Les transports face au défi de la transition énergétique

Explorations entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement

Aurélien BIGO
23/09/2020

Ce document est la thèse envoyée pour la soutenance finale du lundi 23 novembre 2020.
Si ce document est accepté en l'état lors de la soutenance, la thèse finale correspondra à ce document des pages 2 à 335, avec la page de garde et la 4ème de couverture officielles de l'école doctorale.
Ces éléments seront mis à jour sur la page suivante : http://www.chair-energy-prosperity.org/publications/travail-de-these-decarboner-transports-dici-2050/
Contact : aurelien.bigo@hotmail.fr

Avant-propos

Motivations

Le présent document est le résultat d'un travail qui m'a occupé et passionné durant 4 ans et demi, depuis le mémoire "Comment atteindre le Facteur 4 dans les transports ?" en 2016.
Par cette thèse, j'ai souhaité contribuer à la réflexion sur un sujet qui me semble majeur parmi les défis de notre époque et des décennies à venir.
Les recherches menées souhaitent répondre à la question "**Comment aligner le secteur des transports sur l'objectif de neutralité carbone en France à l'horizon 2050 ?**".

La thèse explore les éléments **temporels** de la transition (entre passé et avenir), les **moyens** (entre technologie et sobriété) et la notion de **vitesse** (entre accélération et ralentissement).
Les recherches visent à la fois à poser un regard lucide sur la **difficulté** des transformations à mener par rapport aux trajectoires actuelles, mais aussi à mettre en avant des **pistes d'actions** ainsi que les opportunités de la transition pour se tourner vers une société plus durable.
Si la spécialité de la thèse concerne les sciences économiques, sa préparation a recherché autant que possible une **approche interdisciplinaire**, sollicitant ponctuellement des travaux de recherche et des connaissances dans des domaines variés (sciences du climat, technique, médecine, histoire, sociologie, etc.) afin d'enrichir la réflexion et adopter un point de vue large sur la problématique abordée.
Enfin, il a été tenté d'apporter des éléments nouveaux à la **littérature** et aux connaissances existantes, tout en produisant des résultats **accessibles** pour toutes les personnes intéressées par les enjeux des transports, de l'énergie et/ou du climat, afin de faciliter l'appropriation des résultats par les politiques publiques, les acteurs du secteur ou encore les citoyens.

Comment lire cette thèse ?

Pour une **première lecture** qui permet de saisir les principaux éléments développés dans la thèse, il est possible de se référer en priorité : aux résumés d'1/2 page au début des chapitres ; aux points clés résumés en début de chaque sous-partie ; aux 93 figures et 22 tableaux présents dans la thèse ; aux discussions et conclusions de chaque chapitre, et à la conclusion générale ; et/ou à l'article résumé, publié sur le site du Forum Vies Mobiles (p324-332).
La Table des matières permet aussi de saisir les éléments développés dans chaque chapitre. Un renvoi en bas à droite de chaque page permet d'y retourner en un clic. Des renvois sont aussi prévus pour la citation des figures et des tableaux, et les références à d'autres parties.

Concernant les éléments de **politiques publiques**, les discussions et conclusions de chaque chapitre reviennent sur les principaux enseignements à ce sujet. Le chapitre 4 y est aussi consacré, tout en reprenant les principaux éléments des chapitres précédents.

Le cœur du rapport comporte une introduction présentant le sujet et la problématique (17 p, hors bibliographie), suivie de 4 chapitres qui peuvent être lus séparément, sur :

1) Les tendances **passées** des émissions des transports (56 p) ;
2) Les scénarios de **prospectives** et les potentiels de baisses d'émissions à 2050 (43 p) ;
3) La **vitesse** des mobilités, son importance et son évolution (73 p) ;
4) Une analyse plus globale des **leviers** et des politiques publiques (62 p).

Les annexes fournissent des compléments, et les articles produits dans le cadre de la thèse.

Remerciements

Ce travail a été rendu possible grâce au soutien de nombreuses personnes et institutions, ainsi que grâce à de nombreux échanges qui ont permis d'enrichir ce travail.

Je tiens ainsi tout d'abord à remercier les **3 partenaires de la thèse**, à savoir le CREST à Polytechnique, la SNCF, et la Chaire Energie et Prospérité. Un grand merci à mes encadrants académiques, à savoir mon directeur de thèse Guy Meunier, ma co-directrice de thèse Patricia Crifo, ainsi que Jean-Pierre Ponssard, pour m'avoir fait confiance, pour leurs nombreux conseils vis-à-vis de la conduite des travaux et les exigences académiques, tout en m'ayant laissé développer les sujets qui me tenaient à cœur. La SNCF est aussi grandement remerciée, et toutes les personnes de la direction Stratégie que j'ai pu côtoyer et m'ont encadré depuis le stage de fin d'études, en particulier : Béatrice Jarrige, Grégoire Marlot, Patricia Perennes, Marc Barrau durant le stage, et des remerciements particuliers à Raphaël Poli, mon encadrant sur le temps de la thèse, ainsi qu'Adrien Lavayssière et Sarah Caillaux. Un remerciement spécial à François Vielliard pour nos nombreuses discussions et le partage de son immense connaissance du monde ferroviaire. Merci aussi aux personnes des directions développement durable et de l'énergie avec qui j'ai été en contact, en particulier Florence Cousin, Claire Rousselet, Adrien Philouze, ainsi qu'Olivier Menuet, et Claire Commere pour le travail commun réalisé sur le report modal. Enfin, merci à Marion Cohen, notamment pour m'avoir aidé à diffuser mes recherches sur le site de la Chaire Energie et Prospérité.

Un grand merci, en plus des personnes déjà citées ci-dessus, aux personnes qui m'ont fait l'honneur d'accepter de faire partie de mon **jury** de thèse : Céline Guivarch, Yves Crozet, Ophélie Risler et Jérémie Almosni.

Les **chapitres** ont aussi bénéficié de l'aide de nombreuses personnes, par des réponses à mes sollicitations et (parfois) nombreuses questions, par leurs partages de données (sur le passé, scénarios de prospectives, etc.), ou encore leur relecture et commentaires. Des remerciements particuliers, pour le chapitre 1, à : Jean-Marc André, Jean-Marie Beauvais, Benjamin Besnard, Mathieu Chassignet, Thierry Delort, Eric Dutrieux, Adrien Lavayssière, Guy Meunier, Francis Papon, Jean-Pierre Ponssard, Florian Simatos, et François Vielliard. Pour le chapitre 2, à : Stéphane Barbusse, Yann Briand, Stéphane Chatelin, Emmanuel Combet, Aurore Fabre-Landry, Marine Gorner, David Laurent, Nicolas Raillard, et Sébastien Timsit. Et pour le chapitre 3 : Jean-Marc André, Michel André, Jean-Marie Beauvais, Benjamin Besnard, Yves Crozet, Frédéric Héran, Nicolas Mercat, et Francis Papon.

Merci aussi pour les **échanges** ou les possibilités de **présenter mes travaux**, avec le Forum Vies Mobiles, The Shift Project, l'ADEME, le Haut Conseil pour le Climat, France Stratégie, le CGEDD, le CEDD ou encore le CGDD. Merci aussi au média The Conversation pour cette possibilité de faire du lien entre la recherche et le grand public, mission qui me tient à cœur.

Merci aux amis de SolidariTerre, CliMates, d'Avenir Climatique, de la COY11, et du WARN, **engagements** successifs par lesquels j'ai énormément appris et ouvert mon regard sur les nombreux défis de la période actuelle, et les pistes de solutions à explorer.

Mille mercis enfin à la famille, aux amis, et à Manon pour son soutien quotidien.

Les recherches et points de vue exprimés dans la thèse n'engagent bien évidemment que moi, et aucunement les personnes ou instituts cités ci-dessus. J'ai en effet eu la grande chance de pouvoir étudier des sujets qui me tenaient à cœur et m'intéressaient, avec une grande liberté.

Table des matières

LES TRANSPORTS FACE AU DEFI DE LA TRANSITION ENERGETIQUE **1**

AVANT-PROPOS **2**

Motivations *2*

Comment lire cette thèse ? *2*

REMERCIEMENTS **3**

TABLE DES MATIERES **4**

LISTE DES SIGLES ET ABREVIATIONS **8**

Sigles d'organismes cités *8*

Sigles de noms communs *9*

Unités fréquentes *10*

INTRODUCTION GENERALE **11**

1. LES TRANSPORTS ET LA MOBILITE **11**

1.1. Repères historiques sur les transports *11*

1.2. Les grandes caractéristiques de la mobilité actuelle *13*

1.3. Transports, marchandises et économie *15*

2. LES 3 ENJEUX DE LA TRANSITION ENERGETIQUE DES TRANSPORTS **16**

2.1. Un enjeu global : le changement climatique *17*

2.1.1. Scénarios et conséquences au niveau mondial 17

2.1.2. La stratégie nationale bas-carbone (SNBC) française 18

2.1.3. La place des transports dans les émissions françaises 19

2.2. Un enjeu local : la pollution de l'air *20*

2.3. Un enjeu de résilience : la dépendance au pétrole *21*

3. LA DECARBONATION, UN DEFI INEDIT D'ICI 2050 ..... **23**

3.1. Les transitions énergétiques passées, la singularité de celle à mener *23*

3.2. Une approche système, pour un système complexe *25*

3.3. Problématique et plan de la thèse *27*

BIBLIOGRAPHIE **28**

I. COMMENT EXPLIQUER L'EVOLUTION DES EMISSIONS DES TRANSPORTS DEPUIS 1960 ? **31**

RESUME **31**

1. INTRODUCTION **32**

2. METHODOLOGIE ET DONNEES **33**

2.1. Positionnement par rapport à la littérature existante *33*

2.2. Explications sur l'utilisation du LMDI *40*

2.3. Périmètre et données utilisées *42*

3. RESULTATS ET ANALYSE DES DECOMPOSITIONS DES EMISSIONS **46**

3.1. Analyse par période *46*

3.1.1. La période globale marquée par la demande 46

3.1.2. Une inflexion dans les années 2000, surtout liée à la demande 49

3.1.3. Une hausse récente des émissions, probablement conjoncturelle 50

3.2. Analyse par facteur d'évolution *51*

3.2.1. Demande de transport 51

3.2.2. Report modal 57

3.2.3. Taux de remplissage 59

3.2.4. Efficacité énergétique 61

3.2.5. Intensité carbone 63

3.3. Analyse par mode de transport ... 66
3.3.1. Routier : VP, VUL, PL, B&C, 2RM, vélo et marche ... 66
3.3.2. Transports ferroviaires de voyageurs et de marchandises ... 74
3.3.3. Transport aériens intérieurs et internationaux ... 78
3.3.4. Fluvial et maritime ... 80
4. DISCUSSION ET CONCLUSION ... 81
BIBLIOGRAPHIE ... 87

II. SCENARIOS DE PROSPECTIVES : QUELS POTENTIELS DES 5 LEVIERS DE DECARBONATION D'ICI 2050 ? ... 95

RESUME ... 95
1. INTRODUCTION, BIBLIOGRAPHIE ET OBJECTIFS ... 96
2. COMPARAISON DES SCENARIOS DE PROSPECTIVES D'ICI 2050 ... 100
2.1. Retour sur 15 ans de prospectives sur les émissions des transports ... 100
2.1.1. Des scénarios de plus en plus difficiles à atteindre ... 100
2.1.2. Passage de l'exploratoire au normatif ... 102
2.1.3. Des scénarios aux logiques variées ... 103
2.2. Les 15 scénarios de prospectives étudiés ... 104
2.3. Méthodologie ... 107
2.3.1. Utilisation et interprétation des décompositions pour la prospective ... 107
2.3.2. Périmètres, difficultés de la comparaison et ajustements réalisés ... 110
3. RESULTATS DES DECOMPOSITIONS ... 113
3.1. Résultats temporels par scénario ... 113
3.1.1. Résultats des décompositions voyageurs ... 113
3.1.2. Résultats des décompositions marchandises ... 116
3.1.3. Comparaison des décompositions à 2050 et 2030 ... 118
3.2. Comparaison des scénarios tendanciels et ambitieux ... 119
3.2.1. Comparaison pour les voyageurs ... 119
3.2.2. Comparaison pour les marchandises ... 122
3.2.3. Positionnement de la SNBC parmi les scénarios ... 123
3.3. Détails des contributions par levier ... 125
3.3.1. Demande de transport ... 126
3.3.2. Report modal ... 127
3.3.3. Taux de remplissage ... 128
3.3.4. Efficacité énergétique des véhicules ... 129
3.3.5. Intensité carbone de l'énergie ... 130
4. DISCUSSION ET CONCLUSION ... 133
BIBLIOGRAPHIE ... 138

III. VITESSES DES DEPLACEMENTS : ACCELERATION AU XXEME SIECLE, RALENTISSEMENT AU XXIEME ? ... 142

RESUME ... 142
1. INTRODUCTION ... 143
2. METHODOLOGIE ... 144
2.1. Les modes et infrastructures de transport considérés ... 144
2.2. Calcul d'une vitesse moyenne et décomposition de ses déterminants ... 145
2.3. Données utilisées et principales incertitudes ... 146
2.3.1. Demande de transport ... 146
2.3.2. Vitesse des modes de transport ... 147
2.3.3. Temps de transport ... 149
2.3.4. Principales incertitudes et implications ... 149
3. CARACTERISER LA VITESSE ET SON ROLE CLE ... 150
3.1. Différentes définitions de la vitesse des mobilités ... 150
3.1.1. La vitesse, à l'interface de nombreux bouleversements et disciplines ... 150

3.1.2. La vitesse des transports et ses implications ... 151
3.1.3. Différentes définitions de la vitesse des mobilités ... 154
3.2. Evaluation des temps de déplacements ... 155
3.2.1. Les temps de déplacement, vus par les données d'enquêtes ... 155
3.2.2. L'estimation des temps de déplacements en 2017 ... 159
3.2.3. Vers une évaluation complète des temps de déplacements ... 161
3.3. Estimer une vitesse moyenne des déplacements ... 167
3.3.1. La vitesse moyenne des déplacements ... 167
3.3.2. La vitesse moyenne des modes : des records à la vitesse porte-à-porte ... 168
3.3.3. Courte distance, longue distance et constantes de mobilité ... 173
4. L'EVOLUTION PASSEE ET FUTURE DE LA VITESSE ... 178
4.1. Historique : conquête et diffusion de la vitesse ... 178
4.1.1. Sortir de la vitesse du pas : une vitesse d'abord rêvée puis conquise ... 178
4.1.2. Une chronologie marquée par l'invention de nouveaux modes ... 181
4.1.3. La diffusion d'une vitesse confortable ... 184
4.2. Les déterminants de l'évolution de la vitesse ... 186
4.2.1. La diffusion des modes rapides, ou l'effet du report modal ... 187
4.2.2. La diffusion des infrastructures rapides ... 191
4.2.3. L'évolution des vitesses pratiquées par (sous-)mode ... 194
4.3. L'évolution des vitesses : une saturation durable ? ... 198
4.3.1. Saturation de la vitesse et de la demande ? ... 198
4.3.2. Evolutions futures possibles de la vitesse ... 201
4.3.3. La transition énergétique, synonyme de ralentissement ? ... 205
5. CONCLUSION ... 210
BIBLIOGRAPHIE ... 215

IV. SUR QUELS LEVIERS COMPTER, QUELLES POLITIQUES PUBLIQUES ? ... 222

RESUME ... 222
INTRODUCTION ... 223
1. QUELLE METHODE D'EVALUATION DES EVOLUTIONS SOUHAITABLES ? ... 227
1.1. L'évaluation temporelle ... 228
1.1.1. Les tendances passées ... 228
1.1.2. Les potentiels futurs ... 228
1.1.3. L'état actuel ... 229
1.2. L'analyse des émissions de manière plus large ... 230
1.2.1. Les interactions entre les facteurs ... 230
1.2.2. L'analyse en cycle de vie ... 232
1.3. Au-delà des émissions, quels coûts et bénéfices sociétaux ? ... 235
1.3.1. L'impact sur les autres externalités ... 235
1.3.2. Facilité et coûts de mise en œuvre ... 238
2. EVALUATION DES 5 LEVIERS A ACTIONNER ... 242
2.1. La demande de transport, un facteur structurant à réinterroger ... 242
2.1.1. Temps et vitesse, nombre et distance des déplacements ... 243
2.1.2. Quel aménagement du territoire pour une mobilité bas-carbone ? ... 245
2.1.3. Modérer la demande de fret ... 247
2.2. Le report modal, un potentiel en forte interaction avec la demande ... 249
2.2.1. La voiture, un développement arrivé à saturation ? ... 250
2.2.2. L'avion, des perspectives de croissance insoutenables ? ... 255
2.2.3. Quels potentiels de report vers le ferroviaire ? ... 257
2.2.4. Le renouveau du vélo, jusqu'où ? ... 259
2.2.5. Autres modes : poids-lourds, maritime et fluvial, bus et cars, marche ... 261
2.3. Le taux de remplissage, un levier soumis aux effets rebonds ... 263
2.3.1. Le covoiturage, à développer de manière ciblée ... 263

2.3.2. Des marges faibles pour les poids-lourds et les autres modes 264
2.4. L'efficacité énergétique, des potentiels technologiques et de sobriété 264
2.4.1. Voitures, le manque de sobriété a annulé les gains récents 264
2.4.2. Les autres modes, des potentiels plus difficiles ou plus faibles 268
2.5. Intensité carbone, un levier majeur… avec des limites importantes 269
2.5.1. La mobilité électrique : enjeux et limites d'une révolution en cours 270
2.5.2. L'hydrogène, sa faible efficacité restreint son potentiel 275
2.5.3. Le biogaz, possible carburant d'avenir des véhicules lourds 278
2.5.4. Les agrocarburants : quels potentiels, quelle durabilité ? 280
3. FREINS ET LEVIERS DE LA TRANSITION : ELEMENTS DE DISCUSSION 281
3.1. Technologie et sobriété, des interactions à repenser 281
3.2. Les freins et leviers qui dépassent les transports 282
BIBLIOGRAPHIE 284

CONCLUSION GENERALE 291

ANNEXES 293

1. ANNEXES DU CHAPITRE 2 SUR LES SCENARIOS 293
1.1. Résultats des décompositions des scénarios à 2050 et 2030 293
1.2. Décompositions additives de la SNBC, comparée au passé 295
2. ANNEXES DU CHAPITRE 3 SUR LA VITESSE 296
2.1. Estimations des temps et kilomètres professionnels 296
2.2. Estimations des temps de marche au quotidien 297
2.3. La congestion routière, frein ou opportunité pour la transition énergétique ? 299
3. ARTICLES DANS THE CONVERSATION 309
Le train, grand oublié de la transition énergétique ? 309
Dépendance à la voiture en zone rurale, quelles solutions ? 313
Impact du transport aérien sur le climat : pourquoi il faut refaire les calculs 316
Avion et climat, le tabou des aides publiques 319
Pourquoi la grève aura des effets durables sur la pratique du vélo 321
4. ARTICLE DE SYNTHESE, SITE DU FORUM VIES MOBILES 324
Stratégie nationale bas-carbone : peut-on faire l'économie d'un ralentissement des mobilités ? 324
L'évolution des émissions des transports depuis 1960 325
Le défi de la décarbonation des mobilités 327
La vitesse au cœur de l'évolution des mobilités 329

Liste des sigles et abréviations

Sigles d'organismes cités

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (désormais Agence de la transition écologique)
AIE : Agence internationale de l'énergie (IEA en anglais)
ANCRE : Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie
AQM : Association qualité mobilité
AQST : Autorité de la qualité de service dans les transports
ARAFER : Autorité de régulation des activités ferroviaires et routières (devenue ART)
ART : Autorité de régulation des transports
ATEE : Association technique énergie environnement
BP : British Petroleum
CARB : California Air Resources Board
CAS : Centre d'analyse stratégique (désormais France Stratégie)
CCFA : Comité des constructeurs français d'automobiles
CCNUCC : Convention cadre des Nations Unies pour le changement climatique
CEREMA : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
CGDD : Commissariat général au développement durable
CGEDD : Conseil général de l'environnement et du développement durable
CGPC : Conseil général des ponts et chaussées
CGSP : Commissariat général à la stratégie et à la prospective
CIRED : Centre international de recherche sur l'environnement et le développement
CITEPA : Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique
CJUE : Cour de justice de l'Union européenne
CNIR : Centre national d'information routière
CNUCED : Conférence des Nations Unies sur le commerce et le développement
CRE : Commission de régulation de l'énergie
DGAC : Direction générale de l'aviation civile
DGEC : Direction générale de l'énergie et du climat
DGITM : Direction générale des infrastructures, des transports et de la mer
ECF : European Climate Foundation
EDF : Electricité de France
EEA : European environment agency
EIA : US energy information administration
EpE : Entreprises pour l'environnement
FNAUT : Fédération nationale des associations d'usagers des transports
FNH : Fondation pour l'homme et la nature
FVM : Forum Vies Mobiles
GFEI : Global fuel economy initiative
GIEC : Groupe intergouvernemental d'experts sur l'évolution du climat (IPCC en anglais)
GrDF : Gaz réseau distribution France
IAU IDF : Institut d'aménagement et d'urbanisme d'IDF (désormais Institut Paris Région)

ICCT : International Council on Clean Transportation
IDDRI : Institut du développement durable et des relations internationales
IEA : International energy agency (AIE en français)
IFOP : Institut français d'opinion publique
IFPEN : Institut français du pétrole et des énergies nouvelles
IFSTTAR : Institut français des sciences et technologies des transports de l'aménagement et des réseaux
Insee : Institut national de la statistique et des études économiques
IRENA : International renewable energy agency
ITF : International transport forum
IPBES : Intergovernmental science-policy platform on biodiversity and ecosystem services
IPCC : Intergovernmental panel on climate change (GIEC en français)
JRC : Joint research center, European Commission
L'ObSoCo : L'observatoire société et consommation
LET (désormais LAET) : Laboratoire (aménagement) économie transports
MEDDE : Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie
MEEM : Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer
MTES : Ministère de la transition écologique et solidaire
NGVA : Natural & bio gas vehicle association, Europe
OCDE : Organisation de coopération et de développement économique
OMNIL : Observatoire de la mobilité en Ile-de-France
OMS : Organisation mondiale de la santé
ONISR : Observatoire national interministériel de la sécurité routière
OPECST : Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques
ORS : Observatoire régional de santé
PREDIT : Programme de recherche et d'innovation dans les transports terrestres
SETRA : Service d'études sur les transports, les routes et leurs aménagements (dans Cerema)
SDES: Service de la donnée et des études statistiques
SLoCaT : Stichting Partnership on Sustainable, Low Carbon Transport
SNCF : Société nationale des chemins de fer français
RAC : Réseau action climat
RATP : Régie autonome des transports parisiens
RGCF : Revue générale des chemins de fer
RTE : Réseau de transport d'électricité
T&E : Transport & Environment
TDA : Transport decabonisation alliance
TSP : The shift project
UNEP : United Nations Environment Programme
URF : Union routière française

Sigles de noms communs

2RM : deux-roues motorisés
B&C : bus et cars
DT : demande de transport

EE : efficacité énergétique
EGT : enquête globale transport
ENTD : enquête nationale transports déplacements
GNV : gaz naturel véhicule
IC : intensité carbone (de l'énergie)
IDF : Île-de-France
IDA : index decomposition analysis
LMDI : log-mean divisia index
LOM : loi d'orientation des mobilités
LTECV : loi pour la transition énergétique et la croissance verte
PIB : produit intérieur brut
PL : poids-lourds
PM : *particulate matter*, ou particules fines (dimension exprimée en microns, µm)
POPE : programme fixant les orientations de la politique énergétique
PPE : programmation pluriannuelle de l'énergie
PTAC : poids total autorisé en charge
RFN : réseau ferré national
RM : report modal
SDMP : stratégie pour le développement de la mobilité propre
SECTEN : SECTteurs Economiques et éNergie (inventaire d'émissions du CITEPA)
Smic : salaire minimum interprofessionnel de croissance
SNBC : stratégie nationale bas-carbone
SUV : sport utility vehicle
TC : transports en commun
TER : train express régional
TET : train d'équilibre du territoire
TGV : train à grande vitesse
TR : taux de remplissage
TRM : transport routier de marchandises
UTCF : utilisation des terres, leur changement et la forêt
VAE : vélo à assistance électrique
VP : voitures particulières
VUL : véhicule utilitaire léger

Unités fréquentes

CO_2 : dioxyde de carbone (émissions en gCO_2, tCO_2, $MtCO_2$)
M : million
Md : milliard
T.km : tonne.kilomètre (= 1 tonne qui parcourt 1 km)
Tep : tonne équivalent pétrole (unité de consommation d'énergie)
Veh.km : véhicule.kilomètre (= 1 véhicule qui parcourt 1 km)
Voy.km : voyageur.kilomètre (= 1 voyageur qui parcourt 1 km)

Introduction générale

Cette introduction générale a pour objectif de cadrer le sujet de la thèse sur la transition énergétique des transports, en présentant en trois parties :

- ✓ Des **éléments généraux** sur les **transports** : leur historique, et les principales caractéristiques du transport de voyageurs et de marchandises ;
- ✓ Les **trois défis** rendant nécessaire la **transition énergétique** du secteur des transports : changement climatique, pollution atmosphérique et dépendance au pétrole ;
- ✓ Et enfin, mettre en évidence le **caractère inédit** et **complexe** de la transition à venir, et ainsi développer la **problématique** générale de la thèse et les principales questions auxquelles elle cherche à répondre.

1. Les transports et la mobilité

Points et messages clés :

- ✓ Les deux derniers siècles ont été marqués par l'invention et le développement successif de **nouveaux modes** de déplacements.
- ✓ La mobilité est **dominée par la voiture**, qui représente en France environ 2/3 des distances (~50 km), des durées (~1h) et du nombre de déplacements quotidiens (~ 3).
- ✓ Les transports (de voyageurs, de marchandises) sont intimement liés aux modes de vie et à l'**économie**. Les dépenses de transports représentent **18 % du PIB**.

1.1. Repères historiques sur les transports

Le Tableau 1 compile des **dates importantes de l'histoire des transports**, en particulier pour la France, de 1800 à 2020. Si des changements importants sont antérieurs au XIXème siècle (progrès de la navigation, machine à vapeur de J. Watt en 1765, Montgolfière en 1783, etc.), les XIXème et XXème siècles ont vu de fortes innovations et évolutions dans les transports.
Les évolutions ont été marquées par l'invention de nouveaux modes de déplacements, grâce aux progrès techniques et à un accès à de nouvelles formes d'énergie qui ont démultiplié les possibilités en termes de vitesses et distances parcourues (détails en chapitre 3, partie 4.1).

Parmi les quatre types de modes de transport du Tableau 1, les premières évolutions concernent les **modes non motorisés**, avec l'accélération du transport attelé à cheval à partir du XVIIIème siècle, d'abord par le développement des voitures publiques pour des trajets à longue distance. Au début du XIXème siècle, l'invention de la draisienne en Allemagne en 1817 marque les prémices du vélo, qui sera ensuite développé à partir des années 1860.
Le XIXème siècle voit l'invention et la progression des **chemins de fer**, à partir de l'année 1827 pour les marchandises, et 1837 pour la première ligne spécialement pour les voyageurs.
Viennent à la fin du siècle les débuts de l'automobile, dont la France fait partie des précurseurs. Les **véhicules routiers** (voitures, deux-roues motorisés, bus et cars, poids-lourds, véhicules utilitaires légers) se développent sur les décennies suivantes jusqu'à dominer très fortement les transports, aussi bien pour le transport de voyageurs avec la voiture, que pour le transport de marchandises avec les poids-lourds. Cette dominance des modes routiers se fait au détriment des modes actifs, tandis que les transports en commun résistent essentiellement dans les grandes villes et pour les trajets à longue distance, notamment par la création du

métro parisien à partir de 1900, la quasi-disparition puis le renouveau récent du tramway, et le développement des trains à grande vitesse à partir de 1981.

Enfin, le **transport aérien** se développe à partir du début du XXème siècle, permettant de se substituer à la navigation de croisière pour traverser les mers et océans, et de développer progressivement les voyages à très longue distance. En revanche, le transport **maritime** est resté largement dominant pour le transport de marchandises entre continents.

Tableau 1 : Dates clés de l'évolution des transports en France, 1800-2020

	Non motorisés	Ferroviaire	Routier	Aérien	Autres
1800					
1810	1817 : invention de la draisienne, Allemagne				
1820	1826 : omnibus, Nantes	1827 : 1ère ligne en France, St-Etienne - Andrézieux			
1830	1828 : omnibus à Paris				
1840		1837 : 1ère ligne voyageurs, St-Germain-en-Laye - Paris			
1850					
1860					1859 : 1er puits de pétrole, Etats-Unis
1870					
1880					1882 : 1er ligne élec. haute tension
1890		1890 : tramway électrique, Clermont-Fd	1887 : 1ère vente mondiale de voiture, en France		
1900		1900 : 1ère ligne de métro à Paris	1899 : record +100 km/h, par voiture électrique		
1910	1913 : fin tramways et omnibus hippomobiles à Paris		1908 : Fort T		1914-1918 : 1ère guerre mondiale
1920			1921 : 1er Code de la route	1919 : 1ère utilisation comm., Paris-Londres	
1930				1927 : 1ère traversée Atlantique 1933 : création d'Air France	
1940		1938 : création de la SNCF		1939 : début avions à réaction	1939-1945 : 2ème guerre mondiale
1950		1948 : création de la RATP	1946 : 1ère ouverture d'autoroute		
1960					
1970		1977 : débuts du RER, IDF	1973-74 : limites de vitesse sur routes rapides	1976 : lancement Concorde	1973 : 1er choc pétrolier
1980		1981 : débuts du TGV			1979 : 2ème choc pétrolier
1990					
2000	2005 : système de vélos en libre-service à Lyon	2007 : record mondial sur rail, SNCF, 574,8 km/h	2003 : 1ers radars auto.		
2010					2007-08 : crise économique
2020					2020 : crise du coronavirus, confinement

1.2. Les grandes caractéristiques de la mobilité actuelle

Les chapitres 1 et 3 reviendront sur les comportements de mobilité et leur évolution passée plus en détails que dans cette introduction, en particulier : sur les notions de demande de transport, de parts modales, et de taux de remplissage, pour le chapitre 1 sur les émissions passées ; sur les temps de déplacements et l'importance de la vitesse des mobilités, par mode et pour l'ensemble des déplacements, pour le chapitre 3. Cette introduction revient sur quelques-unes des principales caractéristiques des comportements de mobilité : la demande de mobilité, les modes utilisés, les motifs de déplacements, et leur différenciation selon les caractéristiques socio-démographiques des usagers.

Les données les plus complètes pour suivre l'évolution des **comportements de mobilité** sont les enquêtes nationales sur les transports et déplacements (ENTD), adressées aux Français de 6 ans ou plus. Les dernières enquêtes de ce type remontent à 1982, 1994 et 2008 (CGDD, 2010), tandis que seuls quelques premiers résultats de l'enquête réalisée en 2019 ont été rendus publics juste avant la finalisation de cette thèse (SDES, 2020).
L'enquête de 2008 montrait une relative stabilité de la durée et du nombre de déplacements quotidiens (56,3 minutes et 3,15 déplacements par jour en moyenne) par rapport aux deux enquêtes précédentes, mais un allongement de leur distance (passée de 17,4 km en 1982 à 23,1 km en 1994 et 25,2 km/jour en 2008). En 2019, les temps de déplacements locaux ont augmenté de 6 minutes par rapport à 2008, à 62 minutes/jour du lundi au vendredi.
La mobilité à longue distance (supérieure à 80 km du domicile) augmentait de 5,5 voyages par an en 1994 à 6,4 voyages en 2008, pour une distance moyenne de ces déplacements à peu près stable (à 944 km). Si la mobilité longue distance ne représente qu'une faible part des déplacements (1,6 % en 2008), elle représente en revanche une part importante des kilomètres parcourus (40 %) et des émissions de CO_2 de la mobilité (30 %).

La **répartition modale** pour l'ensemble des déplacements est donnée en Figure 1, selon trois critères des comportements de mobilité que sont le nombre de kilomètres parcourus (un peu plus de 50 km/jour/personne, international compris), le temps et le nombre de déplacements.

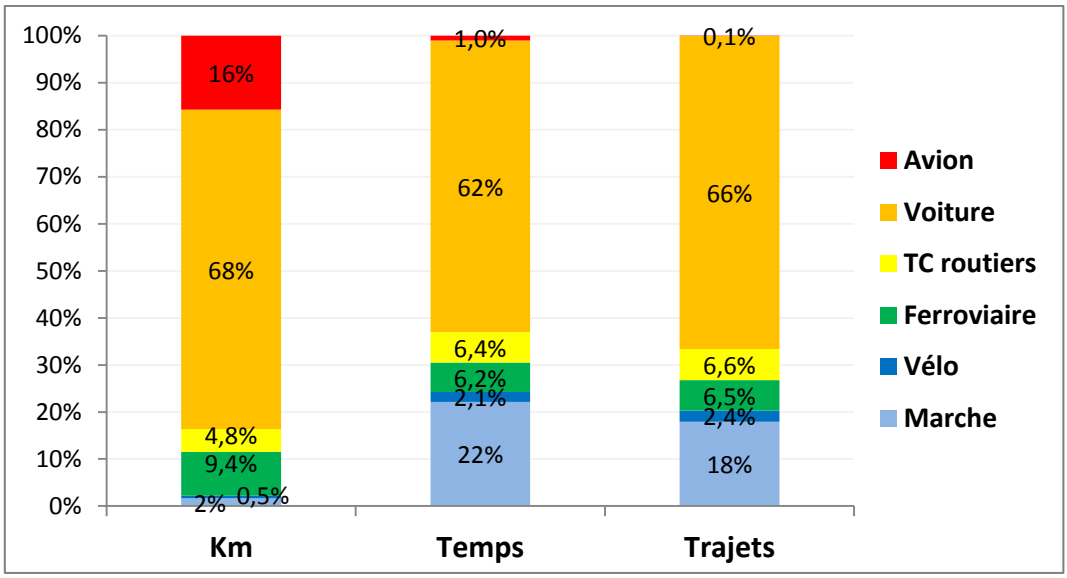


Figure 1 : Parts des kilomètres parcourus, des temps de déplacements et du nombre de trajets par mode en France
Calculs pour 2017, aérien international compris, compilation de nombreuses sources, voir chapitres 1 et 3 (dont Tableau 14)

La figure montre une forte domination des transports routiers individuels (qui comprend les deux-roues et une partie des véhicules utilitaires légers, voir Tableau 14 en chapitre 3), quel que soit le critère utilisé, puisqu'ils réalisent de l'ordre des deux tiers des kilomètres, temps et nombres de déplacements. Les transports en commun routiers et ferroviaires représentent des proportions similaires du nombre et des temps de déplacements, de l'ordre de 6-7 %. En nombre de kilomètres, c'est un peu plus pour le ferroviaire en raison de la vitesse importante sur la longue distance, et un peu moins pour les transports en commun routiers, plus lents en moyenne. Sur la courte distance, la marche à pied, mode lent, représente une très faible part des kilomètres parcourus (1,7 %, contre 0,5 % pour le vélo), mais de l'ordre de 18 % des trajets et 22 % des temps de déplacements (y compris la marche en intermodalité). Le vélo représente un peu plus de 2 % des temps et du nombre de déplacements. Ces proportions estimées à partir des ENTD, des données de trafics et de vitesse plus récentes, semblent globalement cohérentes avec les nouveaux résultats de l'ENTD de 2019, malgré des périmètres un peu différents (notamment une partie des VUL et la longue distance pris en compte ici ; cf chapitres 1 et 3). L'ENTD montre des parts modales qui n'ont que peu évolué entre 2008 et 2019 : la part de la voiture est légèrement réduite et passe de 64,8 à 63 % des déplacements locaux, au profit de la marche (de 22,3 à 23,5 %) et des transports en commun (8,3 à 9,1 %), tandis que le vélo reste constant (à 2,7 % en moyenne ; SDES, 2020).

Pour les déplacements locaux, la **répartition par motif** était la suivante en 2008 : 18 % des déplacements étaient consacrés au domicile-travail, représentant 25 % des kilomètres parcourus en raison d'une distance moyenne plus importante que les autres déplacements (11,1 km contre 8 km) ; 10 % pour le domicile-étude (et 7 % des distances) ; la moitié pour les déplacements depuis le domicile vers d'autres destinations comme les loisirs, les achats ou les procédures administratives (49 % des trajets et 53 % des distances) ; enfin, 19 % des trajets et des distances pour des déplacements secondaires, dont ni l'origine ni la destination n'est le domicile (CGDD, 2010).

Concernant la différenciation des comportements selon différentes **caractéristiques socio-démographiques**, l'enquête de 2008 montrait que les facteurs d'âge, de genre ou de classe sociale influençaient moins la mobilité que pour les 2 enquêtes précédentes en 1982 et 1994, tandis que le lieu de résidence restait un marqueur important d'inégalités de mobilité. Ces tendances semblent s'être poursuivies, d'après les premiers résultats de l'enquête de 2019.
Le **lieu de résidence** influence toujours fortement les comportements de mobilité, et notamment le choix du mode de transport, avec une dépendance bien plus forte à la voiture dans les zones peu denses : environ 80 % des déplacements locaux se font en voiture dans les communes rurales, contre 59 % dans les agglomérations de 100 000 à 2 millions d'habitants, et 33 % dans l'agglomération parisienne. A l'inverse, la part de la marche et des transports en commun augmente dans les grandes agglomérations et les zones les plus denses. La part du vélo est située entre 2,2 % et 3,2 % au sein des cinq types de communes considérées.
Le nombre et la distance des déplacements sont croissants avec les **revenus** (CGDD, 2010 ; FVM, 2020). La mobilité est la plus forte pour les tranches d'**âge** de 14-18 ans à 45-54 ans, avec plus de 70 min quotidiennes. Enfin, les différences sont de moins en moins fortes selon le **genre**, bien que la voiture et le vélo soient toujours un peu plus utilisés par les hommes que les femmes, au contraire de la marche et des transports en commun (SDES, 2020).

1.3. Transports, marchandises et économie

Les **déplacements des personnes** ont une place majeure dans les modes de vie. Ils permettent de se rendre aux lieux de travail, d'études, d'achats, de réaliser des démarches administratives ou de soin, de se rendre à des activités de loisirs, de voir ses proches, de prendre des vacances, etc. Ils représentent également des coûts pour les usagers, en termes monétaires, de temps passé, ainsi que des coûts pour la société (les externalités, évoquées dans la suite de l'introduction). Ainsi les déplacements ont une place très importante dans l'économie.

Il en est de même pour le **transport de marchandises**, qui assure l'approvisionnement de l'économie en matières premières, en biens intermédiaires et finaux, puis le transport des déchets, pour les besoins alimentaires, d'énergie, de construction, d'habillement ou encore de santé. Le transport de marchandises est donc un maillon indispensable du commerce et de l'économie, et l'évolution des volumes transportés suit généralement l'évolution du PIB.
Comme pour les voyageurs, les **transports routiers dominent** largement les transports intérieurs de marchandises, avec une part de 89,1 % des tonnes.kilomètres transportées en poids-lourds en 2018, très loin devant le ferroviaire (9,0 %) et le transport fluvial (1,9 % ; hors oléoducs, CGDD, 2019a). Les volumes transportés totaux sont de 356 Md t.km en 2018, soit quasiment 5500 t.km par personne et par an, ou 15 t.km par jour (soit l'équivalent de 15 kg qui font 1000 km, chaque jour). Par ailleurs, le transport de marchandises international est largement dominé par le **transport maritime**, dont les données françaises sont exprimées en volumes débarqués dans les ports français. Le volume était de 368 M de tonnes en 2018, soit environ 1 Mt/jour, ou 15 kg/jour/personne, ce qui ne correspond qu'à une partie des marchandises arrivant par voie maritime et livrées en France, une autre partie d'entre elles transitant notamment par les ports hollandais ou belges.

La **dépense totale de transport** en France s'élève à 425 milliards d'euros en 2018, soit 18 % du PIB français et environ 6500 €/personne. Parmi ces dépenses, un peu plus de la moitié sont utilisées pour la production de la branche transport, c'est-à-dire pour des services de transport de voyageurs (56 Md€), de marchandises (79 Md€), de poste et courrier (13 Md€), et d'autres services auxiliaires (68 Md€ ; total de 216,5 Md€). Aussi, sans être tout à fait additifs, 182 Md€ correspondent à des dépenses des ménages, soit 2800 €/an/pers pour les transports, et quasiment 15 % des dépenses de consommation des ménages. La majorité est utilisée pour les dépenses liées aux véhicules particuliers (achat, entretien, carburants, assurance, péage ou encore stationnement), et 30 Md€ pour des services de transport (aérien, transports en commun, taxi, etc.). Enfin, le financement public des transports s'élève à 46,3 Md€ en 2018 (quasiment 11 %), dont 30,1 Md€ et 16,2 Md€ en investissements (CGDD, 2019a, 2020).

Le secteur des transports et de l'entreposage représente aussi un **grand nombre d'emplois**, chiffré à 1,4 million d'emplois directs en 2018, soit 5,2 % des emplois en France (27,1 M ; Insee, 2020). Ce chiffre inclut de l'ordre de 400 milliers de transporteurs routiers, 370 milliers de salariés des transports en commun routiers et ferroviaires, et 64 milliers pour l'aérien. En revanche, ne sont pas inclus les secteurs de production de l'énergie, des véhicules et des infrastructures, qui augmenteraient fortement les chiffres. Ainsi une évaluation complète pour le seul transport routier en arrive à 2,2 millions d'emplois liés à la route en 2018, dont environ 0,2 dans l'industrie automobile et 0,4 dans les activités de vente et réparation (URF, 2019).

2. Les 3 enjeux de la transition énergétique des transports

Points et messages clés :

- ✓ La **décarbonation des transports** est à l'interface de **3 enjeux** majeurs : changement climatique, pollution atmosphérique, et dépendance au pétrole. L'échelle, la temporalité ou encore le type de conséquences diffèrent fortement entre ces enjeux.
- ✓ Le **changement climatique** présente des risques systémiques à l'échelle mondiale, et nécessite des baisses rapides des émissions pour éviter de graves conséquences.
- ✓ La **pollution de l'air** liée aux transports est en baisse en France, mais son impact sur la santé est régulièrement revu à la hausse, en faisant un enjeu de plus en plus fort.
- ✓ La **dépendance au pétrole** présente des risques économiques et sociaux, quant à la finitude des ressources, à la volatilité des prix et à la dépendance géopolitique.

La **consommation de pétrole dans les transports** nécessite d'opérer une transition énergétique vers d'autres types d'énergie, pour au moins trois raisons importantes directement liées à cette consommation : les émissions de CO_2 qu'elle implique et l'impact sur le changement climatique ; les émissions de polluants atmosphériques impactant la santé ; et enfin, la dépendance au pétrole, impliquant une forte vulnérabilité à l'épuisement des ressources et à la volatilité des prix.

Ces trois enjeux sont de **différentes natures**, en termes de type de causes et de conséquences, de part des transports, d'échelle géographique ou encore de temporalité, des éléments qui sont résumés dans le Tableau 2 et évoqués ensuite dans les trois sous-parties liées à ces enjeux.

Tableau 2 : Principales caractéristiques et différences des trois enjeux liés à la transition énergétique des transports

	Changement climatique	Pollution de l'air	Dépendance au pétrole
Causes	Emissions de gaz à effet de serre (GES) : CO_2, CH_4, N_2O, etc.	Emissions de polluants variés : PM, NOx, métaux, etc.	Vulnérabilité à la hausse des cours du pétrole : accès aux ressources, géopolitique, spéculation, etc.
Part des transports	≈ 15 % GES au niveau mondial ≈ 30 % en France (territoire intérieur)	17,5 % des $PM_{2.5}$, 63 % des NOx en France. Davantage en milieu dense, proche du trafic	65 % de la consommation dans le monde, 64 % en France
Echelle géographique	Mondiale Décalage entre lieux d'émissions et conséquences	Locale Impacts surtout en zones denses	Variable Surtout zones importatrices
Temporalité des causes et conséquences	CO_2 : temps de résidence de 100 ans Décalage entre les émissions et les conséquences, qui seront croissantes dans les décennies à venir	Temps de résidence faible polluants Conséquences de court (immédiates, pics de pollution) et long terme (décalée, pollution de fond)	Crises soudaines et de durée limitée dans le temps Selon la volatilité des cours
Tendance des émissions et consommations	En hausse au niveau mondial Stables pour les transports en France	A la baisse pour la majorité des polluants : -60 à -72 % PM et NOx Taux de mortalité de -60 % entre 1990 et 2015 en Europe	Relativement stables en France
Conséquences déjà visibles ?	Canicules, événements extrêmes, montée des eaux, etc. Conséquences croissantes	42 000 à 67 000 décès estimés par an en France	Chocs pétroliers ; pétrole et crise de 2008 ; crise des gilets jaunes
Type de conséquences	Systémiques : économiques, sociales, environnementales, agriculture…	Santé, qualité de vie	Economiques et sociales
Evaluation scientifique	Forte, croissante	Réévaluations à la hausse des impacts sur la santé	Peu étudié
Mobilisation citoyenne	En croissance	En croissance	Absente

2.1. Un enjeu global : le changement climatique

2.1.1. Scénarios et conséquences au niveau mondial

Du fait des émissions de gaz à effet de serre, les activités humaines ont déjà provoqué un **réchauffement planétaire d'environ +1 °C** par rapport aux niveaux préindustriels (rapport 1,5 °C du GIEC ; IPCC, 2018). Ce réchauffement est par ailleurs quasiment deux fois plus élevé à la surface des terres émergées, là où vivent les populations humaines. Ainsi sur la période 2006-2015, la température moyenne a été de 0,87 °C plus chaude que sur la période 1850-1900, alors que le réchauffement à la surface des continents a augmenté de 1,53 °C (IPCC, 2019).

Les 4 groupes de scénarios développés dans le 5ème rapport d'évaluation du GIEC (groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) prévoyaient une fourchette d'un réchauffement **entre +0,9 °C et +5,4 °C** d'ici à la fin du siècle par rapport aux niveaux préindustriels (+0,3 à +1,7 °C dans le scénario le plus optimiste RCP 2,6, jusqu'à +2,6 à +4,8 °C dans le scénario aux plus fortes émissions RCP 8,5, sur 2081-2100 par rapport au niveau de 1986-2005, qui avait déjà vu un réchauffement de +0,61 °C ; IPCC, 2013). Aussi une récente réévaluation à partir des modèles français a montré que le scénario RCP 2,6 ne permettait pas d'atteindre l'objectif de limitation du réchauffement à 2 °C, tandis que le pire des scénarios considérés amènerait à un réchauffement moyen de **+6,5 à +7 °C** à la fin du siècle, un niveau qui serait encore plus fort sur les terres émergées (CNRS et al, 2019).

Ces éléments montrent que la température à la fin du siècle et donc les conséquences du changement climatique dépendent encore largement de la trajectoire mondiale des émissions, et donc des politiques climatiques mises en place.

Les **conséquences** dont il est question vont bien au-delà de l'élévation de température moyenne : montée du niveau de la mer, augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements extrêmes (canicules, feux de forêts, inondations, sécheresses, etc.), saisons et climats secs et humides accentués, fonte des glaces, etc. Ces impacts physiques du climat auront des répercussions sur les systèmes naturels et les populations : baisse de rendement des cultures agricoles, pertes de biodiversité, risques pour la santé, ou encore destruction d'infrastructures. Ces perturbations risquent d'affecter en particulier les populations les plus pauvres et les plus vulnérables. Un fort changement climatique compliquerait fortement à l'avenir la réduction de la faim et de la pauvreté dans le monde, et augmenterait les migrations et les risques de conflit. Aussi les conséquences sont de plus en plus fortes à chaque degré supplémentaire : à +1 °C, de nombreuses conséquences sont dans une gamme de risques d'imperceptibles à modérés ; déjà à +2 °C, les risques d'instabilité de l'approvisionnement alimentaire sont très élevés (IPCC, 2019 ; voir aussi IPCC, 2018). Ainsi le changement climatique porte le risque à moyen et long termes de **conséquences systémiques** et de déstabilisations majeures d'ordres économiques, géopolitiques, alimentaires ou encore environnementales.

Pour limiter ces risques, il est important d'agir simultanément : sur l'**atténuation** (dite aussi mitigation) du changement climatique, afin de limiter les émissions et donc les causes du réchauffement ; et sur l'**adaptation**, afin de limiter les conséquences, la trajectoire d'évolution des températures étant par ailleurs peu dépendante des scénarios d'émissions d'ici 2040 (CNRS et al, 2019).

La communauté internationale s'était fixée dès 2009 à Copenhague l'objectif de **limiter le réchauffement à +2 °C d'ici la fin du siècle**. Cet objectif a été réaffirmé à la COP21 à Paris en 2015, où a même été ajouté l'objectif de **tendre vers un réchauffement limité à 1,5°C** (UNFCCC, 2015), un niveau de réchauffement qui pourrait être atteint entre 2030 et 2052 au rythme actuel de réchauffement (de +0,2 °C/décennie environ ; IPCC, 2018).
Limiter le réchauffement à 1,5 ou 2 °C nécessite une **inflexion très rapide des émissions mondiales**. Par rapport aux émissions de 2010, il faudrait réduire les émissions de 45 % d'ici 2030, et atteindre des émissions nettes de CO_2 nulles autour de 2050 pour limiter le réchauffement à 1,5 °C ; et réduire les émissions de 25 % d'ici 2030 pour atteindre la neutralité carbone des émissions de CO_2 autour de 2070 pour rester sous les 2 °C. Aussi les émissions ont augmenté depuis 2010, et l'évaluation des Nations Unies indiquait fin 2019 une nécessaire baisse des émissions de -7,6 %/an dès 2020 et jusqu'à 2030 pour rester sous les 1,5 °C, et de -2,7 %/an pour l'objectif de 2°C (UNEP, 2019). Il était également estimé que les trajectoires d'émissions prévues avec une continuité des politiques actuelles devraient mener vers un réchauffement de +3,5 °C à la fin du siècle, comparé aux niveaux préindustriels. Si les contributions nationales proposées par les Etats étaient respectées, le niveau de réchauffement serait de l'ordre de +3,2 °C, et descendrait à +3,0 °C dans le cas où à la fois les contributions inconditionnelles et conditionnelles seraient respectées.

2.1.2. La stratégie nationale bas-carbone (SNBC) française

En France, l'objectif actuel et la contribution affichée au niveau international est d'atteindre la **neutralité carbone à l'horizon 2050**.
Cet objectif fait suite à l'objectif de **Facteur 4**, adopté en 2005 avec la loi de programme fixant les orientations de la politique énergétique (dite loi POPE) : l'objectif était ainsi de diviser par 4 l'ensemble des émissions de gaz à effet de serre du territoire, entre 1990 et 2050.
Puis en 2015, la loi pour la transition énergétique et la croissance verte (**LTECV**) était votée (Légifrance, 2015). Parmi les dispositions, la loi créait deux outils de planification de la stratégie climatique et énergétique de la France, mis à jour à intervalles de temps réguliers : la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE), et la **stratégie nationale bas-carbone** (SNBC). La PPE, qui traite davantage des orientations de court terme, comprend un volet transport, appelé stratégie pour le développement de la mobilité propre (SDMP). La SNBC concerne davantage la stratégie de long terme, et fixe des budgets carbones à atteindre par secteur et pour différents horizons de temps d'ici 2050.
En 2017, le **Plan Climat** a fixé le **nouvel objectif de neutralité**, soit un équilibre entre les émissions de gaz à effet de serre et les absorptions de ces gaz par les écosystèmes (secteur UTCF : utilisation des terres, leur changement et la forêt) ou des technologies de captage et stockage du carbone (CSC ; MTES, 2017). L'objectif est plus ambitieux que le Facteur 4, puisque la SNBC remise à jour en 2020 prévoit une division par 6,6 des émissions en 2050 par rapport à 1990 (de 548 à 80 $MtCO_2eq$) et par 5,8 entre 2015 et 2050 (de 464 à 80 Mt) ; en parallèle un doublement des émissions négatives est prévu (de 40 $MtCO_2eq$ environ à 82, dont 67 liés au secteur UTCF et 15 par le CSC ; CITEPA, 2020 ; MTES, 2020 ; voir Figure 2).
En 2019, ces objectifs relatifs au secteur des transports et à la neutralité carbone ont été réaffirmés dans la loi d'orientation des mobilités (**LOM**).

2.1.3. La place des transports dans les émissions françaises

Pour le **secteur des transports**, la SNBC prévoit 5 leviers de décarbonation, à savoir : la modération de la demande de transport, le report modal, l'optimisation du remplissage des véhicules, l'efficacité énergétique des véhicules, et l'intensité carbone de l'énergie.

Par le passé, les émissions de gaz à effet de serre intérieures ont été fortement croissantes de 1960 jusqu'au début des années 2000, avant une légère baisse et une relative stabilité depuis quelques années. Cette évolution et les facteurs qui l'ont déterminé parmi les 5 leviers de la SNBC, feront l'objet du premier chapitre de la thèse.

En 2019, le secteur des transports est le principal émetteur avec 136 $MtCO_2eq$ d'émissions de combustion des carburants, dont la grande majorité pour les modes routiers (127,7 $MtCO_2eq$). Les transports représentent 30,8 % des émissions de gaz à effet de serre françaises et 40 % des émissions de CO_2 du territoire, des proportions en hausse depuis de nombreuses décennies (totaux de 328 $MtCO_2$ et 441 $MtCO_2eq$ en 2019 ; à comparer à 49 $GtCO_2eq$ en 2010 au niveau mondial, dont 14,4 % pour les transports ; IPCC, 2014). Aux 136 $MtCO_2eq$ des transports intérieurs s'ajoutent également 24,4 $MtCO_2eq$ pour les transports internationaux, ce qui ferait 34,5 % des émissions totales si elles étaient inclues (CITEPA, 2020). L'empreinte carbone globale des transports inclut également les émissions de la production de l'énergie, des véhicules, et des infrastructures, pour lesquelles il existe moins de données.

A l'horizon 2050, la SNBC vise une décarbonation quasiment complète du secteur des transports, avec seulement 4 $MtCO_2eq$ en 2050. Les transports terrestres sont complètement décarbonés, et seuls les transports aériens et maritimes conservent une part de carburants fossiles en 2050. L'importance des 5 leviers de décarbonation dans la SNBC et dans d'autres scénarios de prospectives français seront étudiés en chapitre 2 de la thèse.

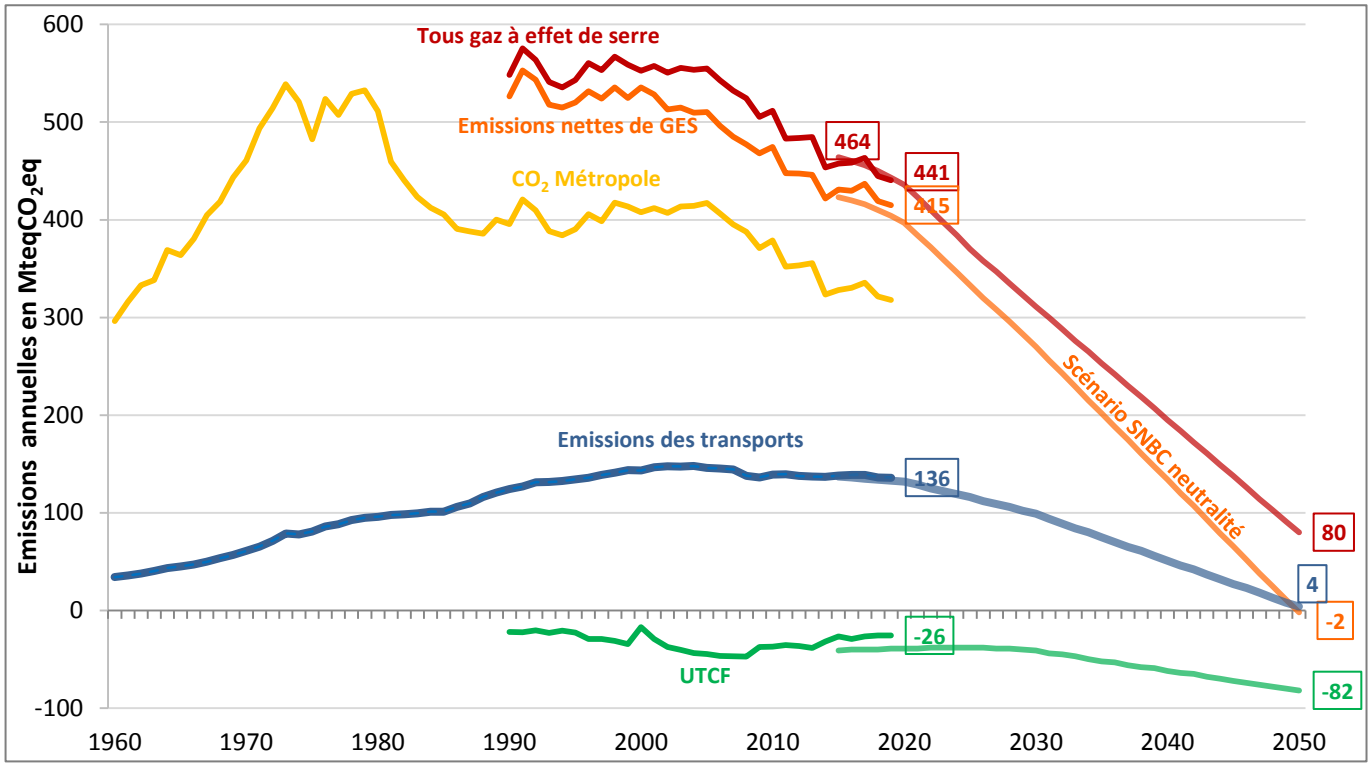


Figure 2 : Emissions passées sur 1960-2019 et trajectoires de baisses d'émissions prévues d'ici 2050 par la SNBC
Sources : CITEPA, 2020 pour le passé ; et MTES, 2020 pour les trajectoires 2015-2050. Les émissions de CO_2 seules pour la Métropole sont disponibles avant 1990. Une correction de +3 à 4 % a été appliquée aux émissions de CO_2 des transports de la Métropole sur la période 1960-1990 pour assurer un périmètre similaire à 1990-2019, soit tous gaz à effet de serre et Outre-mer compris.

2.2. Un enjeu local : la pollution de l'air

Contrairement au changement climatique, les conséquences des émissions de polluants atmosphériques sont davantage **au niveau local**, en raison de la concentration des polluants au niveau des sources de pollution, et des temps de résidence plus faibles dans l'atmosphère. Aussi **le sujet connaît une double tendance, qui peut sembler paradoxale** : alors que les émissions de la majorité des polluants sont en baisse en France, l'évaluation scientifique des conséquences et ainsi la mobilisation sur le sujet sont au contraire en hausse.

Ainsi le **chiffrage des conséquences sur la santé de la pollution de l'air extérieur a régulièrement été revu à la hausse** au niveau mondial. L'organisation mondiale de la santé (OMS) évaluait en 2002 son impact à 1,4 % des décès soit environ 750 000 personnes pour l'année 2000, chiffres qui ont progressivement augmenté jusqu'à atteindre 7,6 % des décès et 4,2 millions de morts prématurées en 2016 (Castaignède, 2018 ; OMS, 2018). Deux études récentes avec des méthodologies différentes arrivent à un chiffrage plus de deux fois plus important : 8,9 millions de décès par an liées à la pollution de l'air extérieur aux particules fines ($PM_{2,5}$) en 2015 (Burnett et al, 2018) ; et 8,8 millions de décès dus aux mêmes particules fines et à l'ozone (O_3 ; Lelieveld et al, 2019).

En **France**, l'évaluation du nombre de morts prématurées liées à la pollution de l'air extérieure est de 42 100 morts en 2016 d'après l'agence européenne de l'environnement (dont 33 200 pour les $PM_{2,5}$, 7500 pour les NO_2 et 1400 pour O_3 ; EEA, 2019), de 48 000 morts pour la seule pollution aux particules fines ($PM_{2,5}$; Santé Publique France, 2016), et de 67 000 morts pour l'étude citée ci-dessus (Lelieveld et al, 2019). Ces deux dernières études estiment la perte d'espérance de vie moyenne respectivement à 9 mois et à 1,6 année.
Les effets sur la santé les plus importants sont le fait des **particules fines**, dont la part des transports dans les émissions est estimée en 2019 à 14,8 % pour les PM_{10}, 17,5 % pour les $PM_{2,5}$ et 13 % pour les $PM_{1,0}$, la majorité de ces émissions provenant du trafic routier. La part des transports dans les émissions des oxydes d'azote, les NO_x, est en revanche plus importante, de l'ordre de 63 %, et ceux-ci sont également des polluants précurseurs d'ozone (CITEPA, 2020). Aussi la part des transports est plus importante dans les zones denses et proches du trafic, là où l'exposition de la population est plus forte. Ainsi en 2015, la part du trafic routier dans les émissions de $PM_{2,5}$ était de 17,2 % en moyenne en France (sur 19,2 % tous transports), de 27 % en Île-de-France, et de 35 % à Paris (CITEPA, 2020 ; Airparif, 2019a, 2019b).
A un niveau plus fin, des études font le lien entre la proximité du lieu de vie à un axe routier important et l'incidence de certaines maladies (Jocelyne Just, pédiatre et pneumologue, interview LeMonde, 2019). De même, une augmentation des admissions aux urgences pour maladies respiratoires a été observée les jours de grève des transports en commun, dans 10 grandes aires urbaines françaises de 2010 à 2015 (Insee, 2019). Les preuves des **effets néfastes** des émissions des transports et en particulier du **trafic routier sur la santé** sont fortes, en particulier pour les atteintes respiratoires et cardiovasculaires et les décès anticipés (Anses, 2019). Pour les particules fines, leur impact sur la santé dépend du type de composé, de la source et de la taille des particules, l'avis de l'Anses préconisant notamment un meilleur suivi et des politiques publiques plus ciblées sur les particules ultrafines, le carbone suie et le carbone organique.

Les recherches sur les **effets de la pollution de l'air sur la santé** se sont progressivement étendues, pointant progressivement de nouveaux impacts, depuis les maladies pulmonaires aux maladies cardiovasculaires, du cerveau, du sang, ou encore de troubles du système reproductif et du développement de l'enfant (Santé Publique France, 2016). Les conséquences sur la santé peuvent être ressenties à court terme, en lien avec un pic de pollution, mais c'est bien la pollution de fond et les impacts à plus long terme qui sont les plus importants.
Ces éléments expliquent la **mobilisation croissante** de la recherche, de la profession médicale, de l'opinion, ou encore des politiques publiques sur ce sujet, alors que la France fait l'objet de procédures auprès de la cour de justice de l'Union Européenne (CJUE) pour non-respect des valeurs limites de concentration en NO_2 et PM_{10} (CITEPA, 2020).

Malgré ces impacts réévalués à la hausse et cette mobilisation croissante, et de manière paradoxale, **les émissions de polluants sont pourtant à la baisse** pour la grande majorité des polluants, au moins en France et en Europe. Ainsi, sur les 30 polluants suivis par le CITEPA, un seul est en hausse (HFC), 8 sont en baisse de moins de 50 %, 7 entre 50 et 75 %, et 14 polluants sont en baisse de plus de 95 % entre 1990 et 2018 : cette baisse est notamment de -60 à -72 % pour les particules fines (-60 % pour les PM_{10}, -68 % pour les $PM_{2,5}$ et -72 % pour les $PM_{1,0}$), et de -62 % pour les NO_x. Des baisses d'émissions similaires voire légèrement supérieures sont constatées pour les transports et pour le trafic routier (CITEPA, 2020).
Au niveau européen, il est estimé que la **mortalité prématurée a diminué d'environ 60 %** pour l'exposition aux $PM_{2.5}$ entre 1990 et 2015, en lien avec des baisses similaires des concentrations (EEA, 2018).
La tendance va donc déjà dans le bon sens depuis de nombreuses années, grâce aux évolutions technologiques notamment sur les motorisations, et pour certaines villes par une politique de réduction de la place de la voiture (le trafic a par exemple diminué de 48 % dans Paris entre 1992 et 2018 ; rapports annuels des déplacements, dont Paris, 2019). Cette **tendance reste à poursuivre** au vu des impacts encore très importants de la pollution de l'air sur la santé.

2.3.Un enjeu de résilience : la dépendance au pétrole

L'économie et les modes de vie dans les pays les plus développés et notamment en France sont très **dépendants de l'énergie**, pour l'extraction des matières premières, la production des biens, les déplacements des voyageurs et des marchandises, le chauffage des logements, les besoins en électricité spécifique, ou encore la production agricole.
Au niveau mondial, ces besoins en énergies sont principalement assurés par les énergies fossiles, qui couvrent plus de 80 % de la production primaire d'énergie (81,3 % en 2018; IEA, 2020 ; 84,3 % en 2019 selon BP (2020). Le **pétrole constitue la première source d'énergie** mondiale, avec respectivement 31,6 % et 33,1 % de la production selon l'IEA et BP. Le secteur des transports représente 65 % des consommations de pétrole en 2017, devant les usages non énergétiques (16,7 %, en particulier la pétrochimie), l'industrie (7,3 %), le résidentiel (5,4 %) et les autres usages (5,5 %, dont l'agriculture et les services ; IEA, 2020). Les transports sont en effet fortement dépendants du pétrole, aussi bien au niveau mondial avec 92 % des consommations d'énergie (TDA, 2018) qu'au niveau français avec 90 % des consommations des transports intérieurs (voir en partie suivante, 3.1).

Pour le pétrole comme pour les autres énergies fossiles, outre les problèmes que pose leur combustion en termes de contribution au changement climatique et à la pollution atmosphérique, les ressources sont disponibles en quantités finies et posent donc la question de la **raréfaction des ressources et de la vulnérabilité des sociétés** à cet épuisement. Si les réserves prouvées des énergies fossiles sont trop importantes pour maintenir le climat à un niveau de réchauffement acceptable, diverses contraintes peuvent néanmoins à court et moyen termes poser des problèmes d'approvisionnements et de coût de l'énergie, qui se sont déjà révélés particulièrement forts sur le pétrole par le passé. Parmi les énergies fossiles, le pétrole est en effet amené à connaître son pic d'extraction le plus rapidement, l'AIE ayant annoncé que le pic du pétrole conventionnel, plus facile et moins cher à extraire, a été dépassé en 2008. Depuis, ce sont les hydrocarbures non conventionnels et en particulier les pétroles de schistes américains, qui permettent de maintenir la croissance de la production de pétrole.

Mais si la demande de pétrole continuait à croître comme le prévoit l'AIE, il existe un **risque de *supply crunch*** ou de limite dans l'approvisionnement, faisant craindre une nouvelle flambée des prix. En effet, pour satisfaire une demande en hausse de 99,2 à 106,4 millions de barils par jour (Mb/j) entre 2018 et 2025, il faudrait développer de nouvelles sources à hauteur de 34 Mb/j pour combler l'écart entre le déclin des champs actuellement en production et la demande en hausse. Aux niveaux actuels de développements, seul un peu plus de la moitié (19 Mb/j) de cet écart pourrait être assuré par les nouveaux projets en développement, et il est espéré une croissance des pétroles de schistes américains jusqu'à 15 Mb/j. Seulement, différentes projections montrent que même dans les scénarios les plus optimistes (sur le niveau des prix, la productivité des puits, le rythme des nouveaux puits, etc.), un tel niveau sera difficile à atteindre (IEA, 2018 ; Hacquard et al, 2019 ; EIA, 2020 ; TSP, 2020). Ainsi le scénario de référence de l'agence d'information sur l'énergie américaine (EIA en anglais) prévoit un plateau de la production autour de 10 Mb/j au début des années 2020, et le scénario le plus optimiste prévoit une augmentation à environ 13 Mb/j. L'AIE prévoit dans son scénario un doublement de la production, alors qu'un triplement serait nécessaire.

Les prix relativement bas du pétrole depuis la baisse des prix du baril en 2014 pourraient faire croire à un faible niveau de demande par rapport à l'offre, en réalité ils pénalisent également fortement les investissements, et donc le développement d'autres projets. La crise du coronavirus n'arrange pas la rentabilité du secteur et rajoute à l'incertitude pour les prochaines années, faisant craindre à une certaine **volatilité des prix**, qui dépendra fortement de la vitalité de la relance économique et donc du niveau de demande en pétrole.

La France est particulièrement vulnérable, puisqu'elle ne produit qu'environ 1 % du pétrole consommé. Les risques sont à la fois économiques et sociaux, touchant à la fois à la balance commerciale (29 Md € d'importations nettes en 2017 ; CGDD, 2019b), aux coûts des entreprises et aux déplacements des ménages. Ces risques se sont déjà illustrés, au moment des chocs pétroliers des années 70, de la forte hausse des prix précédant la crise de 2008 (voir le lien avec le pétrole, et d'autres éléments sur ce sujet dans le mémoire précédant cette thèse ; Bigo 2016, p30-36), et plus récemment par le déclenchement de la crise des gilets jaunes. Celle-ci a également montré que la forte dépendance au pétrole dans les transports pouvait être un frein à la transition énergétique, puisqu'elle complique la mise en place d'une taxe carbone. Sans une transition rapide et au vu des tensions sur les marchés mondiaux du pétrole, il est probable que de nouvelles hausses de prix se produisent dans les années à venir.

3. La décarbonation, un défi inédit d'ici 2050

Points et messages clés :

- ✓ La **transition énergétique** vers la décarbonation des transports est encore très peu entamée, secteur encore dépendant à 90 % du pétrole.
- ✓ L'étude de cette transition et des 5 leviers de la SNBC est complexe et nécessite une **vision systémique**, prenant en compte de nombreux éléments interdépendants.
- ✓ La thèse vise à approfondir la question suivante : **comment aligner le secteur des transports sur l'objectif de neutralité carbone en France à l'horizon 2050 ?**

3.1. Les transitions énergétiques passées, la singularité de celle à mener

L'**histoire de l'énergie** ces derniers siècles a été faîte de différentes **transitions énergétiques**, depuis une énergie renouvelable (à partir de la biomasse, de l'hydraulique et du vent) vers les énergies fossiles : le charbon dans un premier temps, puis l'essor du pétrole, du gaz, avant un renouveau plus récent des énergies renouvelables. Cependant, au niveau mondial et depuis 1900, c'est plutôt un empilement des différentes sources énergétiques qui a été constaté, les nouvelles énergies développées venant s'additionner aux énergies déjà existantes, permettant de démultiplier les usages (Figure 3 ; l'empilement se voit bien sur l'évolution cumulée à gauche, ou sur les courbes par énergie au milieu ; la transition depuis le charbon se voit en % du total, à droite).

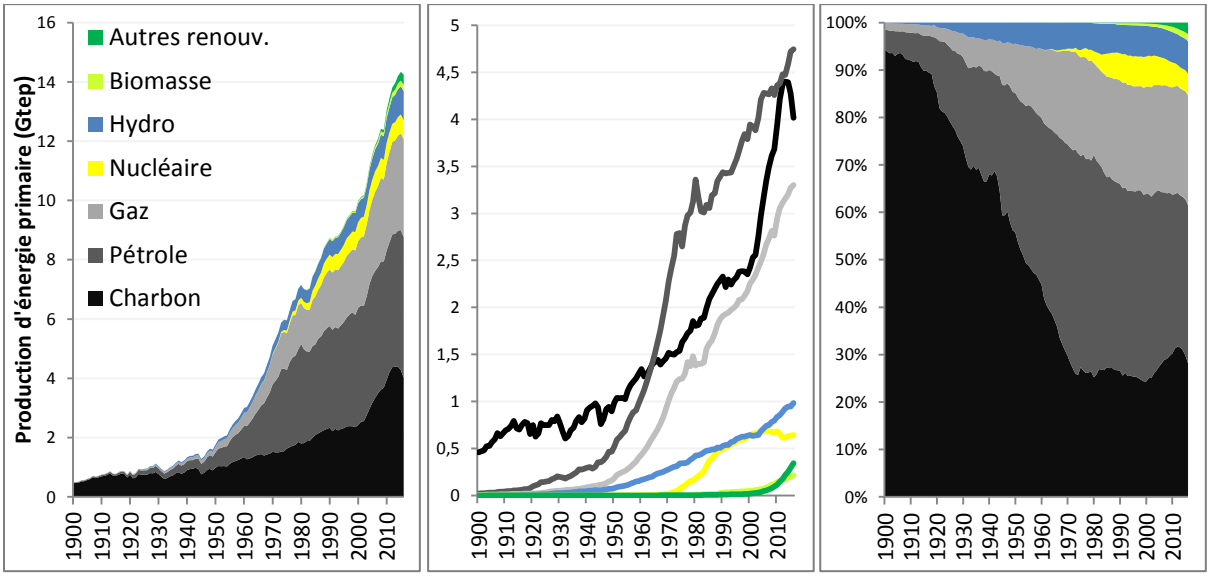


Figure 3 : Production d'énergie primaire dans le monde entre 1900 et 2016 (source The Shift Data Portal, 2020)
Evolution cumulée en Gtep à gauche, par énergie au milieu, en part de chaque énergie à droite ; légendes identiques ; toute l'utilisation de la biomasse ne semble pas inclus dans les données, déjà fortement utilisée au début du XXème siècle

Cette même évolution pour la consommation d'énergie en France est donnée en Figure 4. De nouveau apparaît une **forte hausse de la consommation d'énergie totale**, seulement stoppée ou réduite par les deux guerres mondiales, les deux chocs pétroliers, et la crise de 2008 (dernière année de la série de donnée). Cependant, une vraie transition vers une sortie progressive du charbon est constatée depuis 1930, une tendance qui va encore se poursuivre dans les années à venir. Dans une moindre mesure, une transition a été observée pour le pétrole, la croissance de sa consommation étant stoppé par le 1er choc pétrolier en 1973, avant une décrue à la suite du second choc pétrolier de 1979.

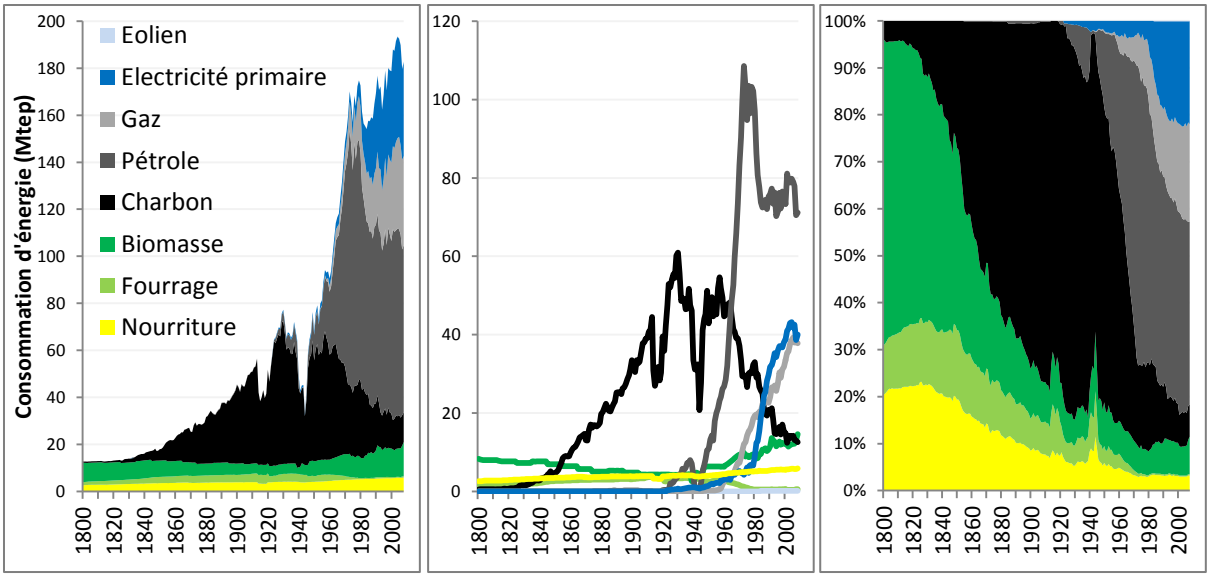


Figure 4 : Consommation d'énergie primaire en France de 1800 à 2008 (Energy History, 2020)
Evolution cumulée en Gtep à gauche, par énergie au milieu, en part de chaque énergie à droite ; légendes identiques ; cette série de données montre ici davantage de détails sur la biomasse, mais ne détaille pas l'électricité (hydraulique, nucléaire, etc)

La Figure 5 ci-dessous sur la période 1960-2017 montre que cette **baisse de la consommation de pétrole** s'est surtout faîte dans les secteurs industriel et résidentiel-tertiaire, aidés par la sortie du fioul de la production de l'électricité (voir aussi la part du pétrole dans les différents secteurs, en Figure 6 à gauche).

Cependant, le secteur des transports a montré une croissance quasiment continue de sa consommation de pétrole de 1960 à 2000, seulement ralentie par les chocs pétroliers des années 70. Ainsi la **part du secteur des transports dans les consommations de pétrole** n'a cessé d'augmenter depuis 1970, passant de 28 % à **74 %** en 2017 (usages énergétiques seuls, et hors transport international ; 64 % s'ils sont inclus, avec 51 Mtep sur 80 Mtep de pétrole au total), tandis que la part des transports dans les consommations totales d'énergie est passée de 18 à 33 % sur la même période (Figure 5 à droite et à gauche ; CGDD, 2019b).

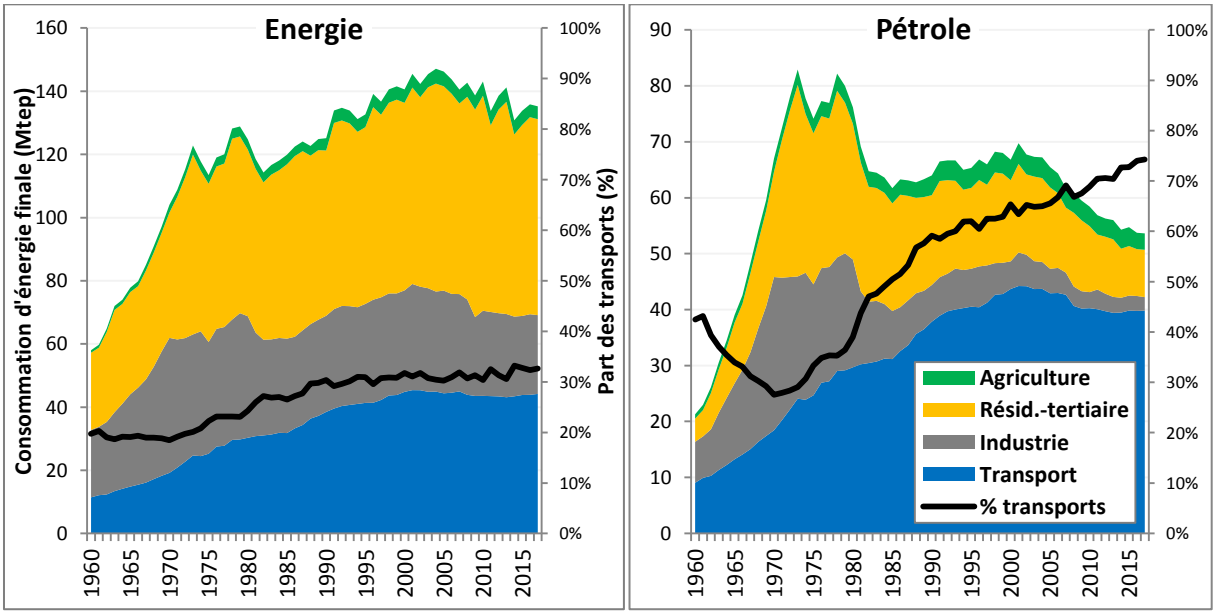


Figure 5 : Consommation finale d'énergie par secteur, toutes énergies (gauche) et pétrole (droite), France, 1960-2017
Evolution cumulée (axe à gauche) et part des transports (axe à droite) ; légendes et titres des axes identiques ; source CGDD, 2019b, consommations à usage énergétique seulement, hors soutes internationales (aérien et maritime) pour le pétrole

Ainsi la part des transports dans la consommation totale de pétrole est forte (environ les 2/3), et l'inverse est également vrai, avec une **forte part du pétrole dans les consommations d'énergie des transports**. Si le pétrole ne représente plus que 10 % des consommations de l'industrie et 14 % du résidentiel-tertiaire, il représente en revanche 72 % des consommations d'énergie de l'agriculture et **90 %** des transports intérieurs (hors international). Cette dépendance est restée très forte depuis 1960 : seule la fin du charbon en début de période et le développement des biocarburants depuis le début des années 2000 ont représenté une part significative, tandis que la part de l'électricité est restée proche des 2 % des consommations d'énergie des transports sur l'ensemble de la période (Figure 6 ; CGDD, 2019b).

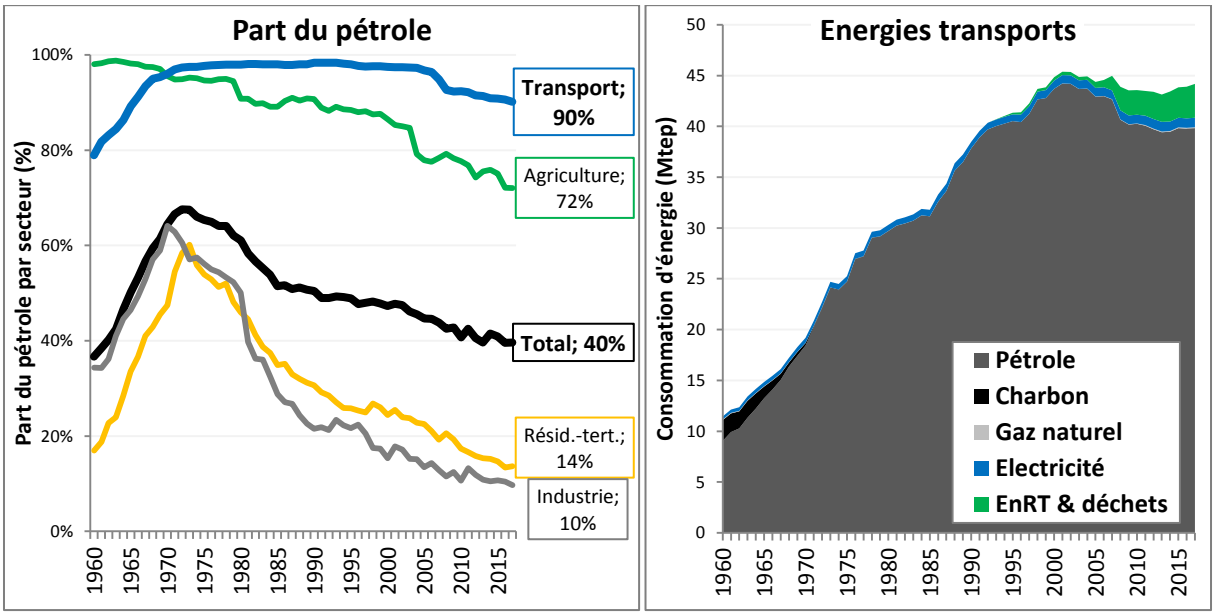


Figure 6 : Part du pétrole dans les consommations finales d'énergie des secteurs en France (à gauche) et consommations d'énergies dans les transports en France (à droite), 1960-2017 (CGDD, 2019b)

La décarbonation du secteur des transports dans les trois décennies à venir se pose ainsi comme un **défi majeur** étant donné la très forte dépendance au pétrole, qui n'a pas pu être fortement réduite depuis de nombreuses dernières, malgré les chocs pétroliers et les tentatives précédentes des politiques publiques de réduire cette dépendance.

3.2. Une approche système, pour un système complexe

Le système de transport, le secteur de l'énergie, et en particulier les consommations d'énergie du secteur des transports, sont **influencés par de nombreux paramètres**. Ainsi les 5 facteurs de la SNBC étudiés plus particulièrement dans cette thèse sont eux-mêmes en interaction et sous influence de nombreuses autres composantes, tel que schématisé de manière simplifiée en Figure 7.

Ainsi les analyses sur l'évolution des facteurs par le passé, et leur évolution à l'avenir (chapitres 1 et 2) doit tenir compte de ces éléments, qui touchent à la fois aux évolutions démographiques, économiques, dans l'aménagement du territoire, les modes de transport développés, l'évolution des modes de vie, des politiques publiques, ou encore de la disponibilité et du coût des énergies et autres ressources. L'évolution des 5 facteurs de la décomposition a une influence sur les 3 principaux enjeux de la transition énergétique dans

les transports que sont les émissions de CO_2, la pollution de l'air et la dépendance au pétrole (partie 2 de l'introduction), mais aussi sur d'autres externalités des transports (la congestion, l'insécurité, la sédentarité, le bruit, etc.) ou encore sur d'autres impacts environnementaux (biodiversité, consommation d'espace, pollution des sols et des eaux, consommation de métaux, de biomasse, etc.).

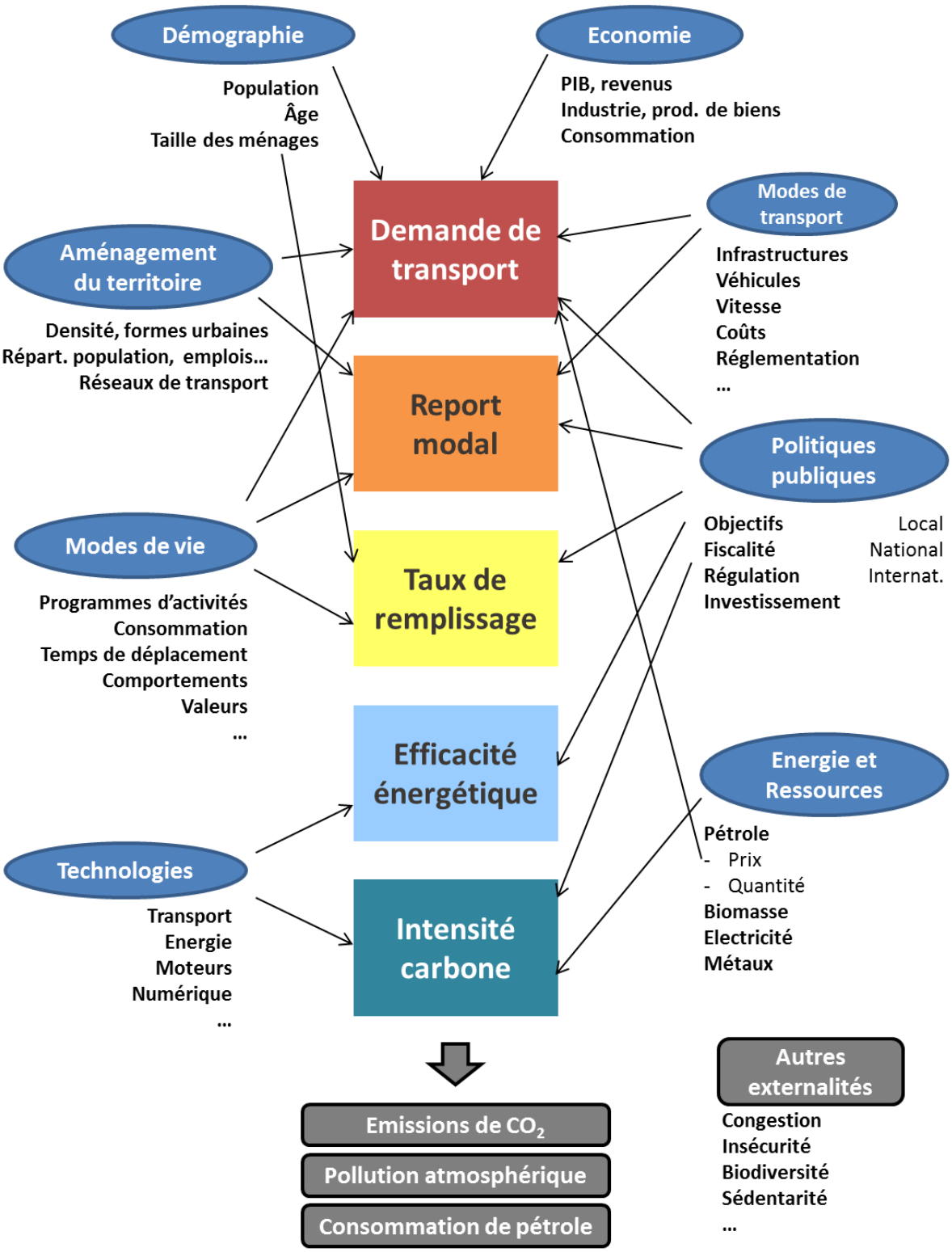


Figure 7 : Principaux éléments liés à la transition énergétique des transports, et principales influences sur les 5 leviers de décarbonation du secteur

Cette **complexité** nécessite autant que possible une **vision systémique** de la problématique, et de prendre en compte les paramètres les plus importants dans les évolutions constatées ou à venir, et les interactions qui existent entre tous les éléments. Modifier un élément du système peut ainsi avoir des effets simultanés sur plusieurs autres composantes. Ces nombreuses interactions ainsi que les incertitudes qui entourent de nombreux paramètres doivent également amener à une certaine prudence quant à l'interprétation des résultats et aux possibles évolutions futures. De nombreuses évolutions imprévues aujourd'hui pourraient en effet survenir d'ici 2050.

3.3.Problématique et plan de la thèse

L'introduction a permis jusqu'ici de faire un tour d'horizon de l'historique et de quelques éléments clés des transports actuels, des 3 enjeux de transition énergétique auxquels ces transports font face, ainsi que de la complexité de cette transition, au vu de la forte dépendance au pétrole depuis de nombreuses décennies, et au vu de la complexité du sujet.

Dans ce contexte, l'objectif de la présente thèse est de répondre au mieux à la question suivante : **comment aligner le secteur des transports sur l'objectif de neutralité carbone en France à l'horizon 2050 ?**

Tel que l'indique le sous-titre de la thèse, il est proposé de fournir des éléments de réponse par différentes **explorations entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement**, au travers de 4 chapitres dont les sujets principaux et secondaires sont indiqués dans le Tableau 3.

Le **chapitre 1** traitera des trajectoires d'émissions passées des transports, et notamment de la place de la technologie, insuffisamment efficace, et de la sobriété, trop peu mise en œuvre jusqu'alors pour réduire significativement les émissions des transports.

Le **chapitre 2** évoquera cette fois les potentiels de réduction d'émissions des leviers technologiques et de sobriété, dans les scénarios de prospectives d'ici 2050, situant la stratégie nationale bas-carbone parmi les scénarios fortement tournés vers la technologie.

Le **chapitre 3** se focalisera sur la notion de vitesse des mobilités, à la fois sur le passé et de manière prospective, montrant que l'accélération des mobilités a été forte sur la seconde moitié du XXème siècle, plutôt stagnante depuis le tournant du millénaire, et que la transition énergétique pourrait être synonyme de ralentissement des mobilités à l'avenir.

Le **chapitre 4** détaillera enfin les moyens à mettre en œuvre pour aligner les transports sur l'objectif de neutralité carbone, pointant l'importance de combiner technologie et sobriété pour répondre au défi que représente la décarbonation du secteur en seulement 3 décennies.

Tableau 3 : Sujets principaux (vert foncé) et secondaires (vert clair) traités dans les 4 chapitres de la thèse, entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement

	Temporel		Moyens		Vitesse	
	Passé	Avenir	Technologie	Sobriété	Accélération	Ralentissement
Chapitre 1						
Chapitre 2						
Chapitre 3						
Chapitre 4						

Bibliographie

Airparif, 2019a. *Bilan des émissions atmosphériques en Île-de-France. Année 2015*. Publié en avril 2019. 87 p. http://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/inventaire_emissions_idf_2015_20190418.pdf

Airparif, 2019b. *Émissions de polluants atmosphériques et de gaz à effet de serre. Bilan Paris Année 2015*. Publié en août 2019. 42 p. http://www.airparif.asso.fr/_pdf/publications/emissions_ges_paris_donnees2015_30012020.pdf

Anses, 2019. *Particules de l'air ambiant extérieur. Effets sanitaires des particules de l'air ambiant extérieur selon les composés, les sources et la granulométrie. Impact sur la pollution atmosphérique des technologies et de la composition du parc de véhicules automobiles circulant en France*. Avis de l'Anses. Rapport de synthèse et de recommandations de l'expertise collective. Juillet 2019 - Édition scientifique. 118 p. https://www.anses.fr/fr/content/pollution-de-l'air-nouvelles-connaissances-sur-les-particules-de-l'air-ambiant-et-l'impact

Bigo, A., 2016. *Comment atteindre le facteur 4 dans les transports ? Analyse comparée de scénarios de prospectives à 2050*. Mémoire de Master 2 EDDEE. 159 p. http://www.chair-energy-prosperity.org/publications/working-papers/atteindre-facteur-4-transports/

BP, 2020. *BP Statistical Review of World Energy 2020*. 69th edition. 68 p. https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html

Burnett, R., et al., 2018. *Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter*. Proc Natl Acad Sci USA 2018, Volume 115, pp. 9592–9597. https://doi.org/10.1073/pnas.1803222115

Castaignède, L., 2018. *Airvore ou la face obscure des transports*. Chronique d'une pollution annoncée. Ed. Ecosociété. 344 p. https://ecosociete.org/livres/airvore

CGDD, 2010. *La mobilité des Français. Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008*. 228 p. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/la-mobilite-des-francais-panorama-issu-de-lenquete-nationale-transports-et-deplacements-2008

CGDD, 2019a. *Les comptes des transports en 2018 - 56e rapport de la Commission des comptes des transports de la Nation*. 212 p. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-comptes-des-transports-en-2018-56e-rapport-de-la-commission-des-comptes-des-transports-de-la

CGDD, 2019b. *Bilan énergétique de la France pour 2017*. 176 p. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/bilan-energetique-de-la-france-pour-2017

CGDD, 2020. *Chiffres clés du transport - Édition 2020*. 92 p. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/chiffres-cles-du-transport-edition-2020

CITEPA, 2020. *Secten – le rapport de référence sur les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques en France*. https://www.citepa.org/fr/secten/

CNRS, Météo France, CEA, 2019. *Changement climatique : les résultats des nouvelles simulations françaises*. Dossier de presse. 17 septembre 2019. 32 p. https://www.cnrs.fr/fr/changement-climatique-les-resultats-des-nouvelles-simulations-francaises-0

EEA, 2018. *Air quality in Europe - 2018 report*. EEA Report No 12/2018. https://www.eea.europa.eu/publications/air-quality-in-europe-2018

EEA, 2019. *Air quality in Europe - 2019 report*. EEA Report No 10/2019. https://www.eea.europa.eu//publications/air-quality-in-europe-2019

EIA, 2020. *Annual Energy Outlook 2020, with projections to 2050*. January 29, 2020. https://www.eia.gov/outlooks/aeo/

Energy History, 2020. *National Energy Accounts*. Center for History and Economics. https://sites.fas.harvard.edu/~histecon/energyhistory/energydata.html

Forum Vies Mobiles, 2020. *Enquête Nationale Mobilité et Modes de vie*. 48 p. https://fr.forumviesmobiles.org/projet/2019/01/07/enquete-nationale-mobilite-et-modes-vie-12796

Hacquard, P., Simoën, M., Hache, E., 2019. *Is the oil industry able to support a world that consumes 105 millions barrels of oil per day in 2025?* Oil and Gas Science Technology. Rev. IFP Energies nouvelles, Vol. 74, 88. 11 p. https://doi.org/10.2516/ogst/2019061

IEA, 2018. *World Energy Outlook 2018*. November 2018. https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2018

IEA, 2020. *Key World Energy Statistics 2020*. Statistics report, August 2020. 81 p. https://www.iea.org/reports/key-world-energy-statistics-2020

Insee, 2019. *La pollution de l'air due au trafic automobile augmente les admissions aux urgences pour maladies respiratoires*. Insee Analyses N° 46, Paru le : 27/05/2019. 4 p. https://www.insee.fr/fr/statistiques/4160040

Insee, 2020. *Tableaux de l'économie française. Edition 2020*. Insee Références. Paru le 27/02/2020. 266 p. https://www.insee.fr/fr/statistiques/4318291

IPCC, 2013. Climate Change 2013: *The Physical Science Basis. Summary for Policymakers*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/

IPCC, 2014. *Transport, Chapter 8*. In: *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/

IPCC, 2018. *Global Warming of 1.5 ºC*. Special Report. https://www.ipcc.ch/sr15/

IPCC, 2019. *Climate Change and Land*. Special Report. https://www.ipcc.ch/srccl/

Légifrance, 2015. *LOI n° 2015-992 du 17 août 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte*. JORF n°0189 du 18 août 2015. https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000031044385/

Lelieveld, J., Klingmüller, K., Pozzer, A., Pöschl, U., Fnais, M., Daiber, A., Münzel, T., 2019. *Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe reassessed using novel hazard ratio functions*. European Heart Journal, Volume 40, Issue 20, 21 May 2019, Pages 1590–1596, https://doi.org/10.1093/eurheartj/ehz135

Le Monde, 2019. « La voiture, en ville, est de loin la première source de pollution ». Interview de Jocelyne Just, par Stéphane Mandard. Publié le 10 août 2019. https://www.lemonde.fr/festival/article/2019/08/10/la-voiture-en-ville-est-de-loin-la-premiere-source-de-pollution_5498258_4415198.html

MTES, 2017. *Plan climat. 1 planète, 1 plan*. Jeudi 6 juillet 2017. 20 p. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2017.07.06%20-%20Plan%20Climat.pdf

MTES, 2020. *Stratégie nationale bas-carbone. La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone*. Mars 2020. 192 p. https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc

OMS, 2016. *Qualité de l'air ambiant et santé* [en ligne]. 2 mai 2018. Consulté le 6 juin 2020. https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health

Paris, 2019. *Le bilan des déplacements à Paris en 2018*. Ville de Paris. 52 p. https://www.paris.fr/pages/les-deplacements-a-paris-en-2018-7426

Santé publique France, 2016. *Impacts de l'exposition chronique aux particules fines sur la mortalité en France continentale et analyse des gains en santé de plusieurs scénarios de*

réduction de la pollution atmosphérique. 162 p. https://www.santepubliquefrance.fr/content/download/189661/2330875

SDES, 2020. *Comment les Français se déplacent-ils en 2019 ? Résultats de l'enquête mobilité des personnes*. Publié le 16/09/2020. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/comment-les-francais-se-deplacent-ils-en-2019-resultats-de-lenquete-mobilite-des-personnes

TDA, 2018. *Decarbonising transport by 2050. A TDA manifesto on how to reach net zero emission mobility through uniting Countries, Cities / Regions and Companies.* December 2018. 44 p. http://tda-mobility.org/tda-manifesto-release/

The Shift Data Portal, 2020. *World Primary Energy Production* [données]. Consulté le 22/06/2020. https://theshiftdataportal.org/energy/primary-energy

TSP, 2020. *L'Union européenne risque de subir des contraintes fortes sur les approvisionnements pétroliers d'ici à 2030 – Analyse prospective prudentielle*. 42 p. https://theshiftproject.org/article/ue-declin-approvisionnements-petrole-2030-etude/

UNEP, 2019. *Emissions Gap Report 2019*. 108 p. https://www.unenvironment.org/resources/emissions-gap-report-2019

UNFCCC, 2015. *Accord de Paris*. 28 p. https://unfccc.int/fr/process-and-meetings/the-paris-agreement/l-accord-de-paris

URF, 2019. *Faits et chiffres*. *Statistiques de mobilités en France et en Europe*. 142 p. https://www.unionroutiere.fr/ publications/faits-et-chiffres/

I. Comment expliquer l'évolution des émissions des transports depuis 1960 ?

Résumé

Le chapitre analyse les facteurs ayant influencé les émissions de CO_2 des transports entre 1960 et 2017 en France. Cette période a connu une forte hausse des émissions de 32 à 126 $MtCO_2$, après un pic à 136 $MtCO_2$ au début des années 2000. Une décomposition des émissions des transports de passagers et de marchandises est utilisée, afin d'évaluer la contribution relative des 5 facteurs d'évolution des émissions. Ces facteurs correspondent aux 5 leviers de la stratégie nationale bas-carbone (SNBC) : la demande de transport, le report modal, le taux de remplissage, l'efficacité énergétique des véhicules et l'intensité carbone de l'énergie. L'analyse met en évidence la forte relation entre les émissions de CO_2 et la demande de transport, alors que les quatre autres facteurs se sont majoritairement compensés entre eux : le report modal vers les transports routiers et la baisse du taux de remplissage des voitures ont participé à la hausse des émissions de CO_2, tandis que la hausse du taux de remplissage des camions, l'efficacité énergétique et la légère amélioration de l'intensité carbone ont compensé ces effets négatifs. L'impact des politiques publiques environnementales sur les trajectoires d'émissions apparaît limité pour le moment. Elles n'ont pas agi sur le principal facteur d'évolution qu'est la demande, et n'ont pas réussi à accélérer substantiellement les baisses d'émissions unitaires (par km parcouru ou tonne.km transportée). L'atteinte des budgets carbone de court terme, telle que prévue dans la stratégie nationale, nécessite de fortes accélérations de ces baisses d'émissions unitaires.

1. Introduction

Points et messages clés :

- ✓ La stratégie nationale bas-carbone (SNBC) mise sur **5 leviers** de décarbonation des transports : demande de transport, report modal, taux de remplissage des véhicules, efficacité énergétique et intensité carbone de l'énergie.
- ✓ Le chapitre vise à étudier leur évolution de **1960 à 2017** en France, pour le transport de voyageurs et de marchandises.
- ✓ Le **plan** est le suivant : la partie 2 détaille la méthodologie ; la partie 3 présente les résultats par période, par facteur et par mode de transport ; la partie 4 discute l'impact des politiques publiques passées et quelques implications pour l'avenir.

La stratégie nationale bas-carbone (SNBC) française fixe pour objectif l'atteinte de la **neutralité carbone d'ici 2050**. Pour le secteur des transports, cela implique une décarbonation quasiment complète à cet horizon. De même, des objectifs sont fixés pour les budgets carbone à plus court terme, impliquant par exemple une baisse indicative des émissions des transports de -28 % entre 2015 et 2030 (MTES, 2020).
Les mesures et évolutions nécessaires pour atteindre ces objectifs sont classées en **5 leviers** de décarbonation des transports : la demande de transport, le report modal, le taux de remplissage des véhicules, l'efficacité énergétique des véhicules, et enfin l'intensité carbone de l'énergie.

Il est ainsi fondamental de comprendre comment ces leviers ont évolué par le passé, et comment ils ont expliqué l'évolution des émissions des transports. Le présent chapitre a pour objet de fournir l'analyse de l'impact de ces cinq facteurs sur les émissions de CO_2 du transport de passagers et de marchandises, sur la période 1960-2017.
Ce premier objectif d'**analyse des trajectoires passées** est étudié sous plusieurs angles : celui des périodes d'évolution des émissions, avec en particulier une forte augmentation des émissions de 1960 jusqu'au début des années 2000, une baisse des émissions et une reprise récente sur 2014-2017 ; les évolutions propres à chacun des 5 facteurs de la décomposition ; les évolutions propres aux différents modes de transport.
Le second objectif sera de discuter **l'impact des politiques publiques** passées sur les trajectoires d'émissions.
Enfin, le troisième objectif est d'informer les **implications pour atteindre les objectifs** de transition énergétique des transports. Cela est valable en particulier pour les évolutions de court terme, qui devraient se rapprocher des tendances de ces dernières années, en raison de l'inertie dans l'évolution des facteurs étudiés et dans la réaction progressive aux politiques publiques ou aux autres évolutions influençant les transports.

Après cette courte introduction, le **plan** sera le suivant. La partie 2 présente la bibliographie sur les décompositions des émissions appliquées aux transports, la méthodologie de décomposition retenue et les données utilisées. La partie 3 présente les principaux résultats, par période, par facteur et par mode de transport. La partie 4 discute ces résultats, en particulier sur l'impact observé des politiques publiques par le passé, l'interaction entre les principaux facteurs, et les implications pour les trajectoires d'émissions de court terme.

2. Méthodologie et données

2.1. Positionnement par rapport à la littérature existante

Points et messages clés :

- ✓ Les techniques de **décomposition des émissions** ont eu un usage croissant depuis le début des années 1990, et 40 études appliquées aux transports sont ici comparées.
- ✓ La décomposition utilisée est présentée, avec ses **5 facteurs** de demande, report modal, taux de remplissage, efficacité énergétique, et intensité carbone.

Depuis le début des années 1990, les analyses de décomposition (**IDA : index decomposition analysis**) ont été de plus en plus utilisées pour identifier les facteurs explicatifs de l'évolution des consommations d'énergie ou d'émissions de CO_2 au cours du temps. C'est le chercheur japonais Yoichi Kaya qui a proposé une première version de décomposition des émissions de CO_2 d'une économie, lors d'une conférence du GIEC (Groupe d'étude intergouvernemental sur l'évolution du climat ; Kaya, 1990), ce qui vaut désormais à ces analyses le nom d'équation ou plus exactement d'**identité de Kaya**. L'identité initialement proposée, et encore largement utilisée aujourd'hui, décompose les émissions de CO_2 en quatre facteurs, qui sont la population, la richesse ou PIB (produit intérieur brut) par personne, l'efficacité énergétique de l'économie, et enfin l'intensité carbone de l'énergie (Kaya, 1990) :

$$\mathbf{CO_2 = Pop.\frac{PIB}{Pop}.\frac{Energie}{PIB}.\frac{CO_2}{Energie}}$$

Une version proche avait été développée dès les années 1970 pour caractériser de manière plus générale les facteurs explicatifs des impacts environnementaux. C'est l'**identité IPAT** :

Impact = Population x Affluence x Technology

Le facteur "Affluence" caractérise également la richesse par personne. Le facteur de technologie indique le niveau de dégradation environnementale par unité de PIB, regroupant pour comparaison avec l'identité de Kaya les facteurs d'efficacité énergétique et d'intensité carbone de l'énergie dans le cas d'une décomposition des émissions de CO_2.

Les **décompositions des émissions appliquées aux transports** se sont développées dès le début des années 1990. Certaines études ont fait une compilation d'analyses déjà existantes sur ce sujet, et ont pu référencer 10 études académiques pour Gupta et Singh (2016), 16 références pour Fan et Lei (2016) et 12 pour Andrés et Padilla (2018), en citant à chaque fois les facteurs utilisés dans les décompositions des émissions des transports. Une analyse de littérature en 2013 sur les décompositions appliquées à divers secteurs avait par ailleurs recensé 80 études, dont 15 sur les transports (Xu et Ang, 2013).

Sans prétendre être exhaustive en particulier sur les études de la littérature grise ayant utilisé ce type de décompositions, l'analyse de littérature réalisée ici a permis de réunir **40 études** appliquées aux transports depuis 1992 (Tableau 4). Parmi elles, 35 ont été publiées dans des revues académiques, et 5 autres correspondent à des analyses plus ou moins détaillées dans des rapports publics de l'agence internationale de l'énergie (AIE) pour deux d'entre elles, de l'agence européenne de l'environnement (AEE) et du ministère de l'environnement en France (MEDDE, 2015 ; CGDD, 2018a et 2019a).

Plus récemment, les analyses de décomposition ont aussi été développées avec des visées prospectives, une récente analyse de littérature a ainsi recensé 60 études dont 6 sur les

transports (Ang et Goh, 2019). La bibliographie ainsi que les questions méthodologiques qui lui sont associées seront détaillées au début du chapitre 2, qui a justement pour objectif d'appliquer la méthode de décomposition aux scénarios de prospectives français.

Concernant le **périmètre géographique**, la plupart des études sont réalisées à l'échelle d'un pays, parfois en comparaison entre plusieurs d'entre eux. Quelques études ont été réalisées aux échelles de villes, de régions ou de provinces, notamment en Chine qui concentre une partie importante des études recensées depuis 2011. La France a fait l'objet de certaines publications académiques, il y a désormais plusieurs années, et toujours en comparaison avec d'autres pays (Schipper et al, 1992 ; Scholl et al, 1996 ; Schipper et al, 1997 ; Greening et al, 1999; Greening, 2004; Kamakaté and Schipper, 2009 ; Eom et al, 2012). Les deux plus récentes d'entre elles portent uniquement sur le secteur des marchandises. Les autres ne permettent pas de rendre compte des dynamiques les plus récentes, et notamment de l'analyse temporelle du plafonnement des émissions dans les années 2000.
Comme évoqué en introduction, deux autres analyses ont été conduites plus récemment par des services du ministère français du développement durable, en certains points assez similaires au travail réalisé ici. L'encadré ci-dessous précise ces différences, dont certains éléments méthodologiques seront détaillés plus loin.

Encadré 1 : principales différences entre cette étude et les décompositions du ministère

Les analyses réalisées dans le rapport de la SNBC (MEDDE, 2015 ; p156) et par le CGDD (2018a, 2019a, 2020) présentent des similitudes dans l'approche, la méthodologie et les résultats. Le travail réalisé ici comporte les spécificités et approfondissement suivants :

- ✓ **La période** considérée : 1960-2017 dans la présente étude, contre 1960-2013 dans le rapport MEDDE, et depuis 1990 uniquement pour les analyses du CGDD, ce qui donne moins de recul pour interpréter le plafonnement récent des émissions ; un intervalle de temps d'un an est pris en compte pour toutes les études, sauf ici pour les décompositions additives réalisées avec un pas de temps de 5 ans ;
- ✓ **Le périmètre et les modes** considérés : transport routier motorisé seul pour le MEDDE, en confondant voyageurs et marchandises ; véhicules particuliers, transports collectifs terrestres et aérien pour les décompositions voyageurs, routier, ferroviaire et fluvial pour les marchandises dans les analyses du CGDD ; ici sont repris à peu près les mêmes modes, avec l'ajout des modes actifs (marche et vélo) pour les voyageurs, la séparation des transports collectifs routiers et ferroviaires, un test en tenant compte de l'aérien international, et la prise en compte des véhicules utilitaires légers (VUL) en partie dans les voyageurs et les marchandises ;
- ✓ **Les facteurs de la décomposition** : effets de population, trafic, consommation par km, pourcentage d'énergie fossile et intensité carbone pour MEDDE (la décomposition laisse aussi un faible résidu ; voir Figure 8) ; on retrouve sensiblement les mêmes facteurs que dans la présente étude pour le CGDD ; les décompositions voyageurs et marchandises sont séparées, mais avec deux (sous-)décompositions pour chacune, avec d'abord la consommation des véhicules particuliers et poids-lourds (facteurs de demande, taux de remplissage et consommation par veh.km) avant une seconde décomposition sans le taux de remplissage, mais avec le report modal,

l'intensité carbone, et l'ajout de la population pour les voyageurs (voir cette deuxième décomposition pour les voyageurs en Figure 9). Le fait de regrouper dans cette étude tous ces facteurs dans une même décomposition peut sembler anodin, mais couplé au choix d'une période étendue de 1960 à 2017, cela demande bien plus de données sur l'ensemble des modes de transport, données qui sont plus difficiles à trouver ou estimer, surtout pour la période précédant 1990 ;

- ✓ **Présentation des résultats** : uniquement en additif (variations en absolu des émissions) avec un intervalle d'un an pour MEDDE et uniquement en multiplicatif pour les décompositions du CGDD ; ici les deux sont utilisés selon le contexte ;
- ✓ **Le détail des leviers et de l'analyse** : si les analyses du ministère sont expliquées respectivement sur 1 page et 6 pages, l'objectif est ici de détailler davantage les résultats, notamment pour l'analyse des déterminants de l'évolution de chaque levier, chaque mode, du plafonnement récent des émissions, et pour discuter des principaux enseignements pour les politiques publiques énergie-climat et des transports.

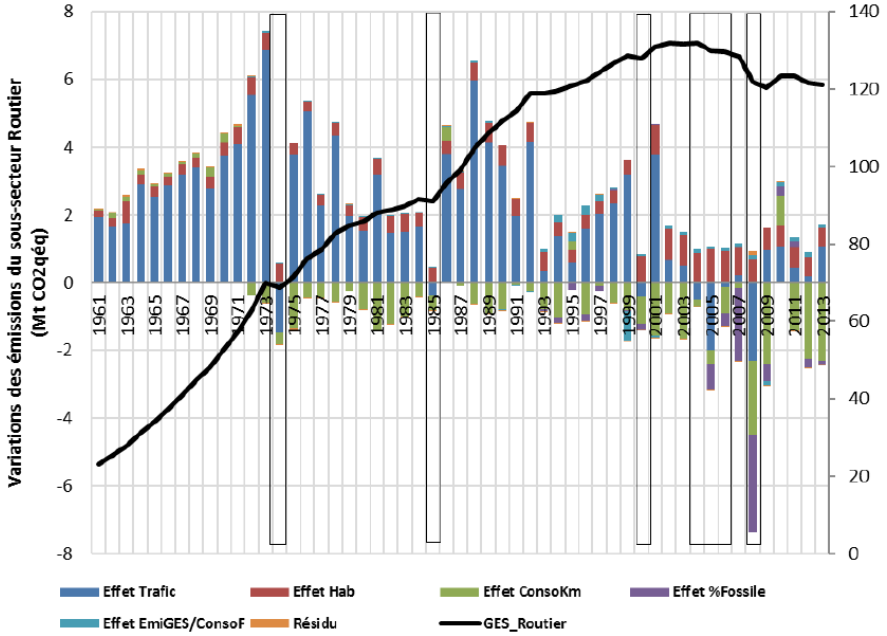


Figure 8 : Décomposition des émissions de gaz à effet de serre du transport routier de 1960 à 2013 (MEDDE, 2015)

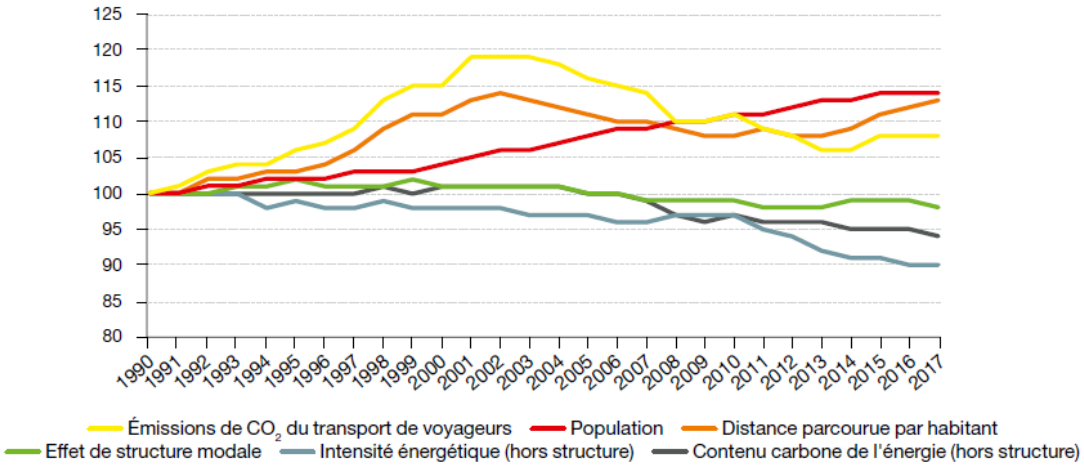


Figure 9 : Décomposition de l'évolution des émissions de CO2 du transport de voyageurs en France entre 1990 et 2017 (indice base 100 en 1990 ; CGDD, 2019a)

Une différence de la présente étude avec la littérature concerne la **période** considérée. Parmi les 40 études, la période s'étend en moyenne sur une vingtaine d'année, de 7 ans au minimum jusqu'à 53 ans pour la décomposition du MEDDE (2015, voir encadré ci-dessus). La période de 1960 à 2017 (soit 57 ans) ici considérée, semble assez inédite parmi la littérature consultée. Les avantages de considérer une période aussi longue sont notamment de renseigner une part plus importante de l'histoire des transports, et ainsi de pouvoir caractériser différentes sous-périodes aux tendances différentes, comme c'est le cas en France sur la période considérée avec un plafonnement des émissions au début des années 2000 après une longue période de croissance. La contrepartie est évidemment la difficulté à regrouper suffisamment de données de bonne qualité pour réaliser la décomposition.
Aussi une partie des études considère une seule décomposition entre la première et la dernière année de la période, sans avoir de continuité annuelle tout au long de la période, ce qui ne permet pas de voir si la période totale a été caractérisée par des sous-périodes aux tendances différentes pour certains facteurs. Ici la décomposition est réalisée avec un pas de temps annuel pour la décomposition multiplicative (avec une base 1 en 1960), et avec un pas de temps de 5 ans de 1960 à 2015 pour la décomposition additive. Ce dernier choix permet de capturer les tendances de moyen terme, et d'éviter d'obtenir des résultats qui font davantage apparaître l'imprécision de certaines données dans une décomposition additive annuelle.
La **présentation des résultats** varie sensiblement selon les études, et est souvent réalisée sous forme de tableaux pour les études avec un seul ou peu d'intervalles étudiés, tandis que les figures sont rares. Un effort particulier est fait ici pour proposer les nombreuses présentations graphiques rendues possibles par les décompositions d'émissions.

Bien que non indiquées dans le tableau, les **méthodes de décomposition** se sont tournées progressivement vers le log-mean divisia index (LMDI, cf 2.2 pour les explications), utilisé dans toutes les études publiées depuis 2017 et aussi dans cette étude. Cela est concordant avec l'analyse de littérature de Xu et Ang (2013) qui montrait que la méthode était largement dominante sur la période 2006-2012 alors qu'elle était minoritaire avant ; aussi elle était d'autant plus utilisée que le nombre de facteurs considérés dans la décomposition était élevé.

Les études sont réalisées le plus souvent pour expliquer les variations des **émissions de CO_2** des transports, plus rarement pour décomposer ses consommations d'**énergie**, le plus souvent croissantes sur les périodes et les périmètres étudiés (en rouge dans le tableau).
La majorité des identités utilisées dans les transports utilisent **de l'ordre de 5 facteurs, variant de 3 à 9** parmi les études recensées (Tableau 4).
En effet, une représentation commune des mesures d'atténuation pour les transports repose sur le tryptique "Avoid - Shift - Improve" : le premier terme correspond à l'évitement ou à la réduction de la demande de transport ; le deuxième terme peut faire référence selon les interprétations au report modal seul (d'un mode à un autre) ou aussi au changement d'énergie (par exemple du véhicule thermique au véhicule électrique) ; enfin, le facteur "Improve" considère a minima l'efficacité énergétique, et souvent également le taux de remplissage des véhicules et l'intensité carbone de l'énergie. Il est donc possible à partir de ces trois facteurs de détailler davantage certains éléments, ou d'utiliser une interprétation différente de ce qu'ils signifient, en prenant une unité ou un ratio différent notamment.

Tableau 4 : Publications de décompositions des émissions des transports et les principaux facteurs d'évolution

En: consommation d'énergie; CO_2: émissions de CO_2 ; Pop : population ; PIB : produit intérieur brut ; IT : intensité du transport ; PV : possession de véhicules ; DT : demande de transport ; RM : report modal ; TR : taux de remplissage ; EE : efficacité énergétique ; IC : intensité carbone ; CC : changement de carburant. En et CO_2 sont les variables dépendantes étudiées ; elles sont indiquées en rouge quand elles ont augmenté sur la période, vertes quand elles ont baissé, noires quand il n'y a pas de tendance claire. De même, les facteurs en rouge sont ceux qui ont participé à la hausse des émissions, vert à la baisse, noir sans tendance claire ou si cela dépend des pays ; en gras quand le facteur a eu un impact majeur ; ≈ indique un facteur non pris en compte directement dans la décomposition mais étudié dans la publication.

Publications	Aire d'étude	Période	Secteur	En.	CO_2	Facteurs	Pop	PIB	IT	PV	DT	RM	TR	EE	IC	CC	Autres facteurs
Schipper et al, 1992	8 pays OCDE	1970-1987	Passagers	**X**		3					**X**	**X**	≈	X			
Scholl et al, 1996	9 pays OCDE	1973-1992	Passagers	**X**	**X**	4					**X**	X		X	X		
Schipper et al, 1997	10 pays indus.	1973-1992	Marchandises	**X**	**X**	4					**X**	X		X	X		
Lakshmanan et Han, 1997	Etats-Unis	1970-1991	Passagers	**X**	**X**	5	**X**				**X**	X		**X**			Terme d'interaction
			Marchandises	**X**	**X**	5		**X**	X			X		**X**			Terme d'interaction
Greening et al, 1999	10 pays OCDE	1970-1993	Marchandises		**(X)**	4					≈	**X**		X	X	X	Décompo. IC agrégée
Mazzarino, 2000	Italie	1980-1995	Transport		**X**	6	X	**X**	X			X		X		X	
Greening, 2004	10 pays OCDE	1970-1993	Passagers		**(X)**							X	≈	X	X	X	Décompo. IC agrégée
Kwon, 2005	Grande-Bretagne	1970-2000	Voitures		**X**	3	X			≈	**X**	≈	≈	≈	X	≈	Plusieurs décompo.
Steenhof et al, 2006	Canada	1990-2003	Marchandises		**X**	4					**X**	X		X	X		
Kamakaté et Schipper, 2009	5 pays OCDE	1973-2005	Marchandises	**X**	**X**	3-5		**X**				**X**	≈	X	X		
Papagiannaki et Diakoulaki, 2009	Grèce, Danemark	1990-2005	Voitures		**X**	6	X			**X**				X		X	Distance par voiture, capacité du moteur
Timilsina et Shrestha, 2009	20 pays Am. Latine et Caraïbes	1980-2005	Transport		**X**	5		**X**				X		**X**	X	X	
Timilsina et Shrestha, 2009	12 pays d'Asie	1980-2005	Transport		**X**	6	X	**X**				X		**X**	X	X	
EEA, 2011a	UE	1990-2008	Marchandises		**X**	5					**X**	**X**		**X**	X	X	
Kumbaroğlu, 2011	Turquie	1990-2007	Economie, dont transport		**X**	4		X				X		X	X		
Mendiluce et Schipper, 2011	Espagne	1990-2008	Passagers		**X**	4					**X**	X		X	X		
			Marchandises		**X**	4					**X**	X		X	X		
Millard-Ball et Schipper, 2011	6 pays industrialisés	1973-2007	Passagers		**X**	3					**X**	X		X			
Schipper et al, 2011	Etats-Unis	1960-2008	Passagers		**X**	5					**X**	X		**X**	X	X	
			Marchandises		**X**	5					**X**	**X**		**X**	X	X	
Wang et al, 2011	Chine	1985-2009	Transport		**X**	6	X	**X**	X			**X**			X	X	
Zhang et al, 2011	Chine	1980-2006	Transport	**X**		4					**X**	X		**X**			Effet parts passagers–fret
Andreoni et Galmarini, 2012	Europe	2001-2008	Voies d'eau et aviation		**X**	4		**X**						X	X		Changement structurels
Eom et al, 2012	11 pays AIE	1990-2007	Marchandises		**X**	5		**X**	X			X	≈	X		X	
Wang et al, 2012	Chine	1995-2006	Marchandises routier		**X**	9		**X**					X	X	X		Facteurs liés entreprises de fret et industrialisation
Li et al, 2013	Chine	1985-2007			**X**	9		**X**	X					X	X		
Guo et al, 2014	Régions de Chine	2005-2012	Transport		**X**	4	X	**X**						X		X	
Lin et Xie, 2014	Chine	1980-2010	Transport		**X**	4		**X**						X	**X**		Taux d'urbanisation
Sobrino et Monzon, 2014	Espagne	1990-2010	Transport routier		**X**	7		X		X				X	X		Intensités d'emploi, salaires, usage de route
MEDDE, 2015	France	1960-2013	Transport routier		**X**	5	X				**X**			X	X	X	
M'raihi et al, 2015	Tunisie	1990-2006	Marchandises		**X**	5		**X**	X			X		X	X		
Fan et Lei, 2016	Pékin	1995-2012	Transport		**X**	6	X	**X**	X					X		X	Valeur production par chiffre d'affaire trafic
Gupta et Singh, 2016	Inde	1971-2011	Routier passagers		**X**	5	X	**X**			X			X	X		
Kharbach et Chfadi, 2017	Maroc	2000-2011	Transport routier		**X**	4	X			**X**				X	**X**		
Luo et al, 2017	Shanghai et Tokyo	1965-2005	Trans. urbain		**X**	4	X			≈	X	X	≈	≈	X		Plusieurs décompo.
IEA, 2018a	Etats-Unis, UE, Chine, Inde	2000-2016	Transport		**X**	4	X	**X**						**X**	X		
IEA, 2018b	Monde	2000-2017	Passagers	**X**		5					**X**	X	X	X			Type de véhicule
			Marchandises	**X**		4					**X**	X		X			Type de véhicule
Wang et al, 2018	Chine	1990-2015	Passagers		**X**	5	**X**	X	X			X			X		
			Marchandises		**X**	5	**X**	X	X			X			X		
CGDD, 2019a	France	1990-2017	Passagers	**X**	**X**	6	X				X	X	X	X	X		
			Marchandises	**X**	**X**	5					X	X	X	X	X		
Guo et Meng, 2019	Régions de Chine	1995-2016	Transport		**X**	7		**X**			X			X	X	X	CA du fret / prod. ind., industrialisation
Li et al, 2019	Chine, 341 villes	2005-2015	Transport		**X**	4	X	**X**				X					CO_2 par unité de PIB
Solaymani, 2019	7 pays + émetteurs	2000-2015	Transport		**X**	6		**X**				X		X	X	X	Structure électrique

L'analyse retenue dans cette étude retient les **cinq facteurs** de demande, report modal, taux de remplissage, efficacité énergétique et intensité carbone. Avant de détailler l'identité retenue, les principaux éléments issus de la littérature concernant ces cinq facteurs sont présentés ci-dessous.

La **demande** est parfois décomposée entre un facteur de population, et une demande individuelle. Aussi nombre d'études considèrent le PIB comme facteur de demande : cela a les avantages de la simplicité, de la disponibilité des données, et de pouvoir dans certains cas considérer les transports de voyageurs et de marchandises combinés ; mais l'inconvénient d'être moins représentatif des comportements de mobilité ou des flux physiques. Ce facteur est parfois couplé à une intensité des transports (IT dans le tableau), ce qui permet de lier le PIB avec la demande de transport généralement exprimée en voyageurs.kilomètres ou en tonnes.kilomètres (voy.km et t.km dans la suite du document). Historiquement, les facteurs de population, PIB et demande ont été identifiés comme des facteurs participant à la hausse des émissions pour la quasi-totalité des études, très souvent avec une contribution identifiée comme majeure pour le PIB. En revanche, la demande a souvent cru moins fortement que le PIB, comme en témoigne la contribution généralement à la baisse du facteur d'intensité des transports dans les études qui le prennent en compte.

Le facteur de **report modal** est souvent pris en compte dans les études, et s'avère avoir une contribution quasiment systématique à la hausse sur les émissions. Ainsi historiquement le report modal s'est fait le plus souvent vers les modes plus carbonés, en particulier vers la voiture ou les poids-lourds, ce qu'avait aussi remarqué l'analyse de Xu et Ang (2013).

Le **taux de remplissage** des véhicules n'est pris en compte que par un faible nombre d'études, et parfois dans une analyse parallèle à la décomposition principale. Il n'y a pas de tendance claire pour l'ensemble des transports, en revanche le taux de remplissage a généralement contribué à la hausse des émissions pour les passagers et les voitures, et à la baisse pour les marchandises et les poids-lourds.

Pour **l'efficacité énergétique**, souvent appelée intensité énergétique dans les études, elle peut regrouper des indicateurs très différents selon les décompositions : elle est souvent exprimée comme une consommation d'énergie par mode ou divisée par la demande totale (en tep/voy.km notamment ; avec tep = tonne équivalent pétrole), divisée par le trafic de véhicules (tep/veh.km), ou encore par le PIB ou le chiffre d'affaires d'entreprises de fret (tep/€). L'interprétation peut donc différer selon les études, mais dans la grande majorité des cas, l'intensité énergétique participe à la baisse des émissions ou des consommations énergétiques, parfois avec une contribution majeure.

Enfin, l'**intensité carbone** telle qu'elle est utilisée dans la présente étude, regroupe deux dimensions qui sont parfois séparées : le passage d'une énergie à une autre, et l'évolution de l'intensité carbone de chaque énergie prise individuellement. La différence entre les deux peut différer selon les études, l'électricité peut par exemple être considérée comme un vecteur énergétique à part entière en concurrence avec les autres énergies et dont l'intensité carbone évolue au cours du temps, ou il est aussi possible de considérer chaque source de production d'électricité séparément, avec chacune leur propre intensité carbone qui peut éventuellement changer selon la qualité de l'énergie par exemple. Les tendances sur ce facteur sont parfois positives mais généralement peu marquées, reflétant le fait que l'énergie consommée par les transports est dominée par le pétrole depuis plusieurs décennies.

L'identité utilisée dans cette étude concerne les **5 facteurs** suivants, cités par la SNBC :

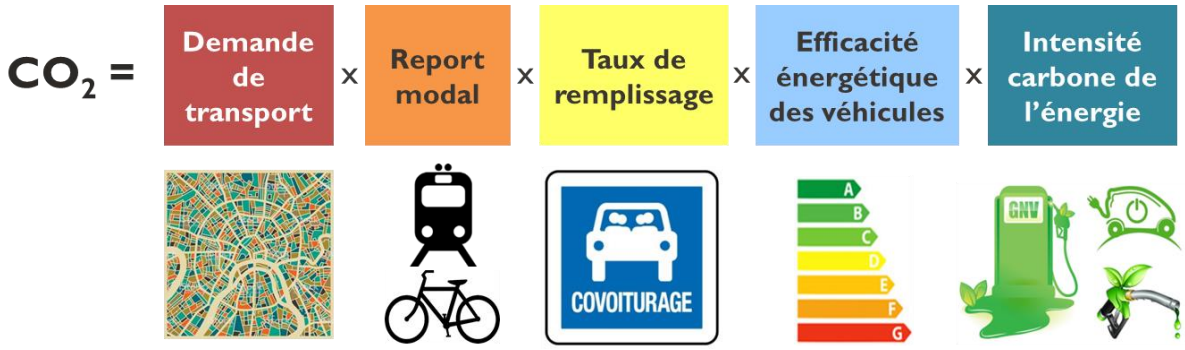


Figure 10 : Les cinq leviers clés pour décarboner les transports, utilisés dans la décomposition des émissions

L'identité mathématique utilisée pour décomposer les différents leviers s'écrit comme la somme des émissions des i modes considérés :

$$\mathbf{CO_{2,Transport} = \sum_i D.\frac{D_i}{D}.\frac{C_i}{D_i}.\frac{E_i}{C_i}.\frac{CO_{2,i}}{E_i}}$$

Avec :

- ✓ **D** : la demande de transport voyageurs ou marchandises (voy.km ou t.km), soit le nombre de kilomètres parcourus par les voyageurs et par les tonnes de marchandises transportées, avec 1 t.km = 1 tonne de marchandises qui parcourt 1 km.
- ✓ $\mathbf{D_i}$: demande de transport du mode i (voy.km ou t.km)
- ✓ $\mathbf{C_i}$: circulation des véhicules du mode i (veh.km : véhicule.kilomètre)
- ✓ $\mathbf{E_i}$: énergie consommée par le mode i (tep : tonne équivalent pétrole)
- ✓ $\mathbf{CO_{2,i}}$: émissions de CO_2 du mode i (tCO_2 : tonne de CO_2)

Les 5 facteurs qui apparaissent dans l'identité sont les suivants :

- ✓ La **demande de transport** (notée **DT** dans la suite de l'étude), **D** dans l'identité ;
- ✓ Le **report modal** (**RM**), qui correspond à un effet structure lié à la répartition de la demande entre les modes ; pour chaque mode, le ratio $\mathbf{D_i/D}$ représente sa part modale ou le pourcentage des kilomètres totaux réalisés avec le mode i ; le facteur de report modal permet par exemple de mesurer l'impact sur les émissions d'un transfert de 1% des voy.km ou des t.km depuis le ferroviaire vers le routier ; l'impact est alors égal au surplus d'émissions du transport routier induit par ce pourcent de trafic ajouté, moins les émissions évitées dans le ferroviaire dues à cette perte de trafic ;
- ✓ Le **taux de remplissage** des véhicules (**TR**), qui se mesure en nombre de voyageurs ou de tonnes par véhicule (voy/veh ou t/veh) ; dans l'identité c'est $\mathbf{C_i/D_i}$ qui apparaît, soit l'inverse du taux de remplissage, l'unité est donc en veh/voy ou veh/t ; ainsi, lorsque le taux de remplissage baisse, les émissions augmentent (car l'inverse du TR C_i/D_i est en hausse), car il faut une circulation plus élevée de véhicules pour satisfaire une même demande de transport pour ce mode ;
- ✓ **L'efficacité énergétique** des véhicules (**EE**), mesurée par $\mathbf{E_i/C_i}$ qui correspond aux consommations d'énergie d'un véhicule qui parcourt un kilomètre, en tep/veh.km ;
- ✓ **L'intensité carbone** de l'énergie (**IC**), dont le rapport $\mathbf{CO_{2,i}/E_i}$ correspond à la quantité d'émissions de CO_2 par unité d'énergie consommée du mode i, en tCO_2/tep.

2.2.Explications sur l'utilisation du LMDI

Points et messages clés :

- ✓ Le log-mean divisia index (**LMDI**) est la méthode de décomposition la plus utilisée.
- ✓ La méthode de **calcul** et l'**interprétation** des coefficients sont relativement simples et sont explicités dans cette partie.

Depuis que les analyses de décomposition se sont développées, les méthodes de décomposition ont évolué et se sont progressivement tournées vers l'utilisation du log-mean divisia index (LMDI), comme indiqué précédemment. L'objectif est ici de présenter de manière simple les avantages de cette méthode, comment fonctionne le calcul des facteurs de la décomposition, ainsi que l'interprétation des résultats des décompositions en formes additives et multiplicatives.

Pour mieux en comprendre l'utilisation et la forme des résultats, il peut être utile de regarder au préalable comment se présentent les résultats (Figure 12 et Figure 13 en 3.1.1 par exemple). Pour davantage d'informations sur les techniques de décomposition, se référer à leur comparaison par Ang (2004), et pour son utilisation aux guides réalisés par le même auteur (Ang, 2005 ; 2015 ; 2016).

La décomposition utilisée prend la forme d'une somme des émissions des i modes, avec pour chaque mode une décomposition en 5 facteurs multiplicatifs :

$$\mathbf{CO_{2,Transport} = \sum_i D.\frac{D_i}{D}.\frac{C_i}{D_i}.\frac{E_i}{C_i}.\frac{CO_{2,i}}{E_i}}$$

Au-delà de cette forme statique de l'identité, l'objectif du LMDI est de décomposer l'évolution de ces émissions au cours du temps, en attribuant la part respective de l'évolution qui est imputée à chacun des 5 facteurs, qui peuvent jouer à la hausse ou à la baisse sur l'évolution des émissions. La résultante correspond à la somme des contributions des 5 facteurs (forme additive) ou à leur multiplication (forme multiplicative).

Avec la **forme additive** du log-mean divisia index (LMDI), l'objectif est de décomposer la variation d'émissions de CO_2 des transports entre deux années, en variations absolues que l'on peut additionner. La contribution liée à chaque facteur peut être exprimée en ± x $MtCO_2$.

$$\mathbf{\Delta CO_{2,tot} = CO_2^T - CO_2^0} = \Delta CO_{2,DT} + \Delta CO_{2,RM} + \Delta CO_{2,TR} + \Delta CO_{2,EE} + \Delta CO_{2,IC}$$

Le calcul de la contribution de chaque facteur consiste en une somme pondérée des taux de croissance logarithmiques (Ang, 2004). Dans l'exemple suivant, la formule pour le calcul de la contribution de l'efficacité énergétique entre 2010 et 2015 est donnée. La première partie de la formule représente la pondération des émissions de chaque mode de transport entre les deux années considérées, la deuxième donne l'évolution de l'efficacité énergétique de chaque mode sur la période. Les contributions de chaque mode sont additionnées :

$$\mathbf{\Delta CO_{2,EE}} = \sum_i L(CO_{2,i}^{2015}; CO_{2,i}^{2010}).\ln\left(\frac{EE_i^{2015}}{EE_i^{2010}}\right)$$

avec $L(a,b) = \frac{a-b}{\ln a - \ln b}$ la moyenne logarithmique de a et b. Par exemple, pour calculer les émissions moyennes du mode i entre les deux dates, le calcul suivant est appliqué :

$$L(CO_{2,i}^{2015}; CO_{2,i}^{2010}) = \frac{CO_{2,i}^{2015} - CO_{2,i}^{2010}}{\ln(CO_{2,i}^{2015}) - \ln(CO_{2,i}^{2010})}$$

La pondération par les émissions de chaque mode implique logiquement qu'un gain d'efficacité énergétique de 10 % sur un mode de transport comme le voiture qui représente de l'ordre de 80 % des émissions aura un impact bien plus important (8 %) que s'il concerne un mode qui ne représente que 2 % des émissions comme le ferroviaire (gain de 0,2 %).
Ce raisonnement simple pour évaluer la contribution de chaque mode à un facteur est celui qui est utilisé dans les formules du LMDI, avec la légère complication d'utiliser des moyennes et des taux de croissance logarithmiques, pour que ceux-ci soient réversibles.
Ainsi, si par exemple il y a une augmentation de 50 % des émissions entre l'année A et B de 100 à 150 $MtCO_2$), on ne pourra pas dire que les émissions de l'année A sont inférieures de 50 % à celles de l'année B, car elles lui sont inférieures de 33,3 %. En revanche, les changements relatifs sont symétriques dans le cas du logarithme : ln(150/100) = 0,41 et ln(100/150) = -0,41. L'utilisation du logarithme permet ainsi de passer le 'time-reversal test' que toutes les méthodes de décomposition ne remplissent pas forcément. Grâce à cette propriété, en décomposition multiplicative, l'estimation du changement d'un facteur de l'année 0 à T est la réciproque de l'année T à 0. Pour la décomposition additive, les valeurs sont égales mais de signe opposé (Ang, 2004).

La **forme multiplicative** de la décomposition considère des changements relatifs par rapport à une année de base. La lecture de la contribution de chaque facteur peut ainsi être donnée par rapport à une base 1 (ou base 100) en année de référence, ou comme un pourcentage d'évolution des émissions liés à ce facteur. Il suffit de multiplier la contribution de chaque facteur entre deux années pour retrouver la variation totale des émissions sur cette période (par exemple, facteur de 1,2 si les émissions ont augmenté de 20 %).
Un facteur supérieur à 1 s'interprète comme une contribution à l'augmentation des émissions liée à ce facteur, au contraire d'une baisse pour un facteur inférieur à 1 (-25 % par exemple pour un facteur de 0,75).
La décomposition entre une année 0 et T se décompose de la manière suivante :

$$\mathbf{D_{tot}} = \frac{\mathbf{CO_2^T}}{\mathbf{CO_2^0}} = D_{DT}.\ D_{RM}.\ D_{TR}.\ D_{EE}.\ D_{IC}$$

Le calcul de chaque facteur se fait cette fois avec la formule suivante, dans laquelle se retrouve la somme pondérée des taux de croissance logarithmiques, avec au milieu de la plus grande parenthèse la part des émissions du mode i dans les émissions des transports :

$$\mathbf{D_{EE}} = \exp\left(\sum_i \frac{L(CO_{2,i}^{2015};CO_{2,i}^{2010})}{L(CO_2^{2015};CO_2^{2010})}.\ln\left(\frac{EE_i^{2015}}{EE_i^{2010}}\right)\right)$$

Parmi les avantages du LMDI, le **lien entre les formes additives et multiplicatives** est relativement simple, de la forme suivante :

$$\frac{\mathbf{\Delta CO_{2,EE}}}{\mathbf{\ln D_{EE}}} = L(CO_2^{2015};CO_2^{2010}) = \frac{CO_2^{2015} - CO_2^{2010}}{\ln(CO_2^{2015}) - \ln(CO_2^{2010})} = \frac{\Delta CO_{2,tot}}{\ln D_{tot}}$$

En plus de cet avantage, du passage du 'time-reversal test', du 'factor-reversal test' (aucun résidu à la décomposition) qui lui donnent des fondations théoriques solides, son utilisation et son interprétation sont faciles (Ang, 2004), ce qui explique son utilisation croissante ces dernières années.

2.3.Périmètre et données utilisées

Points et messages clés :

- ✓ Le **périmètre** concerne les transports de passagers et marchandises, en France, sur 1960-2017, en considérant uniquement les émissions directes (du réservoir à la roue).
- ✓ Les **données** utilisées viennent principalement des compilations publiques.
- ✓ Les principales **incertitudes** et choix méthodologiques importants (en particulier les VUL répartis entre voyageurs et fret) sont expliqués.

L'étude considère à la fois le **transport de passagers et de marchandises**, dans des décompositions qui sont séparées, en raison des unités de demande de transport (voy.km et t.km) qui ne permettent pas de mélanger les deux sous-secteurs en une seule décomposition.

Les principaux graphiques et l'analyse concernent les transports en France, compris comme le **transport intérieur**. Pour le transport de voyageurs et de marchandises terrestres (routier et ferroviaire) et fluvial, la part des trajets internationaux qui est réalisée sur le territoire français est comptée. Pour l'aérien, les trajets avec l'Outre-mer sont compris, mais pas le trafic international. Une décomposition est cependant réalisée avec l'aérien international compris (voir la partie sur l'aérien en 3.3.3 et notamment la Figure 32).
Pour la navigation, uniquement le trafic fluvial est considéré. Il n'a pas été testé de faire une analyse avec le transport maritime compris, pour au moins trois raisons : le manque de données sur la demande en t.km ; le fait qu'une partie importante du trafic maritime arrive indirectement par les pays voisins et dont les émissions ne sont pas recensées en France ; et enfin le fait que cette demande est tellement importante (le maritime représente 70 % des t.km au niveau mondial ; SLoCaT, 2018 ; voir aussi 3.3.4) qu'elle modifierait probablement de manière très significative les facteurs de demande totale ou de report modal, sans que cette croissance du maritime puisse vraiment être considérée comme un report modal depuis les transports terrestres vers le maritime.

La période étudiée s'étend de **1960 à 2017**, ce qui permet de capturer des tendances de long terme et de mieux mettre en perspective le récent plafond des émissions et les éventuels effets des politiques environnementales dans les transports sur les émissions.

Les émissions considérées sont uniquement les **émissions de CO_2**, sans compter les émissions des autres gaz à effet de serre des transports, qui représentent 3,7 % des émissions des transports en 2017 d'après l'inventaire SECTEN, en raison principalement des émissions des HFC (hydrofluorocarbures ; 2,4 %), le N_2O (protoxyde d'azote, 1,1 %) et le CH_4 (méthane, 0,1 %), majoritairement dans le transport routier à chaque fois (CITEPA, 2019). De même, les autres effets réchauffants liés aux émissions de l'aérien ne sont pas pris en compte, ils seront évoqués en chapitre 4.
Aussi il est considéré uniquement les **émissions directes**, appelées aussi scope 1 ou du réservoir à la roue (TTW : tank-to-wheel en anglais), c'est-à-dire les émissions à la sortie du pot d'échappement, sans même compter les émissions liées à la production de l'énergie utilisée dans les transports.

Les principales émissions amont de la production de l'énergie sont liées aux **carburants pétroliers**, pour lesquels l'exploitation, le transport, le raffinage et la distribution ajoutent de l'ordre de 15 à 30 % d'émissions par rapport aux seules émissions liées à la combustion (MTES, 2018 ; JRC, 2017, 2019). Cet ordre de grandeur n'ayant sûrement que peu évolué historiquement et étant relativement proportionnel aux émissions directes, la simplification des émissions directes n'a sûrement que peu d'impacts sur les facteurs multiplicatifs des décompositions. Il est cependant important de retenir que l'analyse ne porte pas sur l'ensemble des émissions liées aux transports, qui au-delà de la production de l'énergie concerne également le cycle de vie complet des véhicules et des infrastructures, en particulier pour leur construction. Le manque de données sur ces éléments demanderait une analyse spécifique qui n'est pas l'objet de cette analyse.

Le choix des émissions directes implique également que les émissions de la production de l'**électricité** ne sont pas comptées. L'électricité dans les transports ne représente cependant que 2 % de ses consommations d'énergie des transports et l'équivalent de 0,4 % de ses émissions totales, essentiellement pour le transport ferroviaire à ce jour. Leur prise en compte multiplierait le facteur d'émission du ferroviaire et donc ses émissions par environ 2,5 en 2017, ce qui ne changerait cependant qu'assez peu les termes des décompositions, car le ferroviaire resterait de l'ordre de 13 fois moins émetteur que le routier individuel par km parcouru. En revanche, les émissions de l'électricité dans les transports étaient maximales au milieu des années 1970, alors que le réseau ferroviaire électrique se développait et avant le développement du parc nucléaire qui a permis de baisser le facteur d'émission de l'électricité : à ce moment-là, les émissions de l'électricité que l'on peut accorder aux transports ferroviaires étaient de l'ordre de 2,8 $MtCO_2$, soit près de 4 % des émissions des transports de l'époque (CGDD, 2019b ; CGDD, 2019d ; IEA, 2009 dans Xpair, 2011). La prise en compte de ces émissions aurait quelque peu retardé et réduit la baisse du facteur d'intensité carbone du ferroviaire, élément développé en partie 3.3.2.

Enfin, la question de la prise en compte des émissions de CO_2 des **agrocarburants** est entière. Dans les inventaires d'émissions du CITEPA auprès de la CCNUCC (Convention Cadre des Nations Unies pour le Changement Climatique), elles sont notées en "CO_2 biomasse hors bilan" et ne sont pas comptés dans le principal bilan des émissions des transports. Le bilan carbone est considéré neutre en postulant que le CO_2 émis a été retiré de l'atmosphère à la croissance des plantes. Cette hypothèse est en réalité trompeuse, et sera discutée en partie 3.2.5 de ce chapitre sur l'intensité carbone, puis dans le chapitre 4. Les émissions seront présentées principalement hors combustion de la biomasse. Leur ajout apparaîtra en pointillé sur certaines figures.

Concernant les **modes actifs**, aucune consommation énergétique ni émission n'est prise en compte dans la décomposition. La méthode LMDI ne prenant pas en compte les valeurs 0 dans les données, des valeurs infinitésimales ont été remplacées pour les consommations et les émissions des modes actifs.

Les principales **données nécessaires** pour effectuer la décomposition sont, comme il a été vu précédemment, la demande de transport par mode, le trafic, les consommations d'énergie et les émissions de CO_2 pour les modes considérés.

Les **cinq modes** considérés pour le transport de **voyageurs** sont : le transport routier individuel, avec les voitures particulières (VP), les deux-roues motorisés (2RM) et 60 % des véhicules utilitaires légers (VUL) ; le transport routier collectif, comprenant les bus et cars (B&C) ; le transport ferroviaire, depuis les tramways et métros jusqu'aux trains à grande vitesse (TGV) ; le transport aérien, généralement uniquement le trafic intérieur (métropole et trajets avec l'Outre-mer), sauf exception précisée ; enfin, les modes actifs, c'est-à-dire la marche et le vélo.
Pour le transport de **marchandises**, les **quatre modes** considérés sont : les poids-lourds, 40 % des VUL, le fret ferroviaire, et enfin le transport fluvial.

Les **véhicules utilitaires légers**, qui représentent 17 % des émissions intérieures en 2017, sont difficiles à prendre en compte dans les décompositions. En effet, leur utilisation se répartit à la fois entre du transport de voyageurs par des particuliers ou professionnels, et du transport de marchandises, en particulier pour de petits volumes et les derniers kilomètres de la logistique. Les données et enquêtes sont peu nombreuses et ne sont pas régulièrement mises à jour. Les dernières enquêtes du CGDD sur leur utilisation ont donc été analysées (CGDD, 2012, 2014 ; voir détails de l'analyse en Tableau 6, en 3.3.1). L'analyse montre qu'environ 60 % des véhicules.km parcourus par les VUL étaient utilisés pour des motifs de transport de voyageurs (trajets domicile-travail, achats, loisirs, voyage, etc.) et les 40 % restants pour du transport de marchandises (comprenant aussi le transport de matériels, de déchets, les livraisons, etc.).
Ainsi, **60 %** des trafics en VUL sont intégrés dans les transports routiers individuels, en supposant des taux de remplissages équivalents aux VP. Cette intégration n'influence qu'assez peu les résultats de la décomposition voyageurs, car l'évolution des VUL est proche des VP, qui représentent la majeure partie des émissions. Pour le transport de marchandises, les **40 %** de trafics des VUL sont séparés des poids-lourds pour en faire un mode à part entière de la décomposition, tout comme les transports routiers individuel et collectif sont séparés pour les voyageurs. Ce choix permet de faciliter l'interprétation des coefficients de la décomposition. En divisant la demande en t.km réalisée par les VUL (CGDD, 2019c) par le trafic de 40 % des VUL, cela donne un taux de remplissage de l'ordre de 0,5 t/véhicule, chiffre cohérent avec les autres estimations de la littérature. La proportion 60%/40% est supposée constante au cours du temps, faute de données sur son éventuelle évolution.

Tableau 5 : Principales sources des données utilisées dans le travail de décomposition

		Demande	Circulation	Energie	Emissions
		voy.km / t.km	veh.km	tep	tCO_2
Voyageurs	VP + 2RM + 60 % VUL	CGDD, OCDE	CITEPA, CGDD	CITEPA	CITEPA
	Bus + Autocars	CGDD	CITEPA	CITEPA	CITEPA
	Ferroviaire	CGDD, SNCF	CGDD, SNCF, Omnil	CGDD, SNCF	CITEPA, CGDD
	Aérien	CGDD, DGAC	DGAC	CITEPA	CITEPA
	Modes actifs	Estimation à partir de Papon, 2012		ε	ε
March.	Poids-lourds	CGDD, CITEPA	CITEPA	CITEPA	CITEPA
	40 % VUL	CGDD, CITEPA	CITEPA	CITEPA	CITEPA
	Ferroviaire	CGDD, SNCF	CGDD	CITEPA, SNCF	CITEPA, CGDD
	Fluvial	CGDD	Estim. à partir CGDD	CITEPA	CITEPA

Les **sources des données** des décompositions sont compilées en Tableau 5. Les principales données d'émissions de CO_2, de consommations d'énergie et de trafics routiers sur 1960-2017 viennent du CITEPA (centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique), qui est chargé des inventaires officiels d'émissions en France. Ainsi la cohérence est assurée concernant les périmètres, modes de calculs et la continuité temporelle pour ces données. Pour le reste, de nombreuses données n'étaient pas directement disponibles, en particulier pour les demandes de transport avant 1980, la majorité des séries compilées dans les fichiers du ministère commençant en 1980 ou 1990. De même, certaines séries ont subi des ruptures de données au cours de la longue période étudiée. Un important travail de recherche de statistiques a donc été réalisé afin de croiser de nombreuses sources, de corriger et/ou d'estimer correctement les données manquantes. La majorité des données de demandes viennent des mémentos des transports et des comptes des transports (CGDD, 2019b ; CGDD, 2019c), dont les plus anciens documents sont en version PDF : de nombreuses séries ont été recopiées à la main, et les ruptures de séries ou changements de méthodologie scrutés avec attention pour réaliser des corrections statistiques lorsque cela était nécessaire.

Malgré ce travail statistique, des **incertitudes** sur les données sont bien évidemment présentes, que ce soit par la méthode de production des données, par la possible non correspondance de certaines données entre elles (en cas de périmètres légèrement différents par exemple), ou par des ruptures de séries qui n'auraient pas été vues ou corrigées. La compilation des statistiques a notamment relevé des différences significatives selon les sources statistiques pour les **estimations** de demande pour les modes actifs, les deux-roues motorisés, ou encore les bus et cars sur les premières années de la décomposition (évoquées en 3.3.1). Pour d'autres variables, les données nécessaires n'étaient pas présentes et ont dû faire l'objet d'estimations, en particulier : la demande en voy.km et véhicules.km pour l'aérien en France et à l'international avant 1990 (estimée notamment à partir des croissances du nombre de passagers, ou des données des compagnies aériennes françaises), les taux de remplissage des bateaux (estimés à partir de l'augmentation de la capacité des navires) ou encore les consommations d'énergie de la RATP (estimées à partir des trafics).

Ces estimations et incertitudes ont amené aux **précautions suivantes** dans la suite de l'étude, afin de s'assurer qu'elles ne remettent pas en question les résultats présentés :

- ✓ Les décompositions additives sont présentées avec un pas de temps de 5 ans (et non 1 an) de 1960 à 2015, afin de considérer uniquement des tendances de moyen terme et ne pas risquer de voir apparaître des effets annuels (plus facilement visibles en additif qu'en multiplicatif) qui reflèteraient des incertitudes dans les données ;
- ✓ Les décompositions par mode, non présentes dans la publication académique en anglais et dont les éventuelles imprécisions peuvent n'avoir qu'une faible influence sur les tendances globales, ne seront pas données pour tous les modes de transport ;
- ✓ Des recherches parfois chronophages ont été réalisées lorsque le facteur concerné pouvait avoir une influence forte sur les résultats, comme par exemple pour le taux de remplissage des marchandises, où la série a été reconstruite à partir de nombreuses enquêtes TRM (transport routier de marchandises ; CGDD, 2018b).

En prenant ces précautions, les incertitudes ne remettent pas en cause les grandes tendances sur les facteurs explicatifs de l'évolution passée des émissions des transports, ainsi **les principales conclusions de l'étude sont robustes à ces incertitudes**.

3. Résultats et analyse des décompositions des émissions

3.1. Analyse par période

Points et messages clés :

- ✓ La **demande** a été le principal facteur explicatif de l'évolution des émissions sur la période, aussi bien pour les transports de voyageurs que de marchandises.
- ✓ Le **découplage entre demande et émissions est très faible** sur la période, les autres facteurs s'étant majoritairement compensés entre eux : les facteurs à la hausse sur les émissions sont le report modal et le remplissage des voitures, alors que le remplissage des poids-lourd, l'efficacité énergétique et l'intensité carbone ont joué à la baisse.
- ✓ Le **pic des émissions début 2000** est dû à un plafonnement de la demande pendant quelques années pour les voyageurs, couplé à l'efficacité énergétique, un léger report modal vers le train et au développement des agrocarburants ; pour les marchandises, le pic intervient via la chute de la demande lors de la crise de 2008.

Sur la période 1960-2017, les **émissions de CO_2 des transports ont été quasiment multipliées par 4** (de 32,4 à 126,2 $MtCO_2$, soit une multiplication par 3,9), avec un pic au début des années 2000 à 136 $MtCO_2$. Les émissions du transport de voyageurs représentent environ 70 % des émissions sur l'ensemble de la période, avec des émissions qui ont été multipliées par 4,2 pour passer de 22,1 à 90,5 $MtCO_2$. Les émissions du transport de marchandises ont été multipliées par 3,3, et sont passées de 10,4 à 34,5 $MtCO_2$ (Figure 11).

Le transport **routier** représente **97 %** des émissions en 2017, une part qui a fortement augmenté au cours de la période, en passant de 66 % des émissions en 1960 à 95 % des émissions dès le début des années 70, à la place du ferroviaire qui passait de 31 % à 2 % des émissions sur cette même période.

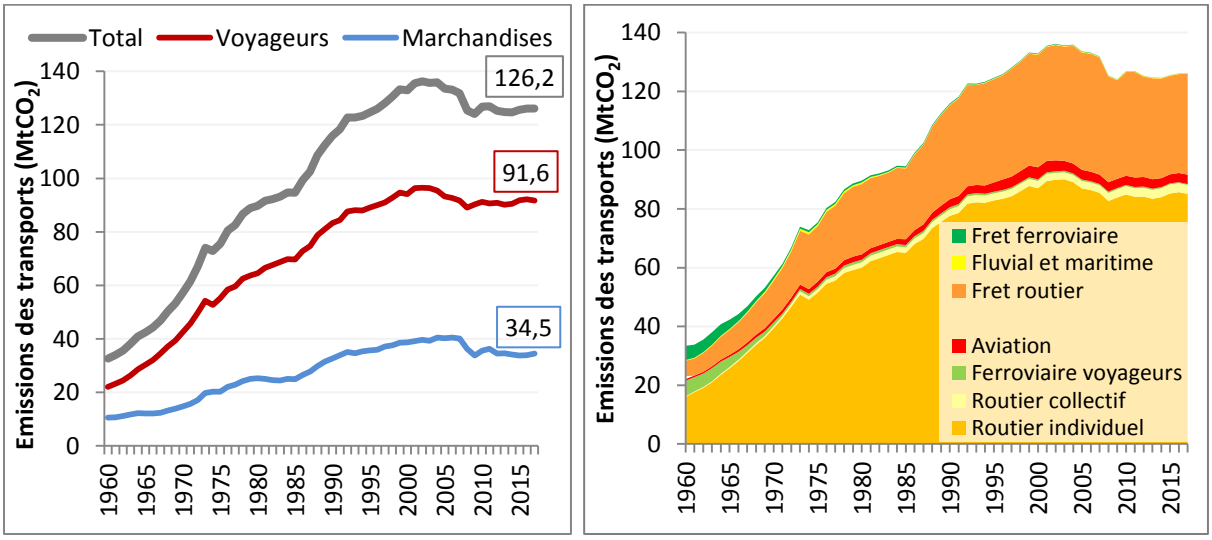


Figure 11 : Evolutions des émissions du transport de voyageurs et de marchandises (à gauche) par mode de transport considéré (à droite) sur 1960-2017

3.1.1. La période globale marquée par la demande

Pour le transport de voyageurs, la Figure 12 représente la décomposition multiplicative entre 1960 et 2017, évolution qu'il est possible d'expliquer par la multiplication des 5 facteurs de la décomposition. Sur la période, **la demande a été le principal facteur expliquant la hausse** des émissions, avec une multiplication par 4,7 des kilomètres parcourus par les voyageurs en

France, soit une augmentation un peu plus forte que les émissions. Cela signifie que les **émissions par kilomètre parcouru ont diminué de 13 %** dans le même temps, une baisse relativement faible sur 57 ans. Ce **faible découplage entre la demande et les émissions** s'explique par le fait que les 4 autres facteurs de la décomposition se sont principalement compensés entre eux : le report modal a eu un effet à la hausse sur les émissions sur la période en se faisant majoritairement vers les modes carbonés (facteur de 1,22, soit une hausse des émissions de +22 % liée au report modal) ; l'autre effet à la hausse concerne le taux de remplissage des véhicules et en particulier des voitures (qui a baissé, participant à la hausse des émissions de l'ordre de +28 %) ; l'efficacité énergétique a été le principal facteur à la baisse des émissions par la baisse des consommations par kilomètre (-37 %) ; enfin, l'intensité carbone de l'énergie s'est faiblement améliorée sur la période (-10 %).

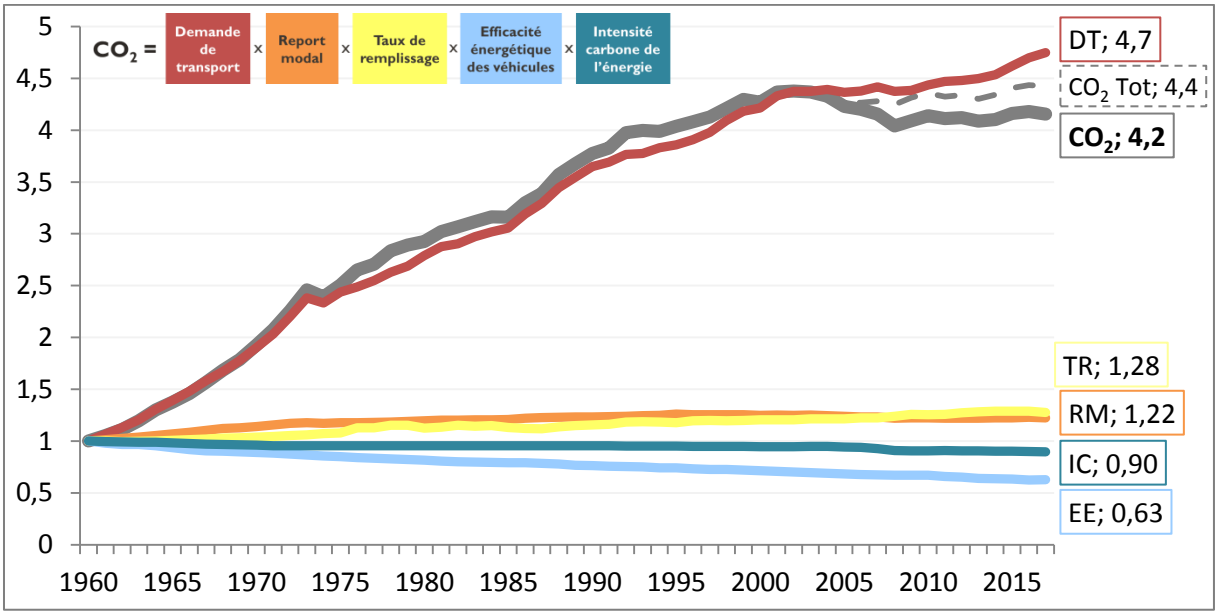


Figure 12 : Décomposition multiplicative de l'évolution des émissions de CO_2 du transport de voyageurs, 1960-2017
(pas de 1 an, courbe des émissions en pointillés avec CO_2 biomasse compris)

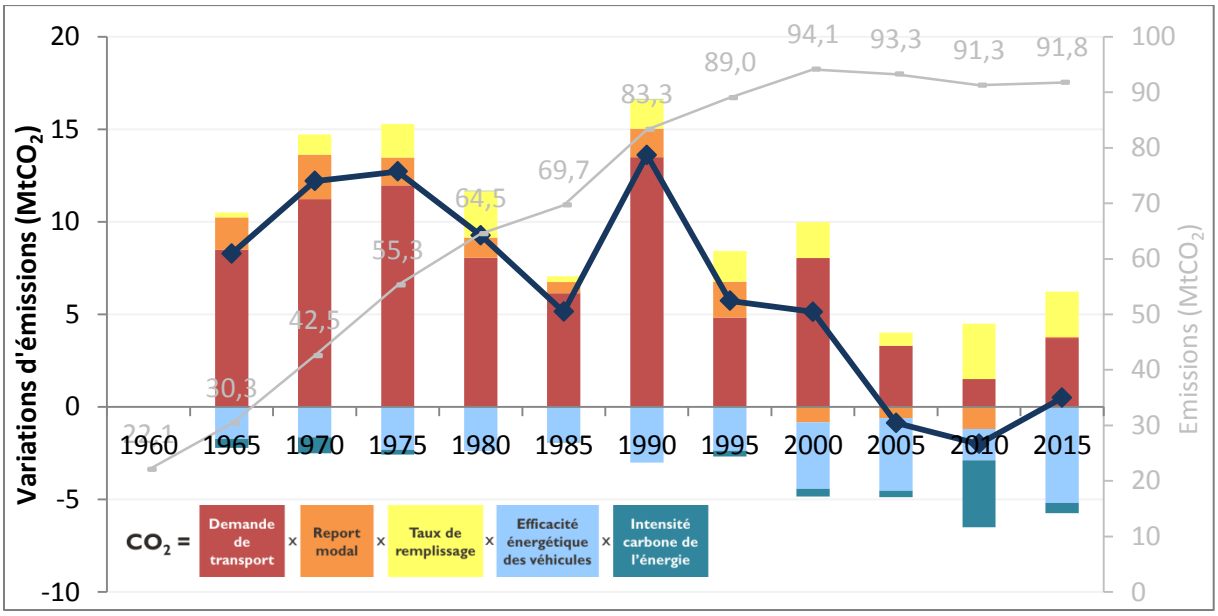


Figure 13 : Décomposition additive de l'évolution des émissions de CO_2 du transport de voyageurs de 1960 à 2015
(courbe grisée pour les émissions sur la période, leur variation tous les 5 ans en bleu marine)

La majeure partie de l'amélioration de l'intensité carbone est due au développement des agrocarburants, dont les émissions de combustion ne sont pas comptées (cf méthodologie en 2.3 ci-dessus, et 3.2.5). La courbe des émissions totales, en comptant les émissions de combustion de la biomasse des agrocarburants, apparait en pointillés "CO_2 Tot" sur la figure. Le découplage entre demande et émissions apparaît encore plus faible avec cette courbe.

Les grandes tendances décrites par la décomposition multiplicative se retrouvent dans la décomposition additive de 1960 à 2015 en Figure 13. La courbe grise représente l'évolution des émissions avec un pas de temps de 5 ans, la courbe de points bleus marine représente le différentiel entre 2 dates (par exemple 1965 représente les +8,2 $MtCO_2$ entre 1960 et 1965), expliqué par les 5 facteurs qui jouent à la hausse ou à la baisse sur les émissions.

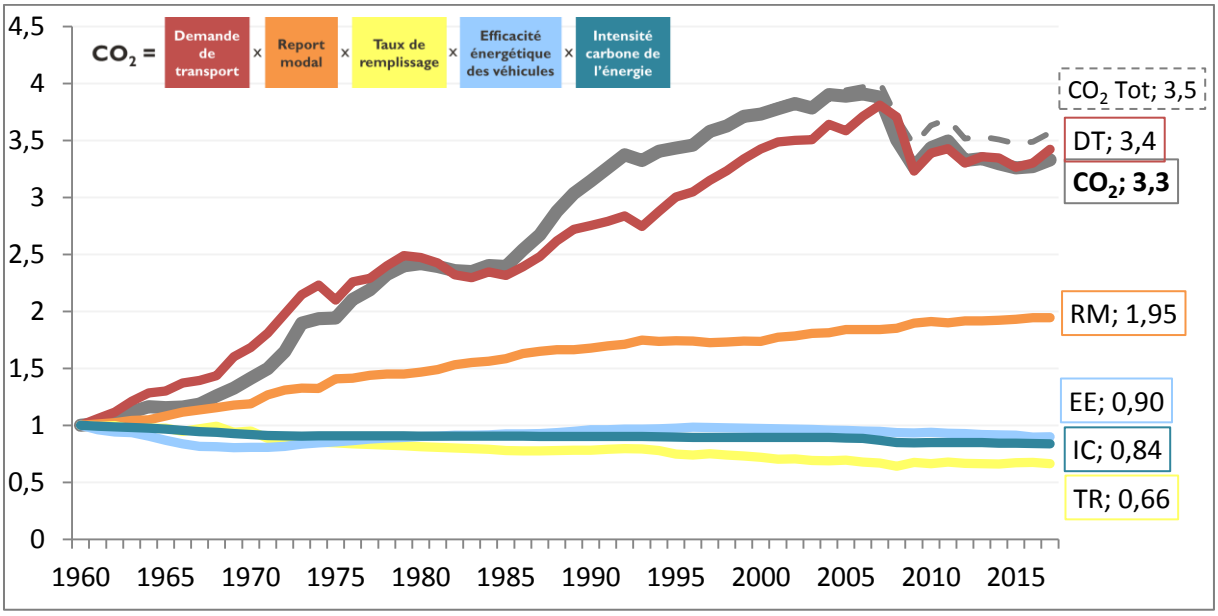


Figure 14 : Décomposition multiplicative de l'évolution des émissions de CO_2 du transport de marchandises 1960-2017
(pas de 1 an, courbe des émissions en pointillés avec CO_2 biomasse compris)

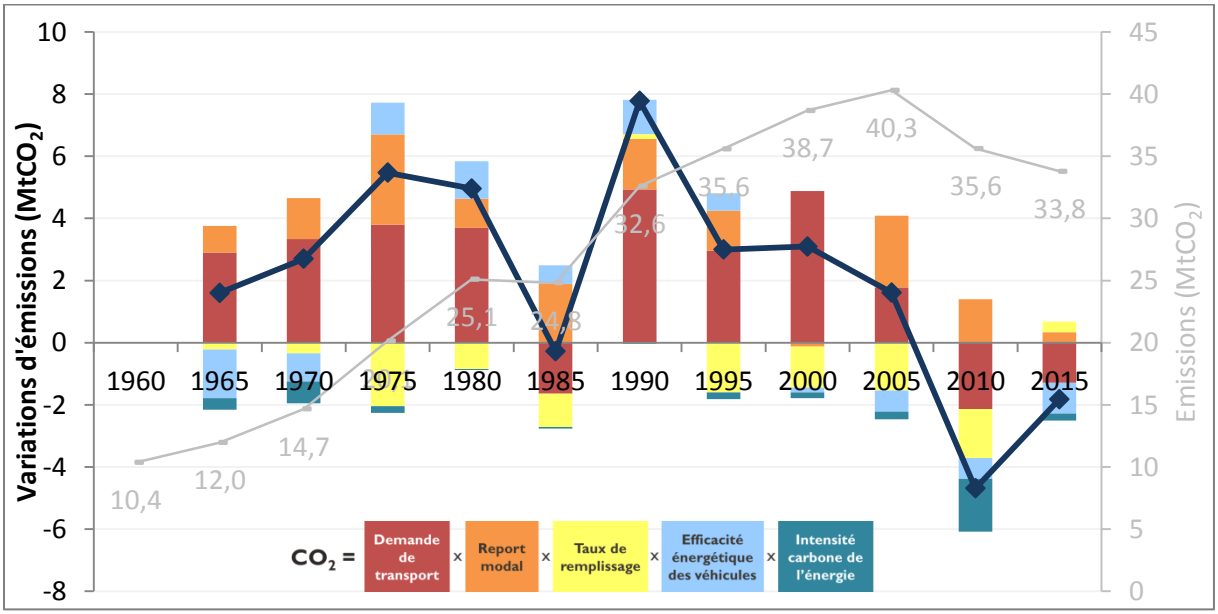


Figure 15 : Décomposition additive de l'évolution des émissions de CO_2 du transport de marchandises de 1960 à 2015
(courbe grisée pour les émissions sur la période, leur variation tous les 5 ans en bleu marine)

Les **décompositions multiplicative et additive du transport de marchandises** sont données en Figure 14 et Figure 15. Les émissions ont été multipliées par 3,3 sur la période. De nouveau, **la demande a été le principal facteur explicatif**, avec une multiplication par 3,4 des tonnes.kilomètres transportées. Le découplage entre demande et émissions est donc ici quasiment nul. Le report modal a également joué à la hausse des émissions, mais de manière beaucoup plus massive que pour les voyageurs. Le report modal vers le transport routier a participé à un quasi-doublement des émissions (facteur de 1,91, soit +91 %) par rapport à une situation où les parts modales seraient restées constantes. Le taux de remplissage s'est amélioré, contrairement aux voyageurs, et a notamment été en forte croissance pour les poids-lourds, participant à la baisse des émissions (-34 %). Cette amélioration permise par des poids-lourds plus capacitaires a dans le même temps limité leurs baisses de consommations par kilomètre, expliquant les moindres gains d'efficacité énergétique (-10 %) par rapport aux voyageurs. Enfin, l'intensité carbone s'est améliorée comme pour les voyageurs par le développement des agrocarburants, et par la sortie du charbon dans le ferroviaire en début de période. La part modale du ferroviaire étant plus forte pour les marchandises que pour les voyageurs en 1960, cela explique le plus fort impact de l'intensité carbone pour les marchandises (-16 %). En comptant les émissions de CO_2 liées à la combustion des agrocarburants (courbe "CO_2 Tot"), la croissance des émissions sur 1960-2017 apparaît légèrement plus forte que la croissance de la demande.

Encadré 2 : des tendances historiques similaires pour les autres pays du monde ?

Les grandes tendances observées durant la phase de croissance des émissions sont cohérentes avec la littérature existante pour la France, et également avec les tendances observées dans d'autres pays et régions du monde (Tableau 4) ou au niveau mondial entre 2000 et 2017 (IEA 2018b). La demande apparaît ainsi souvent comme la cause majeure de hausse des émissions, suivie par le report modal vers les modes routiers, et la baisse du taux de remplissage des voitures, évolutions dues à une croissance des taux de motorisation. Dans le même temps, l'efficacité énergétique des véhicules s'est améliorée partout dans le monde, en raison d'un marché des véhicules fortement mondialisé. Enfin, les transports restent partout très fortement dépendants du pétrole, expliquant la faible amélioration de l'intensité carbone jusqu'à aujourd'hui. Si ces tendances ont pu évoluer récemment pour certains pays développés (comme développé ci-dessous pour la France), un défi important existe pour que les pays en développement ne suivent pas cette même trajectoire à la hausse des émissions.

3.1.2. Une inflexion dans les années 2000, surtout liée à la demande

L'intérêt de réaliser la décomposition depuis 1960 est d'avoir un recul important sur les tendances longues de l'évolution des émissions et des 5 facteurs, et de pouvoir mieux évaluer les éventuelles ruptures qui ont eu lieu au début des années 2000 et qui expliquent le pic des émissions des transports à ce moment-là (Figure 11).

Pour les **voyageurs**, le pic des émissions intervient au début des années 2000 (voir Figure 11 et Figure 12). Ce pic est en partie dû à un plateau de la demande de transport entre 2002 et 2009, alors qu'elle augmentait auparavant. Cette stagnation s'explique par une baisse du nombre de kilomètres parcourus par personne sur ces années, compensée par la croissance de la population (cf 3.2.1). Dans le même temps, les émissions par kilomètre sont en baisse depuis 1993, d'environ -0,8 %/an sur 1993-2017, sans rupture visible au début des années

2000. Ainsi la décomposition additive en Figure 13 montre qu'en dehors de la demande, les facteurs à la baisse (essentiellement l'efficacité énergétique) l'emportent sur l'effet à la hausse du taux de remplissage à partir de la période 1995-2000 (point 2000 sur la figure). Au-delà de l'efficacité énergétique qui agissait déjà à la baisse des émissions avant les années 90, le report modal a joué dans le sens d'une baisse des émissions à partir de 1995, alors que le facteur avait un effet à la hausse sur les premières décennies de la décomposition. Enfin, le développement des agrocarburants, a eu un effet à la baisse important sur le pas de temps 2005-2010. En comptant les émissions de ces agrocarburants, c'est davantage un plateau qu'un pic qui apparaît dans les émissions de CO_2 depuis le début des années 2000.

Pour les **marchandises**, le point haut des émissions se situe en 2007, après une légère stagnation des émissions sur les années précédentes. Le lien avec la demande de transport qui a fortement chutée au moment de la crise économique de 2008-2009 est très clair. Comme pour les voyageurs, les émissions unitaires (par t.km) baissent à partir de 1993, sur un rythme moyen de -0,9 %/an jusqu'à 2017. Cette baisse s'explique par une contribution plus positive de l'efficacité énergétique, un moindre effet négatif du report modal pour certains pas de temps, et par le développement des agrocarburants, en particulier pour l'intervalle 2005-2010. Depuis la crise, la demande et les émissions sont plutôt stables, et la demande est à un niveau similaire qu'en 2000.

L'effet de la crise de 2008 montre que les **crises économiques** ont un impact plus important sur le transport de marchandises que pour les tendances sur les voyageurs. Les chocs pétroliers de 1973 et 1979 ont eu des impacts sur la demande et les émissions du transport de voyageurs, qui ont des taux de croissance bien plus faibles après 1973 qu'avant le 1er choc pétrolier. En revanche, la demande est plus rapidement repartie à la hausse que pour les marchandises, dont la demande a été en baisse sur le début des années 80, laissant penser à un impact davantage sur la durée du second choc pétrolier.

3.1.3. Une hausse récente des émissions, probablement conjoncturelle

Sur la période récente de la décomposition, **les émissions ont ré-augmenté entre 2014 et 2017**, de 124,6 à 126,2 MtCO2, soit +1,2 %. Cette hausse est faible mais questionnante alors qu'une baisse des émissions de l'ordre de -2 %/an était prévue pour atteindre le premier budget carbone 2015-2018 (127 $MtCO_2$ sur la période, comparé à 136 $MtCO_2$ en 2013 ; MEDDE, 2015). La hausse est valable aussi bien pour les voyageurs depuis 2013, que pour les marchandises sur la période 2015-2017. Bien que la précision des données nécessite de prendre les résultats de très court terme avec précaution, il semblerait que cette hausse soit due en particulier à la croissance de la demande, dans un contexte de baisse du prix du pétrole depuis le milieu de l'année 2014. Cela est cohérent également avec le fait que la demande a été et reste le facteur majeur de l'évolution des émissions, et que ce facteur peut avoir de fortes évolutions de court terme par rapport aux autres facteurs qui ont généralement davantage d'inertie. Aussi il ne semble pas y avoir eu de variations importantes concernant les autres facteurs qui auraient pu expliquer la hausse récente des émissions. Si le principal facteur semble être la demande et en particulier le prix du pétrole, il est possible que cette hausse soit conjoncturelle, comme semble le confirmer la baisse des émissions de -1,8 % en 2018 et -0,1 % en 2019 (CITEPA, 2020).

3.2.Analyse par facteur d'évolution

Points et messages clés :

- ✓ La **demande de transport** a été le principal facteur d'évolution des émissions par le passé. Elle est influencée par de nombreux facteurs à court et long terme : population, PIB, prix des carburants, aménagement du territoire, vitesse et coûts des transports…
- ✓ Le **report modal** s'est fait essentiellement vers les modes routiers sur la période, malgré un faible report vers le train pour les voyageurs depuis la fin des années 90.
- ✓ Le **taux de remplissage** des véhicules s'est amélioré pour quasiment tous les modes par des véhicules plus capacitaires, sauf pour la voiture qui fait exception.
- ✓ L'**efficacité énergétique** des véhicules s'est régulièrement améliorée, compensés en partie par les fortes hausses du poids et du remplissage pour certains modes.
- ✓ L'**intensité carbone** a peu évoluée sur la période, hormis la fin du charbon dans le ferroviaire au début des années 70, et le développement des agrocarburants dont l'analyse en cycle de vie montre en réalité des émissions similaires au pétrole.

Au-delà des tendances générales expliquées précédemment concernant l'impact des 5 leviers sur les émissions, cette partie vise à décrire les principaux facteurs et changements qui sous-tendent l'évolution de chacun des 5 facteurs sur les émissions.

3.2.1. Demande de transport

La **demande de transport a été le facteur principal d'évolution des émissions** du transport de voyageurs et de marchandises. Son impact est majeur à la fois sur les tendances de long terme pour l'ensemble de la période 1960-2017, et sur les variations de court terme. Sur la période, la tendance de la demande a été essentiellement à la hausse jusqu'au début des années 2000, avec cependant des taux de croissance à la baisse au fil des décennies : si la demande de transport augmentait de +6,7 %/an pour les voyageurs et de +5,4 %/an pour les marchandises sur la décennie 1960, depuis 2000 elle n'augmente plus que de +0,7 %/an en moyenne pour les voyageurs et le niveau de demande en 2017 est similaire à celui de 2000 pour les marchandises.

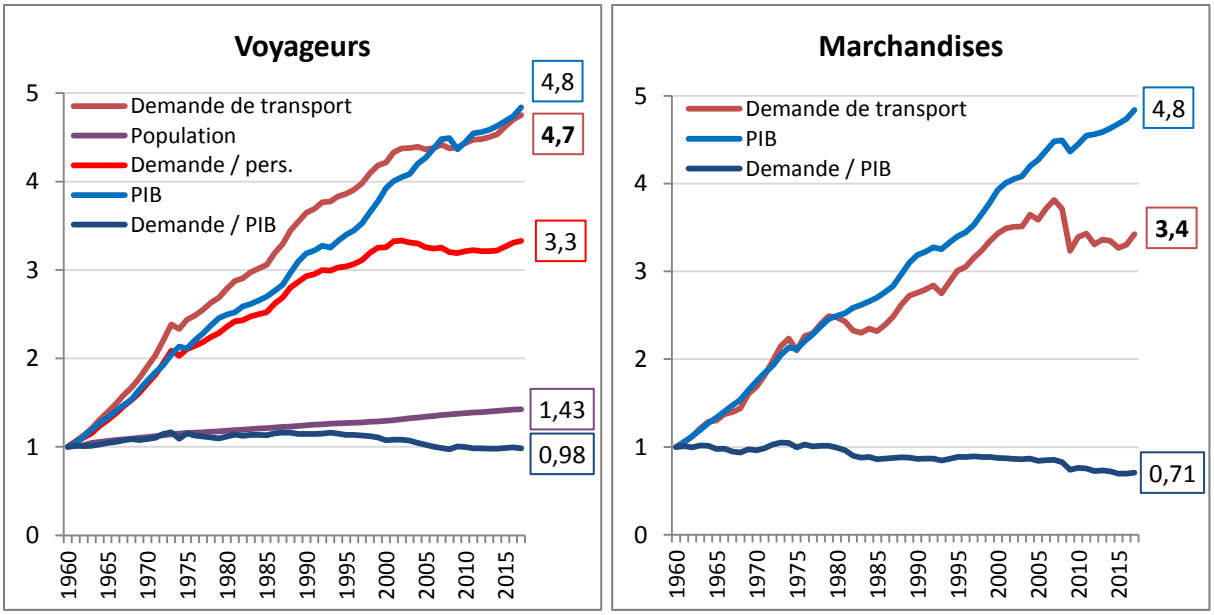


Figure 16 : Demande de transport de voyageurs et de marchandises et déterminants de la population et du PIB
(demandes en voy.km et t.km, données issues de la compilation ; source pour population et PIB réel : Insee, 2020)

Parmi les facteurs d'évolution de la demande, il est possible de citer en premier lieu la **population**, qui a augmenté régulièrement sur le période, et est passée de 45 à 65 millions d'habitants, soit une hausse de 43 % entre 1960 et 2017. La demande par personne a cependant augmenté davantage, multipliée par 3,3 pour les kilomètres parcourus par personne et de 2,4 pour le transport de marchandises (en t.km par personne). En revanche, depuis 2000, la population est le principal facteur de croissance de la demande de voyageurs, puisque la demande a augmenté de 0,7 %/an et que la population a augmenté de quasiment 0,6 % sur la période. La demande individuelle a baissé sur la décennie 2000 avant de ré-augmenter durant la décennie 2010 (Figure 16), participant à la reprise de la hausse des émissions.

Un autre facteur conditionnant fortement la demande est la **croissance du PIB** (produit intérieur brut, en prix de l'année précédente chaînés). Le PIB a été multiplié par 4,8 sur la période, de manière similaire à la demande voyageurs. Sur le début de la période, la demande de transport de voyageurs a augmenté plus fortement que le PIB, alors que la demande augmente moins fortement depuis le milieu des années 90. Pour le transport de marchandises, le PIB et la demande ont évolué de manière proche, hormis deux baisses dans l'intensité en transport du PIB après le second choc pétrolier de 1979 et avec la crise de 2008 (Figure 16).
Le lien entre croissance du PIB et demande de voyageurs est bien documenté, et la croissance du PIB agit par de nombreux canaux. Tout d'abord, par la capacité à construire de nouvelles **infrastructures** de transport et à fournir une **offre** de transports en commun, qui nécessitent des soutiens publics. Aussi par la hausse du revenu des ménages, qui permet : de démocratiser l'achat de véhicules et augmente la **motorisation des ménages** ; de baisser le **coût relatif** de la mobilité, et ainsi d'augmenter la vitesse généralisée (voir chapitres 3 et 4 ; pour les liens demande et PIB, voir aussi Schafer, Victor, 2000 ; Crozet, 2016). Ainsi, la croissance du PIB a des effets à la hausse sur des déterminants majeurs de l'offre et de la demande de mobilité.
Cette imbrication des deux variables est également importante et évidente pour le transport de marchandises, avec un lien qui apparaît également dans les deux sens : si une plus forte croissance nécessite davantage de transport de ressources, de biens intermédiaires et finaux, la baisse du coût des transports est également une condition pour la croissance des échanges commerciaux et du développement économique.
Ces liens sont valables aussi bien pour les tendances de long terme que pour les variations de court terme, pour lesquelles la croissance du PIB a une forte influence. Sur la période 1960-2017, le lien entre croissance du PIB et des kilomètres parcourus en Figure 17 apparaît clairement. Le coefficient de la régression linéaire indique une croissance de 0,9 % de la demande quand le PIB augmente d'1 % (qui peut être interprété comme une élasticité de la demande au PIB de 0,9 ; avec $R^2 = 0,52$). Ce coefficient a toutefois une tendance à la baisse au cours du temps, comme cela a été relevé en Figure 16 ou sur une plus longue période depuis 1850 au Royaume-Uni (Fouquet, 2012). L'effet du PIB apparaît fort également pour le trafic de marchandises, avec cette fois un coefficient supérieur à 1 (1,61) indiquant une réaction plus forte au PIB, mais une régression qui passe sous l'origine, indiquant plutôt une demande en baisse (de -2,3 %) en cas de croissance nulle ($R^2 = 0,69$, supérieur aux voyageurs). La prise en compte du transport maritime international pourrait cependant modifier ces tendances, dans un contexte de mondialisation augmentant fortement la part du transport international.

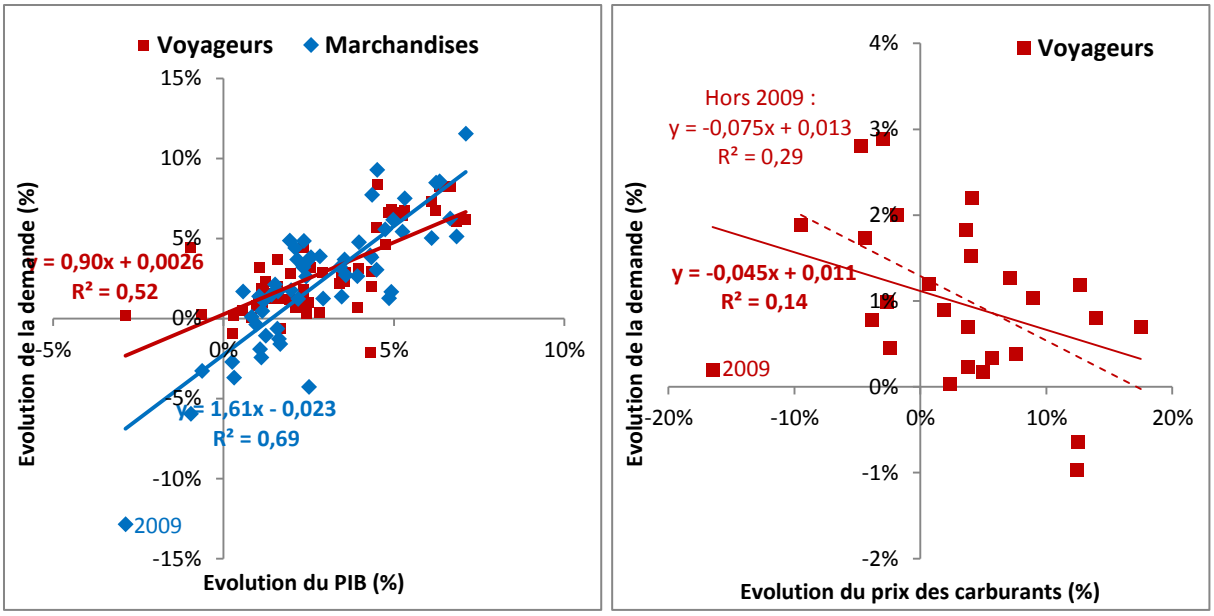


Figure 17 : Evolution annuelle de la demande en fonction du PIB (à gauche) et du prix des carburants (à droite) (voyageurs et marchandises à gauche pour le PIB, sur la période 1960-2017, données de PIB Insee, 2020 ; demande de voyageurs uniquement pour le prix des carburants à droite, sur 1990-2017, données de prix du CGDD, 2019b)

Un autre facteur économique avec de forts effets de court terme concerne le **prix des carburants**, principalement influencé par le cours du pétrole sur les marchés internationaux et plus marginalement par les évolutions de taxations ou de marges des distributeurs.

Le prix des carburants représente 80 % du coût marginal de la voiture, coût qui détermine fortement les comportements de mobilité pour les ménages possédant une voiture (chiffres AQM, 2020). Aussi l'effet de ses variations est bien plus marqué pour les voyageurs que pour le transport de marchandises. Ce s'explique par une plus faible part des carburants dans le coût marginal, et probablement par une répercussion seulement indirecte sur les coûts pour les chargeurs qui décident du transport (la répercussion directe est sur les transporteurs).

L'impact des variations de prix est visible en faisant une simple régression des variations annuelles de la demande totale de voyageurs en fonction des variations du prix des carburants sur la période 1990-2017 (Figure 17). La droite de régression tracée a cependant un coefficient de détermination faible (R^2 = 0,14), qui apparaît plus fort (R^2 = 0,29) en enlevant le point 2009 qui est une année particulière, en raison de l'après-crise qui s'apparente à un contre-choc pétrolier pour les prix du pétrole. Hors année 2009, il apparaît une baisse de la demande totale de 0,75 % en cas de hausse du prix des carburants de 10 %.

De plus, le fait de garder la demande totale cache plusieurs effets des prix du pétrole, dont un impact à la baisse sur la demande en voiture, mais au contraire un impact positif pour le trafic ferroviaire : une simple régression linéaire pour le trafic SNCF sur 1990-2017 (hors 1993 et 1995, années aux événements particuliers justifiant une baisse inhabituelle du trafic) montre un coefficient de la droite de 0,2, impliquant une augmentation du trafic de 2 % lorsque le prix des carburants augmente de 10 % (avec R^2 = 0,28 ; chiffre cohérent avec l'élasticité croisée de la demande de +0,2 citée dans Kopp et Prud'homme, 2010). Au contraire, le trafic automobile seul baisse de l'ordre de 1,4 % avec une hausse de 10 % du prix des carburants, une évolution qui n'est pas rare, puisque 5 années depuis 1990 ont subi une hausse supérieure.

L'impact des prix se retrouve ainsi plus fortement sur les voy.km parcourus en voiture (R^2 = 0,45 hors année 2009 ; coefficient -0,14), et davantage encore sur l'évolution des kilomètres

annuels moyens en voiture ($R^2 = 0,55$; coefficient -0,13). Cela indique qu'une hausse des prix du pétrole se traduit dans les comportements de mobilité par une moindre utilisation de la voiture, et un plus faible report vers le train. Mais également une tendance observable, en particulier pour de fortes hausses couplées à des crises économiques, à réduire les achats de véhicules et à privilégier des véhicules de plus petite taille et consommant moins. Ces observations sont cohérentes avec des enquêtes interrogeant les comportements des usagers en cas de hausse des prix du pétrole (IFOP, 2008 ; IFOP, 2011). Aussi les travaux portant sur l'élasticité-prix de la demande de carburant montrent des élasticités : de l'ordre de -0,3 à court terme et -0,7 à plus long terme pour les consommations (Clerc et Marcus, 2009 ; Bonnafous et al, 2010 ; Calvet et Marical, 2011 ; Labandeira et al, 2016 cité dans Gloriant, 2018) ; des élasticités plus fortes sur les consommations que sur les circulations (-0,2 pour les consommations d'après Kemel et al. 2009, cité dans Beauvais et al, 2011 ; soit une baisse un peu plus forte que le coefficient de -0,14 pour les kilométrages en voiture) ; ces deux derniers effets illustrent l'adaptation des usagers à moyen et long-terme, en achetant des véhicules moins consommateurs en cas de hausse des prix des carburants.

Parmi les évolutions de fond expliquant les kilomètres parcourus par personne, il est possible d'ajouter deux **décompositions du nombre de kilomètres** qui permettent d'apporter un autre regard sur les évolutions passées : considérer le nombre de trajets, multipliés par le nombre de kilomètres pour chaque trajet ; aussi, décomposer le temps de transport, multiplié par la vitesse des transports. Si historiquement le nombre de trajets et les temps de transport par personne sont relativement stables, ce sont donc essentiellement le nombre de kilomètres par trajet et la vitesse qui ont subi de fortes variations sur les 2 derniers siècles (question qui sera discutée de manière plus forte pour la vitesse en chapitre 3). Ce même raisonnement en décomposition peut également s'appliquer aux budgets monétaires alloués aux transports, qui sont relativement constants également, permettant de mettre en avant l'impact de la hausse du revenu sur le nombre de kilomètres parcourus, comme discuté plus haut.

Concernant le nombre de **kilomètres par déplacement**, les enquêtes nationales transports et déplacements nous montrent que le nombre de trajets est resté relativement stable au cours du temps pour les enquêtes disponibles de 1973-1974, 1982, 1994 et 2008, confirmant l'hypothèse que ce sont essentiellement les distances moyennes par déplacement qui ont augmenté sur la période (Papon, 1999 ; CGDD, 2010). Une différence notable est cependant à signaler pour les évolutions entre les enquêtes de 1994 et 2008 : si pour les déplacements de courte distance (inférieurs à 80 km du domicile), c'est bien la distance des déplacements qui a augmenté ; en revanche pour les déplacements à longue distance, c'est leur fréquence qui a augmenté tandis que leur distance moyenne est restée stable. Mais les déplacements longue distance représentent une très faible fraction de l'ensemble des déplacements (passage en moyenne de 10,3 à 14,1 déplacements par an et par personne entre 1994 et 2008), ainsi cela ne change pas la relative stabilité du nombre de déplacements au niveau global.
Pour la courte distance et les déplacements quotidiens, l'augmentation du nombre de kilomètres par déplacements est à mettre en relation avec un **aménagement du territoire** qui s'est progressivement adapté à des modes rapides et en particulier à la voiture. Ces changements dans l'aménagement du territoire regroupent de nombreuses évolutions qui ont

favorisé une augmentation des distances : une tendance à l'étalement urbain, à la périurbanisation, et au mitage (ou éparpillement) permis par l'extension de l'habitat individuel dans des micro-pôles loin des centralités ; un manque de mixité fonctionnelle de ces espaces, obligeant à parcourir de grandes distances pour accéder aux aménités ; une concentration des emplois, participant également à l'augmentation des distances domicile-travail ; une désertion des centres en particulier dans les villes moyennes, la construction de centres commerciaux en périphérie allant souvent de pair avec l'affaiblissement des commerces du centre-ville ; cela réduit en retour l'attractivité de ces centres villes pour les habitants, comme en témoigne la croissance des logements vacants dans les centres de certaines de ces villes ; enfin, un phénomène de métropolisation à l'échelle nationale, favorisant les grandes villes attractives au détriment des villes moyennes dont le niveau d'activité (emplois, services, activités, etc.) devient insuffisant pour favoriser une vie en proximité de ses habitants.
Cette dépendance entre aménagement et allongement des distances est valable dans les deux sens, car les évolutions dans les lieux de résidence, de travail, d'achats et d'activités favorisent en retour l'utilisation de la voiture et plus globalement à parcourir de grandes distances. Les deux évolutions se sont donc renforcées mutuellement sur la phase de croissance des kilomètres parcourus.

La décomposition entre temps de transport et **vitesse des déplacements** permet d'identifier l'importance de ce second facteur dans l'évolution des kilomètres parcourus. En effet, comme cela sera développé dans le chapitre 3 dédié à la vitesse des déplacements des personnes, les temps de transport restent relativement stables au cours du temps autour d'une heure de transport par jour et par personne, en moyenne. Cette relative stabilité est connue sous le nom de constante ou conjecture de Zahavi, du nom du chercheur qui a travaillé dessus dans les années 1970 (Zahavi, 1973), un concept repris ensuite par de nombreux auteurs pour étudier les implications de la vitesse sur les transports (entre autres Marchetti, 1994 ; Studeny, 1995; Schafer et Victor, 2000 ; Crozet et Joly, 2003). L'hypothèse de stabilité des budgets temps de transport (BTT) implique en effet que toute augmentation des distances parcourues n'est possible qu'à condition d'accéder à des modes de transport plus rapides. Cela rejoint ici un effet majeur de la diffusion de l'automobile, qui a permis en retour un urbanisme plus diffus.

Un raisonnement similaire au nombre de déplacements et à leur distance peut être appliqué au transport de marchandises, en décomposant cette fois la quantité transportée mesurée en tonnes.kilomètres (t.km) en deux facteurs de **tonnes transportées** et de **distance moyenne**. L'évolution des distances moyennes dépend fortement du mode considéré, reflétant une évolution des parts des différents modes et notamment la croissance du routier au détriment des autres modes (cf partie 3.2.2). Pour le fluvial, la distance a été plutôt en baisse en début de période puis est remontée ensuite, proche des 130 km (à ± 20 % sur la période). Le ferroviaire et le routier ont eu une distance moyenne croissante, d'environ 250 à 400 km pour le fret ferroviaire et de 30 à quasiment 100 km pour les poids-lourds (PL) du pavillon français (PL immatriculés en France). Il est cependant à noter pour ces deux modes une baisse au début des années 2000, au même moment que les distances parcourues par les voyageurs, avant une remontée dans les années 2010, reflétant possiblement des tendances guidées par les prix du

pétrole. Les données manquantes pour une estimation précise pour l'ensemble des transports intérieurs de marchandises concernent la distance moyenne parcourue par les PL étrangers en France (dont la part parmi les t.km parcourus par les PL a régulièrement augmenté, jusqu'à 43 % en 2017) et par les véhicules utilitaires légers (VUL). En considérant une distance moitié moins importante pour les VUL que les PL français, et une distance moyenne de 350 km pour les PL étrangers (égale aux trajets internationaux des PL français lorsqu'ils dominaient encore ces trajets), il apparaît que la distance moyenne a été multipliée par 2 sur la période, de 75 à 150 km. Le nombre de tonnes transportées a été multiplié par 1,7, avec une forte croissance jusqu'au premier choc pétrolier, avant de fluctuer autour de 2,5 milliards de tonnes depuis.

Un dernier élément à soulever sur l'**évolution de la demande** concerne le **pic** ou la **saturation** observée depuis le début des années 2000. Pour les marchandises, le pic de la demande intervient très clairement au moment de la crise de 2008. Pour les voyageurs, le phénomène est plus complexe et a beaucoup retenu l'attention depuis les années 2000, étant donné que la tendance a concerné de nombreux pays de l'OCDE.

Il est tout d'abord important de préciser que la force du phénomène est relativement différente selon que la question est regardée : à l'échelle d'un pays, ou par personne (cf Figure 16) ; en ne comptant que la voiture (étudié sous le nom de *peak car*), ou tous les modes (*peak travel*) ; en prenant uniquement le transport intérieur, ou également le transport international. Ainsi, si le phénomène apparaît particulièrement en regardant les kilomètres parcourus par personne en voiture, le pic n'apparaît plus si l'on prend la demande de transport totale incluant l'aérien international (voir Figure 32 en 3.3.3). Aussi les phénomènes de saturation de l'automobile ne se produisent pas au même moment en particulier selon les territoires, avec une baisse de l'usage de l'automobile d'abord dans le centre des grandes villes, sans forcément apparaître pour les territoires peu denses. Les caractéristiques socioéconomiques ou sociodémographiques entrent également en jeu, en raison d'effets de structure liés à une diffusion de l'automobile qui a d'abord concerné les classes aisées, les hommes, les actifs, avant de se diffuser progressivement à une grande partie de la population, pour laquelle la saturation de l'usage de l'automobile a pu être plus tardive.

Les raisons évoquées pour expliquer le phénomène peuvent être décomposées en trois groupes, selon leur possible permanence à l'avenir : l'hypothèse de croissance interrompue, essentiellement par des facteurs économiques conjoncturels ; l'hypothèse de saturation, en termes de taux de motorisation ou d'usage de la voiture, en raison notamment du développement des modes alternatifs ; l'hypothèse du *peak car*, qui se manifesterait à l'avenir par un usage décroissant de la voiture, par une combinaison de facteurs de politiques publiques, culturels, environnementaux, ou technologiques (Goodwin, 2012).

L'étude réalisée à l'échelle de la France révèle que les facteurs économiques ont eu la plus forte influence, leur caractère conjoncturel étant confirmé par la nouvelle hausse des kilomètres parcourus avec la baisse des prix du pétrole. Ces facteurs économiques sont couplés à une tendance à la saturation sur la motorisation des ménages, et à des effets démographiques (Grimal, 2015, 2017). Le chapitre 3 testera l'hypothèse d'une saturation voire d'un pic sur la vitesse moyenne des déplacements en France. L'étude de l'évolution de ce paramètre clé de nos mobilités permet également d'expliquer les tendances récentes des kilomètres parcourus, de manière complémentaire et liée aux évolutions décrites ci-dessus.

3.2.2. Report modal

Pour le **transport de voyageurs**, le report modal sur la période a plutôt contribué à la hausse des émissions, de l'ordre de **+22 %** par rapport à une situation où les parts modales en 1960 n'auraient pas été modifiées. Cependant, la contribution a essentiellement été négative au début de la période et est devenue favorable depuis 1995, en raison d'un léger report modal vers le train.

Le report modal du début de période s'est essentiellement réalisé avant le choc pétrolier de 1973. Le report s'est fait vers les modes routiers individuels, essentiellement depuis les modes actifs (passés de 16 % à 5 % des kilomètres) et le train (de 17 à 10 % entre 1960 et 1973 ; échelle de gauche sur la Figure 18). Les véhicules routiers individuels, constitués majoritairement des voitures personnelles (les VP constituant entre 82 % et 92 % des kilomètres de la catégorie, les 8-18 % restants étant les 2RM et VUL) sont passés d'une part modale de 63 % en 1960 à une part proche des 80 % depuis le premier choc pétrolier. La part était de 78 % à ce moment-là, a augmenté à environ 82 % entre le début des années 90 et début des années 2000, avant de revenir proche des 80 % en 2017. C'est essentiellement le ferroviaire qui a gagné des parts modales ces dernières années, en passant de 7,4 % en 1995, mauvais année car marquée par une grève, pour s'établir autour de 10-11 % de part modale sur les dix dernières années de la période. Le report modal total depuis 1995 peut être chiffré à un gain de **2,7 $MtCO_2$** par rapport à une situation sans report modal, ce qui correspond à environ 3 % des émissions du transport de voyageurs, ou 2 % des émissions actuelles totales des transports.

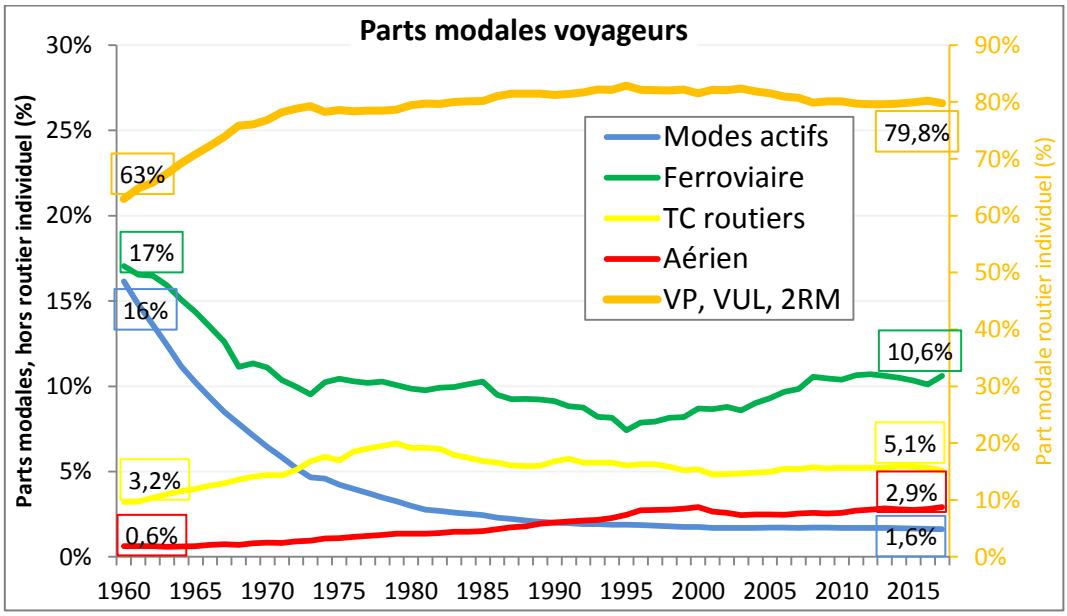


Figure 18 : Parts modales des modes de transport de voyageurs entre 1960 et 2017 en France
(échelle de droite pour le transport routier individuel = VP, VUL, 2RM ; aérien intérieur seul)

Pour le **transport de marchandises**, le report modal a contribué de manière beaucoup plus massive à la hausse des émissions (+91 %), en raison d'une progression très forte des modes routiers au détriment des modes ferroviaire et fluvial (Figure 19). Le transport routier est en effet passé de 34 % à 88,5 % de parts modales entre 1960 et 2017, tandis que le ferroviaire passait de 56 % à environ 10 % de parts modales depuis 2005, et que le fluvial passait de 10 % de part modale à une part proche des 2 % depuis le début des années 90.

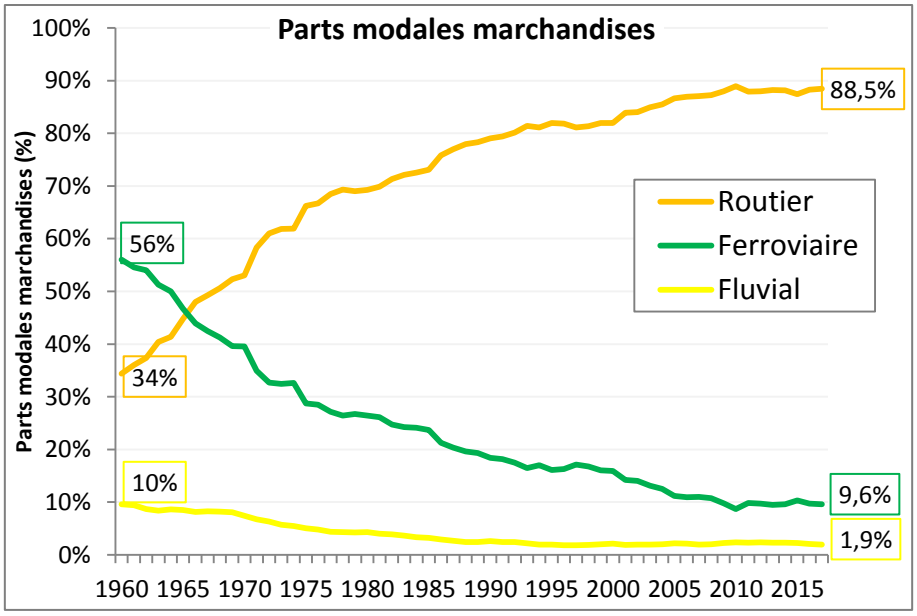


Figure 19 : Parts modales des modes de transport de marchandises entre 1960 et 2017 en France

Au-delà de l'évolution des parts modales, la Figure 20 permet de voir la **relation très forte avec le facteur de demande** totale de transport. L'évolution de la part modale d'un mode dépend ainsi de l'évolution de son trafic par rapport au trafic total. Par exemple pour les modes actifs, si sa part a été divisée par 10 en passant d'environ 16 % à 1,6 % des kilomètres parcourus, c'est lié à une division par deux du trafic, mais aussi voire surtout à la multiplication par 4,7 de la demande totale. Par ailleurs, cet exemple montre bien que conserver une part modale très significative de la marche comme en 1960 (quasiment 14 % d'après les estimations, 2,5 % pour le vélo) n'est pas possible avec une telle croissance de la demande. Hormis les modes actifs, les trafics voyageurs ont augmenté pour les autres modes. Sur la période totale, ils ont été multiplié par 6 pour le routier individuel (qui apparaît sur l'échelle de droite sur la Figure 20), par 7,5 pour les bus et cars, par 3 pour le ferroviaire et par plus de 20 pour le transport aérien intérieur.

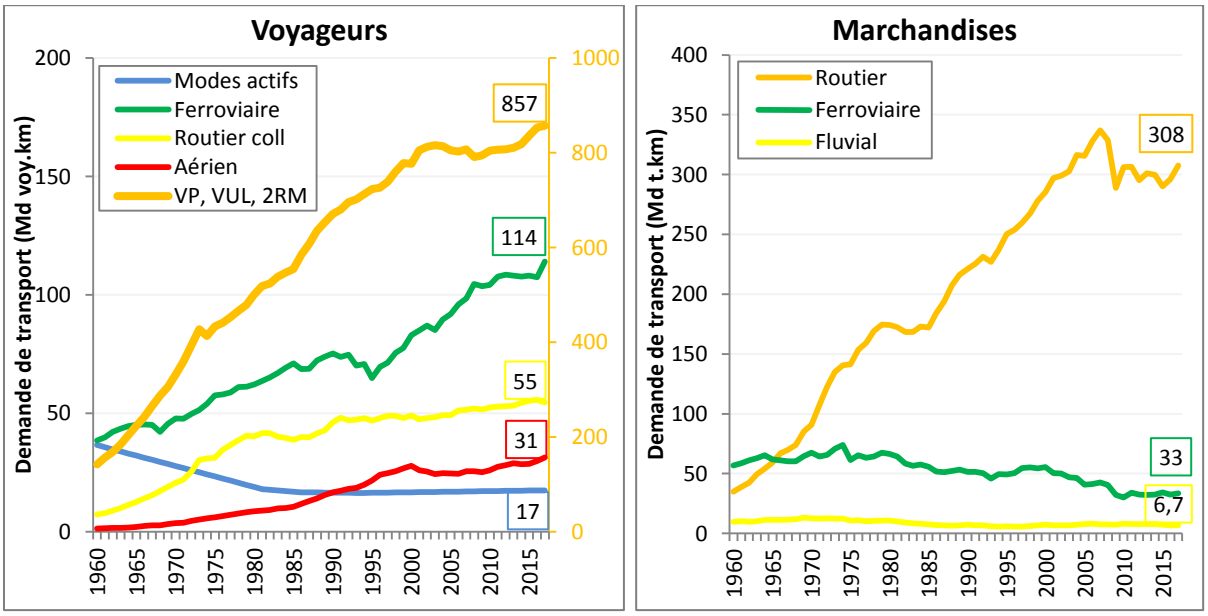


Figure 20 : Demande de transport de voyageurs et marchandises par mode
(voyageurs en voy.km à gauche, avec échelle de droite pour routier individuel ; et marchandises en t.km à droite)

Pour le transport de marchandises, le transport routier a été multiplié par 9 tandis que les trafics ferroviaires et fluviaux ont baissé, bien que de manière moins forte que leur part modale. Leurs trafics ont augmenté en absolu jusqu'au début des années 70, d'environ 10 à 13 Md t.km pour le fluvial et de 57 à 74 Md t.km pour le ferroviaire, pour être ensuite divisé par 2 pour le fluvial et par quasiment 2,5 pour le ferroviaire à son plus bas niveau. Les politiques publiques encourageant le report modal vers le fret ferroviaire ont échoué à augmenter son trafic, et ont au mieux permis de conserver une part de marché qui est proche des 10 % depuis 2005.

Ce qui ressort de la période est **l'essor du transport routier** et notamment de la voiture et des poids-lourds comme principaux moteurs de la croissance de la demande. La croissance de la demande totale est due à 84 % à la croissance de la mobilité routière individuelle sur la période 1960-2017, en particulier par l'accès facilité à l'automobile.
Ces modes routiers se sont imposés en raison d'évolutions déjà mentionnées pour l'évolution de la demande totale : croissance du PIB et du revenu, augmentation du taux de motorisation, ou encore construction d'infrastructures. Si le routier s'est imposé, c'est aussi en raison de certains avantages comparatifs par rapport aux autres modes, en termes de : vitesse, coûts, mais aussi de confort, et de flexibilité dans la possibilité de faire des trajets de porte-à-porte.
Leur très fort développement s'est cependant accompagné de nombreuses externalités négatives pour la société (congestion, insécurité, sédentarité, bruit, pollutions, émissions de CO_2, etc.), amenant à la remise en cause de leur domination, qui pour l'instant ne s'est pas manifestée de manière significative dans les parts modales des différents modes.

3.2.3. Taux de remplissage

Les données collectées sur l'évolution des véhicules de transport montrent une **augmentation de la taille des véhicules** pour quasiment tous les modes voyageurs et marchandises, en termes de capacité d'emport, de remplissage moyen des véhicules ou de poids (compilation issue des chiffres des mémentos du CGDD, 2019b, sauf précision) :

- ✓ Pour le fret ferroviaire, la capacité moyenne d'emport d'un wagon est passée de 24 à 49 tonnes entre 1960 et 2003, et le remplissage moyen des trains est passé d'environ 300 à 500 tonnes par train de 1960 à 2017 ;
- ✓ La capacité d'emport de la flotte de bateaux utilisés pour le transport fluvial a augmenté d'environ 350 tonnes en 1960 à plus de 1000 tonnes aujourd'hui ; pour le transport maritime, la capacité d'emport du transport de containers a été multipliée par 4 depuis 1980 (ITF, 2015) ;
- ✓ La taille des poids-lourds a également augmenté, et la compilation suggère un passage de 5,6 à 9,7 tonnes pour les véhicules excédant 3,5 tonnes de PTAC (poids total autorisé en charge ; mémentos CGDD, 2019b et enquêtes TRM CGDD, 2018b) ;
- ✓ Pour les voitures, le poids de la voiture moyenne achetée en France est passé de 778 kg en 1960 à 1262 kg en 2017, soit +62 % (L'Argus, 2019) ;
- ✓ La tendance est moins claire pour le transport collectif routier, avec un nombre de places plutôt à la hausse, mais un taux de remplissage qui dépend fortement du type d'utilisation, étant moins élevé en milieu urbain et plus fort pour la longue distance ;

- ✓ Le nombre de passagers des trains a augmenté de 160 à 233 par train sur la période 1960-2017, porté essentiellement par la hausse pour les trains longue distance ;
- ✓ Différentes statistiques indiquent également une forte augmentation de la taille et de l'emport des avions, comme le nombre de passagers par mouvement qui est passé de 42 en 1970 à 114 en 2017 pour l'ensemble du trafic partant de France, avec une baisse sur la fin des années 80 et les années 90 (World Bank, 2019) ; le remplissage moyen pour les compagnies aériennes françaises a augmenté de 40 à 122 entre 1960 et 1980.

L'augmentation de la taille des véhicules a ainsi été le principal facteur d'augmentation du **remplissage des véhicules** pour quasiment tous les modes (Figure 21).
Cependant, une exception de taille existe : si les voitures sont devenues plus lourdes, leur taux de remplissage a en revanche fortement baissé sur la période. Si le taux de remplissage était aux alentours de 2,3 personnes par voiture au début de la période (ce chiffre est resté stable sur toute la première moitié du XXème siècle, d'après Orselli, 2009), les estimations du CGDD montrent une tendance à la baisse jusqu'à un taux de remplissage moyen de l'ordre de 1,58 personne par voiture en 2017 (CGDD, 2016 ; CGDD, 2019a). Cette tendance est une autre conséquence de la démocratisation de la voiture individuelle, et en particulier de l'augmentation des taux de motorisation et de multi-motorisation des ménages, qui sont passés respectivement de 30 à 84 %, et de 2 à 36 % de 1960 à 2017 (URF, 2019). L'autre élément de fond de la période est démographique et sociétal, et concerne la baisse du nombre moyen de personnes par ménage, qui est passé d'environ 3,1 en 1960 à 2,2 aujourd'hui (Insee, 2017, 2019). Ces tendances et la baisse du coût relatif de la voiture ont ainsi découragé un usage mutualisé des véhicules, incitation qui a visiblement été plus forte pour les autres modes, gérés majoritairement par des entreprises qui ont intérêt à l'optimisation des coûts.
Le développement récent du covoiturage longue distance n'a pas suffi à renverser la tendance à la baisse du remplissage, car il représente en fait des trafics relativement faible à ce jour. En 2015, il était estimé à 3,5 Md voy.km (CGDD, 2016), soit seulement 0,4 % des 836 Md voy.km estimés des transports routiers individuels cette année-là.

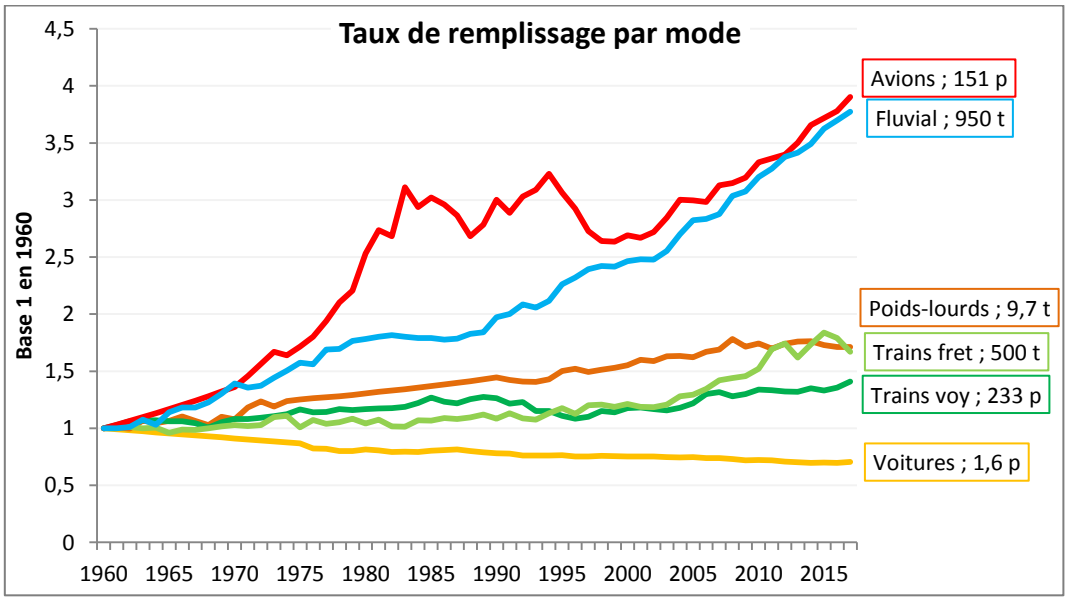


Figure 21 : Evolution du taux de remplissage de différents modes de transport de voyageurs et marchandises
(évolution par rapport à 1960 ; chiffres en absolu à droite, p = passagers, t = tonnes)

Le transport routier individuel constituant la majorité des émissions des voyageurs, la tendance à la baisse du taux de remplissage des voitures justifie l'effet négatif de cette évolution sur les émissions, chiffrée à **+28 %** sur la période (Figure 12). Au contraire, l'effet de la hausse du taux de remplissage des véhicules de transport de marchandises a eu un effet positif sur les émissions, chiffré à **-34 %** (Figure 14). Ce chiffre ne considère pas les effets indirects sur les consommations (discutés ci-dessous) ni les possibles effets rebonds sur la demande ou le report modal, valables aussi bien pour les poids-lourds que le covoiturage.
D'un point de vue plus global, en considérant à la fois cette hausse du taux de remplissage, mais aussi le report modal vers les véhicules routiers moins capacitaires, le transport de marchandises s'est en moyenne tourné vers des véhicules moins remplis, de 9,7 à 4,6 tonnes/véhicule entre 1960 et 2017 (Figure 22). De manière plus évidente encore, le transport de voyageurs s'est tourné vers le transport individuel, à la fois par le report modal vers ces modes et par le moindre remplissage des voitures, pour un passage de 2,9 à 2 personnes en moyenne dans les véhicules motorisés terrestres.

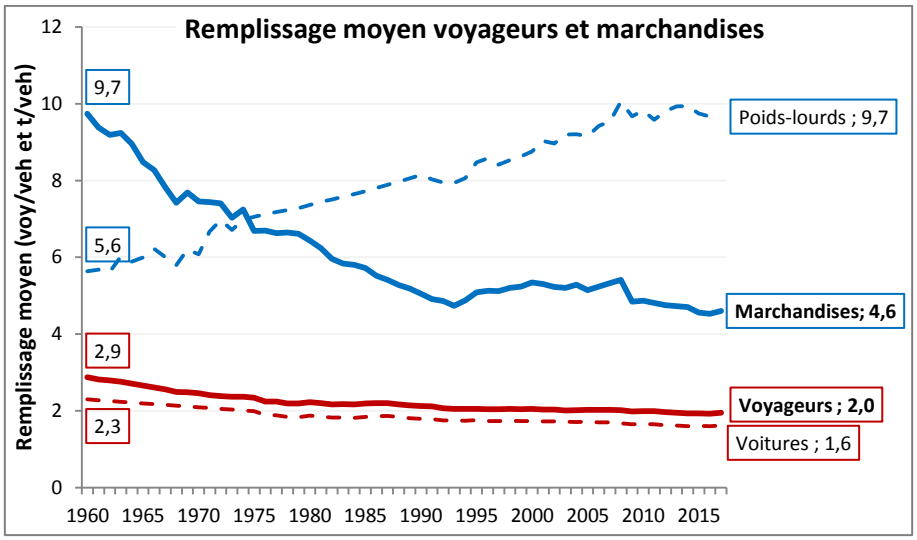


Figure 22 : Remplissage moyen de l'ensemble des transports de voyageurs terrestres et de marchandises
(moyenne voyageurs = routier + ferroviaire, hors avion et modes actifs ; moyenne marchandises = tous modes)

3.2.4. Efficacité énergétique

L'efficacité énergétique, mesurée comme la consommation d'énergie par kilomètre parcouru par les véhicules, a été le **principal facteur participant à la baisse des émissions** pour le transport de voyageurs (-37 % ; Figure 12) et a participé plus faiblement aux baisses d'émissions pour le transport de marchandises (-10 % ; Figure 14).
L'évolution selon les modes dépend fortement du facteur d'augmentation de la taille et du poids des véhicules, expliqué précédemment. C'est ainsi que les consommations des poids-lourds ou des avions ont augmenté sur l'ensemble de la période, surtout au début, en raison d'une capacité d'emport plus importante (Figure 23). Dans le même temps, l'efficacité s'est fortement améliorée en moyenne pour les voitures (-39 %) malgré un poids moyen croissant, pour des raisons de sécurité, de nouveaux équipements et de confort. Le transport ferroviaire montre également de forts progrès qui s'expliquent par la sortie du charbon et de la machine à vapeur, très inefficace d'un point de vue énergétique (cf 3.3.2).

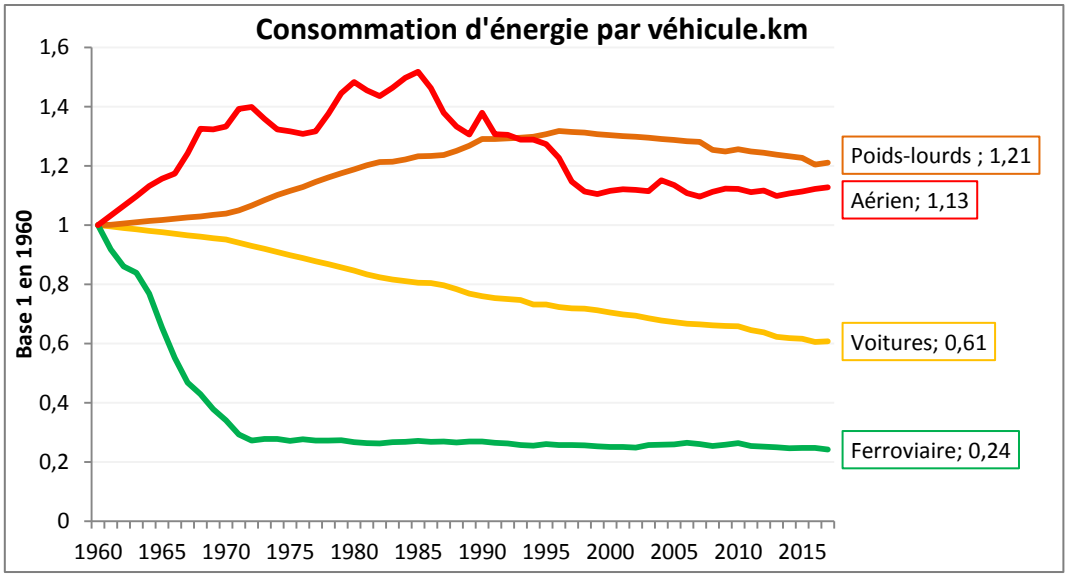


Figure 23 : Evolution de l'efficacité énergétique (par véhicule.km) pour différents modes par rapport à 1960

Les **consommations d'énergie par unité transportée** (par voy.km ou t.km), en combinant les facteurs de taux de remplissage et d'efficacité énergétique, représentent mieux l'efficacité totale du mode sur la période (Figure 24). Ainsi les poids-lourds affichent une meilleure efficacité sur ce critère, avec une baisse des consommations de -31 % sur la période, malgré les +21 % mesurés par véhicule.km. Au contraire, la voiture affiche de moindres gains d'efficacité rapportés au voy.km, puisqu'elle n'a baissé que de -14 % sur la période en raison d'une baisse du taux de remplissage qui a compensé une part importante de l'efficacité sur les véhicules (-39 %). Les gains d'efficacité énergétique par voy.km ou t.km sont forts pour certains des autres modes avec -73 % pour l'aérien, et -83 % et -86 % pour les trains de voyageurs et de fret. Malgré quelques doutes sur la précision des données, les deux-roues motorisés, les transports collectifs routiers et le fluvial montreraient plutôt une hausse des consommations par passager transporté sur la période. Ainsi les progrès semblent très variés selon les modes, bien que la tendance générale soit à la baisse des consommations unitaires.
Si certaines particularités par mode seront évoquées dans les analyses par mode en 3.3, il est possible de remarquer que les gains d'efficacité ont été rendus possibles par des moyens différents selon les modes : par une forte hausse du remplissage, en limitant les surconsommations de plus gros véhicules, pour le fluvial et l'aérien, ainsi que pour les poids-lourds dans une moindre mesure ; par des gains surtout sur les véhicules pour la voiture ; par des gains techniques liés essentiellement au changement de motorisation pour le ferroviaire. Les gains ayant été permis essentiellement par les meilleurs rendements des moteurs, il est probable que cette efficacité énergétique s'approche d'une asymptote à mesure que les principaux gisements d'efficacité sont épuisés.

En raison des évolutions contrastées selon les modes, il est possible de voir un changement dans la **hiérarchie des modes** en termes de consommations d'énergie (Figure 24). En effet, sur la comparaison entre train, voiture et avion, la voiture était la plus efficace en 1960, au même niveau que le train moyen, tandis que l'avion consommait 3 fois plus. L'avion et la voiture sont aujourd'hui à des niveaux comparables en raison des forts progrès de l'aérien et

des faibles progrès pour la voiture, tandis que le train s'est fortement amélioré et consomme en moyenne 4,5 fois moins d'énergie par kilomètre parcouru par un passager. La hiérarchie des modes a été moins bouleversée pour les marchandises, les poids-lourds étant déjà plus émetteurs que le ferroviaire et le fluvial en 1960.

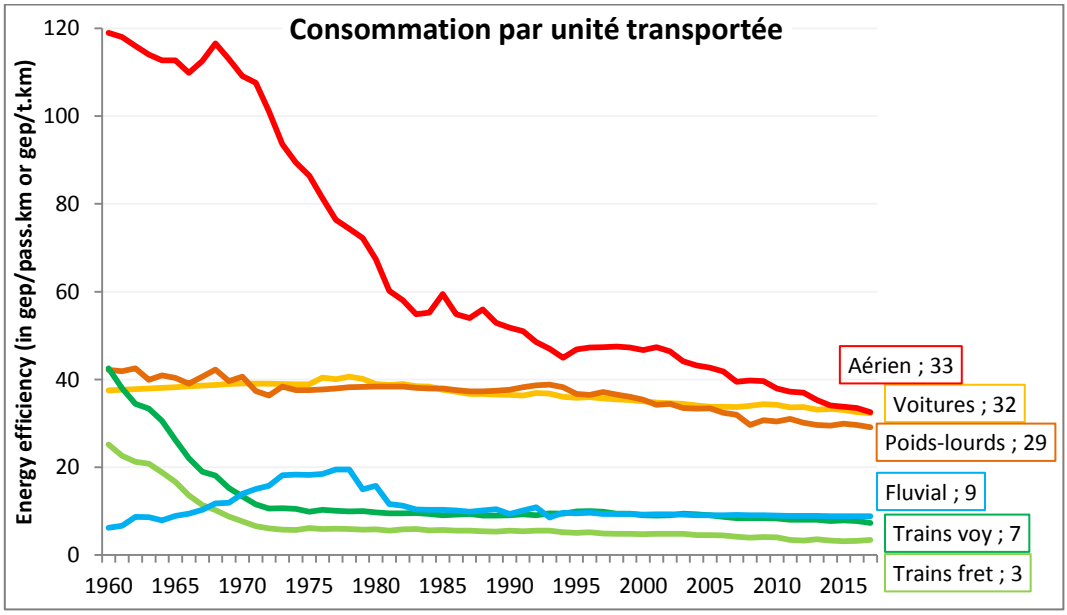


Figure 24 : Evolution de l'efficacité énergétique par unité transportée pour différents modes de 1960 à 2017
(en gep/voy.km pour les voyageurs ou gep/t.km pour les marchandises)

3.2.5. Intensité carbone

L'intensité carbone de l'énergie est le facteur qui montre les plus **faibles variations** sur la période étudiée, avec de faibles baisses respectivement de **-10 %** et de **-16 %** pour les voyageurs et les marchandises (Figure 12 et Figure 14). Les deux faits significatifs sur l'intensité carbone sont la sortie du charbon et dans une moindre mesure du diesel dans le ferroviaire, et le développement des agrocarburants, essentiellement à la fin des années 2000 (Figure 25).

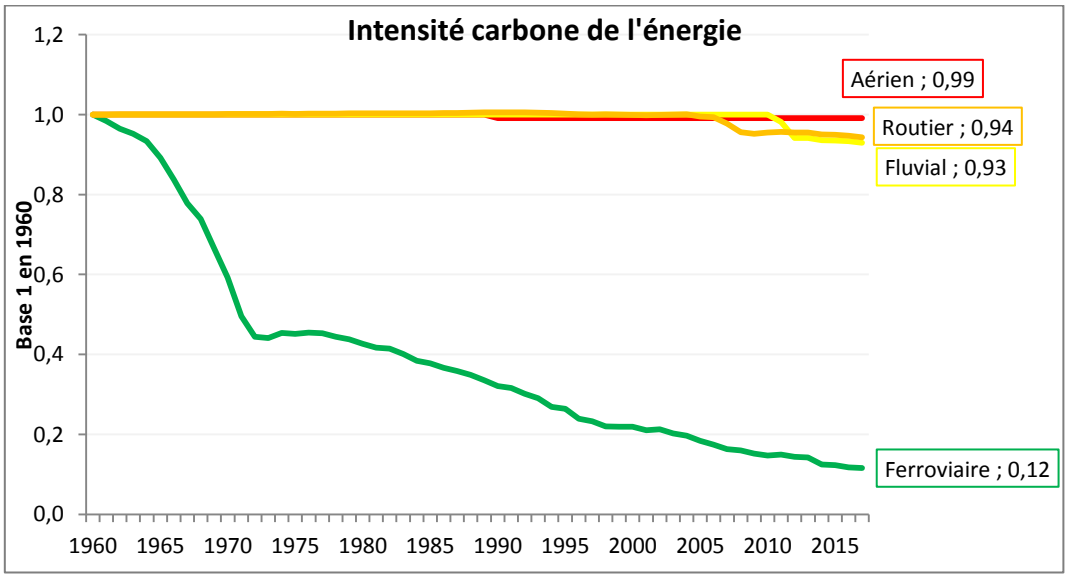


Figure 25 : Evolution de l'intensité carbone de l'énergie pour différents modes par rapport à 1960

Concernant le **mix énergétique du ferroviaire**, il a été marqué en début de période par la sortie du charbon vers 1973-1974, qui se manifeste plus fortement dans la décomposition marchandises en raison du poids plus important du ferroviaire dans les marchandises (56 % de part modale en 1960) que dans les voyageurs (17 % de part modale). La période a également été marquée par une électrification du réseau, permettant également de remplacer progressivement une partie de la traction diesel par la traction électrique (voir 3.3.2).

L'autre élément significatif de la période concerne le **développement des agrocarburants**, qui se distingue pour l'intensité carbone des transports routier et fluvial (Figure 25). Ces agrocarburants ont été développés en particulier en 2007-2008 pour le transport routier, en étant incorporés à la fois dans le gazole et l'essence jusqu'à une proportion d'environ 7 % en volume. Une baisse similaire de leur intensité carbone se retrouve dans les décompositions, faisant apparaître un gain total d'environ 7 $MtCO_2$, sans compter les émissions de leur combustion ni les émissions associées à leur production. L'absence de prise en compte des émissions de combustion est liée à une convention de neutralité carbone de la biomasse pour son utilisation pour la production d'énergie. Ainsi il est considéré au choix que : les émissions de combustion correspondent à la quantité de CO_2 captée par les plantes par photosynthèse durant leur croissance ; ou que ces émissions seront captées de manière équivalente par la biomasse durant la même année. Cette convention est en réalité contestable et contestée. Ces émissions pourraient au contraire être comptées comme relevant du secteur des transports, étant donné que leur intensité carbone par unité d'énergie est similaire aux énergies fossiles qu'elles remplacent (EEA, 2011b ; Leturcq, 2018 ; JRC 2017). L'évaluation complète de leur impact consisterait alors à analyser dans quelle mesure leur production et notamment leur impact sur l'utilisation des terres (secteur UTCF : utilisation des terres, leur changement et la forêt) a permis de capter davantage de CO_2 que ne pas cultiver ces agrocarburants.
Sans rentrer dans ce détail qui sera discuté plus amplement en chapitre 4, une analyse a été conduite afin d'évaluer dans quelle mesure les agrocarburants (ou plus largement les biocarburants, certains n'étant pas directement issus de plantes, mais d'huiles ou de graisses usagées par exemple) consommés en France en 2017 permettent d'émettre moins de CO_2 à leur production que n'en émet la production et la combustion de carburants pétroliers.
Ainsi, la Figure 26 rassemble les principaux éléments et résultats de l'analyse. La première étape a été de rassembler les volumes de biocarburants consommés (MTES, 2019 ; EU, 2018), et de les convertir en quantité d'énergie, le bioéthanol incorporé à l'essence ayant une moindre densité énergétique volumique que le biodiesel. En raison de la prépondérance du diesel dans les carburants consommés, la part des biodiesels est très majoritaire, avec 81 % de l'énergie consommée. Le biodiesel est produit à partir d'huiles issues majoritairement de plantes oléagineuses (colza, palme, ou soja). Le bioéthanol est produit à partir des sucres de plantes sucrières et de céréales. Ainsi, il apparaît que les agrocarburants consommés en 2017 proviennent surtout du colza (51 %), de l'huile de palme (utilisée pour les biodiesels et bioéthanol, 23 %), devant d'autres plantes qui comptent pour environ 5 % (le blé, le maïs, la betterave, le soja, puis les huiles usagées et l'huile de tournesol).
L'impact carbone de chaque biocarburant est ensuite repris via différentes sources et deux principaux types d'impacts. Tout d'abord, l'analyse de cycle de vie de leur production, qui comprend les émissions liées à la culture des plantes, leur transformation, leur transport et la

distribution des agrocarburants (valeurs de la directive européenne, EU, 2018 ; barres bleues en Figure 26). L'aspect le plus controversé des agrocarburants parmi les études concerne les émissions liées aux changements d'affectation des sols (CAS). Les valeurs de différentes études ont été réunies, pour rendre compte des divergences dans leurs résultats. Les barres vertes dans le graphique montrent les résultats obtenus en additionnant les émissions de la production et des CAS selon les études, en comparant les résultats aux carburants pétroliers (référence de 95,1 et 93,3 gCO_2eq/MJ pour le diesel et l'essence, selon JRC, 2019 ; soit 3,98 et 3,91 en gCO_2eq/gep ; échelles en gCO_2eq par gep à gauche et par MJ à droite sur la figure).
Les résultats font apparaître de meilleures performances pour le bioéthanol que les biodiesels, mais au total des **émissions des agrocarburants similaires aux carburants pétroliers**. Plus précisément, l'impact apparaît : plus élevé de 1% pour l'analyse reprenant pour chaque culture les valeurs médianes issues de la revue de littérature réalisée par De Cara et al (2012) ; inférieur de -3 % à partir des valeurs de l'étude de l'IFPRI commandée par la Commission Européenne (Laborde, 2011) ; une hausse des émissions de +53 % des émissions apparaît avec les chiffres de l'étude controversée de ré-actualisation des chiffres, commandée également par la Commission (ECOFYS, 2015) ; enfin, une baisse de -23 % en considérant les valeurs généralement plus optimistes de l'agence Californienne CARB (2015), en considérant un CAS nul pour le blé, la betterave et le tournesol (12 % des à eux trois) en raison de l'absence d'évaluation de ces cultures dans leur étude.
Si ces chiffres montrent des différences significatives en raison des incertitudes, ils montrent que les agrocarburants développés en France n'ont pas permis de baisser significativement les émissions de CO_2, et ont probablement une intensité carbone similaire aux carburants pétroliers. Prendre la convention de compter les émissions de leur combustion dans le secteur des transports serait ainsi davantage représentatif de la réalité, et c'est ce qui sera parfois fait pour certaines analyses et figures de la suite de la thèse.

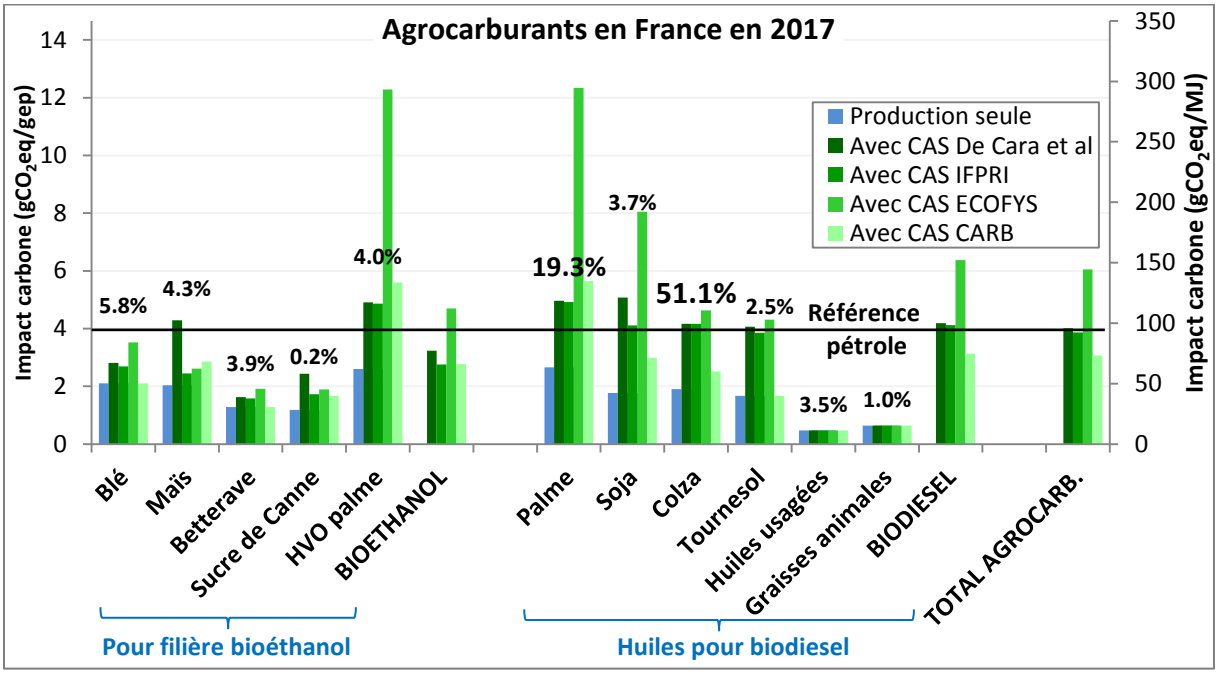


Figure 26 : Estimation de l'impact carbone de la production des agrocarburants consommés en France en 2017
(impact cumulé de l'analyse de cycle de vie de leur production et des changements d'affectation des sols -CAS-, comparé aux carburants pétroliers ; les pourcentages correspondent à la part énergétique de chaque biocarburant dans le total)

3.3.Analyse par mode de transport

Points et messages clés :

- ✓ **Routier** : la prédominance des voitures et poids-lourds dans les émissions fait que les résultats présentés précédemment reflètent surtout leurs évolutions ; les principaux modes routiers sont en hausse sur la période, sauf pour les 2RM et les modes actifs.
- ✓ **Ferroviaire** : c'est le seul mode à avoir réalisé une importante transition énergétique, en sortant du charbon en début de période, et par l'électrification progressive.
- ✓ **Aérien** : de forts progrès d'efficacité par passager ont été rendus possibles par des avions plus capacitaires, mais la forte croissance du trafic en particulier de l'international en fait un mode significatif dans les émissions totales.
- ✓ **Fluvial** : la principale évolution concerne la perte de trafics et de parts modales, tandis que la capacité des bateaux a permis des gains d'efficacité par t.km transportée.

3.3.1. Routier : VP, VUL, PL, B&C, 2RM, vélo et marche

La part du transport routier dans les émissions de CO_2 des transports en France est passée de **66 % à 97 %** entre 1960 et 2017 (cf 3.1 et Figure 11). Au vu de cette prédominance en particulier des voitures pour les voyageurs et des poids-lourds pour le transport de marchandises, les principales évolutions décrites ci-dessus par période et par facteur reflètent pour beaucoup les évolutions de ces deux modes. Certains détails seront ici ajoutés, en considérant également des évolutions spécifiques aux autres modes routiers.

La croissance de la demande en **voitures particulières individuelles** a été une tendance majeure pour les voyageurs, se reflétant dans la croissance de la demande totale, le report modal et la baisse du taux de remplissage, tandis que l'efficacité énergétique a en partie compensé ces évolutions défavorables pour les émissions. Voici les principaux éléments sur la période concernant l'évolution des voitures (hors VUL et 2RM considérés dans la catégorie des transports routiers individuels utilisée précédemment), et de leur importance dans la mobilité et les émissions des transports :

- ✓ Infrastructures routières : le kilométrage du réseau a augmenté de 0,78 à 1,1 million de kilomètres pour l'ensemble des autoroutes, routes nationales, départementales et voies communales ; avec en particulier un passage de 420 à plus de 700 milliers de km des voies communales ; et un fort développement des autoroutes de 188 km en 1960 à un peu plus de 11,6 milliers de km en 2017, la croissance ralentissant fortement sur la fin de période, le passage aux 10 000 km s'étant fait en 2001 (+16 % depuis ; CGDD, 2019b) ;
- ✓ Parc de véhicules : le nombre de voitures est passé de 5,6 millions en 1960 à 33,8 en 2017 (soit une multiplication par 6), faisant passer le nombre de voitures pour 1000 habitants de 124 à 521 en 2017, une tendance à la hausse qui a fortement ralenti en fin de période (passage à 500 en 2003 ; CITEPA) ; comme déjà évoqué, le taux de motorisation des ménages est passé de 30 à 84 %, et le taux de multi-motorisation de 2 à 36 % entre 1960 et 2017 (URF, 2019) ;
- ✓ Trafics automobiles : si le parc a été multiplié par 6, les trafics en veh.km ont été multipliés par 8,8 en raison d'une hausse quasiment de moitié des kilométrages annuels des voitures, de 9,1 à 13,4 milliers de km par an, avec cependant une baisse significative de 13,9 à 12,9 entre 2001 et 2008, la baisse du trafic sur cette période

(*peak car*) s'expliquant par ce facteur et non par le volume du parc qui était toujours en faible hausse ; enfin, la demande en kilomètres parcourus par les voyageurs a été multipliée par 6,2 (de 117 à 730 Md voy.km), cette moins forte hausse par rapport au trafic s'expliquant par la baisse du taux de remplissage (CITEPA, 2019) ;

- ✓ Caractéristiques des voitures : depuis 1960, la taille, le poids, la puissance et la vitesse des véhicules ont tous eu tendance à augmenter, comme l'indiquent les données sur les voitures neuves publiées par L'Argus (2019 et années précédentes) ; la longueur des véhicules neufs est passée de 4,12 à 4,24 m (+3 %) après un point bas au milieu des années 80 à 4,01 m et une hausse régulière depuis ; la largeur a augmenté régulièrement de 1,57 à 1,79 m (+14 %), et la hauteur a augmenté de 1,43 à 1,54 m (+8 %), surtout durant les années 2000 ; en supposant une forme constante des véhicules, les augmentations de longueur, largeur et hauteur auraient entraîné une hausse du volume de +26 % ; après une baisse entre 1953 et 1960, le poids a augmenté de 778 kg en 1960 à 1262 kg pour la voiture neuve de 2017, soit une hausse de +62 % sur la période, et d'environ +10 kg/an jusqu'au milieu des années 2000, avec une fluctuation autour de 1250 kg depuis lors ; la hausse de poids plus forte que les volumes rend compte des augmentations liées aux nouveaux équipements (ABS, airbag, climatisation, etc. ; voir University of Cambridge, Mirova, 2013) ; la puissance des véhicules neufs a quasiment triplée en passant de 40 à 117 chevaux entre 1960 et 2017, en raison notamment des hausses de poids, d'accélération et de vitesse ; en effet, la vitesse maximale a fortement augmenté, passant de 130 km/h en 1966 à 186 km/h en 2017, soit une hausse d'au moins 43 % par rapport à 1960 ;
- ✓ Coûts de la voiture : le nombre de minutes de travail pour une personne au SMIC pour acheter 1 L de carburant a été divisé par 2,5 entre 1970 et 2017 en passant de 20 à 8 minutes ; aussi les consommations ont baissé et le nombre de minutes de SMIC pour payer 100 km a été divisé par 3,4 (soit -70 %), en passant de 168 à 50 minutes (Beauvais, 2020) ; le coût d'achat d'une voiture s'est également fortement réduit, et a chuté de 25 à 17 mois de SMIC entre 1960 et 1970, a stagné autour de 15 mois avant une remontée à 18 mois en 2017 (L'Argus) ; des chiffres un peu plus élevés indiquent une division par 4 du coût en carburant des kilomètres parcourus pour un smicard, et par 2 du coût d'achat d'une voiture depuis 1970 (Crozet, 2016) ; par ailleurs, les chiffres pour les voitures d'occasions, non disponibles ici, représenteraient davantage la possibilité pour les ménages aux plus faibles revenus d'accéder à la voiture.
- ✓ Motorisations et carburants : en baisse avant 1960, la cylindrée des moteurs a ensuite régulièrement augmenté de 1039 à environ 1700 cm^3 au début des années 2000, avant de baisser de nouveau pour atteindre 1457 cm^3 en 2017 (-13 % par rapport au maximum, + 40 % par rapport à 1960 ; L'Argus), la réduction de la taille de la cylindrée (*downsizing*) ayant permis d'importants gains d'efficacité énergétiques (GFEI, IEA, 2017) ; le parc fonctionnait quasiment exclusivement à l'essence en 1960, et le parc diesel a progressé à 4 % des voitures en 1980, 17 % en 1990, 35 % en 2000, avant un pic à 64 % entre 2013 et 2016 (CITEPA) ; ce pic sur la proportion du parc diesel a été précédé d'un pic dans les ventes de véhicules diesel, avec une baisse continue de la part du diesel depuis 2012 de 73 % à 47 % en 2017 (le point le plus haut était de 77 % des ventes en 2008 ; ICCT, 2019a), une baisse qui se

poursuit depuis ; par ailleurs, si le pic du diesel se situait à une proportion du parc de 64 %, les voitures diesel représentaient 77 % des kilomètres sur la même période en raison de leur plus fort kilométrage annuel (environ 8,4 milliers de km annuels pour les voitures essence et 15,6 pour les véhicules diesel au moment du pic ; CITEPA) ; ces tendances sur les carburants ont assez peu d'influence dans la décomposition des émissions, car bien que les consommations des véhicules diesel soient plus faibles en L/100 km (7,3 L pour l'essence et 6,1 pour le diesel en moyenne en 2017, soit +20 % pour l'essence, davantage encore pour un même modèle car le parc diesel est constitué de véhicules plus lourds ; CGDD, 2019c), cela est dû en grande partie à la plus forte densité énergétique du diesel (en tep/L) ; ainsi les consommations mesurées en tep/veh.km varient peu avec la diésélisation du parc, et l'intensité carbone en tCO_2/tep non plus ; en définitive, les données du CITEPA compilées montrent en 2017 des émissions moyennes des véhicules essences par kilomètre parcouru 5 à 8 % plus élevées que pour le parc de véhicules diesel ; enfin, le développement de la voiture électrique reste marginal sur la période, et représente 0,24 % du parc et 0,15 % des kilomètres parcourus en 2017 (CITEPA) ;

- ✓ <u>Demande, énergie et CO_2</u> : les gains d'efficacité énergétique sur les voitures ont été réguliers pour atteindre -39 % sur l'ensemble de la période en consommation par veh.km, et ils ont représenté -14 % par voy.km ; c'est ainsi que la multiplication par 6,2 de la demande (en voy.km) s'est traduite par une multiplication par 8,8 des trafics (en veh.km), par 5,4 des consommations d'énergie des voitures et par 5,1 de ses émissions (hors CO_2 agrocarburants).

Tous ces chiffres traduisent la forte croissance et l'accès facilité à la voiture sur la période. C'est tout un **écosystème automobile** ou un système voiture qui s'est ainsi constitué sur ces décennies et même depuis les débuts de l'automobile à la fin du XIXème siècle.

Ce système automobile repose sur : des véhicules dont les coûts d'achat et d'usage ont diminué ; un réseau dense et hiérarchisé de voies de circulation ; de nombreuses places de stationnement ; une industrie automobile fortement développée et un réseau de concessionnaires, de garagistes, de stations-service, d'autoécoles répartis sur l'ensemble du territoire ; des services d'assurances ; des groupes d'intérêts défendant les automobilistes, les activités économiques et les emplois liés au système automobile ; la forte présence de la publicité, visant à créer un imaginaire positif adossé à la voiture, etc. C'est cet ensemble d'éléments qui fait système, et qui explique l'efficacité mais aussi la dépendance à la voiture qui s'est installée dans les transports. Si la voiture a également été décriée dès ses débuts et l'est de manière croissante avec la montée des préoccupations environnementales, un tel système n'est pas aisé à remplacer, tant il a désormais façonné l'aménagement du territoire, les modes de vie et les programmes d'activités d'une grande partie de la population.

Les **politiques publiques**, qui ont encouragé le développement de la voiture par la construction des infrastructures essentiellement mais aussi par le soutien aux industries, visent désormais également à limiter ses impacts. Historiquement, les principales régulations de l'usage de la voiture ont concerné la sécurité routière (code de la route, limitation des vitesses, etc.), la congestion (l'espace étant par nature limité en ville, mais aussi par les politiques de stationnement, la réduction de voirie parfois, etc.), la pollution atmosphérique en particulier à partir des années 1970. Ces politiques n'ont pour autant pas permis de proposer de système

alternatif capable de concurrencer ni même de remettre en cause plus fortement les éléments structurants du système automobile (Castaignède, 2018 ; voir des auteurs comme A. Gorz, G. Dupuy, F. Héran, M. Flonneau qui ont documenté divers aspects de ce système). Plus récemment, les transports en commun ont été développés notamment pour favoriser le report modal et limiter les émissions. Cependant, augmenter l'offre et subventionner ces systèmes ne pouvait suffire à opérer des reports modaux importants, sans modifier plus fortement les fondamentaux qui font l'attractivité de l'automobile. L'aménagement du territoire, l'accès et les conditions d'usages des infrastructures, ou encore le coût des modes et leur fiscalité, n'ont en effet pas été substantiellement modifiés ces dernières années par les politiques environnementales. Ce constat est valable aussi bien pour le report modal depuis la voiture que depuis l'avion ou les poids-lourds, pour lesquels aucune rupture dans les politiques publiques n'est entrevue à ce jour pour modifier les grands équilibres qui font leur succès.

Les **véhicules utilitaires légers** (VUL) ont également fortement augmenté sur la période, sans interruption dans leur croissance, avec une multiplication par 8,2 du trafic (de 14 à 113 Md veh.km). Les émissions des VUL ont dans le même temps été multipliées par 7,7, en passant de 3,2 à 25 $MtCO_2$. La part des VUL a augmenté d'environ 10 % à 20 % des émissions intérieures des transports, la hausse étant particulièrement forte durant les années 80.
Malgré cette part importante des émissions, les VUL sont mal connus et peu de données et d'analyses portent sur ses utilisations comme transport de voyageurs ou de marchandises. Ce manque d'informations complique de nombreuses analyses des transports, et notamment la classification en tant que voyageurs et/ou marchandises : par exemple, les décompositions des émissions conduites par le CGDD sur les transports ne comptaient pas les VUL dans leur première analyse (CGDD, 2018a) alors que la deuxième analyse incorporait les VUL uniquement aux marchandises (CGDD, 2019a). Comme évoqué dans la méthodologie en 2.3, le choix a été fait ici de faire une répartition avec 60 % des veh.km dans les véhicules routiers individuels (avec les VP et 2RM) dans la décomposition voyageurs, et de mettre 40 % des VUL dans la décomposition marchandises. Cette répartition se base sur l'analyse de deux documents issus de l'enquête sur le parc de VUL au 1er janvier 2011 et sur leur utilisation par les professionnels durant une semaine (voir Tableau 6 ; CGDD, 2012 et CGDD, 2014).

Tableau 6 : Kilométrages et utilisations des véhicules utilitaires légers (VUL) personnels et professionnels
(pour le parc professionnel, détails du nombre et de la distance des déplacements par type d'utilisation)

	Parc (M)	Km/an	Md veh.km	Déplac. (%)	Dist. moy	% dist. Pro.	% dist. totale		
Total	**5,6**	**14900**	**83,2**					**100%**	
Personnels	**2,3**	**10000**	**22,8**				**27,3%**	**59,2%**	**Voyageurs**
Professionnels	**3,3**	**18200**	**60,5**				**(72,7%)**		
Services	Autres : dépannages / visites / chantiers			26%	66	28%	20,3%		
	Déplacement domicile-travail			11%	48	9%	6,2%		
	Transport de personnel ou clientèle			7%	57	6%	4,7%		
	Autre non pro			1%	55	0,9%	0,6%		
Biens	Transport d'outillage ou d'échantillons			21%	57	19%	14,1%	**40,8%**	**Marchandises**
	Transport de matériaux			14%	53	12%	8,8%		
	Transport de gravats et de déchets			2%	43	1,4%	1,0%		
Marchandises	Livraison ou ramassage, compte propre			13,8%	72	16%	11,7%		
	Compte autrui : courrier, textiles, alim…			4%	104	7%	4,9%		
	Déménagements			0,2%	111	0,4%	0,3%		

Il ressort de l'enquête que sur 5,6 millions de VUL utilisés, environ 40 % appartiennent à des particuliers et les autres 60 % à des professionnels. Ces derniers véhicules font quasiment deux fois plus de kilomètres chaque année, ainsi ils représentent environ 73 % des veh.km. Les utilisations du parc de véhicules particuliers sont multiples et correspondent à : des courses-achats (63,7 %), des loisirs et tourisme (55,5 %), des trajets domicile-travail et domicile-école (40,6 % et 7,7 %), et des motifs autres (17,4 %). Ainsi il est considéré que toutes les utilisations du parc des particuliers correspondent à du transport de voyageurs. Pour le parc appartenant aux professionnels, sont considérées comme transport de voyageurs les utilisations de services (45 % des déplacements et 44 % des distances), tandis que sont considérés comme transport de marchandises ce qui est noté comme transport de biens (37 % des déplacements, 33 % des distances) et le transport de marchandises à proprement parler (18 % des trajets, 23 % des distances du parc professionnel ; cf tableau ci-dessus).
Au total, il apparaît que 59,2 % des trafics en veh.km (arrondies à 60 % pour la répartition) correspond à des utilisations de transport de voyageurs, et les 40,8 % restants à du transport de biens et de marchandises. Pour le transport de marchandises, la division de la demande en t.km des comptes des transports (24,5 Md t.km en 2017, soit 8 % de la demande totale de marchandises ; CGDD, 2019c) par les 40 % de trafics des VUL donne un taux de remplissage proche de 0,5 t/véhicule. Ce chiffre est cohérent avec les autres sources trouvées sur le sujet et les chiffres généralement utilisés par les scénarios de prospectives (voir chapitre 2). Les informations manquent cependant pour évaluer l'évolution de cette répartition voyageurs / marchandises au cours du temps, mais il est supposé que les utilisations décrites dans le Tableau 6 ont existé et n'ont pas trop évolué sur la période, et qu'ainsi ce choix ne biaise pas fortement les résultats des décompositions.
Au vu de leur importance dans les émissions, il paraît indispensable d'acquérir une meilleure connaissance des VUL, de leur utilisation et des éventuelles évolutions récentes liées notamment au e-commerce et aux livraisons à domicile. Leur efficacité par t.km transportée étant bien moins bonne que celle des poids-lourds (de l'ordre de 400 g/t.km en 2017 contre moins de 86 g pour les PL), tout comme l'efficacité des voitures est moins bonne que celle des bus et cars, il est important d'éviter que du report modal puisse se faire vers les VUL à l'avenir.

Les évolutions relatives aux **poids-lourds** (PL) ont comme pour les voitures été largement évoquées dans les parties précédentes, étant donné que la décomposition marchandises illustre fortement les évolutions de ce mode et la place croissante qu'il a pris. Ses évolutions se caractérisent par : une forte croissance de la demande, multipliée par 8,8 (de 32 à 283 Md t.km), qui expliquent la croissance de la demande totale de marchandises et le report modal défavorable sur les émissions ; un trafic multiplié par 5 (de 5,7 à 29 Md t.km), soit une croissance bien moins forte que la demande en raison de la hausse du taux de remplissage de 5,6 à 9,7 tonnes par véhicule ; des consommations d'énergie multipliées par 6,1 et des émissions multipliées par 5,6 (de 4,3 à 24 $MtCO_2$) en raison d'une moindre efficacité par veh.km et d'une légère baisse de l'intensité carbone (hors CO_2 biomasse). La part des poids-lourds dans les émissions des transports a augmenté de 13 à 22 % entre 1960 et 1979, notamment dû à un effet de structure lié à la fin du charbon ferroviaire, et cette part a ensuite peu bougé et représentait 19 % des émissions en 2017, une part comparable aux VUL.

La forte croissance de la demande (x 8,8) s'explique en partie par une multiplication par plus de deux des tonnes transportées jusqu'au premier choc pétrolier, tandis que ce volume a fluctué autour de 2,3 milliards de tonnes transportées depuis (± 0,3 Md t). Un deuxième facteur plus important encore concerne donc l'augmentation des distances moyennes, qui ont été multipliées par 3,1 pour les transporteurs nationaux et par plus de 4 en comptant également le transport assuré par le pavillon étranger (d'après les estimations évoquées en 3.2.1). En effet, la part du pavillon français a régulièrement diminué jusqu'à atteindre 57 % du trafic de marchandises en 2017 (CGDD, 2019c), reflétant aussi une part croissante du trafic qui correspond à des trajets internationaux parmi les poids-lourds circulant sur le territoire.

Parmi l'ensemble des véhicules lourds, les **bus et cars** (B&C) représentent une part relativement faible bien que croissante sur la période, passant de 4,5 % à 12 % du trafic entre 1960 et 2017 (le reste étant constitué des PL). La croissance de la demande en transports en communs routiers a également été plus forte que l'ensemble de la demande voyageur. Les données compilées indiquent une augmentation de la part modale de 3,2 % en 1960 à 6,5 % à la fin des années 70, avant une croissance plus modérée du trafic qui a ramené la part modale des transports en commun routiers proche de 5 % depuis le début des années 90 (Figure 18 ; Figure 20). En dehors de la demande, les données indiquent un taux de remplissage plutôt orienté à la baisse, des consommations par kilomètre stables voire en faible augmentation, et une tendance sur l'intensité carbone similaire aux autres modes routiers.
Il existe de nombreuses ruptures de séries ou réévaluations dans les données françaises de demande et de trafics pour les B&C, ainsi il est difficile de bien caractériser l'évolution temporelle des différentes utilisations, ou même la précision de l'évolution globale : pour en citer deux exemples, en 1960 les chiffres des mémentos des transports indiquent des trafics de l'ordre de 17 Md voy.km, contre 7,3 dans la compilation réalisée à partir des données de trafics en veh.km du CITEPA ; aussi les données ont été réévaluées pour les comptes des transports de 2017, donnant pour 2016 une demande de 59 Md voy.km, contre les 82 Md voy.km qui étaient estimés l'année précédente, soit une réévaluation à la baisse de -28 % (CGDD 2019c). Les données du CITEPA ont été conservées pour permettre la continuité de la série. En supposant une demande de 17 Md voy.km en 1960, cela baisserait de 0,2 la multiplication de la demande sur l'ensemble de la période (qui est de 4,7 ; Figure 12).
Les autocars réalisent essentiellement du transport sur longue distance et dominent l'ensemble des transports en commun routiers avec 80 % de la demande en 2017 (43,9 Md voy.km autocars, 10,8 pour les autobus ; aussi 3,5 pour les tramways qui sont généralement comptés avec les autobus dans les statistiques). La récente réévaluation ne donne pas le détail par type de transport d'autocars, mais les chiffres pour 2016 montraient une forte prépondérance du transport longue distance occasionnel, du transport interurbain, dans lequel le transport librement organisé des « autocars Macron » reste faible (2,2 Md voy.km en 2017 soit 5 % du total des autocars), et pour une faible partie le transport scolaire et de personnel (respectivement 5,8 et 1,5 Md voy.km en 2016, avant la réévaluation à la baisse ; données disponibles via le lien dans CGDD, 2019c). Les autres 20 % des B&C sont constitués des autobus, utilisés pour les transports urbain et périurbain, et dont les transports en Île-de-France constituent quasiment la moitié de la demande (5,2 sur les 10,8 Md voy.km en 2017).

Parmi les transports routiers de voyageurs figurent également les **deux-roues motorisés** (2RM), intégrés dans les transports routiers individuels avec les VP et une partie des VUL dans la décomposition voyageurs. Les 2RM montrent des tendances fluctuantes au cours du temps, avec des variations dans le type de véhicules, et des données variées selon les sources. Les données de parc sont bien renseignées et font apparaître un parc d'environ 5 millions de 2RM en 1960 après une augmentation très forte dans les années 50 (le parc étant inférieur à 1 million en 1950 ; CGDD, 2019b). Si au milieu des années 50, le parc était constitué pour moitié de cyclomoteurs (cylindrée inférieure à 50 cm^3, et vitesse maximale de 45 km/h depuis 1976) et pour moitié de motocyclettes (> 50 cm^3), les ventes de ces dernières chutent et ne représentent quasiment plus rien en 1960. Le parc de ces 2RM était constitué de plus d'un million de motocyclettes et tricycles à moteurs, de vélomoteurs et de scooters en 1960. Il est divisé par 3 dès 1964 et atteint un point bas à environ 120 000 motocyclettes en 1970. Ainsi, ce sont les cyclomoteurs qui dominent très largement le parc de 2RM durant les premières années de la période étudiée, pendant laquelle le parc fluctue autour de 5-6 millions de véhicules. A partir de 1974, les ventes de cyclomoteurs chutent fortement et sont divisées par 3 en une décennie, entraînant avec un léger décalage la baisse du parc de 2RM qui passe de 6,1 millions en 1980 à un point bas à 2,3 millions de véhicules en 1995. Le parc augmente ensuite de nouveau, porté par la croissance des motocyclettes, jusqu'à atteindre un pic des ventes de cyclomoteurs et de motocyclettes en 2007, entraînant un pic dans le parc à 4 millions de 2RM en 2012. Le parc a déjà été plus important qu'aujourd'hui dans les décennies précédentes, en revanche les données du CITEPA indiquent que le trafic n'a jamais été aussi important (autour de 16 Md veh.km depuis la fin des années 2000). En effet, le kilométrage annuel des 2RM est plus fort aujourd'hui qu'en 1960 (entre 4000 et 6000 km/an pour le parc depuis 2000, contre 1270 km/an en 1960). Cela est notamment dû à la plus forte proportion de motocyclettes, dont le kilométrage annuel est plus élevé (CITEPA, 2019).

Si les grandes tendances décrites précédemment sur le parc se retrouvent pour les différentes estimations de trafics compilées, ces estimations varient cependant significativement pour le début de la période, en fonction des hypothèses de kilomètres annuels parcourus par les 2RM. Ainsi les données du CITEPA donnent un trafic de 6,2 Md veh.km en 1960 (parc de 4,7 millions, et 1270 km/an), alors que d'autres données indiquent des trafics plus élevés : 16,2 Md voy.km en 1960 avant de converger avec les données du CITEPA au milieu des années 70 pour Orselli (2009) ; des trafics deux fois plus élevés sur la période 1973-1995 pour Lacour et Jourmard (2002) ; des évolutions plus étranges pour les données des deux-roues par Grübler (2003), données qui comprennent également les cycles ; enfin, des estimations à partir des enquêtes nationales donnent des chiffres un peu supérieurs pour 1969 et très proches pour les années 1973-74, 1981-82 et 1993-94 (Papon, 1999). Cette compilation tendrait à supposer une légère sous-estimation des données du CITEPA pour les années 1960. Etant donné que les évaluations du CITEPA croisent des données de parc avec les kilométrages annuels, mais aussi avec les consommations moyennes du parc et les volumes totaux de carburants livrés en France, il est possible qu'une sous-estimation sur un mode soit compensée par une sur-évaluation sur un autre mode, d'où la pertinence de regrouper les modes de transport individuels entre eux. Enfin, l'efficacité énergétique des 2RM montre plutôt une tendance à la hausse des consommations sur 1970-2000, avant une baisse depuis le début des années 2000.

Hormis les deux-roues motorisés avec lesquels ils ont parfois été regroupés dans les enquêtes de transports, les vélos constituent avec la marche l'un des deux **modes actifs** intégrés à la décomposition. Leur seule influence dans la décomposition est d'agir sur les facteurs de demande et de report modal, étant donné que leurs taux de remplissage, leurs consommations d'énergie et émissions de CO_2 ne sont pas considérés. Cependant, leur impact est fort sur le début de la période, car ils représentaient encore une part significative des kilomètres parcourus en France. En 1960, ils représentaient d'après les estimations encore 16 % des kilomètres, correspondant à 2,2 km par jour et par personne, dont 85 % en marche à pied. Ces modes ont massivement perdu des parts modales, essentiellement au profit de la voiture au début de la période, pour correspondre à 1,6 % des kilomètres parcourus aujourd'hui. Cela s'explique par une division par 2 des kilomètres parcourus en modes actifs (et division par 3 par personne), en parallèle d'une multiplication par 4,7 de la demande totale (Figure 18 ; Figure 20).

L'usage du **vélo**, qui a culminé en France dans les années 1930-1940, a ensuite fortement diminué, même si le kilométrage par jour et par personne ne semble pas avoir énormément varié depuis 1960, toujours proche des 100 km par an (ou 0,3 km/jour) d'après les enquêtes entre 1967 et 2008 (données compilées par Papon, 2012 ; aussi Orselli, 2009). Les trafics sont estimés en plus forte baisse par Orselli. Les données manquent pour évaluer précisément les tendances récentes, mais il est probable que les trafics n'aient pas évolué très fortement au niveau global, car bien que l'usage augmente en particulier dans le centre des grandes villes, la tendance des dernières années est plutôt à la baisse dans les zones périurbaines et rurales (CGDD, 2010 ; Héran, 2015 ; ADEME, 2020).

Les mêmes données d'enquêtes indiquent un usage de la **marche** en forte baisse sur la période, de 1,4 km/jour/personne pour l'enquête de 1969 à 0,5 km pour l'enquête de 2008. Les données ici prises en compte sont seulement celles des trajets réalisés entièrement à pied, alors que la marche dans les déplacements en transports en commun ou d'autres modes n'est pas prise en compte. Elle augmenterait les chiffres précédemment cités d'environ 0,3 à 0,4 km/jour d'après les estimations de Papon (2012), soit une proportion plus forte en fin de période.

Les estimations utilisées ici sont donc plutôt basses, d'autant qu'elles n'incluent pas d'autres distances parcourues en marche à pied au quotidien (dans le logement, dans l'activité professionnelle, etc.), ni les distances parcourues en balade ou durant les loisirs et activités physiques. Ces questions de classification sont valables également pour le vélo utilisé comme loisir, ou pour les distances parcourues par les chauffeurs de taxi ou de poids-lourds qui ne sont pas comptées ici dans les statistiques de transport de voyageurs. Cela questionne plus largement ce qui doit être considéré comme un déplacement, et la place des transports dans les modes de vie (les méthodologies différent selon les statistiques et enquêtes : inventaires du CGDD, 2019b et 2019c ; ENTD, CGDD, 2010 ; Forum Vies Mobiles, 2020). Les modes actifs et en particulier la marche représentent une faible part des kilomètres parcourus, mais une part importante du nombre de déplacements locaux (22,3 % en 2008 pour la marche, 2,7 % pour le vélo ; CGDD, 2010) et des temps de transport (estimation de 22 % du temps de transport minimum pour la marche en 2017, cf chapitre 3). Cependant, ces modes manquent d'évaluations régulières de leur évolution, les rendant parfois invisibles comme dans les statistiques des mémentos et des comptes des transports où ils ne sont pas comptés.

3.3.2. Transports ferroviaires de voyageurs et de marchandises

Le **transport ferroviaire** est le seul mode à avoir réalisé une **transition énergétique très forte** sur la période étudiée, avec des émissions de CO_2 par voy.km et par t.km divisées par un facteur 50 entre 1960 et 2017 (de 139 à 2,8 gCO_2/voy.km et de 86 à 1,6 gCO_2/t.km, en émissions directes). Ainsi la part du transport ferroviaire dans les émissions des transports intérieurs a fortement diminué, passant de 31,4 % à 0,3 % des émissions. En absolu, les émissions des transports ferroviaires de voyageurs et de marchandises cumulés sont passées de 10,2 à 0,4 $MtCO_2$ entre 1960 et 2017, après une forte baisse à 1,5 $MtCO_2$ et une part de 2 % des émissions intérieures dès l'année 1973.

Si les émissions de la production de l'énergie (du gazole, de l'électricité) et de la combustion des agrocarburants étaient ajoutés, cela ferait un plus que doubler les émissions des années récentes, pour les porter à 0,9 $MtCO_2$ en 2017. Aussi leur prise en compte depuis 1960 amènerait à une division des émissions unitaires (par voy.km et t.km) par un facteur d'environ 30 plutôt que 50. Cette forte progression est largement liée à la fin de la machine à vapeur, dont la forte décrue a été entamée après la seconde guerre mondiale. Elle a permis au train de passer de mode trois fois plus émetteur de CO_2 par voy.km que la voiture en 1950, à un mode aux émissions 3 fois moins élevées que la voiture dès le milieu des années 70. Les progrès réalisés depuis permettent au train d'avoir des émissions de l'ordre de 15 fois moins élevées que la voiture en 2017, même en comptant les émissions liées à la production de l'énergie.

La décomposition additive du transport ferroviaire de voyageurs montre bien les changements importants sur les émissions du ferroviaires **jusqu'au milieu des années 70** (Figure 27). La figure indique de manière séparée les effets de la demande totale et du report modal, et leur addition indique l'effet du trafic ferroviaire : ici la demande totale augmente, mais le ferroviaire perd des parts modales malgré la croissance de son trafic ; l'effet combiné correspond à une hausse des émissions (la barre rouge est plus grande que la orange). Le trafic continue à augmenter après les années 70, mais la hausse s'applique à des émissions beaucoup plus faibles, d'où l'effet bien plus réduit constaté ensuite. Enfin, comme évoqué en 3.2.3, le taux de remplissage des trains a augmenté sur la période et a donc plutôt participé à la baisse des émissions, bien que cet effet ne soit pas régulier au cours du temps.

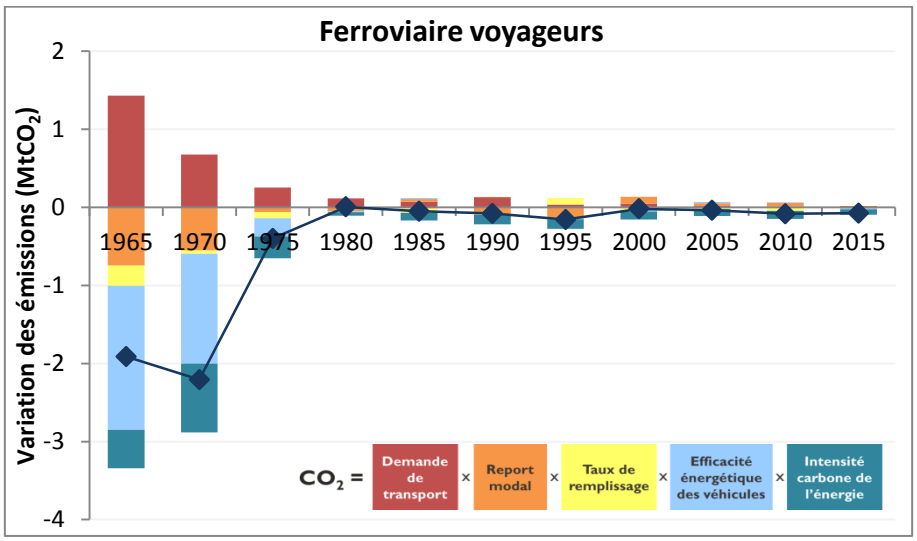


Figure 27 : Décomposition additive de l'évolution des émissions du transport ferroviaire de voyageurs de 1960 à 2015
(pas de 5 ans : l'année 1965 représente la variation sur la période de 1960 à 1965)

Les évolutions les plus importantes apparaissent sur l'efficacité énergétique et l'intensité carbone de l'énergie (voir aussi Figure 23 et Figure 25). Les fortes améliorations sont dues jusqu'au début des années 70 à la sortie du charbon et du fuel utilisés dans les **machines à vapeur**. Ces dernières ont été remplacées par des trains électriques ou au diesel (Figure 28 à droite pour les consommations d'énergie à partir de 1950). Si la majorité des baisses d'émissions sur la période apparaissent dans l'efficacité énergétique, c'est parce que les machines à vapeur étaient très peu efficaces énergétiquement, et leur remplacement par des trains diesel permettait de diviser par 4 les consommations, et par 20 dans le cas des trains électriques (CGDD, 2019b, fichier 1975_1). Les gains d'intensité carbone sont dus quant à eux à la moindre intensité carbone du diesel et de l'électricité par rapport au charbon.

L'intensité carbone et dans une moindre mesure l'efficacité énergétique ont continué à s'améliorer après la sortie de la machine à vapeur, en raison de **l'électrification progressive du réseau**. Cette électrification a été utilisée dès 1900 pour le métro parisien, puis développée en particulier à partir des années 20 dans le sud-ouest de la France, à un moment où la compagnie ferroviaire de la région développait également les barrages hydroélectriques pour fournir les trains en électricité. La part du réseau électrifié est passée de 18 % en 1960 à 57 % en 2017, sous l'effet de l'augmentation du nombre de kilomètres de lignes électrifiées, et également d'une réduction progressive de la longueur des lignes exploitées sur le réseau ferré national (RFN ; non compris réseaux RATP et tramways), en baisse de -28 % entre 1960 et 2017 (Figure 28 à gauche).

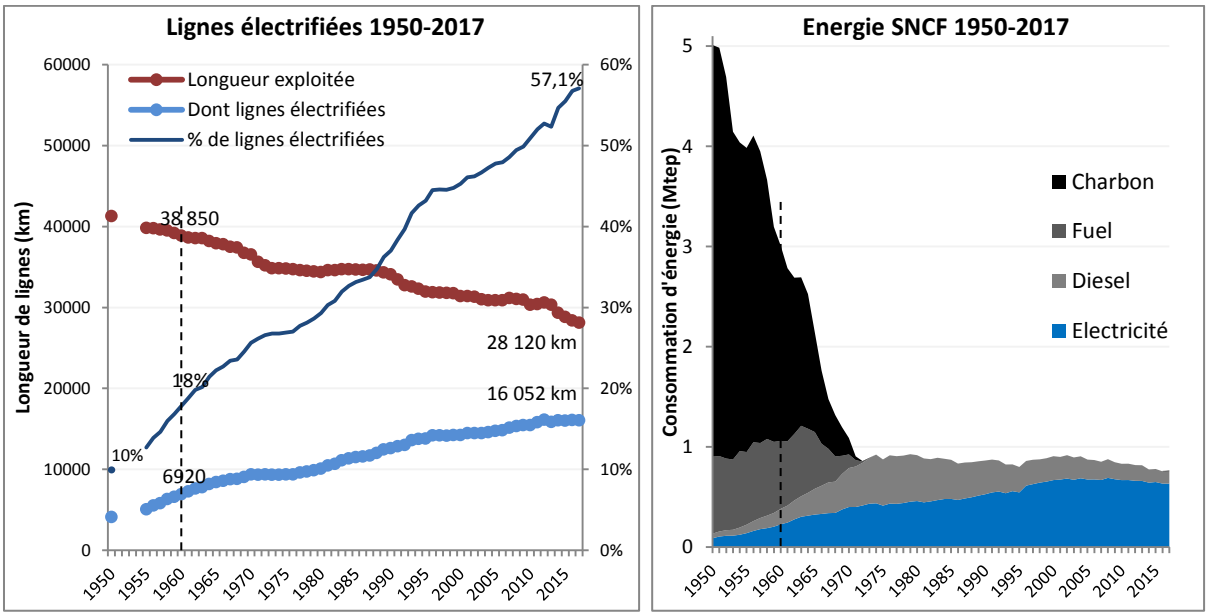


Figure 28 : Evolution des lignes électrifiées (gauche) et des consommations d'énergie de la SNCF (droite), 1950-2017
(la ligne en pointillés indique l'année 1960, début de la période étudiée ; Sources : CGDD, SNCF)

Les lignes ont été électrifiées là où les travaux étaient le plus rentables, en priorité sur le réseau structurant. Ainsi, le réseau électrifié est davantage circulé que la moyenne du RFN, par des trains plus capacitaires et mieux remplis, comme c'est le cas pour les TGV, les trains de banlieue (Transilien) et la grande majorité des Intercités. Au contraire, la majorité des lignes non électrifiées sont des lignes TER relativement moins circulées et/ou utilisées pour le fret ferroviaire. Cela explique le fait qu'environ 86 % des trafics en trains.km et 94 % des voy.km et du nombre de voyages en train sont réalisés dans des trains électriques en 2017, des

proportions bien plus fortes que la part du réseau qui est électrifiée. En raison des plus fortes consommations des trains au gazole (par voy.km et t.km ; car moins bon taux de remplissage et moins bonne efficacité des moteurs) et de la plus forte intensité carbone du gazole, ils représentent cependant 18 % des consommations d'énergie et même 60 % des émissions du transport ferroviaire en 2017 (Figure 29).

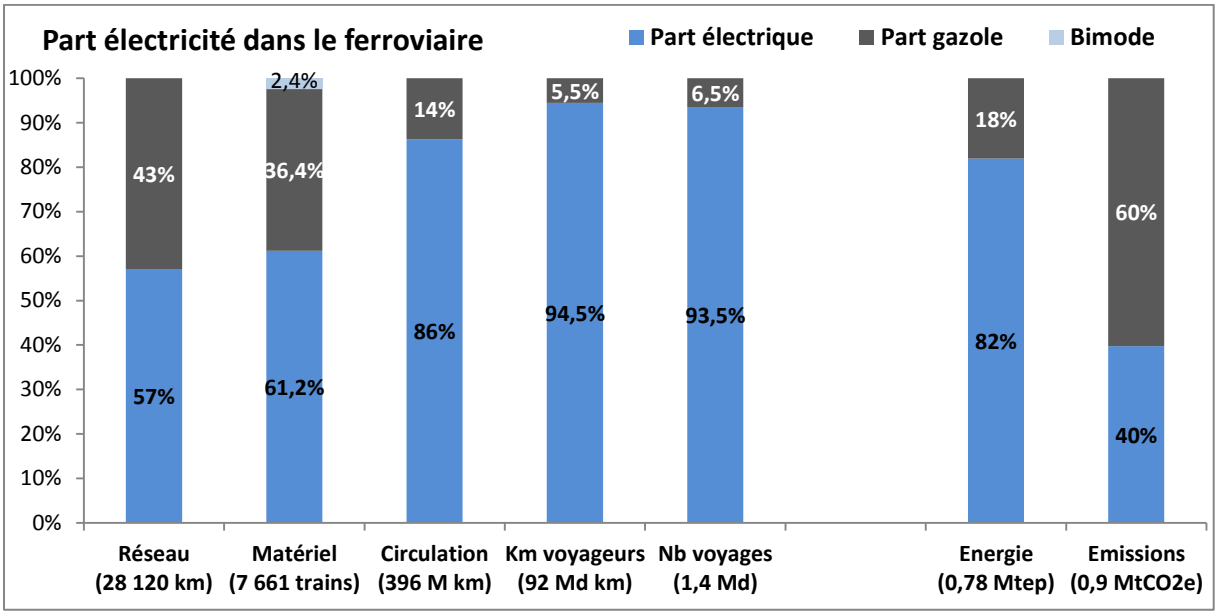


Figure 29 : Part de l'électricité dans les trafics SNCF, les consommations d'énergie et émissions du ferroviaire en 2017 (km du réseau ferré national, matériel moteur tous opérateurs, circulation des trains de voyageurs en trains.km, trafic en voy.km, en nombre de voyages, puis énergie et CO_2 pour l'ensemble du ferroviaire ; Sources : Arafer, SNCF, CGDD)

Il apparaît ainsi que la grande majorité des kilomètres en train est réalisée en traction électrique. L'inverse est également vrai : en raison de la faible électrification des autres modes, la grande majorité des kilomètres en **mobilité électrique** sont des kilomètres réalisés en train. Une estimation pour 2017 montre que le ferroviaire représentait quasiment 98 % des kilomètres parcourus en mode électrique, le reste de la mobilité électrique étant encore très minoritaire (par exemple, seuls 0,15 % des kilomètres des VP étaient réalisés en voitures électriques en 2017 ; CITEPA, 2019).

Si le transport ferroviaire a réussi sa transition énergétique et apparaît aujourd'hui comme le mode motorisé le moins émetteur de CO_2, en revanche **le train a perdu des parts modales** sur la période, surtout pour le transport de marchandises. Ainsi le fret ferroviaire représentait 56 % des t.km transportés en 1960 et les trains de voyageurs 17 % des voy.km. Depuis le milieu des années 2000, le ferroviaire ne représente plus qu'environ 10 % du transport de voyageurs et de marchandises (voir 3.2.2). Les très fortes baisses de parts modales du fret ferroviaire sont dues à la combinaison d'une demande totale en forte hausse (x 3,4) et d'une baisse des trafics de fret ferroviaire, qui ont d'abord augmenté de 57 Md t.km en 1960 à 74 Md t.km en 1974, avant une forte baisse jusqu'à une demande entre 30 et 35 Md t.km depuis 2009. Au contraire, pour les trains de voyageurs, la demande a quasiment été multipliée par 3 sur la période (Figure 30, à gauche), et montre l'importance d'une modération de la demande totale pour obtenir des reports modaux significatifs. Depuis 1995, les trains de voyageurs ont regagné des parts modales, pour un effet sur les émissions qui peut être estimé à -2,7 $MtCO_2$.

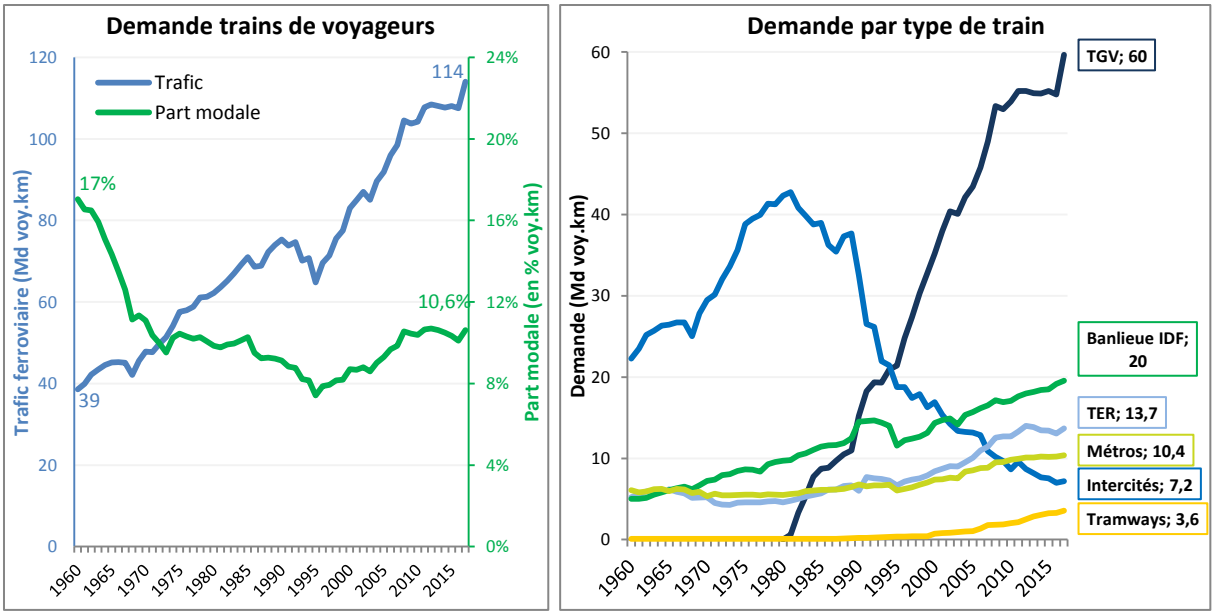


Figure 30 : Trafics ferroviaires (à gauche, détails à droite) et part modale dans la demande voyageurs de 1960 à 2017

En raison des évolutions contrastées des demandes de voyageurs et de marchandises, la **proportion des trains de voyageurs** parmi l'ensemble des circulations ferroviaires a régulièrement augmenté, en passant de 52 % des trains.km en 1960 à 81 % en 2017 (191 sur 401 M trains.km en 1960, et 396 sur 489 en 2017 ; CGDD, 2019c et Arafer, 2018). L'ensemble des circulations sur le réseau est resté relativement stable au cours du temps, indiquant une tendance à une utilisation plus intense du réseau en raison de la baisse de 28 % des longueurs de lignes. Les circulations ont d'abord plutôt augmenté de 400 M trains.km en 1960 jusqu'à fluctuer autour des 500 M trains.km, puis elles ont baissé sur les dernières années, d'un maximum de 538 en 2002 à 489 M trains.km en 2017.

Pour les trains de voyageurs, les évolutions des trafics sont contrastées selon les types de trains (compilation en Figure 30, à droite).

Les **trains grandes lignes** regroupaient les trains régionaux et les trains Intercités avant 1965 (ils ont été séparés en proportion équivalente avant 1965 pour la Figure 30). Les trains régionaux ont d'abord plutôt baissé jusqu'au début des années 70, avant de multiplier leurs trafics par 3 (de 4,3 à 13,7 Md voy.km pour les TER en 2017). Les trains Intercités ont quasiment doublé de trafics entre 1960 et 1981 (de 22 à 43 Md voy.km), année qui marque la mise en service de la ligne à grande vitesse (LGV) Paris-Lyon et les débuts du TGV. Le transfert important des trafics longue distance vers le TGV entraîne une forte baisse des trafics Intercités (de 43 à 7,2 Md voy.km de 1981 à 2017, soit une division par 6, et -36 Md voy.km). Cette baisse est plus que compensée par la hausse des trafics TGV, qui augmentent fortement au fur et à mesure des mises en service de nouvelles LGV (2 640 km de LGV fin 2017 et 12 542 km de lignes parcourues par des TGV) et du développement de l'offre, jusqu'à atteindre 60 Md voy.km en 2017.

Les **trains de banlieue** en Île-de-France (IDF) montrent une progression régulière au cours de la période, avec une multiplication par 4 des trafics (hormis la variation de l'année 1990 qui correspond probablement à un changement statistique, et l'année 1995 qui était marquée par une forte grève qui s'est particulièrement fait ressentir sur les trafics en IDF).

Les **métros** parisiens restent en revanche stables autour de 5,5-6 Md voy.km jusqu'en 1994. Le trafic a ensuite progressé de 5 Md voy.km pour l'année de la grève de 1995 jusqu'à 7,8 Md voy.km en 2017. Par ailleurs, la progression du métro s'explique également par la croissance des réseaux de métros dans 5 autres villes de France à partir des années 70, avec Lyon (première ligne en 1974), Marseille (1977), Lille (1983), Toulouse (1993) et Rennes (2002). Ces réseaux représentent actuellement un trafic de 2,6 Md voy.km en 2017, les métros parisiens représentant les trois quarts du trafic français en métro.
Enfin, les réseaux de **tramways** en France existant au début du XXème siècle ont quasiment totalement été abandonné entre 1925 et 1964 (1925-1938 en IDF, surtout 1950-1964 pour les grands réseaux de province), à l'exception de 3 lignes à Marseille, Saint-Etienne et Lille. Ils ont été relancés à partir du milieu des années 80, d'abord à Nantes (1985), Grenoble (1987), puis Strasbourg, Rouen et Montpellier à la fin des années 90, jusqu'à atteindre 27 villes en France fin 2019 (Héran, 2015 ; Cerema, 2019 ; L'Express, 2019). Le trafic des tramways atteint 3,6 Md voy.km en 2017, avec cette fois les trois quarts des trafics concentrés sur les réseaux de province (sources des trafics ferroviaires : CGDD, SNCF, Omnil, Arafer). Pour rappel, les trafics des réseaux de bus urbains sont répartis pour moitié entre IDF et province.

3.3.3. Transport aériens intérieurs et internationaux

La décomposition des émissions réalisée considère dans les transports aériens les trajets intérieurs, c'est-à-dire en Métropole ainsi qu'avec les Outre-Mer. Les grandes tendances détaillées précédemment font apparaître une **forte hausse de la demande** (x 22 entre 1960 et 2017 d'après les données compilées et estimées), une forte progression du remplissage des avions qui a limité les gains d'efficacité par veh.km, et une intensité carbone constante. Ces tendances se retrouvent dans la Figure 31. Les facteurs de demande et de report modal apparaissent en hausse sur l'ensemble de la période, hormis entre 2000 et 2005 pour le report modal. La principale raison est la baisse du trafic observée à la suite des attentats du 11 septembre 2001. Elle a eu un impact à la baisse de -0,8 $MtCO_2$ sur les émissions de l'aérien entre 2000 et 2005, alors que la tendance des émissions est plutôt stable entre 2005 et 2017.

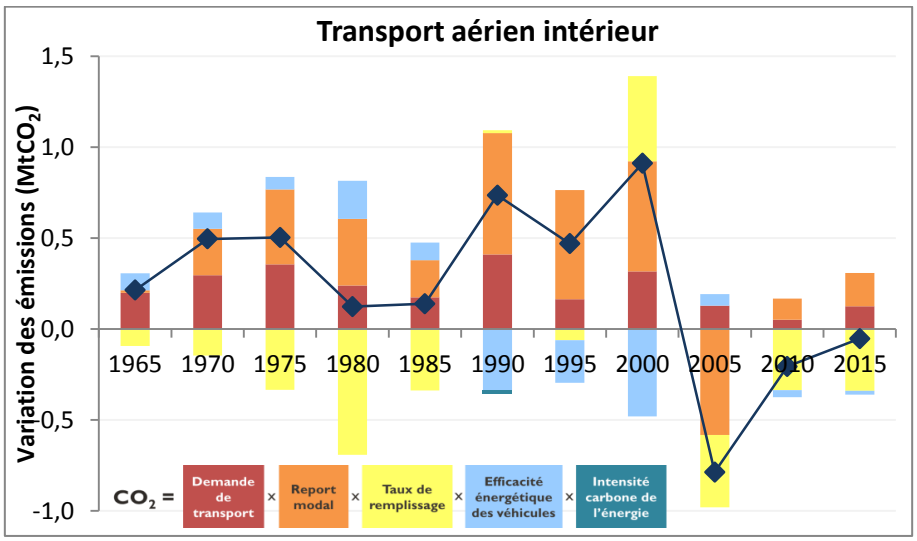


Figure 31 : Décomposition additive de l'évolution des émissions du transport aérien intérieur de voyageurs, 1960-2015
(pas de 5 ans : l'année 1965 représente la variation sur la période de 1960 à 1965)

Au sein du **trafic aérien intérieur**, les trajets avec l'Outre-mer représentent 50 % des voy.km, 21 % des km parcourus par les avions (le remplissage moyen étant de 360 passagers, contre 95 pour les trajets métropolitains), et 36 % des consommations d'énergie et des émissions, des proportions en hausse ces dernières décennies. La croissance des trafics ces dernières années est en effet plus forte pour les trajets avec l'Outre-mer (+ 13 % de passagers en 2017 par rapport à 2000) qu'en Métropole.
En Métropole, les trafics sont stables ces dernières années sur les liaisons radiales (depuis ou vers Paris), après une baisse au début des années 2000 suite aux attentats de 2001, soit -21 % entre 2000 et 2017. Au contraire, le nombre de passagers a augmenté de +53 % sur 2000-2017 sur les liaisons transversales. Ces différences s'expliquent notamment par un développement du réseau TGV qui s'est concentré sur des liaisons radiales (données CGDD, 2019b ; DGAC).

Si les **gains d'efficacité énergétique** par voy.km (voir Figure 24) ont été très forts sur la période avec une division quasiment par 4 des consommations par passager, cela a été possible par la multiplication par 4 du remplissage des avions (Figure 21) tout en limitant le surplus de consommation lié aux avions plus capacitaires (Figure 23). Ces ordres de grandeur sont cohérents avec les baisses de consommations d'énergie par siège de 70 % identifiés pour les nouveaux appareils entre 1950 et 1997. Ces améliorations ont été obtenus pour 4/7ème par des gains sur les moteurs et 3/7ème par le fuselage (soit par la forme des avions ; IPCC, 1999).
Ces chiffres concernent les avions à réaction utilisés actuellement, qui ont remplacé la génération précédente des avions à hélices, majoritairement durant les années 60. Les avions à hélices étaient au moins deux fois plus efficaces que les premiers avions à réaction, ce qui explique les hausses de consommation par avion.km sur le début de la période (Figure 23) et la stagnation des consommations par voy.km sur les premières années considérées (Figure 24 ; Peeters et al, 2005).

La **prise en compte de l'aérien international** a des impacts très significatifs sur les tendances identifiées pour le transport aérien. En effet, les trafics et les émissions sont un peu plus de 6 fois plus élevés au total que lorsque les trafics intérieurs seuls sont considérés (passage de 31 à 192 Md voy.km, et de 3,2 à 20 $MtCO_2$; DGAC). Ainsi les émissions du transport de voyageurs en 2017 augmentent de 18,5 % (et passent de 91,6 à 108,6 $MtCO_2$). Ces chiffres de l'aérien international sont obtenus en considérant la moitié des trafics et des émissions des trajets internationaux partant ou atterrissant en France.
La croissance des trafics internationaux en voy.km est très forte, d'un peu plus de 5 % par an en moyenne depuis 1980, une croissance régulière que les différentes crises économiques ou les attentats de 2001 n'ont entamé que très temporairement. Les progrès d'efficacité énergétique sur les appareils ont permis de limiter quelque peu l'impact sur les émissions, qui ont néanmoins augmenté en moyenne d'un peu plus de 3 %/an depuis le début des années 90.
En raison de sa croissance soutenue, l'intégration de l'aérien international dans la décomposition des émissions des voyageurs augmente la croissance des émissions entre 1960 et 2017 (x 4,7 au lieu de 4,2), de la demande (5,3 au lieu de 4,7) et l'effet négatif du report modal (1,29 au lieu de 1,22). En revanche, cela réduit l'impact négatif du taux de remplissage (1,14 au lieu de 1,28) et réduit très légèrement les progrès d'efficacité (0,66 au lieu de 0,63) et de l'intensité carbone (0,91 au lieu de 0,90 ; Figure 32, comparé à la Figure 12).

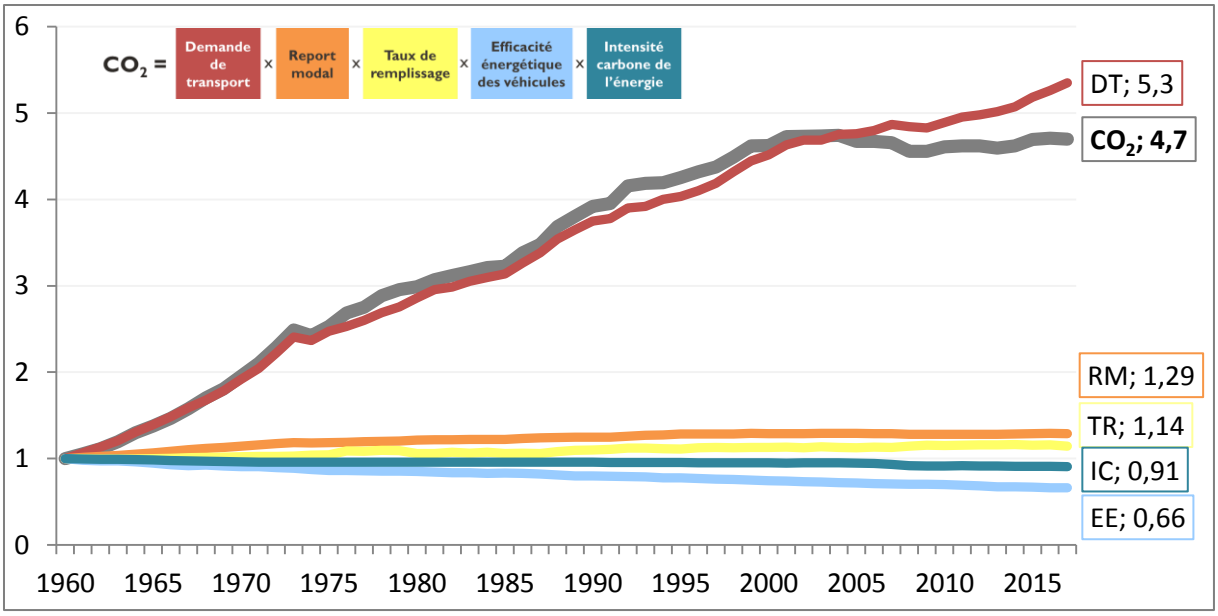


Figure 32 : Décomposition multiplicative des émissions de CO_2 voyageurs sur 1960-2017, aérien international compris

3.3.4. Fluvial et maritime

Le **transport fluvial** est intégré à la décomposition des émissions des marchandises. Le trafic a augmenté jusqu'au début des années 70, avant d'être divisé par 2, avec des parts modales qui sont passés d'environ 10 à 2 % des t.km transportés. Le remplissage des bateaux a fortement augmenté, tandis que l'intensité carbone s'est améliorée à partir de 2011 avec le passage au gazole non routier qui incorpore une part de biocarburants (voir 3.2).

Le **transport maritime international** n'est pas intégré à la décomposition, en raison surtout du manque de données. Les émissions sont pourtant loin d'être négligeables, et représentent 5,6 $MtCO_2$ en 2017, soit plus de 30 fois d'émissions que le fluvial qui représente 0,17 $MtCO_2$ la même année. Ajouter le maritime international aux émissions des transports intérieurs de marchandises augmenterait ces émissions de +16 %. Surtout, le maritime international a émis jusqu'à 17 $MtCO_2$ en 1973, le premier choc pétrolier stoppant la très forte croissance qui précédait, le deuxième choc pétrolier entrainant ensuite une forte baisse de ces émissions pour fluctuer autour de 8 $MtCO_2$ pendant plusieurs années à partir de 1983. Intégrer le maritime augmenterait les émissions liées au transport de marchandises de 87 % en 1973 (CITEPA). Les données historiques manquantes concernent surtout les trafics en t.km. Le scénario de l'agence internationale de l'énergie (AIE, cf chapitre 2) pour la France indique 330 Md t.km pour la navigation totale en 2015, soit un niveau comparable au trafic intérieur de marchandises pris en compte dans la décomposition, ou l'équivalent de 0,3 % du trafic maritime mondial (d'environ 100 000 Mds t.km en 2015 ; CNUCED, 2016). Enfin, les trafics et émissions évoqués ne concernent probablement qu'une partie du trafic maritime qui intéresse la France, étant donné qu'une partie importante transite par des ports étrangers comme ceux d'Anvers ou de Rotterdam. En raison de l'importance des émissions et des trafics, la prise en compte du maritime modifierait significativement les résultats de la décomposition. Cependant, les coefficients obtenus pour les 5 facteurs de la décomposition seraient probablement délicats à interpréter.

4. Discussion et conclusion

Points et messages clés :

- ✓ Les **politiques publiques** n'ont eu qu'un **faible impact** sur l'évolution récente des émissions ; le seul effet mesurable dans les décompositions est une baisse de 3 % des émissions voyageurs, dû au report modal vers le train ; les autres influences sont plus faibles et/ou plus incertaines.
- ✓ Le facteur majeur d'évolution a été la **demande**, sans politiques visant sa modération. Au contraire, la promotion des transports en commun, du remplissage des poids-lourds ou de l'efficacité énergétique ont pu avoir des **effets rebonds** sur la demande.
- ✓ A court terme et pour les **prochains budgets carbone**, la demande devrait rester le facteur majeur, les autres facteurs évoluant plus lentement ; une forte accélération des baisses d'émissions unitaires est nécessaire pour atteindre les objectifs de court terme.

Ce chapitre a étudié les **émissions de CO_2 des transports** de voyageurs et de marchandises sur la période **1960-2017** en **France**. Leur évolution est suivie grâce à une décomposition des émissions avec les **5 facteurs** de la stratégie nationale bas-carbone, que sont : la demande de transport, le report modal, le taux de remplissage des véhicules, l'efficacité énergétique et l'intensité carbone de l'énergie.

La **demande** apparaît comme le principal facteur expliquant l'évolution passée des émissions, aussi bien pour les tendances de long terme que pour les tendances récentes. L'analyse révèle seulement un **faible découplage** entre la demande et les émissions pour les voyageurs et un découplage quasiment nul pour le transport de marchandises, sur la période 1960-2017 :

- ✓ Pour les voyageurs, multiplication de la demande par **4,7** et des émissions par **4,2** ;
- ✓ Pour les marchandises, multiplication de la demande par **3,4** et des émissions par **3,3**.

Ainsi, les **émissions unitaires** (par km ou t.km) se sont peu améliorées en 57 ans (Figure 33) :

- ✓ Elles ont baissé de **-13 %** pour les voyageurs, passant de 97 à 85 gCO_2/voy.km sans compter les émissions des biocarburants, et ont baissé de -7 % en les comptant ;
- ✓ Elles ont baissé de **-3 %** pour les marchandises, passant de 102 à 99 gCO_2/t.km ; elles ont même augmenté de +4 % en comptant les émissions des biocarburants.

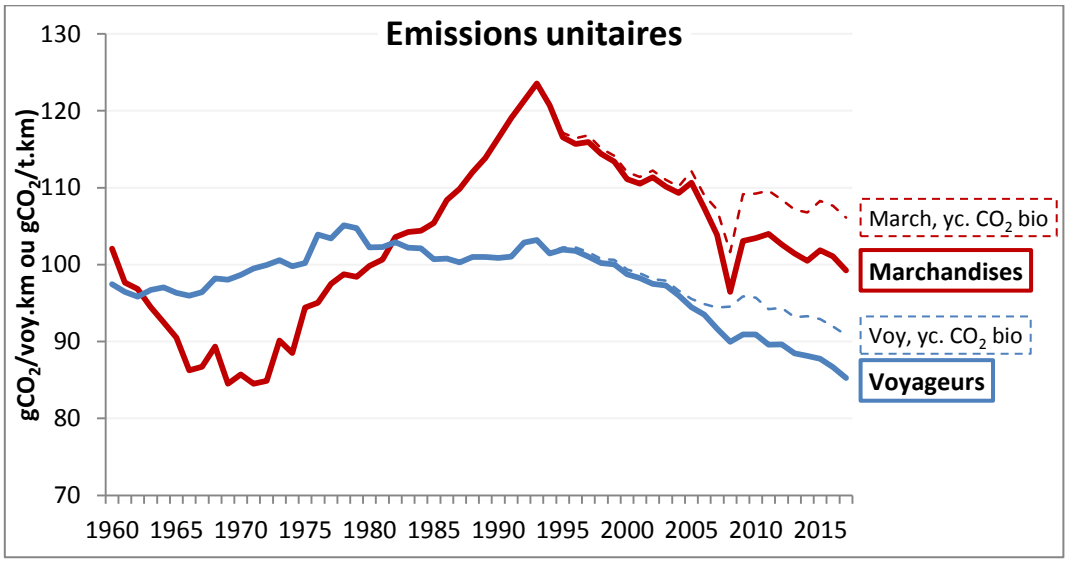


Figure 33 : Emissions unitaires moyennes des transports de voyageurs et de marchandises, avec ou sans les émissions de CO_2 des biocarburants, liées à la combustion de la biomasse

Pourtant, les émissions unitaires de certains modes se sont fortement améliorées, en particulier pour le transport ferroviaire pour lequel elles ont été divisées par environ 50 sur la période. Elles ont également été quasiment divisées par 4 pour le transport aérien, et ont baissé de 31 % pour les poids-lourds.

Mais la période est marquée par une domination de deux modes parmi les plus polluants, que sont la **voiture individuelle** pour les voyageurs et les **poids-lourds** pour le transport de marchandises. Si des progrès ont été réalisés sur ces modes, essentiellement par l'efficacité énergétique pour les voitures et par un meilleur remplissage pour les poids-lourds, ils ont été partiellement compensés par d'autres facteurs qui ont joué à la hausse sur les émissions unitaires des transports.
Ainsi sur la période 1960-2017, les **facteurs à la hausse** concernent : le report modal, pour le transport de voyageurs (+22 %) mais surtout pour les marchandises (+91 %) ; et le taux de remplissage des voitures, qui a baissé et a donc participé à la hausse des émissions (+28 %).
Au contraire, les **facteurs à la baisse** concernent : le taux de remplissage des marchandises (-34 %) ; l'efficacité énergétique, surtout pour les voyageurs (-37 %, et -10 % pour les marchandises) ; et l'intensité carbone, dans des proportions similaires pour les voyageurs et les marchandises (-10 % et -16 %).

Si le découplage est très faible sur l'ensemble de la période, la Figure 33 indique que **les émissions unitaires baissent depuis 1993**, aussi bien pour le transport de voyageurs que de marchandises. Le rythme moyen de baisse est de l'ordre de -0,8 %/an pour les voyageurs et de -0,9 %/an pour les marchandises. Cette baisse se réduit respectivement à **-0,5 %** et **-0,6 %/an** en tenant compte des émissions de combustion des biocarburants.
Les **politiques publiques environnementales** ayant agi sur les 4 facteurs influençant ces émissions unitaires, il est intéressant de comprendre leur rôle dans cette baisse récente.

Le **report modal** a agi dans le sens d'une réduction des émissions à partir de 1995, avec un effet à la baisse sur les émissions du transport de voyageurs qui peut être attribué au volontarisme des politiques publiques pour développer l'offre **ferroviaire** (tandis que les transports en commun routiers n'ont pas vraiment gagné de parts modales). La baisse des émissions obtenue est équivalente à 2,7 $MtCO_2$, soit 3 % des émissions du transport de voyageurs, et l'équivalent du quart des progrès des émissions unitaires depuis 1993 (-12 %, en comptant le CO_2 biomasse).
Pour le **transport de marchandises**, les parts modales sont relativement constantes depuis 2005. Les politiques publiques ont pour le moment échoué à développer la part des transports non routiers, malgré la volonté affichée. Par exemple, le Grenelle prévoyait d'amener cette part de 14 % à 25 % d'ici 2022 (Legifrance, 2009 ; Art. 11). Les données montrent une part constante autour de 12 % depuis plusieurs années, loin de cet objectif. Atteindre 25 % d'ici 2022 aurait nécessité des changements très forts, pour espérer modifier suffisamment les grands équilibres entre les modes de transport de marchandises, au-delà de leur domaine de pertinence respectif actuel. Aucune politique publique n'a permis de remettre en cause de manière significative les avantages du transport routier en termes de coûts relatifs (péages et taxation de l'énergie notamment), de vitesse, de flexibilité ou d'infrastructures, par rapport aux modes ferroviaire et fluvial.

Le **taux de remplissage** a eu un rôle défavorable sur les émissions des voyageurs et un rôle favorable pour les marchandises.
Le **taux d'occupation des voitures** a régulièrement diminué sur la période en raison notamment de la baisse du nombre de personnes par ménage et de l'accès croissant à la voiture individuelle pour les ménages. Ces deux facteurs sont extérieurs aux politiques publiques et les quelques incitations locales au covoiturage (plateformes, aires de covoiturage…) ont été insuffisantes pour développer la pratique quotidienne. Le **covoiturage** longue distance s'est développé par une initiative privée, avec un succès indéniable, tout en ne représentant qu'une trop faible part des trafics (0,4 % des voy.km en transports routiers individuels en 2015) pour avoir un impact significatif sur le taux d'occupation moyen. Par ailleurs, ce trafic en covoiturage a été capté pour 52 % au train et constitue pour 13 % des utilisateurs de nouveaux trajets, ces effets rebonds sur le report modal et la demande annulant les potentiels bénéfices en termes d'émissions (chiffres enquête IFOP dans SNCF, 2015).
Ces effets rebonds ou interactions avec les autres facteurs sont encore plus forts pour la hausse du **taux de remplissage des poids-lourds**. Ce dernier a fortement augmenté sur la période, limitant en même temps les progrès d'efficacité énergétique en raison du poids plus important des véhicules. Cependant, l'impact des deux facteurs cumulés est tout de même fortement positif, avec une baisse de l'impact carbone de la tonne.km transportée en poids-lourds de 36 %. Cette stratégie a également permis de baisser le coût du transport routier, et a potentiellement facilité la demande pour ce mode, avec des effets rebonds potentiels sur la demande et le report modal. Les politiques publiques ont pu en partie encourager ces évolutions, par exemple par l'autorisation de circulation des poids-lourds de 44 tonnes en 2013. Cependant, l'impact sur le taux de remplissage moyen n'apparaît pas clairement, puisque le chargement est fluctuant autour de 10 tonnes sur les années 2010. De plus, l'impact sur les émissions est incertain en raison des effets rebonds. Ces éléments indiquent en tous cas un potentiel qui paraît limité à l'avenir sur ce facteur pour les marchandises.

L'**efficacité énergétique des véhicules** possède des tendances relativement variées selon les modes de transport, en fonction des évolutions techniques et pour beaucoup de l'évolution du poids et du remplissage des véhicules. Ces derniers ont pu limiter les gains de consommations par véhicule.km, comme évoqué ci-dessus.
L'efficacité des moteurs s'est régulièrement améliorée sur la période, et a notamment permis des progrès importants pour les **voitures**. Comme pour le remplissage des poids-lourds, il y a des incitations économiques évidentes à limiter les consommations, car c'est une condition de succès du mode de transport de limiter son coût d'utilisation pour les usagers ou entreprises, rendant ce type de mesure à nouveau soumis aux effets rebonds. Cette incitation naturelle à l'efficacité explique les progrès d'efficacité réguliers sur la période, avant même d'avoir des incitations de politiques publiques visant à limiter les consommations.
La politique la plus structurante en France a été l'instauration du **bonus-malus** sur les voitures neuves en 2008. Il est difficile d'isoler l'impact spécifique de la mesure étant donné que sa mise en œuvre intervient au moment d'une crise économique et d'une forte hausse des prix du pétrole, qui encouragent également des achats de voitures plus économes. Cependant, si l'année est marquée par une plus forte baisse des émissions qui semble se confirmer dans les années suivantes pour les émissions mesurées en laboratoire, cette tendance durable n'est

pas visible pour les émissions en conditions de conduites réelles. En effet, l'écart entre les émissions déclarées et le réel a été croissant au cours du temps, jusqu'à dépasser les +35 % en 2017, et les deux-tiers des baisses d'émissions affichées depuis 2001 sont factices (ICCT, 2019b ; France Stratégie, 2019). Aussi le malus ne s'est appliqué qu'à 10 à 20 % des ventes de véhicules entre 2010 et 2017, avec des montants relativement faibles pour les premiers seuils. Ces caractéristiques ont rendu le malus peu désincitatif, et notamment incapable de contenir la croissance récente de la part de marché des SUVs (*sport utility vehicles*) de 5 à 38 % entre 2008 et 2019 (CCFA, 2020), participant fortement à la stagnation récente des émissions à 111 gCO_2/km entre 2015 et 2019. Au contraire, les bonus s'appliquaient à 50 % des ventes en 2010, avant de fortement baisser au fil des années (MTES-SDES, 2020). Ces bonus ont pu encourager davantage de ventes, contribuant à court terme à une hausse des émissions en tenant compte de la production des véhicules, d'après une étude de l'Insee. A plus long terme, l'analyse révèle divers effets qui ne permettent pas de conclure à un effet positif ou négatif du système mis en place sur les émissions (Givord et d'Haultfoeuille, 2012).
Enfin, le bonus-malus ne concerne pas les **véhicules utilitaires légers** (VUL) ni les **poids-lourds** (PL). Des premiers objectifs pour les PL ont été fixés en 2019 dans les réglementations européennes, tandis que les VUL ont des objectifs au niveau européen depuis 2011. L'objectif de limiter les émissions des VUL neufs à 147 gCO_2/km pour 2020, a été atteint dès 2016. Ce succès fait exception parmi les objectifs d'efficacité énergétique fixés par le passé. En effet, les objectifs européens fixés pour les voitures neuves à 95 gCO_2/km pour 2021 sont très en retard, avec des émissions stables à 111 gCO_2 depuis 2015, bien que le début de l'année 2020 montre des évolutions bien plus favorables (MTES-SDES, 2020). Le retard est bien plus important encore pour les **parcs de véhicules**, pour lesquels le Grenelle prévoyait des émissions moyennes de 120 gCO_2/km en moyenne en 2020. Les chiffres du CITEPA montrent une baisse d'émissions de -8 % de 2005 à 2017, alors que l'objectif visait une baisse de 34 % (Legifrance, 2009, Art. 13). Ainsi, à 3 ans de l'échéance, les émissions moyennes du parc étaient de 165 g en 2017, soit +38 % par rapport à l'objectif. Le Grenelle fixait des objectifs similaires en proportion pour les VUL et les motocycles, et le niveau en 2017 était plus élevé de +42 % par rapport au niveau attendu pour 2020 (CITEPA, 2019, fichier routier-indic).
Si l'effet de ces différentes politiques sur l'efficacité des flottes de véhicules n'a pas forcément été nul, il apparaît en tous cas relativement faible et très loin des objectifs qui avaient pu être fixés par les politiques publiques. Par ailleurs, des règlements sur les vitesses maximales des poids-lourds ou des programmes d'**écoconduite** ont pu fournir des effets positifs sur le transport de marchandises. Par exemple, la charte Objectif CO_2 adressée aux transporteurs fait état d'un gain de l'ordre de 0,4 $MtCO_2$ par an, une baisse qui équivaut à 1,6 % des émissions moyennes annuelles des poids-lourds (env. 25 $MtCO_2$; Objectif CO_2, 2020).
Il n'en reste pas moins que l'efficacité énergétique a été un **contributeur important à la baisse des émissions unitaires**, pour lesquelles il reste des marges de manœuvres importantes à l'avenir. Au-delà des purs progrès techniques sur les moteurs qui approchent nécessairement de l'asymptote au fur et à mesure des progrès réalisés, le surdimensionnement des véhicules (voir les évolutions historiques pour la voiture en 3.3.1) offre des marges de progression sur la baisse de la taille, du poids, de la puissance ou encore de la vitesse, potentiels qui seront davantage explorés dans les chapitres suivants.

L'**intensité carbone de l'énergie** est parmi les 5 facteurs celui qui a le moins évolué sur la période. L'identité réalisée révèle clairement l'impact du développement des **agrocarburants** à la fin des années 2000, comme un contributeur à la baisse des émissions qui peut être chiffré à environ 7 $MtCO_2$. Cependant, un tel gain apparaît en raison de l'hypothèse de neutralité carbone de ces carburants dans la comptabilité des émissions. L'analyse de l'impact carbone des agrocarburants consommés en 2017 montre que leurs émissions sont en réalité similaires au pétrole lorsque sont pris en compte le cycle de vie de leur production et les changements d'affectation des sols pour les mettre en culture. Ainsi les politiques publiques favorisant le développement des agrocarburants n'ont pas permis de réduire significativement les émissions. C'est pour cela que certains chiffres dans cette étude considèrent également les émissions de combustion des agrocarburants (ou CO_2 biomasse), étant donné que du CO_2 est bien émis par leur combustion au même titre que les carburants pétroliers, et que leur production en amont ne permet pas de compenser ces émissions. L'impact étant fortement dépendant du type de culture, la priorité est d'arrêter la consommation des huiles les plus émettrices à produire et qui nécessitent des importations, telles que l'huile de palme et de soja. A l'avenir, des biocarburants de **2nde génération** produits à partir de déchets pourraient également être développés. Cependant, leur potentiel est limité et ne pourra pas remplacer une partie importante des carburants liquides consommés aujourd'hui (cf chapitre 4).
Les politiques publiques favorisant le véhicule électrique ont permis au marché de décoller, avec des effets marginaux sur les émissions sur la période, car ils ne représentent que 0,24 % du parc de voitures et 0,15 % du trafic en 2017 (CITEPA, 2019).

Ainsi l'analyse des principales **politiques publiques environnementales** ayant agi sur la réduction des émissions unitaires, révèle globalement des **impacts limités** de ces politiques : soit l'impact est relativement faible au vu des moyens déployés, dans le cas du report modal pour les voyageurs ; soit l'impact n'est pas clair car sans rupture claire par rapport au passé, dans le cas du taux de remplissage des poids-lourds et de l'efficacité énergétique, avec des effets rebonds possibles sur d'autres facteurs ; soit l'impact de le nouvelle énergie n'est pas meilleure en analyse de cycle de vie, dans le cas des agrocarburants.
Pour autant, cette analyse n'est **pas exhaustive**, et les émissions auraient pu être encore plus élevées sans certaines politiques qui n'ont pas obtenu les résultats souhaités, comme pour le fret ferroviaire ou l'efficacité énergétique des voitures. Aussi, l'analyse s'est essentiellement limitée aux **politiques environnementales**. Certaines politiques publiques qui n'agissaient pas dans le but de réduire les émissions ont pu participer à leur baisse, comme il sera vu en chapitre 3 dans le cas de politiques de sécurité routière entraînant une baisse des vitesses.

Il peut néanmoins être remarqué que de **nombreux objectifs environnementaux** fixés pour le secteur des transports ces dernières années **n'atteignent pas leur but initial**. C'est le cas pour : les objectifs ambitieux de report modal et d'efficacité énergétique du Grenelle ; les objectifs de décarbonation par les agrocarburants ; ou les baisses d'émissions en absolu fixées au moment du Grenelle (revenir en 2020 au même niveau d'émissions qu'en 1990 ; encore +10 % en 2018) ou pour le premier budget carbone pour 2015-2018 (qui a été dépassé de +8,1 % en moyenne sur la période, alors que l'objectif a été fixé en 2015 ; MTES, 2020).

De ces échecs passés, il faut au moins en tirer comme enseignement le **besoin de politiques publiques beaucoup plus fortes et ambitieuses** à l'avenir, surtout dans un contexte d'objectifs relevés à la hausse.
Il faudra aussi **changer de vision**, pour considérer aussi le **potentiel de politiques de sobriété et de modération de la demande**, telles que le développement de véhicules légers, le déploiement d'une politique cyclable ambitieuse, la réduction du trafic aérien, ou encore la baisse des vitesses sur les routes les plus rapides. Ces évolutions ont l'avantage d'être peu coûteuses pour les politiques publiques et les usagers, tout en pouvant apporter des baisses d'émissions significatives à relativement court terme.
Par le passé, les principales politiques publiques se sont concentrées au contraire sur l'augmentation de l'offre de certains modes bas-carbone (transports en commun, ferroviaire) et sur l'amélioration de l'efficacité des modes les plus polluants (poids-lourds, voiture), politiques qui sont nécessaires mais non suffisantes car ne remettant pas en cause la place importante de ces modes fortement consommateurs d'énergie.
Ainsi **ces politiques ont pu encourager directement ou indirectement** (par effets rebonds) **la demande de transport, qui a été le principal facteur d'évolution des émissions**. Cette demande a évolué sous l'effet de nombreux facteurs, tels que la croissance du PIB, le prix des carburants, le taux de motorisation des ménages, l'aménagement du territoire et des activités, les infrastructures de transport, l'évolution de la vitesse et du coût relatif des modes. Ainsi la forte hausse de la demande sur la période a entraîné la hausse des émissions sur les dernières décennies du XXème siècle. Son plafonnement sur la décennie 2000 pour les voyageurs et son pic au moment de la crise de 2008 pour les marchandises ont été les principales évolutions expliquant la baisse des émissions des transports au début du XXIème siècle, dans un contexte de légère baisse des émissions unitaires, de l'ordre de -0,5 % pour les voyageurs et -0,6 %/an pour les marchandises depuis 1993 (-0,8 et -0,9 %/an hors CO_2 biomasse).

L'étude des scénarios de prospectives dans le chapitre 2 montrera qu'une forte accélération de ces gains d'émissions unitaires est nécessaire entre 2015 et 2030 dans la **SNBC** (stratégie nationale bas-carbone), pour atteindre respectivement **-3,8 %/an et -2,2 %/an** pour les voyageurs et les marchandises. Les tendances observées depuis 2015 et les politiques publiques récentes ne laissent pas entrevoir une telle rupture pour le moment. Ainsi l'atteinte des prochains budgets carbone semble d'ores et déjà fortement compromise, ou conditionnée à de fortes baisses de la demande liées à une crise économique ou une forte hausse des prix du pétrole.
L'année 2020 ne dérogera pas à cette règle, avec une forte baisse des émissions à prévoir en raison de la crise du coronavirus, qui pourrait faire passer les émissions de l'année 2020 sous celles de l'année 1990, comme le visait le Grenelle. Mais cette situation n'est pas du tout satisfaisante, car c'est une transformation durable des transports qui est nécessaire pour atteindre les objectifs des prochains budgets carbone à court terme et l'objectif de neutralité carbone à long terme. **A cette crise devra donc suivre une plus forte action des politiques publiques et de l'ensemble de la société sur les 5 leviers de décarbonation des transports.**

Le chapitre 2 reviendra sur les potentiels de ces 5 facteurs d'évolution des émissions pour atteindre ces objectifs à l'avenir, via l'étude des **scénarios de prospectives** français.

Bibliographie

ADEME, 2015. *Enquête auprès des utilisateurs du covoiturage longue distance*. Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par : 6t-bureau de recherche. https://www.ademe.fr/enquete-aupres-utilisateurs-covoiturage-longue-distance

Andreoni, V., Galmarini, S., 2012. *European CO_2 emission trends: A decomposition analysis for water and aviation transport sectors*. Energy, Volume 45, Issue 1, pp. 595-602. https://doi.org/10.1016/j.energy.2012.07.039

Andrés, L., Padilla, E., 2018. *Driving factors of GHG emissions in the EU transport activity*. Transport Policy, Volume 61, pp. 60-74. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2017.10.008

Ang, B. W., 2004. *Decomposition analysis for policymaking in energy: which is the preferred method?* Energy Policy, Volume 32, Issue 9, pp. 1131-1139.

Ang, B. W., 2005. *The LMDI approach to decomposition analysis: a practical guide*. Energy Policy, Volume 33, Issue 7, May, pp. 867-871. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.10.010

Ang, B. W., 2015. *LMDI decomposition approach: A guide for implementation*. Energy Policy, Volume 86, pp. 233-238. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.07.007

Ang, B. W., 2016. *A Simple Guide to LMDI Decomposition Analysis*. https://fr.scribd.com/doc/316487584/A-Simple-Guide-to-LMDI

Ang, B.W., Goh, T., 2019. *Index decomposition analysis for comparing emission scenarios: Applications and challenges*. Energy Economics, Volume 83, pp. 74-87. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.06.013

AQM, 2019. *Dépenses unitaires des voyageurs selon le mode de transport en 2018, et évolution depuis 2011*. Beauvais Consultants pour Association Qualité Mobilité, Rapport final, 31 octobre 2019. https://www.fnaut.fr/actualite/etudes-et-debats/794-depenses-unitaires-des-voyageurs-selon-le-mode-de-transport-en-2018-jean-marie-beauvais

Arafer, 2018. *Le marché français du transport ferroviaire de voyageurs, 2017*. L'observatoire des transports et de la mobilité. https://www.autorite-transports.fr/observatoire-des-transports/marche-du-transport-ferroviaire/

Beauvais, J.M., Calvet, L., Collet, R., Gardes, F., Gaubert, P., Marical, F., Starzec, C., 2011. *Elasticité de la demande de carburant à la volatilité des prix à la pompe.* Rapport Beauvais Consultants, ARMA, ADEME, PREDIT.

Beauvais, J.M., 2020. *Prix réel du carburant, séries 1970-2018*. Fichier Excel.

Bonnafous, L., Boucq, E., Glachant, M., Hivert, L., Kaufmann, V., Goyon, M., Madre, J.L., Ortar, N., Vincent, S., Wingert, J.L., 2010. *Pétrole, mobilité, CO_2 : les politiques publiques et l'automobilité face à la variation des prix du pétrole*. Rapport PREDIT. 223 p. www.innovations-transports.fr/IMG/pdf/Petrole_CO2.pdf

Calvet, L., Marical, F., 2011. *Consommation de carburant : effets des prix à court et à long terme par type de population*. INSEE, Economie et statistique N° 446. 20 p. https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/1377454/es446b.pdf

CARB, 2015. *LCFS Land Use Change Assessment. Detailed Analysis for Indirect Land Use Change*. https://ww2.arb.ca.gov/resources/documents/lcfs-land-use-change-assessment

Castaignède, L., 2018. *Airvore ou la face obscure des transports. Chronique d'une pollution annoncée*. Ed. Ecosociété. 344 p. https://ecosociete.org/livres/airvore

CCFA, 2020. *Dossiers de presse*. https://ccfa.fr/dossiers-de-presse/

Cerema, 2019. *Transports collectifs urbains de province évolution 2011-2016. Annuaire statistique*. 623 p. https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/transports-collectifs-urbains-province-evolution-2011-2016

CGDD, 2010. *La mobilité des Français. Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008*. 228 p. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/la-mobilite-des-francais-panorama-issu-de-lenquete-nationale-transports-et-deplacements-2008

CGDD, 2012. *Les Véhicules utilitaires légers au 01-01-2011*. 9 p. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-vehicules-utilitaires-legers-au-1er-janvier-2011

CGDD, 2014. *Les véhicules utilitaires légers : une bonne complémentarité avec les poids lourds*. 4 p. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-vehicules-utilitaires-legers-une-bonne-complementarite-avec-les-poids-lourds

CGDD, 2016. *Vingt-cinq années de transport intérieur de voyageurs*. Études & documents n° 148. 48 p. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/vingt-cinq-annees-de-transport-interieur-de-voyageurs

CGDD, 2018a. *Les facteurs d'évolution des émissions de CO_2 liées à l'énergie en France entre 1990 et 2016*. Datalab. 38 p. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-facteurs-devolution-des-emissions-de-co2-liees-lenergie-en-france-entre-1990-et-2016

CGDD, 2018b. *Enquête sur l'utilisation des véhicules de transport routier de marchandises (TRM)*. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/enquete-sur-lutilisation-des-vehicules-de-transport-routier-de-marchandises-trm

CGDD, 2019a. *Les émissions de CO_2 liées à l'énergie en France de 1990 à 2017 - Facteurs d'évolution et éléments de comparaison internationale*. Datalab. 44 p. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-emissions-de-co2-liees-lenergie-en-france-de-1990-2017-facteurs-devolution-et-elements-de

CGDD, 2019b. *Mémento de statistiques des transports*. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/memento-de-statistiques-des-transports-2017

CGDD, 2019c. *Les comptes des transports en 2018 - 56e rapport de la Commission des comptes des transports de la Nation*. 212 p. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-comptes-des-transports-en-2018-56e-rapport-de-la-commission-des-comptes-des-transports-de-la

CGDD, 2019d. *Bilan énergétique de la France pour 2017*. Publié le 18/02/2019. 176 p. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/bilan-energetique-de-la-france-pour-2017

CGDD, 2020. *Les facteurs d'évolution des émissions de CO_2 liées à l'énergie en France de 1990 à 2018*. Datalab. 36 p. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-facteurs-devolution-des-emissions-de-co2-liees-lenergie-en-france-de-1990-2018

CITEPA, 2019. *Inventaire SECTEN. Analyses détaillées spécifiques Transport*. https://www.citepa.org/fr/secten/

Clerc, M., Marcus, V., 2009. *Elasticités-prix des consommations énergétiques des ménages*. INSEE. 25 p. https://www.insee.fr/fr/statistiques/fichier/1380837/G2009-08.pdf

CNUCED, 2016. *Étude sur les transports maritimes 2016*. 135 p. https://unctad.org/en/Pages/Publications/Review-of-Maritime-Transport-(Series).aspx

Crozet, Y., Joly, I., 2003. *De l'hypothèse de la constance du budget-temps de transport à sa remise en cause : une double interpellation des politiques de transport urbain. La "Loi de Zahavi" : quelle pertinence pour comprendre la construction et la dilatation des espaces-temps de la ville ?* 72 p. https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00087658

Crozet, Y., 2016. *Hyper-mobilité et politiques publiques. Changer d'époque ?*. Economica, pp.190, 2016, Coll. Méthodes et Approches, Gérard Brun, 9782717868623. https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01328814

De Cara, S., Goussebaile, A., Grateau, R., Levert, F., Quemener, J., Vermont, B., 2012. *Revue critique des études évaluant l'effet des changements d'affectation des sols sur les bilans environnementaux des biocarburants*. [Rapport de recherche] ADEME. 2012, 96 p. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01172993

DGAC, 2018. *Statistiques du trafic aérien*. https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/statistiques-du-trafic-aerien#e3

ECOFYS, 2015. *ILUC Quantification Study of EU Biofuels*. Project Transparency Platform – by Ecofys, IIASA and E4tech. 261 p. http://www.globiom-iluc.eu/

EEA, 2011a. *Decomposition analysis of CO_2 emissions from road freight transport in the EU, 1990–2008*. https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/figures/decomposition-analysis-of-co2-emissions

EEA, 2011b. *Opinion of the EEA Scientific Committee on Greenhouse Gas Accounting in Relation to Bioenergy*. 15 September 2011. 10 p. https://www.eea.europa.eu/about-us/governance/scientific-committee/sc-opinions/opinions-on-scientific-issues/sc-opinion-on-greenhouse-gas/view

Eom, J., Schipper, L., Thompson, L., 2012. *We keep on truckin': Trends in freight energy use and carbon emissions in 11 IEA countries*. Energy Policy, Volume 45, pp. 327-341. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.02.040

EU, 2018. *Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of energy from renewable sources*. Official Journal of the European Union. http://data.europa.eu/eli/dir/2018/2001/oj

Fan, F., Lei, Y., 2016. *Decomposition analysis of energy-related carbon emissions from the transportation sector in Beijing*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 42, pp. 135–145. https://doi.org/10.1016/j.trd.2015.11.001

Fouquet, R., 2012. *Trends in income and price elasticities of transport demand (1850–2010)*. Energy Policy, Volume 50, pp. 62-71. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.03.001

Forum Vies Mobiles, 2020. *Enquête Nationale Mobilité et Modes de vie*. 48 p. https://fr.forumviesmobiles.org/projet/2019/01/07/enquete-nationale-mobilite-et-modes-vie-12796

France Stratégie, 2019. *Comment faire enfin baisser les émissions de CO_2 des voitures*. Note d'analyse n°78, juin 2019. Nicolas Meilhan. 12 p. https://www.strategie.gouv.fr/publications/faire-enfin-baisser-emissions-de-co2-voitures

GFEI, IEA, 2017. *International Comparison of Light-Duty Vehicle Fuel Economy 2005-2015. Ten Years of Fuel economy Benchmarking*. Working Paper 15. https://webstore.iea.org/international-comparison-of-light-duty-vehicle-fuel-economy-2005-2015

Givord, P., d'Haultfoeuille, X., 2012. *Le bonus/malus écologique, éléments d'évaluation*. Insee analyses, janvier 2012. 4 p. https://www.insee.fr/fr/statistiques/1521342

Gloriant, S., 2018. *Une évaluation quantifiée de la taxe carbone française*. Chaire Economie du Climat. 40 p. https://www.chaireeconomieduclimat.org/publications/une-evaluation-quantifiee-de-la-taxe-carbone-francaise/

Goodwin, P., 2012. *Peak Travel, Peak Car and the Future of Mobility. Evidence, Unresolved Issues, Policy Implications, and a Research Agenda*. ITF Discussion Paper No. 2012-13. 41 p. https://www.itf-oecd.org/peak-travel-peak-car-and-future-mobility

Greening, L.A., Ting, M., Davis, W.B., 1999. *Decomposition of aggregate carbon intensity for freight: trends from 10 OECD countries for the period 1971–1993*. Energy Economics, Volume 21, Issue 4, pp. 331-361. https://doi.org/10.1016/S0140-9883(99)00010-9

Greening, L.A., 2004. *Effects of human behavior on aggregate carbon intensity of personal transportation: comparison of 10 OECD countries for the period 1970–1993*. Energy Economics, Volume 26, Issue 1, pp. 1-30. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2003.05.001

Grimal, R., 2015. *L'auto-mobilité au tournant du millénaire : une approche emboîtée, individuelle et longitudinale*. Sociologie. Université de Paris Est. 473 p. https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01313626

Grimal, R., 2017. *Plafonnement de la circulation automobile : les prémisses d'un déclin ?* Forum Vies Mobiles. https://fr.forumviesmobiles.org/mobilithese/2017/09/28/plafonnement-circulation-automobile-premisses-dun-declin-3694

Grübler, A., 2003. *Technology and Global Change*. IIASA Report. 459 p. http://user.iiasa.ac.at/~gruebler/

Guo, B., Geng, Y., Franke, B., Hao, H., Liu, Y., Chiu, A., 2014. *Uncovering China's transport CO_2 emission patterns at the regional level*. Energy Policy, Volume 74, pp. 134-146. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.08.005

Guo, M., Meng, J., 2019. *Exploring the driving factors of carbon dioxide emission from transport sector in Beijing-Tianjin-Hebei region*. Journal of Cleaner Production, Volume 226, pp. 692-705. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.04.095

Gupta, M., Singh, S., 2016. *Factorizing the Changes in CO_2 Emissions from Indian Road Passenger Transport: A Decomposition Analysis*. Studies in Business and Economics, Volume 11, Issue 3, pp. 67-83. https://doi.org/10.1515/sbe-2016-0036

Héran, F., 2015. *Le retour de la bicyclette. Une histoire des déplacements urbains en Europe de 1817 à 2050*. Ed. La Découverte. 256 p.

ICCT, 2019a. *European vehicle market statistics, Pocketbook 2019-2020*. 56 p. http://eupocketbook.org/

ICCT, 2019b. *From laboratory to road: A 2018 update*. https://theicct.org/series/laboratory-road

IEA, 2018a. *CO_2 emissions from fuel combustion*. Highlights. Statistics. 191 p. https://www.oecd-ilibrary.org/energy/co2-emissions-from-fuel-combustion_22199446

IEA, 2018b. *Energy Efficiency 2018. Analysis and Outlooks to 2040*. 174 p. https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2018

IFOP, 2008. *Les Français et leur budget automobile*. Etude IFOP pour Direct Assurance. Janvier 2008. 30 p. https://www.ifop.com/publication/les-francais-et-leur-budget-automobile/

IFOP, 2011. *2ème édition du baromètre "Les Français & l'automobile"*. Etude IFOP pour AramisAuto. Conférence de Presse, 25 avril 2011. 31 p.

Insee, 2017. *Des ménages toujours plus nombreux, toujours plus petits*. https://www.insee.fr/fr/statistiques/3047266

Insee, 2019. *Taille des ménages en 2016. Données annuelles de 1968 à 2016*. https://www.insee.fr/fr/statistiques/2381486

Insee, 2020. *Principaux indices et séries chronologiques*. https://www.insee.fr/fr/statistiques/3530678

IPCC, 1999 - Penner, J.E., Lister, D.H., Griggs, D.J., Dokken, D.J., McFarland. M. Special *Report on Aviation and the Global Atmosphere*. https://www.ipcc.ch/report/aviation-and-the-global-atmosphere-2/

ITF, 2015. *The Impact of Mega-Ships*. 108 p. https://www.itf-oecd.org/impact-mega-ships

JRC, 2017. *CoM Default Emission Factors for the Member States of the European Union - Version 2017*. European Commission, Joint Research Center. 13 p. https://data.europa.eu/euodp/en/data/dataset/jrc-com-ef-comw-ef-2017

JRC, 2019. *Definition of input data to assess GHG default emissions from biofuels in EU legislation*. European Commission, Joint Research Center. Version 1d – 2019. 284 p. http://dx.doi.org/10.2760/69179

Kamakaté, F., Schipper, L, 2009. *Trends in truck freight energy use and carbon emissions in selected OECD countries from 1973 to 2005*. Energy Policy, Volume 37, Issue 10, pp. 3743-3751. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.07.029

Kaya, Y., 1990. *Impact of carbon dioxide emission control on GNP growth: Interpretation of proposed scenarios*. Paper presented at the IPCC Energy and Industry Subgroup, Response Strategies Working Group, Paris, France.

Kemel E., Collet R., and Hivert, L., 2009. *How do French Motorists React to a Multi-annual Fuel Price Increase? An Econometric Analysis Based on a 1999-2007 Panel Dataset*. 12th International Conference for Transport Behaviour Research, Jaipur (India), December 2009.

Kharbach, M., Chfadi, T., 2017. *CO_2 emissions in Moroccan road transport sector: Divisia, Cointegration, and EKC analyses*. Sustainable Cities and Society, Volume 35, pp. 396-401. https://doi.org/10.1016/j.scs.2017.08.016

Kopp, P., Prud'homme, R., 2010. *Politique des transports. Le difficile ajustement des instruments aux objectifs*. Rapport ADEME et PREDIT. 135 p.

Kumbaroğlu, G., 2011. *A sectoral decomposition analysis of Turkish CO_2 emissions over 1990–2007*. Energy, Volume 36, Issue 5, pp. 2419-2433. https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.01.027

Kwon, T-H., 2005. *Decomposition of factors determining the trend of CO_2 emissions from car travel in Great Britain (1970–2000)*. Ecological Economics, Volume 53, Issue 2, pp. 261-275. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.06.028

Labandeira, X., Labeaga, J.M., López-Otero, X., 2016. *A meta-analysis on the price elasticity of energy demand*. European University Institute, Robert Schuman Centre for Advanced Studies, Florence School of Regulation Climate.

Laborde, D., 2011. *Assessing the land use change consequences of European biofuel policies*. IFPRI, ATLASS Consortium. 111 p. http://www.ifpri.org/publication/assessing-land-use-change-consequences-european-biofuel-policies

Lacour, S., Joumard, R., 2002. *Parc, usage et émissions des véhicules routiers en France de 1970 à 2020*. Rapport de recherche. 89p. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00546282

Lakshmanan, T.R., Han, X., 1997. *Factors underlying transportation CO_2 emissions in the U.S.A.: A decomposition analysis*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 2, Issue 1, pp. 1-15. https://doi.org/10.1016/S1361-9209(96)00011-9

L'Argus, 2019. *Voiture moyenne neuve 2018 : son évolution depuis 1953*. Publié le 13/06/2019. https://www.largus.fr/actualite-automobile/voiture-moyenne-neuve-2018-son-evolution-depuis-1953-9833394.html

Legifrance, 2009. *LOI n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement*. JORF n°0179 du 5 août 2009. https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000020949548/

Leturcq, P., 2018. *Forêt, bois, CO_2 - Le bois énergie mis en question*. 59 p. https://www.pijouls.com/blog/wp-content/uploads/2018/05/Boisenergie_Leturcq2018.pdf

Li, H., Lu, Y., Zhang, J., Wang, T., 2013. *Trends in road freight transportation carbon dioxide emissions and policies in China*. Energy Policy, Volume 57, pp. 99-106. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2012.12.070

Li, F., Cai, B., Ye, Z., Wang, Z., Zhang, W., Zhou, P., Chen, J., 2019. *Changing patterns and determinants of transportation carbon emissions in Chinese cities*. Energy, Volume 174, 1 pp. 562-575. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.179

Lin, B., Xie., 2014. *Reduction potential of CO_2 emissions in China's transport industry*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 33, pp. 689-700. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.017

Luo, X., Dong, L., Dou, Y., Li, Y., Liu, K., Ren, J., 2017. *Factor decomposition analysis and causal mechanism investigation on urban transport CO_2 emissions: comparative study on Shanghai and Tokyo*. Energy Policy, Volume 107, pp. 658–668. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.02.049

L'Express, 2019. *La révolution du tramway*, dans Quitter Paris. Pierre Falga. 11/09/2019.
Marchetti, C., 1994. *Anthropological invariants in travel behavior*. Technological Forecasting and Social Change, Volume 47, Issue 1, pp. 75-88. https://doi.org/10.1016/0040-1625(94)90041-8
Mazzarino, M., 2000. *The economics of the greenhouse effect: evaluating the climate change impact due to the transport sector in Italy*. Energy Policy, Volume 28, Issue 13, pp. 957-966. https://doi.org/10.1016/S0301-4215(00)00078-1
MEDDE, 2012. *Information CO_2 des prestations de transport. Guide méthodologique*. 236 p. http://www.ademe.fr/information-co2-prestations-transport-guide-methodologique
MEDDE, 2015. *Stratégie nationale bas-carbone*. 227 p. https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc
MEEM, 2016. *Stratégie de développement de la mobilité propre*. 125 p. https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc
Mendiluce, M., Schipper, L., 2011. *Trends in passenger transport and freight energy use in Spain*. Energy Policy, Volume 39, Issue 10, pp. 6466-6475. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.07.048
Millard-Ball, A., Schipper, L., 2011. *Are We Reaching Peak Travel? Trends in Passenger Transport in Eight Industrialized Countries*. Transport Reviews, Volume 31, No. 3, pp. 357–378.
M'raihi, R., Mraihi, T., Harizi, R., Bouzidi, M.T., 2015. *Carbon emissions growth and road freight: Analysis of the influencing factors in Tunisia*. Transport Policy, Volume 42, pp. 121-129. https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2015.05.018
MTES, 2018. *Information GES des prestations de transport. Application de l'article L. 1431-3 du code des transports*. Guide méthodologique. 238 p. https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/information-ges-des-prestations-transport
MTES, 2019. *Biocarburants* [en ligne]. Consulté le 12 Novembre 2019. https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/biocarburants
MTES, 2020. *Stratégie nationale bas-carbone. La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone*. Mars 2020. 192 p. https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc
MTES-SDES, 2020. *Motorisations des véhicules légers neufs - Émissions de CO_2 et bonus écologique - Février 2020*. Publié le 04/03/2020. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/motorisations-des-vehicules-legers-neufs-emissions-de-co2-et-bonus-ecologique-fevrier-2020
Objectif CO_2, 2020. *Le Dispositif Objectif CO_2* [en ligne]. Consulté le 31/03/2020. http://www.objectifco2.fr/index/programme
OECD, 2019. *Passenger transport* [online]. https://stats.oecd.org/Index.aspx?&datasetcode=ITF_PASSENGER_TRANSPORT
Omnil, 2019. *Trafic annuel et journalier*. http://www.omnil.fr/spip.php?article119
Orselli, J., 2009. *Usages et usagers de la route, mobilité et accidents 1860-2008*. Rapport n° 2005-0457-01. CGEDD. 1380 p. http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/document.html?id=Temis-0075250&requestId=0&number=3
Papagiannaki, K., Diakoulaki, D., 2009. *Decomposition analysis of CO_2 emissions from passenger cars: The cases of Greece and Denmark*. Energy Policy, Volume 37, Issue 8, pp. 3259-3267. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.04.026
Papon, F., 1999. *La marche et la bicyclette en France depuis 1967*. Volume 4. Dans : Eco-mobilité. La marche et la bicyclette dans les enquêtes transport auprès des ménages. Rapport INRETS. 17 p. http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/document.html?id=Temis-0061106

Papon, F., 2012. *The evolution of bicycle mobility in France*. Conference Paper XXII nd International Cycle History Conference. https://www.researchgate.net/publication/258160941_The_evolution_of_bicycle_mobility_in_France

Peeters P.M., Middel J., Hoolhorst A., 2005. *Fuel efficiency of commercial aircraft. An overview of historical and future trends*. National Aerospace Laboratory NLR. 37 p. http://www.transportenvironment.org/Publications/prep_hand_out/lid/398

Schafer, A., Victor., D.G., 2000. *The future mobility of the world population*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 34, Issue 3, pp. 171-205. https://doi.org/10.1016/S0965-8564(98)00071-8

Schipper, L., Steiner, R, Duerr, P., An, F., Strom., S., 1992. *Energy use in passenger transport in OECD countries. Changes since 1970*. Transportation, Volume 19, pp. 25-42. https://doi.org/10.1007/BF01130772

Schipper, L., Scholl, L., Price, L., 1997. *Energy use and carbon emissions from freight in 10 industrialized countries: An analysis of trends from 1973 to 1992*. Transportation Research Part D: Transport and Environment. Volume 2, Issue 1, pp. 57-76. https://doi.org/10.1016/S1361-9209(96)00014-4

Schipper, L., Saenger, C., Sudardshan, A., 2011. *Transport and carbon emissions in the United States: the long view*. Energies, Volume 4, pp. 563–581. https://doi.org/10.3390/en4040563

Scholl, L., Schipper, L.J., Kiang, N., 1996. CO_2 emissions from passenger transport: a comparison of international trends from 1973 to 1992. Energy Policy, Volume 24, Issue 1, pp. 17-30. https://doi.org/10.1016/0301-4215(95)00148-4

SLoCaT, 2018. *Transport and Climate Change Global Status Report*. 184 p. https://slocat.net/tcc-gsr/

SNCF, 2015. *Vers une mobilité sobre en CO_2 : Une opportunité pour vivre mieux ? Regards croisés pour éclairer les choix de société en matière de mobilité des voyageurs*. 42 p. https://www.sncf.com/fr/groupe/newsroom/etude-facteur4

Sobrino, N., Monzon, A., 2014. *The impact of the economic crisis and policy actions on GHG emissions from road transport in Spain*. Energy Policy, Volume 74, pp. 486-498. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.07.020

Solaymani, S., 2019. *CO_2 emissions patterns in 7 top carbon emitter economies: The case of transport sector*. Energy, Volume 168, pp. 989-1001. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.11.145

Steenhof, P., Woudsma, C., Sparling, E., 2006. *Greenhouse gas emissions and the surface transport of freight in Canada*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 11, Issue 5, pp. 369-376. https://doi.org/10.1016/j.trd.2006.07.003

Studeny, C., 1995. *L'invention de la vitesse, France, XVIIIe-XXe siècle*. Paris, Gallimard, Collection NRF, Bibliothèque des Histoires. 416 p.

Timilsina, G.R., Shrestha, A., 2009. *Factors affecting transport sector CO_2 emissions growth in Latin American and Carribean countries. An LMDI decomposition analysis*. Energy Research Volume 33, Issue 4, pp. 396-414. https://doi.org/10.1002/er.1486

Timilsina, G.R., Shrestha, A., 2009. *Transport sector CO_2 emissions growth in Asia: Underlying factors and policy options*. Energy Policy, Volume 37, Issue 11, pp. 4523-4539. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.06.009

University of Cambridge, Mirova, 2013. *Allégement : les acteurs, les enjeux et les clés pour dégager des gains potentiels*. 58 p.

URF, 2019. *Faits et chiffres 2019. Statistiques de mobilités en France et en Europe*. 142 p. https://www.unionroutiere.fr/publication/consultez-faits-et-chiffres-2019/

Wang, W.W., Zhang, M., Zhou, M., 2011. *Using LMDI method to analyze transport sector CO_2 emissions in China*. Energy, Volume 36, Issue 10, pp. 5909-5915. https://doi.org/10.1016/j.energy.2011.08.031

Wang, T., Li, H., Zhang, J., Lu, Y., 2012. Influencing Factors of Carbon Emission in China's Road Freight Transport. Procedia - Social and Behavioral Sciences, Volume 43, pp. 54-64. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2012.04.077

Wang, B., Sun, Y., Chen, Q., Wang, Z., 2018. *Determinants analysis of carbon dioxide emissions in passenger and freight transportation sectors in China*. Structural Change and Economic Dynamics, Vol. 47, pp. 127-132. https://doi.org/10.1016/j.strueco.2018.08.003

World Bank, 2019. *Air transport, passengers carried* [online]. Retrieved September 23, 2019 from https://data.worldbank.org/indicator/IS.AIR.PSGR

Xpair, 2011. *Le facteur d'émission de l'électricité*. 01/09/2011. Fig 1. Evolution du facteur d'émissions de l'électricité de plusieurs pays depuis 1970, source AIE 2009. [en ligne] https://conseils.xpair.com/actualite_experts/facteur-emission-electricite.htm

Xu, X.Y., Ang., B.W., 2013. *Index decomposition analysis applied to CO_2 emission studies*. Ecological Economics, Vol 93, pp. 313-329. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2013.06.007

Yoon, Y.; Yang, M.; Kim, J., 2018. *An Analysis of CO_2 Emissions from International Transport and the Driving Forces of Emissions Change*. Sustainability, Volume 10, 1677. https://www.mdpi.com/2071-1050/10/5/1677

Zahavi J., 1973. *The TT-relationship: a unified approach to transportation planning*. Traffic Engineering and Control, Volume 15, no. 4-5, pp. 205-212.

Zhang, M., Li, H., Zhou, M., Mu, H., 2011. *Decomposition analysis of energy consumption in Chinese transportation sector*. Applied Energy, Volume 88, Issue 6, pp. 2279-2285. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.077

II. Scénarios de prospectives : quels potentiels des 5 leviers de décarbonation d'ici 2050 ?

Résumé

Les scénarios de prospective sont essentiels pour étudier les trajectoires possibles pour atteindre les objectifs climatiques, ainsi que les évolutions et mesures nécessaires qui y sont associées. Cela est d'autant plus important pour l'objectif ambitieux que s'est fixée la France d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, qui implique quasiment zéro émission directe dans le secteur des transports. L'étude compare 13 scénarios portant sur le transport des passagers et 10 sur les marchandises en France, à l'aide d'une décomposition de l'évolution des émissions de CO_2, afin de quantifier le potentiel de différents leviers de décarbonation des transports. La décomposition est basée sur les 5 leviers de la stratégie nationale bas-carbone : la demande de transport, le report modal, le taux de remplissage des véhicules, leur efficacité énergétique, et l'intensité carbone de l'énergie. Les principales conclusions sont les suivantes : (1) Parmi les 5 leviers, l'efficacité énergétique et l'intensité carbone représentent les plus gros potentiels de réduction des émissions, pour tous les scénarios. (2) La comparaison avec les tendances passées montre le besoin d'accélérations importantes sur ces deux facteurs, questionnant le réalisme de telles évolutions. (3) Cela met en évidence l'importance de l'action aussi sur la demande, le report modal et le taux de remplissage, qui peuvent permettre jusqu'à -20 % d'émissions chacun. (4) La stratégie nationale repose surtout sur les leviers technologiques et montre peu d'ambition sur ces leviers de sobriété, et en particulier sur la demande ; les évolutions ambitieuses dans d'autres scénarios montrent un potentiel additionnel de baisse de la demande en énergie de -40 % pour les voyageurs et -50 % pour les marchandises par ces trois leviers.

1. Introduction, bibliographie et objectifs

Points et messages clés :
Les objectifs de cette étude des scénarios transport pour la France sont :
- ✓ La **comparaison** des principales hypothèses et résultats des scénarios existants.
- ✓ Chiffrer le **potentiel** de baisse d'émissions des 5 leviers de décarbonation d'ici 2050.
- ✓ Identifier les **ruptures** par rapport aux tendances passées.
- ✓ Discuter des implications et recommandations pour les **politiques publiques**.

La littérature associée aux trois premiers objectifs est présentée dans cette introduction.

L'objectif de **neutralité carbone** d'ici 2050 qui a été fixé dans le plan climat français présenté en 2017 vise à s'aligner sur une trajectoire mondiale limitant le réchauffement climatique à +2°C au maximum. Ce nouvel objectif rehaussait l'ambition précédemment affichée d'atteindre le Facteur 4, soit la division par 4 des émissions de gaz à effet de serre entre 1990 et 2050.
Ce nouvel objectif plus ambitieux implique également des objectifs plus forts pour le secteur des transports : à la place d'une baisse des émissions d'au moins 70 % entre 2013 et 2050, **le secteur doit s'approcher de la décarbonation complète**. En effet, en 2050, le secteur des transports ne consomme plus de carburants pétroliers, hormis pour la moitié du mix énergétique du transport aérien et une partie du transport maritime. L'ensemble des transports terrestres en France seraient alors électrifiés ou fonctionneraient à partir de carburants issus de la biomasse, un énorme défi en l'espace de 3 décennies, alors que plus de 90 % de l'énergie des transports est encore issue du pétrole à ce jour (MTES, 2020 ; CGDD, 2019).
Il est ainsi fondamental de comprendre quelle peut être la contribution relative de différents leviers et mesures à l'atteinte de l'objectif assigné aux transports pour atteindre la neutralité carbone. C'est ce que se propose de faire cette étude en reprenant les 5 leviers de la stratégie nationale bas-carbone (SNBC) pour le secteur des transports : la demande de transport, le report modal, le taux de remplissage des véhicules, leur efficacité énergétique, et l'intensité carbone de l'énergie (MTES, 2020).

Les scénarios de prospectives identifient des combinaisons de mesures et évolutions dans l'organisation des transports, les comportements et les technologies, qui permettent d'obtenir un certain niveau de réduction des émissions. Les scénarios disponibles proposant des **visions contrastées** de la transition énergétique dans les transports, leur **comparaison permet d'évaluer différentes options possibles, les points de consensus et les divergences** entre producteurs de scénarios.
En France, **de nombreux scénarios de prospectives existent**, produits par les autorités publiques, des instituts de recherche, des entreprises ou ONGs. Certains sont des scénarios de transition énergétique globaux ou sur les émissions à l'échelle de l'économie entière (y compris émissions non énergétiques), tandis que d'autres scénarios sont spécifiques au secteur des transports, uniquement de voyageurs ou de marchandises pour certains. Une comparaison de ces scénarios réalisée en 2016, recensait et comparait ainsi 13 études incluant 29 scénarios, principalement à l'horizon 2050 (Bigo, 2016 ; mémoire précédant cette thèse). Depuis, certains scénarios ont été remis à jour et d'autres nouveaux scénarios sont sortis, en particulier pour s'aligner avec le nouvel objectif de neutralité carbone.

Ce nombre important de scénarios et leur variété sont évidemment riches pour le débat public. Mais avec cette diversité vient également la difficulté pour les acteurs intéressés par ces transformations de comprendre et de comparer ces scénarios, leurs hypothèses et résultats. Cela peut entraver leur interprétation et leur usage pour les politiques publiques, mais également pour les entreprises ou les citoyens.
Le premier objectif de ce chapitre est donc de **faciliter la comparaison des scénarios**, à travers les principales hypothèses et les résultats en termes de baisses d'émissions, afin d'identifier en particulier leurs points communs et leurs divergences. Tout en s'appuyant sur le précédent recensement des 29 scénarios effectué en 2016, l'analyse concerne de manière plus approfondie 15 scénarios parmi les plus récents, en l'occurrence avec une publication entre 2015 et 2019 selon les études. Les autres travaux de comparaison des scénarios existants en France pour les transports sont assez rares et peu actualisés. Il est possible de citer l'étude de Carbone 4 qui comparait 4 trajectoires du débat national sur la transition énergétique (DNTE ; Carbone 4, 2014), ou la comparaison internationale du Cerema qui regroupait 22 travaux de prospectives dont 3 étaient des études au niveau français (Cerema, 2015).

La lecture des scénarios de prospectives, leurs hypothèses et résultats amène un deuxième type de questionnement : au sein d'un même scénario, il est parfois compliqué de comprendre l'impact des différentes hypothèses dans le résultat final de baisse des émissions.
C'est le second objectif de ce travail que d'utiliser une **décomposition des émissions en 5 facteurs** (demande, report modal, remplissage et efficacité des véhicules, et intensité carbone), afin d'**identifier leur impact relatif sur les émissions dans les scénarios d'ici 2050**. Sans descendre au niveau de chaque hypothèse des scénarios, cela permet au moins d'isoler ces 5 agrégats, et parfois de rentrer un peu plus dans les détails, comme par exemple pour détailler l'effet du report modal pour différents modes, ou en décomposant les gains dans l'intensité carbone de l'énergie par type d'énergie (par exemple entre électricité, agrocarburants ou biogaz).
Ce type d'analyse pourrait être réalisé par les producteurs de scénarios eux-mêmes pour en faciliter la lecture et identifier les points les plus importants du scénario, mais cela n'est que rarement présent dans les études, et avec des méthodes toujours différentes. Quelques démarches proches sont néanmoins à relever : une évaluation quantifie l'impact des différentes politiques publiques des scénarios sur les émissions dans le scénario LET-Enerdata (Crozet et al, 2008) ; le scénario négaWatt montre l'impact des leviers de sobriété, efficacité énergétique (côtés production et consommation) et des énergies renouvelables, par rapport au scénario tendanciel (négaWatt, 2017) ; une décomposition de l'impact de plusieurs leviers pour les transports est réalisée dans le scénario EpE (2019) ; aussi, les études de l'IDDRI présentent l'évolution d'indicateurs proches de ceux utilisés dans la décomposition de cette étude, pour leurs scénarios voyageurs et marchandises (Briand et al, 2017, 2019).
De très nombreux travaux existent dont l'objectif est d'**évaluer l'impact sur les émissions de CO_2 des transports**, soit de politiques publiques, ou de certaines évolutions technologiques ou des comportements. La portée de ces études peut énormément varier en fonction notamment : des échelles géographiques considérées, du caractère ex ante ou ex post de l'évaluation, des limites dans le système de transport ou les modes étudiés, des méthodes appliquées, ou encore du nombre d'évolutions évaluées.

Parmi les études les plus proches du travail réalisé ici sur les potentiels de réduction des émissions des scénarios, l'identité de Kaya est utilisée comme un outil de comparaison des scénarios transport au niveau mondial par les études réalisées par Edelenbosch et al (2017) et Yeh et al (2017). Dans le premier cas, l'étude compare les projections à 2050 et 2100 de 11 modèles globaux (IAMs ou Integrated Assessment Models en anglais) sur les émissions des passagers, en utilisant 4 facteurs de demande, de report modal, d'efficacité énergétique et de mix énergétique, soit les mêmes que dans la présente étude, sans le taux de remplissage. En revanche, la deuxième étude utilise exactement les cinq mêmes facteurs, et s'applique à 4 modèles de transport mondiaux, avec un pas de 5 ans, généralement jusqu'à 2050. D'autres études ont appliqué de manière un peu différente une identité de Kaya pour les transports pour des scénarios. C'est le cas pour l'étude de Mittal et al (2017) ou les études recensées par Ang et Goh (2019) dont les principales différences méthodologiques seront présentées en 2.3.1.

L'évaluation des études prospectives sur les transports montre généralement une prévalence des facteurs d'efficacité énergétique et d'intensité carbone comme principaux contributeurs à la baisse des émissions (Edelenbosch et al, 2017; Mathy et al, 2018). Le focus sur le mix énergétique semble présent en particulier dans la communauté des économistes et notamment dans les travaux utilisant les IAMs, alors que les modèles des experts des transports semblent privilégier les mesures d'efficacité suivis du report modal, et les modèles locaux étudient en priorité des options d'atténuation basées sur des changements dans les comportements et les infrastructures (Yeh et al, 2017 ; Creutzig, 2016). La prévalence du facteur "Improve" parmi le cadre d'analyse en trois facteurs "Avoid / Shift / Improve" est observée simultanément au sein des études d'atténuation des transports, des évaluations des besoins technologiques, mais également au sein des politiques des transports mises en avant dans les "Nationally Determined Contributions" (NDCs), qui correspondent aux plans soumis par les Etats pour les négociations climatiques. C'est la conclusion d'une méta-analyse sur ces trois types de documents, qui a recensé un focus des stratégies d'atténuation à 66 % sur le facteur "Improve", à 23 % sur le facteur "Shift", et à 11 % sur le facteur "Avoid" questionnant la demande de transport (SLoCaT, 2018).

D'autres études questionnent ce focus important sur le facteur technologique, la faisabilité et le rythme nécessaire de forts déploiements technologiques (Förster et al, 2013), ou encore les risques en termes de pression sur les ressources. Elles mettent en avant que d'autres mesures apportent de nombreux co-bénéfices, et évaluent les potentiels de ces contributions à l'avenir. Selon les études, cela prend la forme d'une évaluation du potentiel de la baisse de la demande en services énergétiques (Kesicki et Anandarajah, 2011 ; Anable et al, 2012 ; Creutzig et al, 2016 ; Grübler et al, 2018), des déterminants spatiaux de la demande de mobilité (Waisman et al, 2013), de l'effet des mesures de sobriété (Samadi et al, 2017 ; Saheb et al, étude en cours), des changements de comportements (Girod et al, 2013), ou des changements de modes de vie (terme utilisé pour les études de Samadi et al, ou Anable et al, citées précédemment ; aussi Van Sluisveld et al, 2016 ; Le Gallic et al, 2017). Certaines de ces études recensent la littérature disponible afin de documenter ces effets (dont Creutzig et al, 2016), tandis que d'autres construisent un scénario nouveau prenant davantage en compte les mesures de sobriété ou des changements dans les modes de vie (comme Grübler et al, 2018).

Pour citer quelques conclusions de ces études sur les potentiels identifiés au niveau mondial (sauf cas contraire mentionné) : une baisse d'émissions des transports de **16 %** est identifiée

en réaction à des variations de prix des modes de transport, à partir des élasticités de la demande (Kesicki and Anandarajah, 2011) ; des changements de comportements vers des mobilités moins émettrices d'ici la fin du siècle permettent de réduire les émissions de CO_2 de l'ordre de **50 %** par rapport au scénario de référence dans un scénario mondial (Girod et al, 2013) ; ce même chiffre de **50 %** est identifié pour la baisse de la demande en énergie des transports d'ici 2050, dans un scénario de changements de modes de vie au Royaume-Uni (Anable et al, 2012) ; les mesures comportementales et sur les infrastructures en villes peuvent permettre une baisse des émissions de la mobilité des voyageurs de **20 à 50 %** d'ici 2050 (Creutzig, 2016) ; enfin, les émissions de la mobilité d'ici 2100 pourraient être réduites de l'ordre de **35 %** par rapport à un scénario de référence, par des changements sur l'utilisation des véhicules et le report modal, ce potentiel étant moins fort au sein d'un scénario d'atténuation forte où de nombreux autres leviers sont mobilisés, tel un scénario +2°C (Van Sluisveld et al, 2016).
L'ambition est ici d'appliquer ce type d'analyse à partir de nombreux scénarios transport existants. Cela permet de **comparer** et faire la moyenne de potentiels identifiés par plusieurs études, sans se limiter à une unique évaluation qui reflète toujours la vision d'un acteur ou d'une institution en particulier. Au-delà des évaluations appliquées au niveau mondial, le périmètre est celui de la **France**, ce qui permet d'avoir des chiffres adaptés à son contexte, certains potentiels pouvant être extrapolés à d'autres pays tandis que d'autres ne seront valables que pour la France (ces spécificités seront discutées en chapitre 4). Enfin, les potentiels seront identifiés avec une **vision d'ensemble** de la transition énergétique dans les transports, ce qui donne la possibilité de comparer plus directement le potentiel de cinq facteurs différents, tout en étudiant les interactions positives et négatives entre ces leviers.

Le troisième objectif du papier abordera la question critique et difficile de la **faisabilité des scénarios** (Gambhir et al, 2017). De nombreux critères d'évaluation peuvent être proposés, il sera ici question d'apporter des éléments sur le **rythme d'évolution des cinq facteurs** étudiés, tel que réalisé au niveau européen par Spencer et al (2017). Ce rythme sera comparé en particulier aux évolutions passées étudiées dans le chapitre 1, afin de fournir une évaluation des facteurs qui demanderaient une inversion des tendances historiques ou récentes, une accélération, ou celles qui seraient en ligne avec les principales tendances imaginées dans les scénarios.

A partir des observations précédentes, le quatrième objectif est de fournir des **enseignements et des recommandations** pour les politiques publiques, en particulier pour la stratégie nationale bas-carbone, et plus généralement pour la conduite de la transition énergétique dans les transports.

Le chapitre est structuré de la manière suivante. Après cette première partie introductive, la partie 2 aborde les scénarios étudiés, la méthodologie dans la comparaison des scénarios et l'application de la décomposition des émissions. La partie 3 détaille les résultats pour les scénarios voyageurs et marchandises et les contributions de chaque facteur. Enfin, la partie 4 discute les résultats et les implications pour les politiques publiques, en particulier concernant la comparaison avec les tendances passées.

2. Comparaison des scénarios de prospectives d'ici 2050

2.1.Retour sur 15 ans de prospectives sur les émissions des transports

Points et messages clés :

- ✓ Les scénarios passés font apparaître des **baisses d'émissions de plus en plus fortes**, en raison : du retard sur les objectifs passés, d'un objectif rehaussé du Facteur 4 à la neutralité, et de mesures insuffisantes pour infléchir les émissions à court terme.
- ✓ Les scénarios se sont progressivement orientés d'une logique **exploratoire** visant à explorer des futurs possibles, à une logique **normative** visant à décrire comment atteindre des objectifs climatiques de plus en plus précis et difficiles.
- ✓ Les **scénarios se différencient** sur de nombreux points : sur les trajectoires décrites (objectif CO_2, tendanciel ou volontariste, etc.), la démarche de (co-)construction et compétences mobilisées, les modèles utilisés, ou les paramètres clés des scénarios.

Un précédent travail de comparaison des scénarios de prospectives existants pour le secteur des transports avait été réalisé en 2016 (Bigo, 2016). L'étude décrivait la construction, les principales hypothèses et résultats de 29 scénarios de prospectives français issus de 13 études différentes, publiées entre 2006 et 2016 (CGPC, 2006 ; Crozet et al, 2008 ; Bibas et al, 2012 ; GrDF, 2013 ; Greenpeace, 2013 ; ANCRE, 2013 ; ADEME, 2013a ; négaWatt, 2013 ; Négatep, 2014 ; SNCF Voyages, 2015 ; SNCF, 2015 ; DGEC, 2015 ; CGDD, 2016).

L'éclairage de la présente étude est davantage quantitatif que qualitatif ou descriptif comme c'était le cas précédemment. Aussi les scénarios étudiés sont tous différents en dehors de ceux de la SNCF (2015). Ils sont en effet généralement plus récents, soit par actualisation des scénarios précédemment étudiés (ADEME, 2017a ; négaWatt, 2017), soit par la mise à jour des objectifs et scénarios de l'Etat (MTES, 2020), ou encore par la production de nouvelles études (EpE, 2019 ; scénarios de l'IDDRI, Briand et al, 2017 et 2019) ou de scénarios non encore étudiés (IEA, 2019).

Sans de nouveau rentrer dans le détail des scénarios passés, il est intéressant de revenir sur quelques éléments clés dans l'évolution de ces scénarios, en particulier sur l'évolution des émissions décrites dans les scénarios, leur alignement progressif avec les objectifs climatiques, et sur leurs principales caractéristiques.

2.1.1. Des scénarios de plus en plus difficiles à atteindre

La Figure 34 décrit l'évolution des ambitions des différents scénarios d'ici 2050 parmi les études qui ont été citées ci-dessus, en indiquant l'année de publication du scénario (selon la couleur, légende à droite), l'année de référence du scénario ajustée sur la courbe d'évolution passée, et la baisse d'émissions obtenue en 2050. Seules les droites sont tracées et ne représentent pas forcément la courbe réelle d'évolution des émissions qui a pu être imaginée dans le scénario, de même l'année de référence est calée directement sur les émissions passées du CITEPA et non sur le chiffre présent dans le scénario.

La figure montre clairement que la **pente moyenne des baisses d'émissions a fortement augmenté** au cours du temps pour les scénarios les plus ambitieux. Aussi la trajectoire des émissions constatées a plutôt tendance à suivre voire à dépasser un certain nombre de scénarios tendanciels prévus par le passé (en pointillés sur le graphique), à l'exception de deux scénarios du CGPC publiés en 2006.

Ces pentes de plus en plus fortes reflètent donc des scénarios avec des baisses de plus en plus difficiles à tenir, et cela pour au moins trois raisons.

Premièrement, les premiers **objectifs de court terme ont été manqués**, et en particulier le premier budget carbone pour la période 2015-2018 pour lequel les émissions observées ont été plus importantes de 8,1 % en moyenne que l'objectif (MTES, 2020). Cela retarde à plus tard les nécessaires baisses d'émissions pour s'aligner avec l'objectif de long terme.

Deuxièmement, cet objectif de baisse des émissions d'ici 2050 a été revu à la hausse, avec une **ambition passant du Facteur 4 à la neutralité carbone** (voir chapitre d'introduction pour plus d'explications). Il est intéressant de noter que ce nouvel objectif et ces nouveaux scénarios ne sont en réalité pas forcément plus ambitieux que les précédents en termes de budgets carbones totaux utilisés d'ici 2050. Ces budgets carbones correspondent à l'ensemble des émissions sur la période, ou d'un point de vue mathématique à l'intégrale de la courbe des émissions sur la période. C'est une mesure plus intéressante pour juger des effets réels sur le changement climatique, que celle de la cible à 2050. Il est possible de voir sur la Figure 34 que les scénarios les plus récents sont pour beaucoup comparables en termes de budget carbone d'ici 2050 à certains scénarios ambitieux publiés dans les années 2000.

Enfin, les politiques publiques dans les transports se sont révélées à date trop faibles pour infléchir fortement les émissions (cf chapitre 1), et **aucune rupture n'a été réalisée ou n'est entrevue** au moins pour les mois à venir, aussi bien au niveau des politiques publiques qu'aux autres échelons d'actions. Au vu de l'inertie du système de transport, des infrastructures et comportements, cela indique que les émissions dans les toutes prochaines années risquent de suivre encore une trajectoire tendancielle. Celle-ci sera fortement influencée par les variables exogènes de prix du pétrole et de PIB, et probablement à la baisse mais trop faiblement pour atteindre les objectifs de court et moyen terme. Rester sur cette trajectoire tendancielle nécessiterait à l'avenir de continuer à accentuer la pente nécessaire des baisses d'émissions pour atteindre la neutralité en 2050, voire même d'avancer la date de l'objectif de neutralité carbone si le but est de conserver un budget carbone compatible avec les 2°C, ambition qui risquerait fort de devenir impossible d'ici quelques années sans action plus forte.

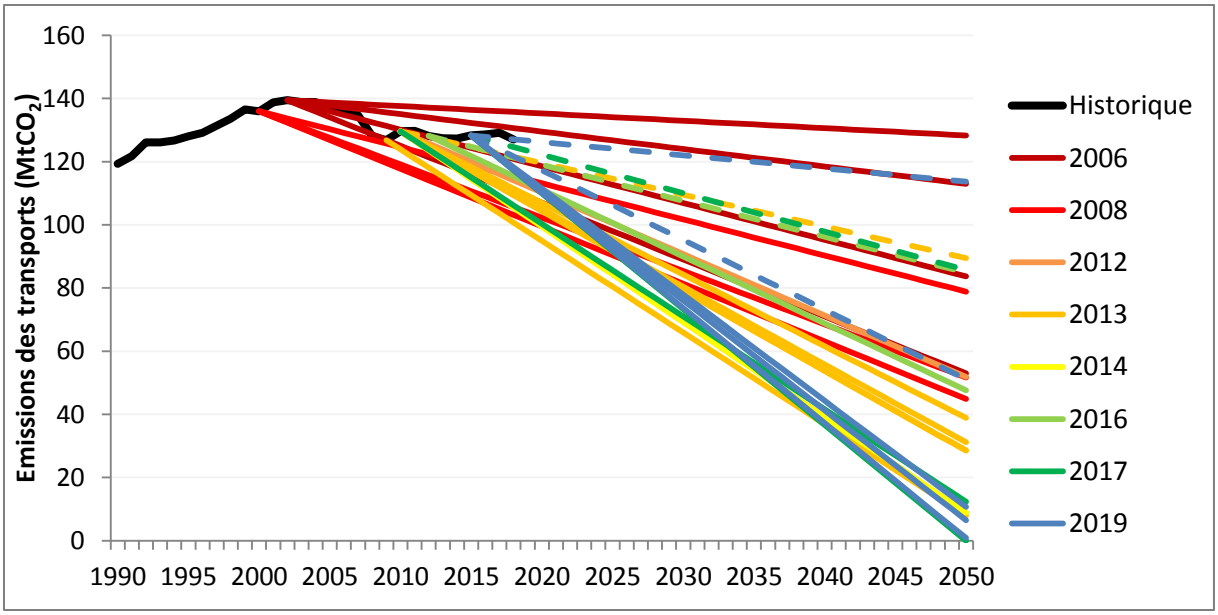


Figure 34 : Evolution de la baisse projetée des émissions entre l'année de référence et 2050 pour les scénarios de prospectives dans les transports, en relation avec les émissions sur 1990-2018 (scénarios tendanciels en pointillés)

2.1.2. Passage de l'exploratoire au normatif

A la lecture de l'évolution des scénarios et notamment de la Figure 34, il apparaît que **les scénarios sont de plus en plus normatifs, orientés vers l'atteinte des objectifs climatiques** : en 2006, les scénarios du CGPC exploraient 4 scénarios reflétant des évolutions du monde contrastées (Gouvernance mondiale et industrie environnementale, Repli européen et déclin, Grande Europe économique, Gouvernance européenne et régionalisation) ; en 2009, l'étude LET-Enerdata dans le cadre du PREDIT (Programme de recherche et d'innovation dans les transports terrestres ; Crozet et al, 2008) produit 3 scénarios contrastés notamment sur les évolutions des vitesses et des budgets temps de transports (Pégase, Chronos, Hestia) dont le dernier des trois permet d'atteindre le Facteur 4 ; à partir de 2012, de nombreux scénarios sont publiés dans le cadre du débat national sur la transition énergétique ; en 2015, des scénarios internes à SNCF Voyages font 5 scénarios contrastés pour les voyages à longue distance, selon l'évolution mondiale (Tendanciel, Catastrophe économique, Société fondée sur la sobriété, Nouvelle gouvernance européenne, et Innovations technologiques).

Hormis ces exemples relativement anciens pour certaines d'entre eux, les scénarios développés récemment s'orientent de plus en plus vers des **scénarios de backcasting ou de visions**. Ceux-ci visent à identifier à quelles conditions il est possible d'atteindre les objectifs climatiques, afin de peser dans le débat public sur ce sujet et préciser les évolutions technologiques, sociétales, de politiques publiques ou des comportements qui seraient à encourager (Tableau 7).

Les publications depuis 2017 étudiées ici comprennent ainsi généralement un scénario compatible avec les objectifs climatiques (normatif), qui est parfois comparé à un scénario tendanciel (exploratoire). Les études de l'IDDRI font exception, avec à chaque fois 2 scénarios normatifs qui supposent des évolutions de la société contrastées pour se réaliser. Aussi les scénarios s'alignent de plus en plus avec l'objectif de neutralité carbone, tous les scénarios publiés en 2019 s'inscrivant dans ce nouvel objectif.

Au moment où ce rapport est écrit, au moins deux études sont en préparation pour publication en 2021, avec de nouveaux scénarios de l'ADEME, et un travail commun mené par France Stratégie et le CGEDD. Ces deux travaux en cours intégreront plusieurs scénarios compatibles avec la neutralité carbone.

Tableau 7 : Les quatre types de prospectives - Matrice de Theys (Cerema, 2015)

		Exploratoire	Normatif
		Se focalise sur les résultats à un horizon donné	Se focalise sur la trajectoire des paramètres jusqu'à un horizon
Continu	Prolongation des tendances passées	**Prévision (Forecasting)** Prolongation des tendances passées et actuelles	**Visions** Propre à chaque acteur et suscite le débat
Discontinu	Recherche de ruptures ou discontinuités	**Conjecture** Détecte les ruptures, les facteurs de changement, les signaux faibles, les idées	**Stratégie (Backcasting)** Exprime les objectifs, croyances d'un acteur face aux incertitudes (Coût – efficacité)

2.1.3. Des scénarios aux logiques variées

La comparaison descriptive des scénarios fait apparaître des **disparités entre les études** concernant les objectifs, les narratifs, les méthodes, les données d'entrées et de sorties, le niveau de détails sur les éléments clés, le périmètre, ou encore les modes de présentation et de restitution des résultats. Cela ne facilite pas toujours la comparaison, mais il est important d'avoir en tête ces différences lorsque l'on veut comparer différentes études. Les éléments cités ci-dessus seront généralement décrits plus loin, en particulier pour la description des études en 2.2 et les éléments quantitatifs en partie 3. Avant cela, voici quelques éléments différenciant les études sur la construction des scénarios.

Certaines différences dans la logique de construction des scénarios ont été évoquées ci-dessus, avec parfois des sens qui paraissent relativement proches entre : les **scénarios exploratoires et normatifs**, qui se différencient par l'utilisation de l'horizon (ici les émissions cibles en 2050) comme un objectif à atteindre dans la construction des trajectoires (normatif) ou comme le résultat des évolutions et trajectoires envisagées dans le scénario (exploratoire) ; la distinction entre les **scénarios tendanciels et volontaristes** sur la transition énergétique dans les transports, en fonction de leur continuité par rapport aux tendances passées, aux politiques publiques et autres évolutions déjà existantes ; cette notion est également proche du caractère **continu ou discontinu** que peut prendre l'évolution de différent paramètres du scénario.

Les **démarches de construction** sont variées, et sont souvent issues d'une consultation d'un certain nombre d'acteurs ou d'expertises du système décrit. Le degré d'ouverture de la démarche vers l'extérieur, le nombre d'acteurs impliqués et d'étapes de co-construction varient sensiblement selon l'objectif de l'étude. Les **compétences** mobilisées pour les scénarios de transition énergétique sont le plus souvent techniques, économiques, et plus rarement sociologiques, géographiques, ou encore de sciences politiques.

Les **modèles** correspondent aux sous-jacents mathématiques des scénarios. Ils visent à représenter le système étudié et son évolution dans le temps via un ensemble d'équations, dont le détail et le fonctionnement sont généralement peu décrits dans les publications. Selon les instituts et les compétences mobilisées, les approches peuvent diverger sur les critères suivants : modélisation de caractères surtout techniques et/ou économiques ; intégration de variables exogènes et endogènes au modèle plus ou moins nombreuses et influentes sur les résultats ; approches bottom-up ou top-down du système et de son évolution ; ou encore utilisation des méthodes de résolution par optimisation ou simulation (TSP et IFPEN, 2019).

Au sein d'une publication comprenant plusieurs scénarios contrastés, les **paramètres clés différenciant les scénarios** varient : bien souvent, il s'agit de la différence entre un scénario tendanciel et un scénario volontariste ; pour les scénarios de l'IDDRI, cela a davantage trait aux évolutions de la société et des leviers mobilisés (sociétaux ou technologiques notamment) ; les 3 scénarios commandés par la SNCF se différencient sur les aspirations et les comportements de mobilité des français à l'avenir ; parmi les études non étudiées ici et comme cité ci-dessus, par le passé des études se sont davantage appuyées sur des évolutions contrastées du contexte économique et géopolitique mondial (CGPC, SNCF Voyages) ou sur les vitesses et les budgets temps de transport (LET-Enerdata) pour construire les différents scénarios de l'étude.

2.2.Les 15 scénarios de prospectives étudiés

Points et messages clés :

- ✓ 15 scénarios provenant de **8 études** publiées entre 2015 et 2019 sont comparés : 8 scénarios tous transports, 5 uniquement voyageurs, 2 marchandises.
- ✓ La comparaison concerne donc **13 scénarios voyageurs** (dont 4 tendanciels, 9 volontaristes) et **10 scénarios marchandises** (dont 3 tendanciels, 7 volontaristes).
- ✓ **Points communs** : périmètre France, secteur des transports étudié, horizon 2050, étude des émissions de CO_2, caractère récent.
- ✓ Les principales **caractéristiques** des scénarios sont détaillées dans cette section.

Les principaux éléments des scénarios de prospectives étudiés sont recensés dans le Tableau 8. Les points communs des études comparées concernent :

- ✓ Le périmètre étudié, qui correspond à la **France**, avec quelques différences détaillées dans la partie méthodologique sur la prise en compte des transports internationaux;
- ✓ La prise en compte du secteur des **transports**, parfois uniquement des voyageurs ou des marchandises, mais toujours avec une vision multimodale ;
- ✓ L'horizon des scénarios à **2050** ;
- ✓ L'étude de l'évolution des émissions de **CO_2** du secteur ;
- ✓ Le caractère **récent** des études et scénarios, qui ont tous été publiés en 2017 et 2019 hormis les scénarios de la SNCF (2015).

Tableau 8 : Description des 15 scénarios comparés dans l'étude, leur périmètre et réductions d'émissions en 2050
(scénarios tendanciels en italique)

Institut		Scénario		Périmètre		% CO_2		
Nom	**Type**	**Année**	**Nom**	**Secteur**	**An réf.**	**Total**	**Voy.**	**March.**
MTES	Ministère - DGEC	2019	*AME*	Tous GES	*2015*	*-11%*	*-26%*	*29%*
			AMS / SNBC		2015	-99%	-99%	-100%
EpE	Asso. d'entreprises	2019	ZEN 2050	Tous GES	2015	-95%	-96%	-92%
négaWatt	Association française	2017	*Tend.*	Tous GES	*2015*	*-33%*	*-38%*	*-19%*
			négaWatt		2015	-100%	-100%	-100%
ADEME	Agence publique	2017	Vision ADEME	Tous GES	2010	-90%	-91%	-88%
IEA	Agence internationale de l'énergie	2019	*NPS*	Transport	*2015*	*-60%*	*-63%*	*-53%*
			EV30		2015	-92%	-96%	-81%
IDDRI	Think tank international	2019	S1	Fret	2010			-99%
			S2		2010			-98%
IDDRI		2017	MOB-First	Voyageurs	2010		-83%	
			TECH-First		2010		-87%	
SNCF	Société nationale des chemins de fer	2015	*Ultramobilité*	Voyageurs	*2013*		*-47%*	
			Altermobilité		2013		-64%	
			Proximobilité		2013		-70%	

> 0 %	0 à -50%	-50 à -70 %	-70 à -90 %	-90 à -100%

Les deux premiers scénarios du tableau correspondent aux scénarios du **ministère de la transition écologique et solidaire** (MTES) français, réalisés en particulier par la direction générale de l'énergie et du climat (DGEC). Ces scénarios font référence pour la politique française et pour la stratégie nationale bas-carbone (**SNBC**). Ils présentent un scénario tendanciel, appelé **AME** pour « avec mesures existantes », tandis que le scénario de la SNBC s'appelle AMS pour « avec mesures supplémentaires ». Le scénario AMS permet d'atteindre

la neutralité carbone sur l'ensemble du territoire, soit des émissions directes quasiment nulles pour le secteur des transports. Le scénario est le résultat d'un processus de concertation avec divers experts et parties prenantes, et d'une consultation publique sur le début de l'année 2020. Les chiffres utilisés dans l'analyse sont issus du projet de SNBC et ont été récupérés en 2019 (voir aussi MTES-SDES, 2020).

Le scénario **ZEN 2050** (zéro émission nette) a été construit par l'association française des **entreprises pour l'environnement** (EpE) créée en 1992. L'étude a été élaborée au travers d'un processus participatif regroupant 27 grandes entreprises françaises, parmi lesquelles figuraient des entreprises du secteur des transports (Groupe ADP, Airbus, La Poste, Michelin, Groupe Renault, SNCF ou encore Vinci) et de l'énergie (RTE, EDF, Engie, ou encore Total). La construction du scénario s'est faîte au travers de nombreuses phases de débats entre ces parties prenantes afin de tendre autant que possible vers une vision commune, aidés par un consortium d'experts (composé de Carbone 4, Enerdata, Solagro, un sociologue, et le CIRED) ainsi qu'un cercle d'inspiration constitué de diverses parties prenantes et acteurs de la société civile, pour réagir aux avancées de l'étude (EpE, 2019).

L'association **négaWatt** a produit en 2003, puis mis à jour en 2006, 2011 et 2017 le scénario négaWatt, qui est un scénario de transition énergétique, couplé avec le scénario Afterres de Solagro pour le secteur de l'usage des terres et de l'agriculture (négaWatt, 2013 ; négaWatt, 2017 ; Solagro, 2016). Ce scénario a été le premier en France à atteindre la neutralité carbone, en visant à sortir simultanément des énergies fossiles et du nucléaire, pour passer à 100 % d'énergies renouvelables à l'horizon 2050. L'autre particularité du scénario a été de populariser les trois étapes de décarbonation visant à privilégier avant tout la sobriété énergétique, ensuite l'efficacité énergétique, et enfin le passage aux énergies renouvelables. Un scénario tendanciel est également fourni, et les deux scénarios sont conçus avec un pas de temps d'un an entre 2015 et 2050.

Le **scénario des visions ADEME** (agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) à 2035 et 2050 est le résultat d'une mise à jour des visions développées en 2012 qui se projetait aux horizons 2030 et 2050 (ADEME, 2013a ; ADEME, 2017a). La nouvelle version s'adapte aux nouvelles données sans changer fondamentalement les principaux éléments du scénario. La version de 2012 fournissait également une évaluation macro-économique des trajectoires présentées et une évolution des modes de vie compatible avec le scénario (ADEME, 2013b ; ADEME, 2014), tandis que la version de 2017 est accompagné d'un document proposant des mesures pour enrichir les politiques publiques (ADEME, 2017b). Le scénario de transition énergétique construit par l'ADEME s'approche de l'objectif de Facteur 4 (-70 à -72 % entre 1990 en 2050), avec des émissions des transports qui baissent de l'ordre de -90 %. Les visions prospectives de l'ADEME ont également été complétées par d'autres études portant notamment sur la faisabilité d'un mix électrique et d'un mix de gaz 100 % renouvelables, ce qui n'est pas le cas du scénario de la vision étudiée ici (ADEME, 2016 ; ADEME, 2018).

Les deux scénarios de l'**agence internationale de l'énergie** (AIE en français, ou IEA pour International Energy Agency en anglais) correspondent à un scénario tendanciel appelé **NPS** pour New Policies Scenario, et un scénario volontariste permettant d'être compatible avec l'Accord de Paris. La version appliquée aux transports a pris le nom de **EV30** pour se référer à l'objectif d'avoir 30 % de véhicules électriques parmi les ventes de véhicules en 2030, et porte d'autres noms pour l'ensemble des secteurs (notamment 2DS pour 2°C scenario ou SDS

pour Sustainable Development Scenario). Ces scénarios sont régulièrement mis à jour et les données utilisées ici ont été récupérées en 2019, et peuvent reprendre des analyses qui ont notamment pu être réalisées pour des études récentes sur la décarbonation du transport routier de marchandises ou le développement des véhicules électriques (IEA, 2017 ; IEA, 2019).

L'**institut du développement durable et des relations internationales** (IDDRI) a lancé en amont de la COP 21 en 2015 une démarche de scénarios de décarbonation au niveau mondial appelée Deep Decarbonization Pathways (DDP). Cette démarche repose sur une méthodologie spécifique qui peut s'appliquer à une grande diversité de pays, avec un objectif de décliner la démarche pour différents secteurs (Waisman et al, 2019). La démarche se compose de 5 étapes : le narratif (*storyline*), soit la description des grands éléments des transformations ; la phase de quantification de ces transformations ; le *dashboard*, décrivant l'évolution des principaux indicateurs utiles au débat public ; l'analyse de cohérence (*check*) du scénario ; et enfin la visualisation graphique des trajectoires (*comparison*). C'est ainsi que l'IDDRI a réalisé deux études reprenant ces méthodologies appliquées aux transports de passagers (Briand et al, 2017) et de marchandises (Briand et al, 2019) en France, en collaboration avec le CIRED, EDF, et également l'IFSTTAR pour les scénarios marchandises. Chaque étude comporte deux scénarios contrastés, dont un scénario qui décrit une poursuite des tendances structurelles faisant reposer l'effort de décarbonation sur les progrès technologiques (**TECH-first** pour la mobilité, et **S1** pour les marchandises), et un autre scénario montrant de fortes évolutions organisationnelles et comportementales des transports (**MOB-first** et **S2**) à partir notamment d'une analyse fine des évolutions possibles de la demande de transport. Les deux trajectoires décrites dans chaque étude permettent d'atteindre des niveaux de baisses d'émissions similaires, supérieures à 80 % pour les scénarios mobilité et des émissions proches de 0 en émissions directes pour les scénarios marchandises, accompagnés d'une évaluation des émissions liées à la production de l'énergie.

En 2015, la **SNCF** a commandé une étude pour éclairer les choix de société en matière de mobilité dans le but d'atteindre le Facteur 4 (SNCF, 2015). L'étude a été coordonnée par Sustainable Mobilities, en croisant les regards et les contributions du Laboratoire de Sociologie Urbaine (LaSUR de l'EPFL), de l'ADEME, Trans-Missions, OuiShare et de nombreux contributeurs de la SNCF. Une originalité a été la commande auprès de l'IFOP d'une enquête auprès de 1800 personnes représentatives de la population française, afin de les interroger sur leurs pratiques et leurs aspirations en termes de mobilité. Ces éléments ont enrichi trois scénarios contrastés, représentant trois logiques possibles d'évolution des comportements des voyageurs : un scénario **Ultramobilité**, considéré ici comme un scénario tendanciel où les grandes tendances du passé sont prolongées ; un scénario **Altermobilité**, où la mobilité croît toujours mais les usagers se reportent vers des modes de transport alternatifs à la voiture ; et enfin le scénario **Proximobilité**, ajoutant à ce système altermobile une valorisation de la qualité de vie de la proximité notamment par de nouvelles logiques d'aménagement du territoire. Les scénarios sont peu contrastés sur les évolutions technologiques possibles, mais intègrent des évaluations quantifiées des externalités, au-delà des seules émissions de CO_2 (accidentologie, pollution atmosphérique, congestion, et bénéfices santé de l'activité physique).

2.3.Méthodologie

Points et messages clés :

- ✓ La décomposition se fait avec les **5 mêmes facteurs** que pour le passé : demande, report modal, taux de remplissage, efficacité énergétique et intensité carbone.
- ✓ L'évolution des facteurs dans les scénarios se fait de manière relative à la situation initiale (**analyse temporelle**) ; le potentiel de certains facteurs dans les scénarios les plus volontaristes est ensuite comparé aux scénarios tendanciels (**analyse spatiale**).
- ✓ Les résultats sont présentés en **décompositions multiplicatives** et **additives** : le lien entre les deux dépend du moment auquel ont lieu les évolutions des facteurs.
- ✓ Les différences de **périmètres** (données sources, pas de temps, VUL, aérien, modes actifs) nécessitent quelques **ajustements** pour faciliter la comparaison.

2.3.1. Utilisation et interprétation des décompositions pour la prospective

Afin de faciliter la comparaison entre les tendances passées décrites au chapitre 1 et les tendances décrites dans les scénarios de prospectives, la méthodologie de décomposition utilisée ici a été mise en œuvre de manière à être la plus proche possible de celle utilisée précédemment. Le log-mean divisia index (LMDI) est de nouveau utilisé (Ang, 2004 ; voir dans le chapitre 1 les parties 2.1 et 2.2 pour plus d'explications méthodologiques).

Les décompositions des émissions des transports de voyageurs et de marchandises utilisent toujours les 5 mêmes facteurs cités dans la SNBC, de demande de transport (DT), report modal (RM), taux de remplissage (TR) des véhicules, efficacité énergétique (EE) des véhicules, et intensité carbone (IC) de l'énergie :

$$\mathbf{CO_{2,Transport} = \sum_i D.\frac{D_i}{D}.\frac{C_i}{D_i}.\frac{E_i}{C_i}.\frac{CO_{2,i}}{E_i}}$$

Avec D la demande totale de transport de voyageurs ou marchandises (voy.km ou t.km) et D_i la demande du mode i, C_i la circulation des véhicules du mode i (en veh.km), E_i l'énergie consommée par le mode i (en tep), et $CO_{2,i}$ les émissions de CO_2 du mode i (en tCO_2).

Comme il a été vu dans la méthodologie du chapitre 1 (voir partie 2.1), les analyses de décomposition ont été de plus en plus utilisées depuis les années 90, en particulier pour les **analyses rétrospectives** qui analysent l'évolution des émissions passées, tel que réalisé dans le chapitre 1. Plus récemment, ces analyses ont également été utilisées dans des objectifs de prospectives, sous des formes différentes selon les analyses (Figure 35 ; Ang et Goh, 2019).

Parmi les études rétrospectives, certaines ont pu prolonger les tendances du passé pour évaluer les possibles évolutions futures. Elles se projettent généralement à court terme et dans une logique d'**analyse extrapolative** à 5 à 10 ans (i sur la Figure 35), comme c'est le cas des études de Steenhof et al, (2006) ou Lin et Xie (2014) pour le secteur des transports. D'autres analyses construisent des scénarios à plus long terme, comme le font Agnolucci et al (2009) et Steckel et al (2011) avec des scénarios à l'horizon 2050, qui sont comparés aux tendances passées respectivement sur 1970-2002 et 1970-2007. L'ambition dans cette étude est également de comparer les tendances passées avec des scénarios à 2050, à la seule différence que les scénarios utilisés proviennent d'une comparaison de scénarios existants et ne sont pas créés dans le cadre de ce travail.

Le deuxième type d'analyses de décomposition en prospective concerne les **analyses temporelles de scénarios**, c'est-à-dire l'évolution des émissions et de ses facteurs explicatifs

entre une année de référence et un horizon temporel. C'est ce type d'analyse qui est majoritairement utilisé ici, généralement avec 2010 ou 2015 comme année de référence, et 2050 comme projection. Les deux papiers les plus proches à l'analyse ici développée de comparaison de scénarios transport concernent les papiers d'Edelenbosch et al (2017) et Yeh et al (2017),

Enfin, la troisième utilisation possible concerne l'**analyse spatiale de scénarios**, pour laquelle la décomposition donne une évolution des émissions et des facteurs en relatif par rapport à un scénario de référence. C'est ce que font les scénarios développés à l'échelle des Etats-Unis par McCollum and Yang (2009), et pour la Californie pour Yang et al (2009), qui évaluent la contribution possible de différentes options et technologies de décarbonation des transports pour atteindre jusqu'à -80 % d'émissions entre 1990 et 2050. C'est également ce que fait l'agence internationale de l'énergie dans un certain nombre de publications, comme celle de 2017 sur le futur des camions, où un 'Modern Truck Scenario' est comparé à un scénario de référence en décomposant les facteurs d'activité, de taux de remplissage, d'efficacité énergétique et de changement de carburants (IEA, 2017). Il est cependant compliqué d'utiliser ce type d'analyse pour l'ensemble des scénarios ici évalués, pour au moins deux raisons. Premièrement, toutes les études ne proposent pas de scénario de référence, et les scénarios de référence sont assez variés selon les études et ne peuvent pas être facilement transposés pour une autre analyse. Aussi l'analyse spatiale est compliquée pour les scénarios de neutralité carbone, car elle consiste à comparer les émissions du scénario de référence en 2050, avec les émissions du scénario volontariste, qui peuvent être proches de 0 : ainsi, étant donné que la décomposition est le résultat d'une multiplication des 5 facteurs étudiés, l'ensemble des baisses d'émissions est compris dans le facteur d'intensité carbone qui arrive à 0 (ou proche de 0) en 2050. Dans les analyses temporelles, cette difficulté est surmontée en ayant plusieurs années intermédiaires dans l'analyse : ainsi si un pas de temps de 5 ans est utilisé, l'impact d'émissions amenées à 0 en 2050 ne se retrouvera intégralement dans l'intensité carbone que pour les baisses d'émissions de 2045 à 2050.

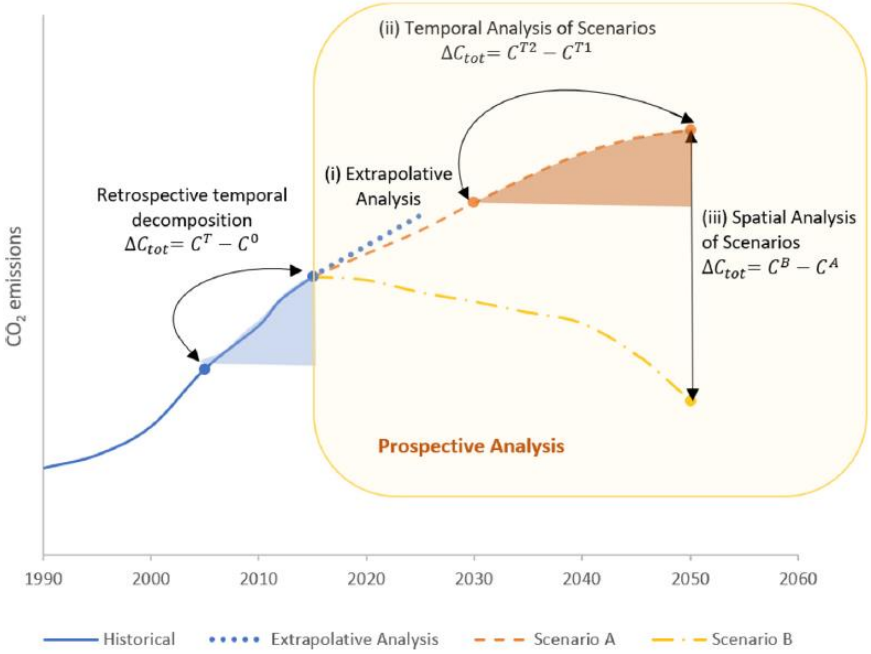


Figure 35 : Illustration graphique des analyses de décomposition rétrospectives et prospectives (Ang et Goh, 2019)

La subtilité liée au choix des pas de temps amène à l'explication de **l'interprétation des résultats des décompositions** additives et multiplicatives.
Les **coefficients des décompositions multiplicatives** correspondent à l'évolution des émissions qui aurait été constatée sur l'ensemble de la période si c'était le seul facteur d'évolution, ou toutes choses égales par ailleurs. Par exemple, un facteur de 1,15 pour la demande indique que la demande augmente de 15 % sur la période et que les émissions augmenteront de 15 % sur la période si les autres facteurs ne bougent pas. De même, un facteur de 0,82 pour le report modal indique que l'évolution des parts modales vers les modes moins émetteurs permet une baisse des émissions de 18 % sur la période.
Si les facteurs sont indépendants dans l'identité et le calcul des coefficients, il existe des **interactions** entre eux (élément discuté dans le chapitre 4), et c'est le cas par exemple pour les facteurs de demande et report modal : ce dernier est d'autant plus facile que la croissance de la demande est faible ; dit autrement, les trafics des modes bas-carbone doivent augmenter bien plus fortement que l'ensemble de la demande pour qu'ils se traduisent en report modal significatif, ayant donc un impact mesurable sur les émissions (voir aussi en fin de section 2.1 du chapitre 1 pour l'interprétation du report modal). Une autre interaction concerne l'intensité carbone, qui pour des problèmes de ressources limitées pour certaines énergies, de rythme de développement des énergies alternatives ou encore de diffusion des véhicules, ne peut dans certains cas être réaliste et aussi important qu'indiqué dans le scénario, qu'à la seule condition d'avoir mis en œuvre des actions de réduction de la demande en énergie via les 4 facteurs précédents. Enfin, le développement du véhicule électrique a des impacts à la fois sur l'efficacité énergétique des véhicules (mesurée en énergie finale, avec des moteurs électriques plus efficaces que les moteurs thermiques) et sur l'intensité carbone de l'énergie qui est considérée comme nulle en émissions directes. Cela implique aussi qu'une partie des gains d'efficacité peut simplement être due à l'effet de structure du parc lié au développement des motorisations électriques, ou hybrides dans une moindre mesure.
Les **résultats des décompositions additives** correspondent à des variations d'émissions en $MtCO_2$. Pour avoir une contribution totale entre l'année de référence et 2050, les hausses ou baisses d'émissions additives qui sont calculées à chaque pas de temps de la décomposition sont additionnées (voir point suivant 2.3.2). Le lien avec les facteurs multiplicatifs dépend fortement du moment auquel le facteur évolue. A titre d'illustration, on reprend l'exemple d'un report modal ayant un impact de -18 % sur les émissions, et on suppose un scénario pour lesquelles les émissions passeraient de 100 à 5 $MtCO_2$ sur 2015-2050. La baisse d'émissions liée au report modal sera proche de 18 $MtCO_2$ si l'intégralité du report modal a lieu de 2015 à 2020 et que les autres facteurs évoluent peu sur cette période. En revanche, la baisse sera très réduite si ce report modal a lieu de 2045 à 2050 et que les émissions ne sont plus que de 15 $MtCO_2$ en 2045, car la baisse de 18 % s'applique à des émissions restantes bien plus faibles.

En plus de ces chiffres qui correspondent à l'analyse temporelle, il sera parfois question de **comparaison spatiale** des facteurs multiplicatifs des 3 ou 4 scénarios les plus ambitieux, avec les facteurs des scénarios tendanciels étudiés, ou avec la stratégie nationale bas-carbone. Si par exemple les scénarios tendanciels donnent une demande croissante de 22 % et les scénarios volontaristes une baisse de 9 %, il peut ainsi être considéré que le potentiel de baisse par rapport à la tendance est de -25 % (car 0,91/1,22 = 0,75 ; sans raisonner en log ici).

2.3.2. Périmètres, difficultés de la comparaison et ajustements réalisés

En raison de la quantité de données nécessaires pour réaliser la décomposition des émissions (évolution de la demande par mode, des taux de remplissage, des consommations d'énergie et des émissions par mode), il a été nécessaire de **contacter les producteurs de scénarios pour se procurer les données nécessaires**.

Les sources de données, les périmètres et les unités ne sont pas toujours exactement les mêmes selon les études, rendant la comparaison directe des valeurs absolues compliquée.

Tableau 9 : Périmètres des scénarios voyageurs, leurs émissions, et ajustements pour la comparaison

Institut	**MTES**		**EpE**	**négaWatt**		**ADEME**	**IEA**		**IDDRI**		**SNCF**		
Nom scénario	**AME**	**SNBC**	**ZEN**	**Tend**	**nW**	**Vision**	**NPS**	**EV30**	**MOB**	**TECH**	**Ultra**	**Alter**	**Proxi**
Année réf	2015		2015	2015		2010	2015		2010		2013		
Année proj	2050		2050	2050		2050	2050		2050		2050		
Pas de temps	5-20 ans		5 ans	1 an		5-15 ans	5 ans		10 ans		37 ans		
Scope	Scope 1		Scope 1	Scope 1		Scope 1	Scope 2		Scope 1		Scope 2		
CO_2 réf	90	90	107	88	88	86	117	117	75	75	95	95	95
CO_2 2050	67	1	5	54	0	7	43	5	13	10	51	34	29
ΔCO_2	-23	-90	-103	-33	-88	-78	-73	-112	-62	-65	-45	-61	-67
% CO_2	-26%	-99%	-96%	-38%	-100%	-91%	-63%	-96%	-83%	-87%	-47%	-64%	-70%
% VUL voy.	60%		60%	60%		60%	60%		0%		0%		
Aérien	Métropole		Métro	< 800 km		Aucun	Total=>Métro		Métropole		Métropole		
Modes actifs	Marche+ vélo		Vélo	Marche + vélo		Vélo	Aucun		Marche + vélo		Marche + vélo		

Tableau 10 : Périmètres des scénarios marchandises, leurs émissions, et ajustements pour la comparaison

Institut	**MTES**		**EpE**	**négaWatt**		**ADEME**	**IEA**		**IDDRI**	
Scénario	**AME**	**SNBC**	**ZEN**	**Tend**	**nW**	**Vision**	**NPS**	**EV30**	**S1**	**S2**
Année réf	2015		2015	2015		2010	2015		2010	
Année proj	2050		2050	2050		2050	2050		2050	
Pas de temps	5-20 ans		5 ans	1 an		5-15 ans	5 ans		5-10 ans	
Scope	Scope 1		Scope 1	Scope 1		Scope 1	Scope 2		Scope 1	
CO_2 réf	33	33	30	30	30	39	45	45	30	30
CO_2 2050	42	0	2	24	0	5	21	8	0	0
ΔCO_2	10	-33	-27	-6	-30	-35	-24	-36	-30	-30
% CO_2	29%	-100%	-92%	-19%	-100%	-88%	-53%	-81%	-100%	-100%
% VUL march.	40% veh.km		40% veh.km	40% veh.km		40% t.km	40% t.km & veh.km		100%	
TR VUL (t/veh)	Fixé à 0,5		0,16 => 0,41	0,24 => 0,6		1,61 => 0,6	0,59		0,38	

Ainsi, de manière générale, il est nécessaire de regarder plutôt les chiffres comme des **ordres de grandeur**, ou de regarder les **évolutions relatives** par rapport à l'année de référence. C'est ce que permettent les décompositions multiplicatives, dont les résultats sont relativement peu dépendants d'éventuelles différences dans les données de l'année de référence.

Pour les **décompositions additives**, elles dépendent plus fortement des données de l'année de référence, en particulier du niveau des émissions qui varie de 75 à 117 $MtCO_2$ pour le transport de voyageurs et de 30 à 45 $MtCO_2$ pour le transport de marchandises (voir les différences de périmètres dans les Tableau 9 et Tableau 10). Les différences par rapport aux 90 et 33 $MtCO_2$ des scénarios de la SNBC sont expliquées essentiellement par une surestimation pour les scénarios qui prennent en compte les émissions de la production d'énergie (scope 2 pour IEA et SNCF) et une sous-estimation pour les scénarios voyageurs qui n'intègrent pas de VUL (IDDRI et SNCF, les deux effets se compensant pour ces derniers scénarios). Ces différences n'affectent que très peu la part des modes de transport considérés dans les émissions, ni la part relative des 5 facteurs étudiés dans les décompositions. Ainsi,

pour les décompositions additives, les résultats ont été pondérés par les émissions de l'année de référence du scénario de la SNBC (par exemple, pour un scénario aux émissions de 117 $MtCO_2$ l'année de référence, une baisse de 11,7 $MtCO_2$ est ramenée à 9 $MtCO_2$). Cela permet de rendre les résultats de ces décompositions plus facilement comparables entre eux, comme par exemple dans la Figure 38 pour les décompositions additives du transport de voyageurs. En revanche, les résultats bruts des décompositions sont donnés dans les tableaux en annexe 1.1.

Une autre différence entre les scénarios concerne l'année de référence et les pas de temps utilisés dans le scénario. Concernant l'**année de référence**, aucune correction n'a été apportée car les années de référence varient seulement entre 2010 et 2015, une période pour laquelle les évolutions ont été relativement faibles pour les émissions et les 5 facteurs étudiés, comparé aux fortes évolutions prévues d'ici 2050 dans les scénarios.
En revanche, des corrections ont dû être apportées pour les **pas de temps** entre les années intermédiaires des scénarios, qui ont été corrigés à 5 à 10 ans pour la majorité des scénarios. Le principal impact que peut avoir le changement de pas de temps concerne la dernière décomposition pour un scénario approchant des émissions nulles en 2050. Comme évoqué en 2.3.1, la dernière décomposition d'un scénario arrivant à 0 accorde l'ensemble des baisses d'émissions à l'intensité carbone, seul facteur capable d'atteindre 0. Pour des scénarios loin de la neutralité comme ceux de la SNCF, l'impact est moins fort et il a été choisi de ne garder qu'une seule décomposition sur une période de 37 ans de 2013 à 2050 (ainsi il n'y a pas de résultats à l'horizon 2030 pour ces scénarios dans les tableaux en annexe). Les scénarios du MTES comportent une projection depuis l'année 2015 aux années 2020, 2025, 2030, et 2050. Etant donné que les émissions sont proches de 0 en 2050 pour le scénario SNBC, des points intermédiaires ont été créés pour les années 2035, 2040 et 2045 en supposant une évolution linéaire des différentes variables (demandes, consommations d'énergie et émissions), étant donné que l'évolution des émissions dans la SNBC prévoie une telle évolution linéaire. Pour le scénario de l'ADEME qui prend comme année de référence 2010 et se projette à 2020, 2030, 2035, et 2050, un pas de temps de 10 ans a été pris, en enlevant l'année 2035 et en calculant une année 2040 avec évolution linéaire entre 2035 et 2050. Aucun changement n'a été réalisé pour les pas de temps de 10 ans des scénarios voyageurs de l'IDDRI, en revanche des années intermédiaires tous les 5 ans ont été créés pour les scénarios marchandises de l'IDDRI étant donné qu'ils approchent de la neutralité carbone. Des pas de temps de 5 ans ont été créés pour les scénarios de négaWatt (initialement pas de temps de 1 an), et aucun changement n'a été réalisé pour les pas de temps de 5 ans d'EpE et de l'IEA.

Les **modes de transports** considérés sont les mêmes que pour le passé : transport routier individuel, bus et cars, ferroviaire, aérien, modes actifs soit généralement 5 modes voyageurs ; poids-lourds, 40 % des VUL, ferroviaire et fluvial soit 4 modes marchandises (voir chapitre 1, partie 2.3). Les exceptions et certains périmètres sont explicités ci-dessous.
La même difficulté méthodologique identifiée pour les décompositions passées se retrouve pour la prise en compte des **véhicules utilitaires légers** (VUL). L'hypothèse de 60 % des VUL intégrés au transport de voyageurs est conservée, avec les 40 % restants intégrés comme 4ème mode aux marchandises. Si l'ajout des VUL dans les transports individuels routiers n'a

que peu d'impact sur la décomposition, sa prise en compte dans le transport de marchandises peut avoir de plus fortes implications selon le choix méthodologique réalisé. Les compter comme un mode séparé permet d'éviter de forts impacts dans la décomposition sur les taux de remplissage ou l'efficacité énergétique (comme c'est le cas quand ils sont intégrés aux poids-lourds). En revanche, une forte croissance des VUL peut apparaître ici comme un report modal défavorable dans le scénario, les émissions par t.km transportées étant beaucoup plus fortes pour les VUL que pour les autres modes. Les hypothèses sur l'intégration des VUL dans les scénarios étant très diverses, des corrections ont été réalisées afin de s'assurer que ces différences ne biaisent pas certains résultats des décompositions marchandises. Les changements réalisés sont résumés dans les deux dernières lignes du Tableau 10. Ils ont été réalisés dans le but de tendre vers des taux de remplissages similaires entre les scénarios, proches de 0,5 t/véhicule : pour les scénarios du MTES, les VUL sont considérés séparément et n'ont pas de demande en voy.km ou t.km associée, 40 % des veh.km sont intégré aux marchandises avec un remplissage constant à 0,5 t/veh ; pour EpE et négaWatt, les demandes de l'ordre de 23 Md t.km en 2015 ont été conservées, en gardant 40 % des veh.km pour les marchandises (ce qui multiplie leur taux de remplissage par 2,5) et 60 % pour les voyageurs (avec un taux de remplissage similaire aux voitures, comme pour les autres scénarios) ; pour le scénario de l'ADEME, étant donné que les veh.km paraissent très faibles (22 Md veh.km, contre de l'ordre de 100 pour les autres scénarios) et le taux de remplissage très fort (1,61 t/veh), 100 % des veh.km sont gardés et ce sont 40 % des t.km qui sont ici pris pour retrouver un taux de remplissage et une demande comparable aux autres scénarios ; les t.km paraissent très surestimés pour les scénarios de l'IEA, ainsi 40 % des veh.km mais aussi des t.km ont été gardés ; enfin, des évaluations spécifiques sur la part des VUL utilisés pour du transport de marchandises ont été faîtes pour les scénarios de l'IDDRI, et les chiffres ont été conservés intacts. Ces corrections peuvent expliquer certaines différences avec les chiffres donnés dans les scénarios, notamment sur la croissance de la demande.

Les périmètres du **transport aérien** apparaissent également variés selon les scénarios. Ce qui permet d'uniformiser le plus facilement les périmètres est de garder uniquement le trafic métropolitain, un périmètre qui a aussi été évalué pour la décomposition passée des voyageurs (les résultats présentés en chapitre 1 comprennent aussi l'Outre-mer, ce qui ne change que très marginalement les résultats). Dans les scénarios du MTES, les chiffres pour la Métropole seule et pour l'Outre-mer sont présentés, avec des évaluations des consommations d'énergie et des émissions pour l'international ; négaWatt sépare le trafic inférieur à 800 km qui est gardé ici, et le trafic pour des distances supérieures à 800 km ; le scénario de l'ADEME ne donne pas de chiffres de trafics pour l'aérien et il n'est donc pas intégré ici ; enfin, le scénario de l'IEA donne uniquement les trafics totaux à la fois pour la navigation et l'aérien, des évolutions sont donc recalculées pour la métropole seule en prenant les mêmes évolutions de demande que pour le trafic total (sauf pour l'aérien supposé constant dans le scénario EV30), et les mêmes évolutions d'efficacité énergétique et d'intensité carbone.

Enfin, les **modes actifs** sont traités différemment selon les scénarios. Certains scénarios ne les prennent pas en compte, d'autres ne prennent en compte que le vélo et d'autres prennent également la marche (voir Tableau 9). Aucune correction n'est appliquée sur ce point, en considérant ainsi que les scénarios qui ne prennent pas en compte ces modes n'auraient pas prévu de croissances significatives de leurs trafics.

3. Résultats des décompositions

Différentes manières de présenter les résultats des décompositions sont possibles, en apportant des visions parfois contrastées selon l'approche retenue, ainsi l'analyse traitera simultanément des résultats :

- ✓ En évolution **temporelle** par rapport à l'année de référence, ou en **comparaison** (approche spatiale) des scénarios tendanciels avec les scénarios ambitieux, et du positionnement de la stratégie nationale bas-carbone (SNBC) parmi ces scénarios ;
- ✓ Ainsi, selon les résultats présentés, tous les **scénarios** seront présentés ou des **groupes de 3 ou 4 scénarios** seront réalisés pour faciliter la lecture et avoir des tendances moyennes entre plusieurs scénarios ;
- ✓ Les résultats seront donnés pour le transport de **voyageurs** et de **marchandises** ;
- ✓ Les décompositions seront présentées sous formes **multiplicatives** (évolutions en %) et **additives** (en $MtCO_2$) ;
- ✓ Principalement à l'horizon **2050**, plus ponctuellement à l'horizon **2030** ;
- ✓ Enfin, les **5 facteurs** de la décomposition seront étudiés, en essayant parfois de décomposer des sous-ensembles au sein de chaque facteur, pour le report modal par mode, différents effets de l'efficacité énergétique, et les différentes énergies influant l'intensité carbone de l'énergie.

La partie de résultats abordera : d'abord les décompositions temporelles aux horizons 2050 et 2030 ; ensuite la comparaison entre les scénarios tendanciels, ambitieux et la SNBC ; enfin, les évolutions prévues des 5 leviers de décarbonation seront détaillées.

3.1.Résultats temporels par scénario

Points et messages clés :

- ✓ L'**analyse temporelle** décompose l'évolution des émissions du scénario au cours du temps (ici surtout d'ici à 2050) par rapport à l'année de référence.
- ✓ Les principales baisses d'émissions dans les scénarios voyageurs et marchandises apparaissent pour les facteurs d'**efficacité énergétique** et d'**intensité carbone**.
- ✓ A l'horizon **2030**, l'intensité carbone a moins d'importance qu'à l'horizon 2050, les autres facteurs ont des potentiels relativement réguliers au cours du temps.

3.1.1. Résultats des décompositions voyageurs

Les résultats des décompositions additive et multiplicative sont d'abord présentés pour l'évolution temporelle des émissions et de la contribution des 5 facteurs dans le scénario de la **SNBC** (stratégie nationale bas-carbone), en Figure 36.

La **décomposition multiplicative** (à gauche) montre : une croissance de 26 % de la demande de transport et qui participe à la hausse des émissions de CO_2 ; une contribution du report modal à la baisse des émissions à hauteur de -8 % des émissions (facteur 0,92) ; une contribution légèrement plus forte de -11 % du taux de remplissage, essentiellement par le développement du covoiturage ; une division par trois (-68 %) des consommations d'énergie par véhicule.kilomètre ; et enfin, l'intensité carbone montre des effets surtout sur la fin de la période, et permet d'atteindre des émissions directes quasiment nulles en 2050 (-97 % d'émissions par unité d'énergie).

La **décomposition additive** (à droite), réalisée avec un pas de temps de 5 ans, permet de voir davantage la répartition des baisses d'émissions au cours du temps (le point 2020 représente l'évolution de 2015 à 2020). Les émissions passent d'environ 90 à 1 $MtCO_2$ de 2015 à 2050, et l'addition des baisses d'émissions montre sur l'ensemble de la période : une contribution à la hausse des émissions de la demande (10,7 $MtCO_2$) et des contributions à la baisse du report modal (-4,5 $MtCO_2$), du taux de remplissage (-5,0 $MtCO_2$), de l'efficacité énergétique (-47,2 $MtCO_2$) et de l'intensité carbone de l'énergie (-43,5 $MtCO_2$).
Les décompositions montrent que les **trois premiers facteurs se compensent** quasiment (1,03 soit +3 % cumulés ; ou +1,2 $MtCO_2$). La demande croissante est presque annulée par les contributions à la baisse des facteurs de report modal et de taux de remplissage. Les plus fortes baisses d'émissions viennent de l'**efficacité énergétique** et de l'**intensité carbone**.

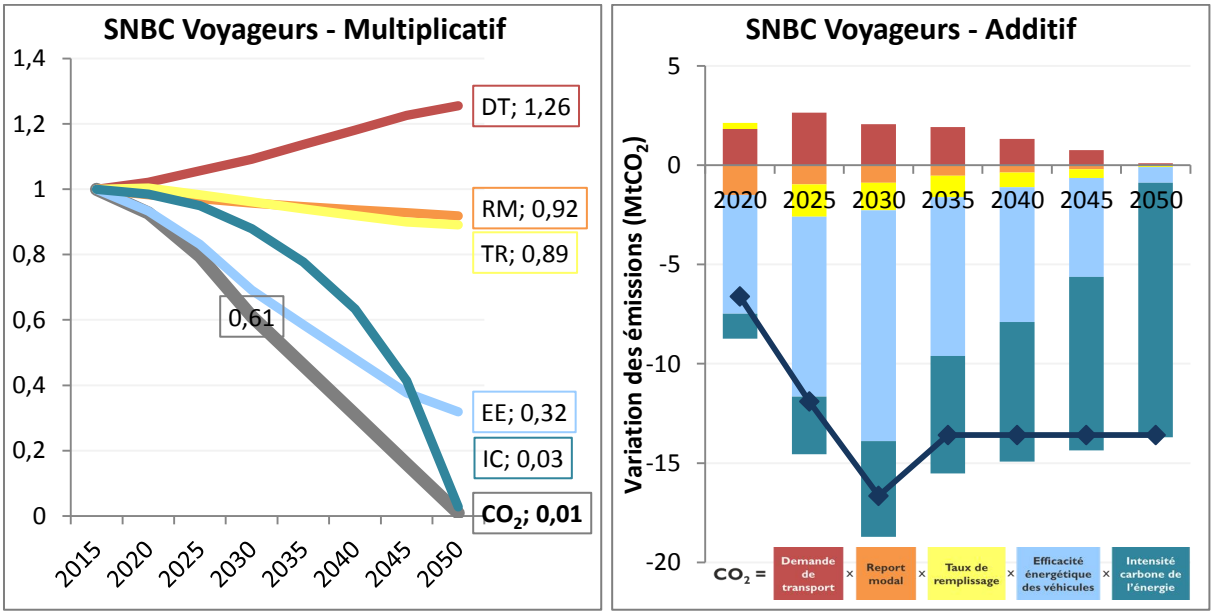


Figure 36 : Décompositions multiplicative (à gauche) et additive (à droite) du scénario voyageurs de la SNBC

Les Figure 37 et Figure 38 ci-dessous comparent respectivement les résultats des décompositions multiplicatives et additives pour l'ensemble des 4 scénarios tendanciels et des 9 scénarios volontaristes voyageurs. Les baisses des émissions de CO_2 sont représentées par les losanges noirs, et sont logiquement plus fortes pour les scénarios volontaristes que pour les scénarios tendanciels. Les résultats sont donné pour l'ensemble de la période jusqu'à 2050, soit les résultats de l'évolution jusqu'à 2050 pour les décompositions multiplicatives, et l'addition des décompositions additives à chaque pas de temps tel que réalisé ci-dessus pour la SNBC, pour les décompositions additives.
La **hiérarchie des facteurs multiplicatifs** fait globalement ressortir un **ordre similaire à la SNBC** dans les scénarios volontaristes, à peu près dans l'ordre des 5 facteurs de la décomposition, avec la demande qui est parfois en hausse, généralement des baisses relativement faibles pour le report modal et le taux de remplissage, et des baisses plus fortes pour l'efficacité énergétique et l'intensité carbone.
Cependant, on peut remarquer des **différences parfois importantes** entre les 13 scénarios, que ce soit entre les scénarios tendanciels et volontaristes, ou au sein de chacune des catégories : la demande apparaît comme un facteur avec des hypothèses variées, depuis des

hausses jusqu'à +30 % pour des scénarios tendanciels et -20 % pour le scénario de l'ADEME, impliquant une baisse des kilomètres par personne encore plus importante (à noter que l'aérien n'est pas pris en compte dans ce scénario) ; le report modal est quasiment nul dans certains scénarios et jusqu'à 20 % pour certains scénarios dans lesquels la croissance de la demande est modérée ; de manière similaire, le taux de remplissage a une légère contribution à la hausse pour certains scénarios, jusqu'à une baisse de -20 % des émissions par ce facteur pour les scénarios EpE et négaWatt ; l'efficacité énergétique participe fortement à la baisse des émissions aussi bien dans les scénarios tendanciels que volontaristes, et dépend en partie importante de l'électrification du parc ; enfin l'évolution de l'intensité carbone est contrastée, avec peu d'évolution dans certains scénarios tendanciels et une décarbonation très forte pour les scénarios visant un objectif proche de la neutralité carbone.

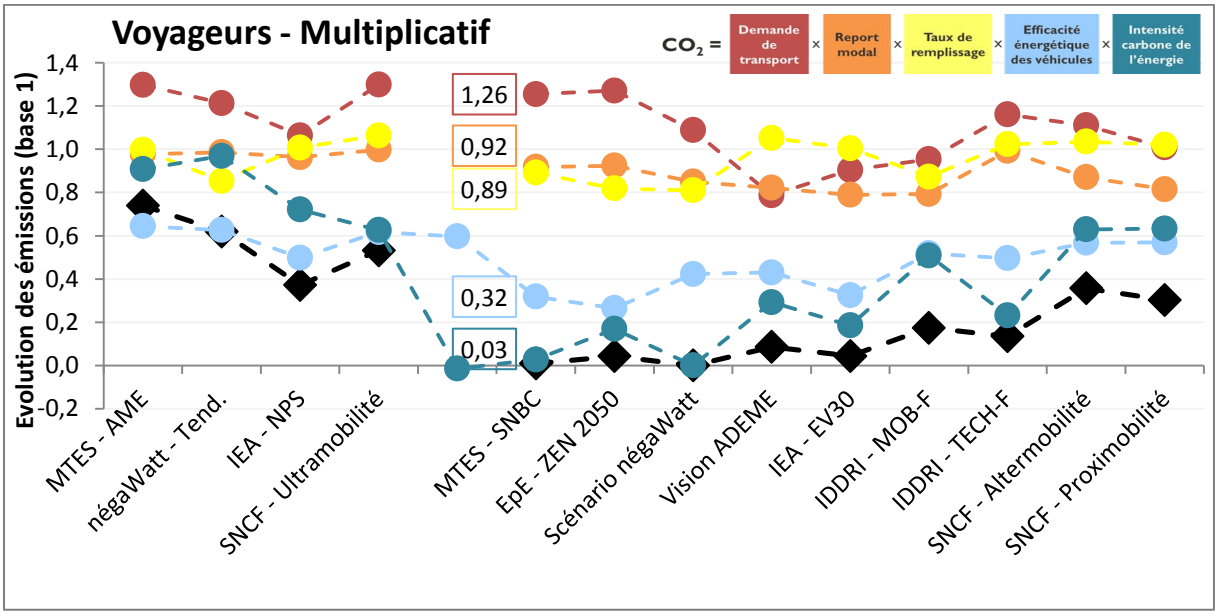


Figure 37 : Décomposition multiplicative de l'évolution des émissions de CO_2 des scénarios voyageurs jusqu'à 2050
(scénarios tendanciels à gauche, volontaristes à droite ; les traits pointillés visent à faciliter la lecture, mais ne représentent en aucun cas un lien entre les scénarios ou entre les évolutions des facteurs)

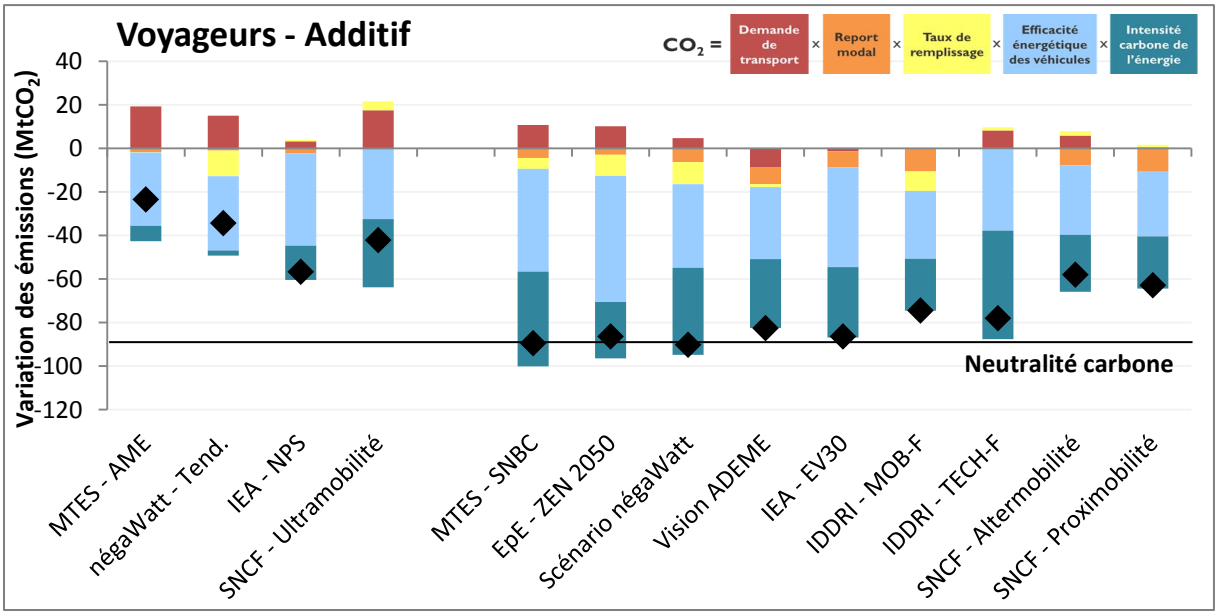


Figure 38 : Décomposition additive de l'évolution des émissions de CO_2 des scénarios voyageurs jusqu'à 2050

3.1.2. Résultats des décompositions marchandises

La Figure 39 donne les décompositions multiplicative et additive de la SNBC pour les marchandises, avec des tendances sur les 5 facteurs qui apparaissent **similaires aux décompositions voyageurs**.

Les **principales différences avec les voyageurs** pour les facteurs multiplicatifs sont : une plus forte croissance de la demande pour le transport de marchandises que pour les voyageurs (+39 % contre +26 %) ; une plus faible contribution du report modal (-4 % contre -8 %) ; une part légèrement plus forte du taux de remplissage des véhicules (-14 % contre -11 %) ; une amélioration plus faible de l'efficacité énergétique des véhicules (-52 % contre -68 %), due notamment à une plus faible électrification des véhicules lourds que des véhicules légers ; enfin, une amélioration similaire de l'intensité carbone, jusqu'à la décarbonation complète du transport de marchandises en 2050.

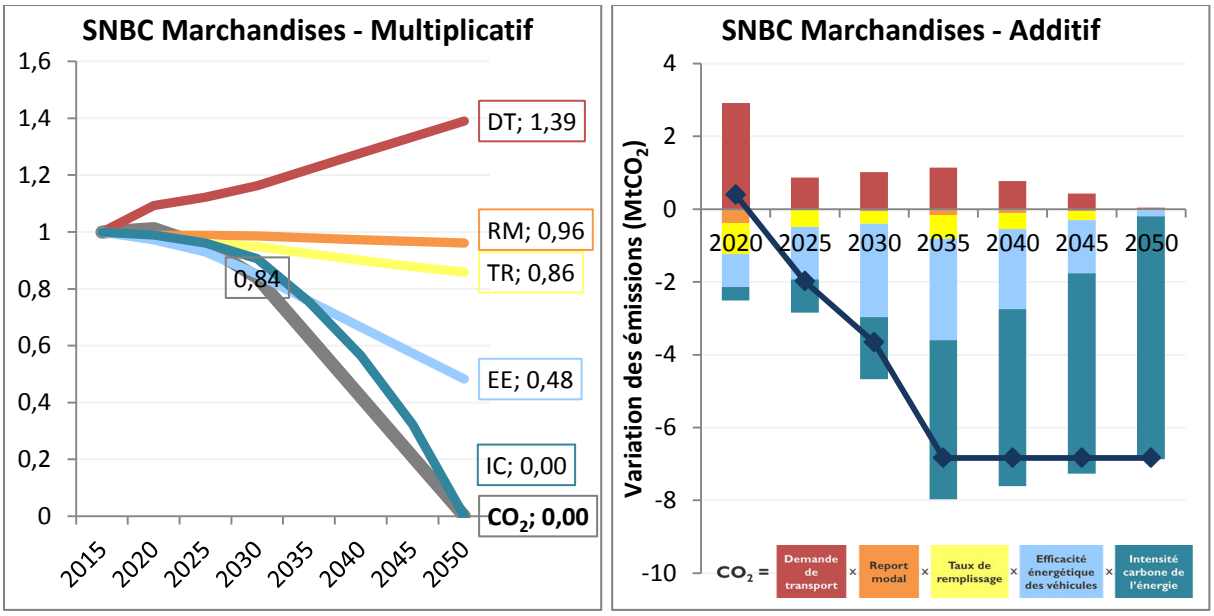


Figure 39 : Décompositions multiplicative (à gauche) et additive (à droite) du scénario marchandises de la SNBC

Les Figure 40 et Figure 41 permettent de comparer les **10 scénarios marchandises**, avec les décompositions multiplicative et additive de la même manière que pour les voyageurs.

De manière plus marquée que pour les voyageurs, **les 3 scénarios tendanciels sont très contrastés**, avec une hausse des émissions de 30 % dans le scénario tendanciel du MTES, alors qu'elles baissent de 20 % dans le scénario négaWatt et de 50 % dans le scénario tendanciel de l'IEA. Ces disparités illustrent la difficulté de prévoir les évolutions des émissions sans politiques supplémentaires, en raison des visions contrastées qui sont possibles sur ce que représentent la tendance actuelle et l'effet des politiques déjà en place. Les différences entre les 3 scénarios tendanciels sont en partie le fait des différences d'efficacité énergétique, mais surtout des **évolutions de la demande**. Celle-ci apparaît très contrastée, aussi bien pour les scénarios tendanciels que pour les scénarios volontaristes : elle varie entre +79 % et -11 % pour les scénarios tendanciels, et entre -26 % et +54 % pour les scénarios volontaristes (en l'occurrence les 2 scénarios de l'IDDRI). Concernant les autres facteurs de report modal, taux de remplissage et intensité carbone, les scénarios tendanciels prévoient des évolutions très faibles d'ici 2050.

Parmi les **scénarios volontaristes**, les potentiels du report modal et du taux de remplissage apparaissent similaires aux voyageurs, de l'ordre de -20 % (jusqu'à -22 % pour le report modal dans le scénario de l'ADEME et -26 % dans le scénario S2 de l'IDDRI). L'efficacité énergétique apparaît autour des -50 % pour les scénarios marchandises, depuis -30 % pour le scénario négaWatt jusqu'à -63 % pour EpE. Enfin, les progrès de l'intensité carbone sont très significatifs pour la majorité des scénarios, davantage en moyenne que les scénarios voyageurs. Cela cache le fait que les scénarios marchandises ont en moyenne des objectifs plus ambitieux (ceux de l'IDDRI par exemple visent la neutralité alors que ce n'était pas le cas de leurs scénarios voyageurs en 2017). En réalité, l'intensité carbone semble plus difficile à faire baisser que pour les scénarios voyageurs au moins à court terme, en raison de l'électrification plus compliquée pour les véhicules routiers de transport de marchandises.

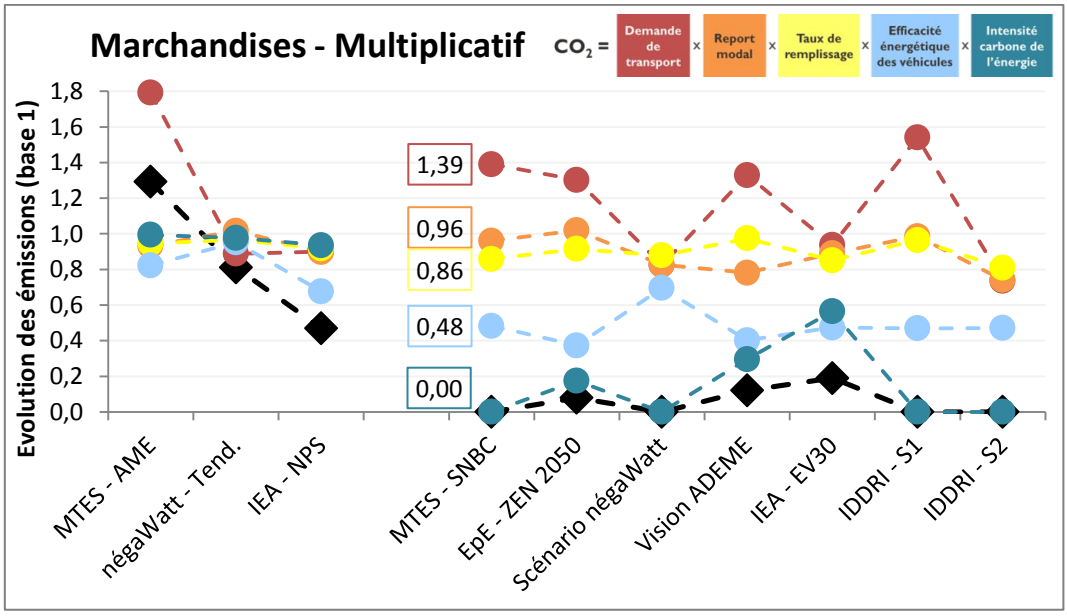


Figure 40 : Décomposition multiplicative de l'évolution des émissions de CO_2 des scénarios marchandises jusqu'à 2050
(scénarios tendanciels à gauche, volontaristes à droite)

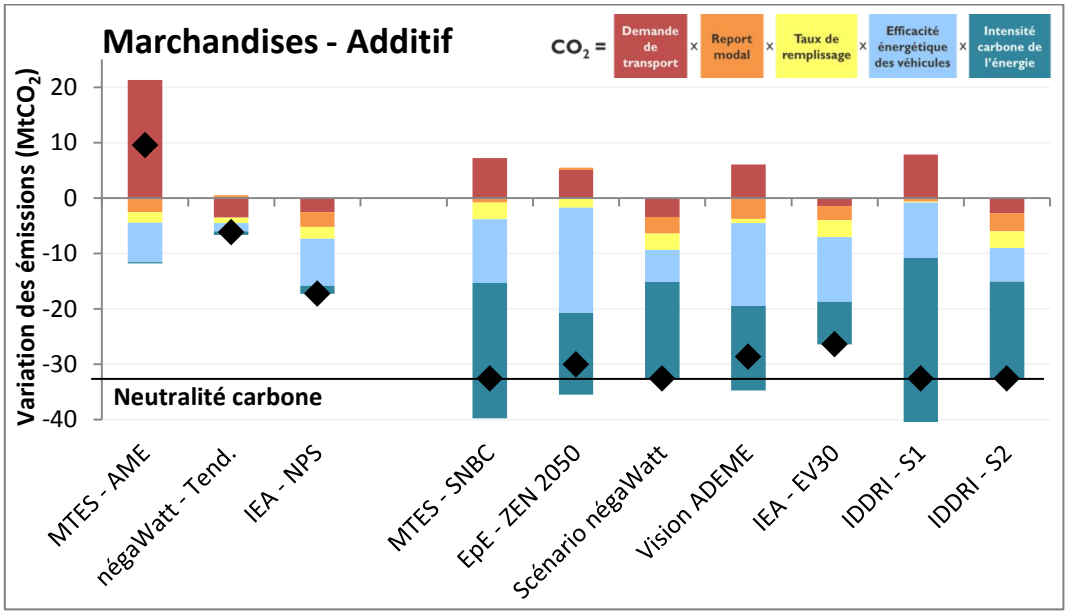


Figure 41 : Décomposition additive de l'évolution des émissions de CO_2 des scénarios marchandises jusqu'à 2050
(scénarios tendanciels à gauche, volontaristes à droite)

3.1.3. Comparaison des décompositions à 2050 et 2030

La grande majorité des évolutions et des résultats donnés dans cette analyse se situent à un horizon 2050. Cependant, il est intéressant de voir quelles sont les évolutions possibles à un **horizon plus proche que constitue l'année 2030**, pour au moins 3 raisons. Tout d'abord, la feuille de route française que constitue la SNBC fixe des budgets carbone à court- et moyen-termes (notamment -28 % entre 2015 et 2030 ; MTES, 2020), et il est utile de voir grâce à quelles évolutions il est possible de les atteindre. Comme rappelé en 2.1.1, d'un point de vue climatique, les budgets carbone représentent également une quantité d'émissions que l'on peut émettre pour rester par exemple dans la limite d'un réchauffement de +2°C. Ainsi ce n'est pas le niveau d'émissions en 2050 (la cible) qui conditionnera le réchauffement mais c'est plutôt la somme des émissions sur l'ensemble de la période (le budget carbone consommé), qui nécessite pour être minimisée des baisses d'émissions le plus rapidement possible. Enfin, l'horizon 2030 permet bien plus facilement de se projeter pour les politiques publiques ou les différents acteurs des transports ou de la transition énergétique.

En annexe, le détail des résultats des décompositions par scénario est donné pour les voyageurs aux horizons 2050 et 2030 en Tableau 23 et Tableau 24, et pour les marchandises en Tableau 25 et Tableau 26. Les figures ne sont pas reproduites ici, car **les évolutions à 2030 sont très similaires à l'horizon 2050**, avec logiquement des baisses d'émissions moins fortes et des évolutions plus modérées des différents facteurs. Une **différence notable concerne l'intensité carbone**, qui comme cela a été noté pour les trajectoires de la SNBC en Figure 36 et Figure 39, présente des évolutions relativement faibles à court terme, tandis qu'elles deviennent de plus en plus fortes au cours du temps.

Les principales baisses d'émissions des décompositions temporelles provenant de l'efficacité énergétique et de l'intensité carbone, cela indique que **le principal levier pour baisser les émissions à court terme concerne l'efficacité énergétique**. Par exemple, la décomposition additive du scénario voyageur de la SNBC indiquait une hausse des émissions due à la demande, tandis que les baisses d'émissions se répartissaient entre les 4 autres facteurs de la manière suivante pour la période 2015-2050 (voir 3.1.1 pour les chiffres en absolu) : 4 % le report modal, 5 % le taux de remplissage, 47 % l'efficacité énergétique et 44 % l'intensité carbone. D'ici 2030, la part de l'intensité carbone baisse à 22 %, et celle des autres facteurs augmente à 8 % pour le report modal, 6 % pour le taux de remplissage et 64 % soit quasiment les deux-tiers pour l'efficacité énergétique. Aussi, il sera vu plus loin (cf 3.3.4) que les baisses d'émissions liées à l'efficacité énergétique proviennent essentiellement des progrès sur les moteurs thermiques dans un premier temps, et sont ensuite plus fortement associées à l'électrification du parc. A court terme, la baisse de vitesse sur les routes les plus rapides peut également permettre d'obtenir des gains importants, estimés à un gain de 8 % en termes de consommations par rapport à l'évolution tendancielle dans le scénario négaWatt (2014).

Ce que révèlent les tendances relativement régulières au cours du temps des facteurs de demande, report modal et taux de remplissage, sont que ces évolutions sont progressives avec une **inertie relativement importante des grandes tendances dans la demande**, les comportements de mobilité ou le choix des chargeurs pour le fret. Cela n'empêche pas ces variables d'avoir des évolutions de plus court terme qui peuvent avoir un impact important sur les émissions. C'est le cas de la demande qui réagit fortement au prix du pétrole ou au PIB (cf chapitre 1), une volatilité qui n'est pas intégrée dans les scénarios de prospectives.

3.2.Comparaison des scénarios tendanciels et ambitieux

Points et messages clés :

- ✓ L'analyse spatiale permet de comparer différents scénarios : les scénarios **tendanciels** sont comparés avec les 3 à 4 scénarios les plus **ambitieux** pour chacun des 5 facteurs.
- ✓ Cette analyse révèle plus fortement l'importance de la **demande** et relativise la place de l'efficacité énergétique étant donné ses forts progrès y compris en tendanciel.
- ✓ La **SNBC** paraît très orientée vers les **facteurs technologiques**.
- ✓ Les scénarios les plus ambitieux sur la demande et le report modal font apparaître sur ces 2 facteurs un potentiel de baisse supplémentaire des consommations d'énergie dans la SNBC de **-35 %** pour les voyageurs et de **-50 %** pour les marchandises.

L'analyse spatiale des scénarios de prospectives permet de comparer plusieurs scénarios entre eux (cf 2.3.1 Figure 35), par exemple un scénario tendanciel avec un scénario volontariste. Toutes les publications n'ont pas de scénario tendanciel, ainsi il n'est pas toujours possible de le faire. Aussi, les scénarios de neutralité carbone posent un problème méthodologique pour une comparaison en 2050 entre les données du scénario tendanciel et du scénario volontariste. Un tel calcul est possible tant que le scénario volontariste ne s'approche pas trop près de 0 émission, sinon toutes les baisses d'émissions se retrouvent dans l'intensité carbone. Des évaluations alternatives sont cependant réalisées, pour comparer entre eux les scénarios tendanciel (AME) du MTES et la SNBC, et l'ensemble des scénarios tendanciels avec les scénarios les plus ambitieux sur chaque facteur.

3.2.1. Comparaison pour les voyageurs

Comparaison de la SNBC avec le scénario tendanciel AME

Pour pallier la difficulté des scénarios de neutralité et évaluer néanmoins un **différentiel entre le scénario tendanciel (AME) du MTES et la SNBC**, deux estimations sont conduites.

Pour les **décompositions multiplicatives**, l'évolution relative de chaque facteur entre les scénarios AME et SNBC est calculée. Elle est appliquée progressivement dans l'ordre des 5 leviers depuis la courbe des émissions en AME (en noir) jusqu'à la courbe des émissions de la trajectoire SNBC (en vert ; voir Figure 42 à gauche). Le seul inconvénient de cette méthode est de fixer un ordre auquel on applique les facteurs, ce qui n'est pas le cas dans la méthode classique du LMDI. Cela peut être défavorable aux derniers facteurs, ce qui n'est pas trop dommageable ici car les principales baisses d'émissions viennent des deux derniers facteurs de la décomposition. Ainsi, le schéma représente bien une contribution et un différentiel de plus en plus forts du 1er au 5ème levier pour la comparaison entre les scénarios AME et SNBC : très faible baisse de la demande qui passe d'un facteur 1,30 à 1,26 de l'AME à la SNBC ; le facteur de report modal passe de 0,98 à 0,92 ; le taux de remplissage de 1 à 0,89 ; l'efficacité énergétique de 0,64 à 0,32 ; et enfin, l'intensité carbone de 0,91 à 0,03. De cette analyse, il ressort la contribution suivante de chaque facteur à la baisse des émissions entre le scénario tendanciel et la SNBC : 4 % des baisses viennent de la modération de la demande, 8 % du report modal, 10 % du taux de remplissage, 37 % de l'efficacité énergétique et 41 % de l'intensité carbone de l'énergie.

Pour les **décompositions additives**, une simple soustraction des résultats des deux scénarios est conduite (Figure 42, à droite). Elle peut mettre en évidence certains effets liés à l'évolution

des émissions : par exemple, le différentiel est au désavantage du scénario SNBC pour l'efficacité énergétique pour la période 2045-2050, car les baisses d'émissions apparaissent plus fortes dans le scénario AME où les émissions sont encore de 68 $MtCO_2$ en 2045, contre 14 $MtCO_2$ dans le scénario SNBC. Ainsi une variation plus faible en pourcentage peut avoir un effet plus fort en absolu, car il s'applique à des émissions plus élevées. Cette comparaison identifie de nouveau une faible contribution des 3 premiers leviers. La contribution de l'efficacité énergétique est importante, mais cependant moins que dans l'analyse temporelle car des gains importants sont déjà constatés en tendanciel. La contribution supplémentaire de l'intensité carbone apparaît au contraire très forte, car celle-ci évolue peu en tendanciel.

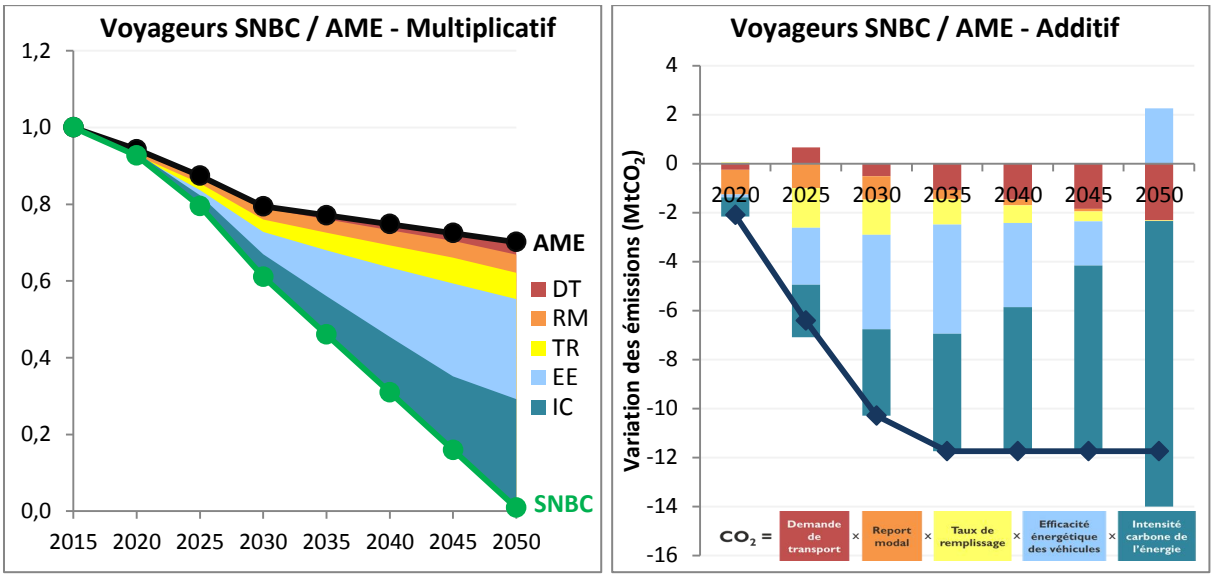


Figure 42 : Comparaison des scénarios voyageurs du MTES, entre le tendanciel (AME) et la SNBC
(comparaison des 5 facteurs en multiplicatif à gauche, différence entre les décompositions additives des scénarios à droite)

<u>Comparaison des scénarios tendanciels et ambitieux pour chaque levier</u>

Une analyse de chaque facteur contributif à l'évolution des émissions est également conduite pour **comparer les 4 scénarios tendanciels voyageurs** (dont le scénario AME), **avec la moyenne des 4 scénarios les plus ambitieux sur chacun des 5 leviers** (hors SNBC, l'objectif étant de la comparer aux autres scénarios volontaristes).

Le schéma de la décomposition multiplicative (Figure 43 à gauche) indique pour chaque facteur : la valeur maximale au sein des 13 scénarios, la valeur minimale, la moyenne des 4 scénarios tendanciels en rouge (limite supérieure du rectangle), et la moyenne des 4 scénarios les plus ambitieux. Un différentiel entre tendanciel et ambitieux est noté (chiffre entouré en vert), il est calculé en divisant les 2 facteurs pour représenter le passage du tendanciel à l'ambitieux sur les émissions. Par exemple, la demande évolue de 22 % pour les scénarios tendanciels, et de -9 % dans la moyenne des 4 scénarios les plus ambitieux, ainsi le différentiel est de -25 % (0,91/1,22 = 0,75). D'une manière similaire, le schéma de droite (Figure 43) présente la comparaison en additif, le différentiel étant cette fois calculé par soustraction des valeurs obtenues en tendanciel et de celles des scénarios les plus ambitieux.

Il ressort de cette comparaison entre scénarios tendanciels et ambitieux une **importance bien plus forte du facteur de demande**, qui ne peut pas atteindre de fortes baisses par rapport à l'année de référence, mais en revanche qui est prévue en hausse de plus de 20 % en moyenne

dans les scénarios tendanciels. Ainsi, le différentiel est relativement important. Au contraire, cette comparaison donne une **moindre importance à l'efficacité énergétique**, qui s'améliore déjà fortement dans les scénarios tendanciels (-40 % en moyenne).

L'analyse montre des **potentiels relativement importants pour les 3 premiers facteurs** de la décomposition utilisée (demande, report modal, remplissage), facteurs qui interrogent davantage la demande et les comportements de mobilité.
La moyenne des 4 scénarios les plus ambitieux simultanément sur les 2 premiers facteurs de **demande et report modal** (ADEME, EV30, MOB-first et Proximobilité) indique des baisses d'émissions de **-27 %** par rapport à l'année de référence (0,91 DT x 0,80 RM = 0,73 ; voir le résumé par facteur plus bas, en Tableau 11). La baisse est de **-39 %** par rapport aux scénarios tendanciels, dans lesquels la combinaison de ces deux facteurs fait augmenter les émissions de +17 % (avec les différentiels de la Figure 43 ci-dessous : 0,75 DT x 0,82 RM = 0,61).
En ajoutant le remplissage, une activation ambitieuse et simultanée des **3 premiers leviers** pourrait amener à une réduction des consommations d'énergie de **-38 %** par rapport à l'année de référence, et de **-47 %** par rapport aux évolutions prévues par les scénarios tendanciels. Une forte ambition sur les facteurs de demande pour les voyageurs permet ainsi quasiment une **division par deux** des émissions par rapport aux scénarios tendanciels, soit la moitié du chemin pour la contribution des transports à la neutralité carbone.

Le potentiel peut également être calculé en **décomposition additive**, bien que l'addition de différents potentiels doive être prise avec précaution car les 4 scénarios les plus ambitieux ne sont pas toujours les mêmes selon les facteurs. Ainsi leur addition donne des potentiels totaux de l'ordre de -67 Mt CO_2, ce qui est davantage que les 54 $MtCO_2$ d'émissions restantes en 2050 pour la moyenne des scénarios tendanciels. Il ressort en ordre de grandeur des baisses possibles de **32 $MtCO_2$ pour les 3 premiers facteurs**, proches des potentiels cumulés de **35 $MtCO_2$ des facteurs plus technologiques** d'efficacité énergétique et d'intensité carbone.

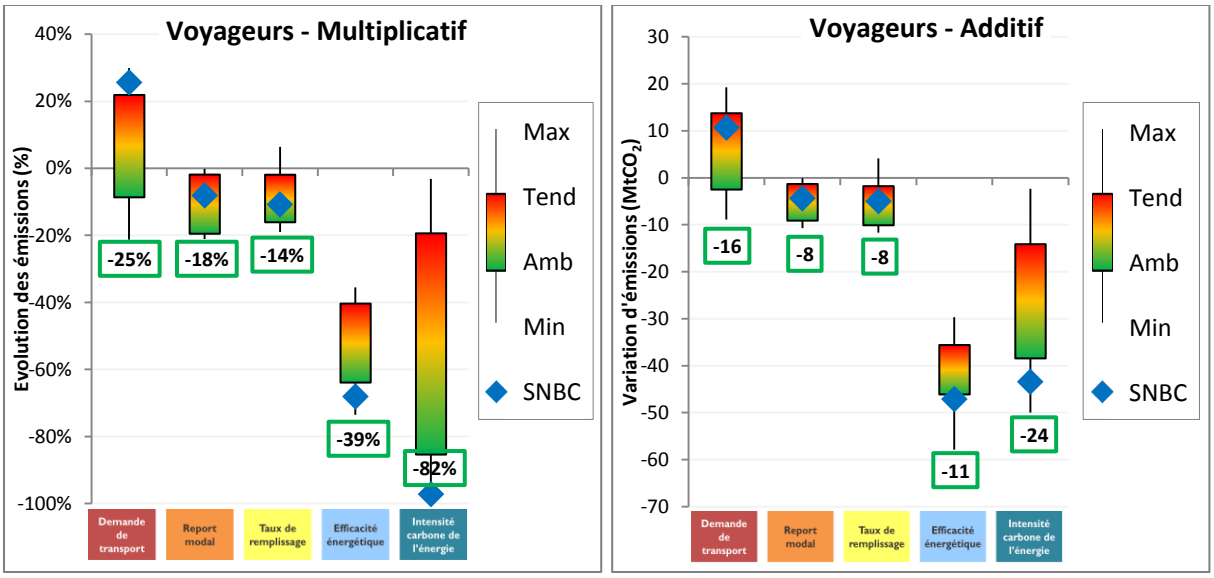


Figure 43 : Comparaison des 4 scénarios tendanciels avec les 4 scénarios voyageurs les plus ambitieux par facteur (facteurs multiplicatifs à gauche, variation d'émissions en additif à droite ; moyenne des 4 scénarios tendanciels en limite supérieure rouge du rectangle, des 4 les plus ambitieux (hors SNBC) pour la limite inférieure en vert ; les chiffres encadrés en vert représentent le différentiel entre les scénarios tendanciels et les 4 les plus ambitieux ; SNBC représentée en bleu)

3.2.2. Comparaison pour les marchandises

Comparaison de la SNBC avec le scénario tendanciel AME

De la même manière que détaillé ci-dessus pour les voyageurs, le **différentiel entre le scénario tendanciel AME et la SNBC marchandises** est réalisé en décompositions multiplicative et additive (Figure 44). De nouveau, cela fait ressortir un moindre effet de l'efficacité énergétique par rapport aux décompositions temporelles, et toujours une forte importance de l'intensité carbone. En revanche, ce qui apparaît ici est une importance bien plus forte de la modération de la demande, qui est en augmentation de +79 % dans le scénario tendanciel AME. Parmi les 5 facteurs, alors que la demande participait à 5 % des baisses d'émissions par rapport au tendanciel pour le scénario voyageurs, il représente pour les marchandises 24 % des baisses d'émissions. Au contraire, de plus faibles contributions sont constatées pour le report modal (seulement 3 %, contre 7 % pour les voyageurs), le taux de remplissage (6 % contre 10 %) et l'efficacité énergétique (27 % contre 38 %), tandis que la contribution de l'intensité carbone reste similaire (41 % contre 40 %).

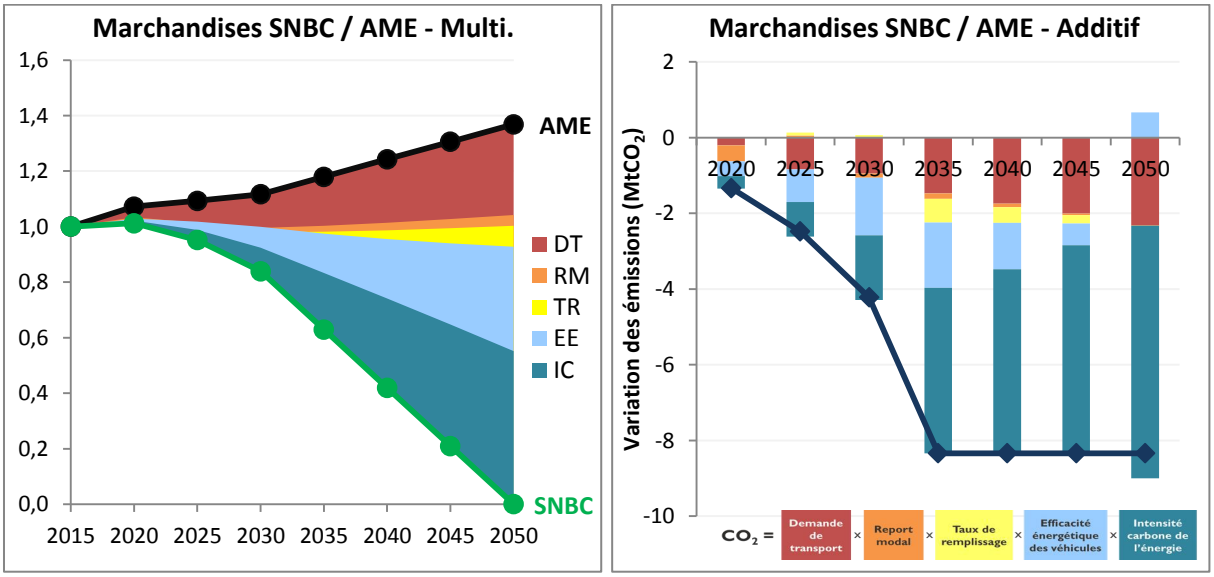


Figure 44 : Comparaison des scénarios marchandises tendanciel (AME) du MTES et de la SNBC
(comparaison des 5 facteurs en multiplicatif à gauche, différence entre les décompositions additives des scénarios à droite)

Comparaison des scénarios tendanciels et ambitieux pour chaque levier

La même comparaison que pour les voyageurs est également conduite pour les **scénarios marchandises**, cette fois entre les **3 scénarios tendanciels et les 3 scénarios les plus ambitieux** sur chaque levier (en raison du plus faible nombre de scénarios ; Figure 45).
Comme cela a été vu en 3.1.2 et en Figure 40, les scénarios du MTES (aussi bien l'AME que la SNBC) se distinguent par des prévisions de fortes croissances de la demande de transport. Les deux autres scénarios tendanciels sont caractérisés par des baisses de la demande, bien plus basses qu'une grande partie des scénarios volontaristes. Ainsi, le différentiel entre la moyenne des 3 scénarios tendanciels et les 3 scénarios les plus ambitieux apparaît seulement de **-30 %** (Figure 45 à gauche). Elle est en revanche de -54 % par rapport au seul scénario tendanciel AME, et même de -40 % lorsque les scénarios les plus ambitieux sont comparés à l'évolution volontariste de la SNBC.

La comparaison pour chaque facteur entre scénarios tendanciels et ambitieux montre des évolutions similaires aux voyageurs pour les facteurs multiplicatifs. Dans les scénarios tendanciels, les progrès d'efficacité énergétique et d'intensité carbone sont moins forts pour les marchandises que pour les voyageurs, nécessitant ainsi un volontarisme plus important pour s'assurer de s'approcher des trajectoires les plus ambitieuses.

En multiplicatif, les **3 premiers leviers** combinés montrent de nouveau des potentiels importants, avec une baisse de **-45 %** par rapport à l'année de référence et de **-48 %** par rapport à la moyenne des 3 scénarios tendanciels (0,70 x 0,82 x 0,90 = 0,52). L'ordre de grandeur d'une réduction de moitié des besoins en énergie par rapport à la tendance, se retrouve donc également pour les 3 premiers facteurs du transport de marchandises.

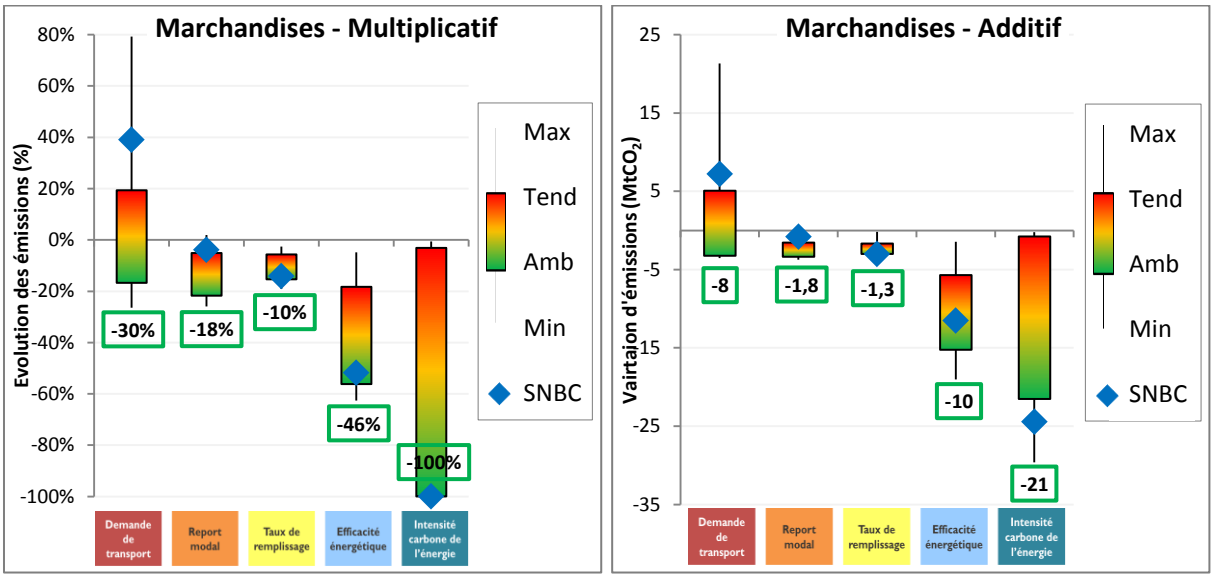


Figure 45 : Comparaison des 4 scénarios tendanciels avec les 4 scénarios marchandises les plus ambitieux par facteur
(pour des explications complémentaires, voir la légende de la Figure 43 ci-dessus)

3.2.3. Positionnement de la SNBC parmi les scénarios

Il ressort des analyses précédentes et notamment du **positionnement du scénario de la SNBC** sur la Figure 43 pour les voyageurs et la Figure 45 pour les marchandises, que la stratégie nationale bas-carbone (SNBC) pour les transports **apparaît peu ambitieuse sur les premiers facteurs de la décomposition**, et de plus en plus ambitieuse vers les facteurs à droite de la décomposition qui sont davantage tournés vers la technologie.

Les évolutions (en multiplicatif) de la SNBC apparaissent même moins favorables que la moyenne des scénarios tendanciels sur l'évolution de la demande de transport de voyageurs et de marchandises, et sur le report modal marchandises. Pour les voyageurs, le volontarisme de la SNBC paraît relativement faible sur le report modal, un peu plus fort pour l'évolution du taux de remplissage, et dépasse la moyenne des 4 scénarios les plus ambitieux pour l'efficacité énergétique et l'intensité carbone de l'énergie. Des tendances très proches sont visibles pour l'évolution des facteurs multiplicatifs pour le transport de marchandises.

Ces évolutions constatées dans **les scénarios de la SNBC révèlent des narratifs** proches de ceux développés dans les scénarios TECH-first pour les voyageurs et du scénario S1 pour les marchandises développés par l'IDDRI. Les narratifs ainsi développés dans ces scénarios reposent sur une poursuite des tendances structurelles actuelles et une forte croissance de la

demande, ce qui rend la décarbonation du secteur dépendante des **évolutions technologiques**, et en particulier les leviers d'efficacité énergétique et d'intensité carbone (voir parties en bleu et vert en Figure 46 et Figure 47, détails expliqués dans la sous-partie suivante en 3.3).
Au contraire, peu de place est laissée aux transformations plus structurelles qui interrogent les **leviers organisationnels et comportementaux** de la mobilité et du fret, tels que le nécessitent les actions de modération de la demande en premier lieu, de report modal et de taux de remplissage. Ces évolutions et narratifs mis en avant par les scénarios MOB-first et S2 de l'IDDRI rejoignent ceux de sobriété par négaWatt et sont aussi présents dans les scénarios de l'ADEME et de l'IEA (bien que l'IEA ne développe pas ce narratif). En revanche, ils sont quasiment absents des narratifs et des évolutions prévus par la SNBC.

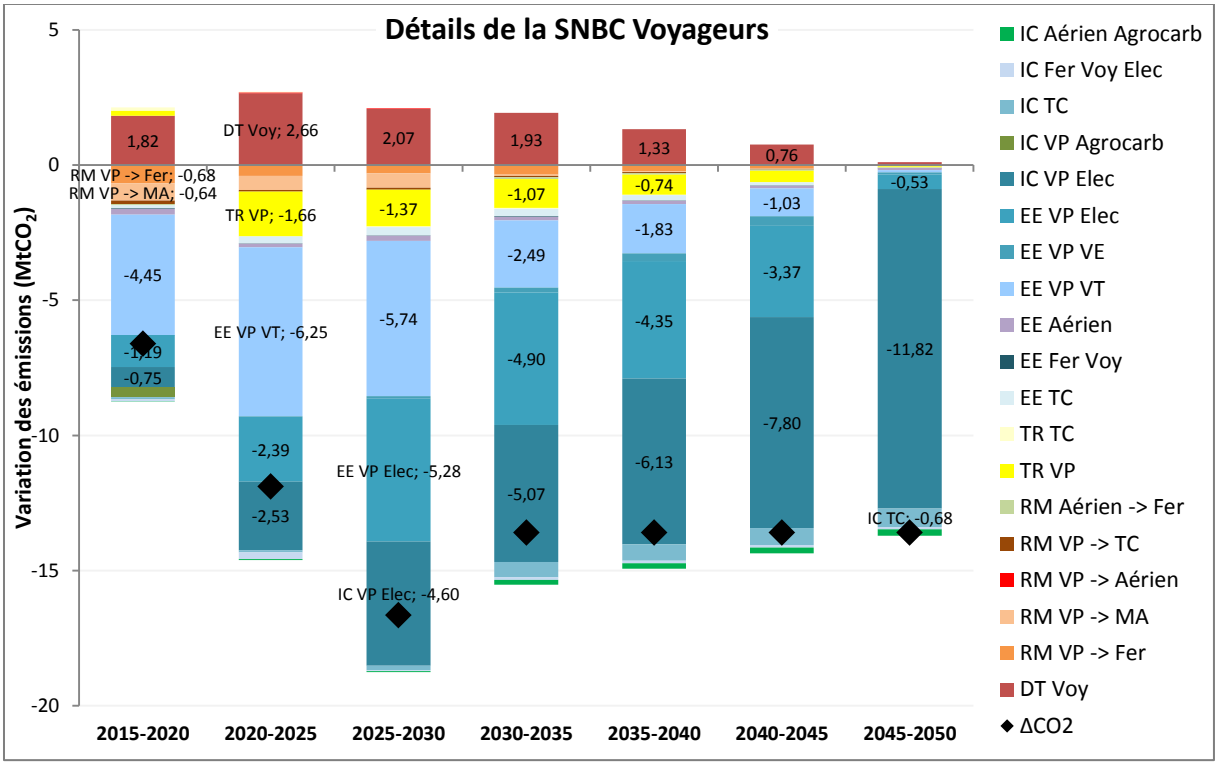


Figure 46 : Détails de la décomposition additive du scénario voyageurs de la SNBC

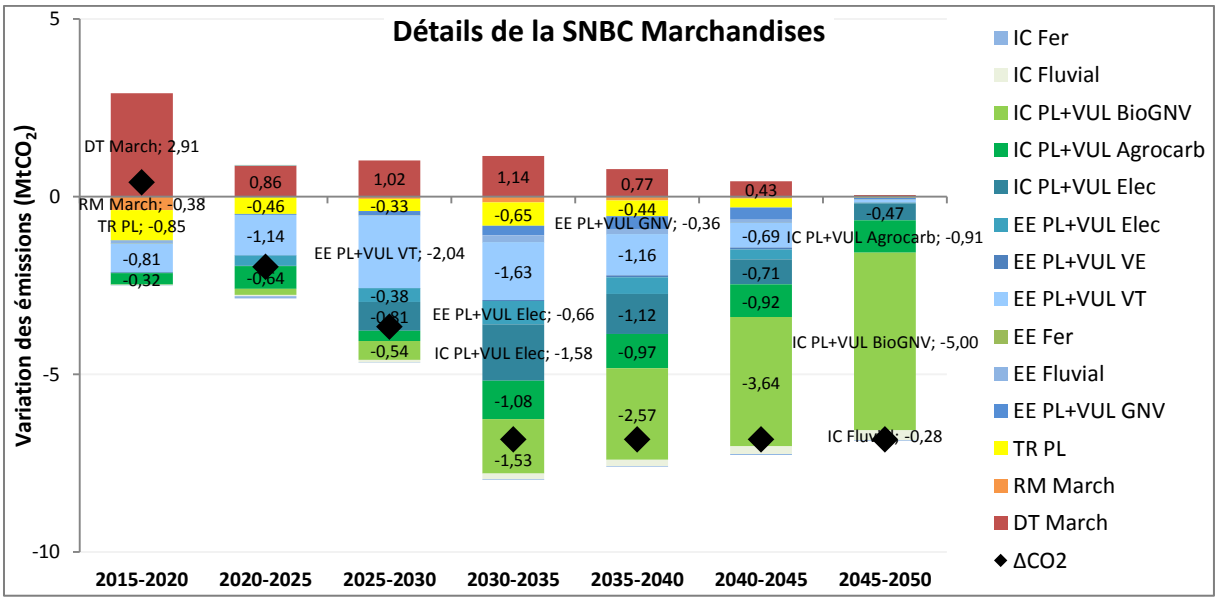


Figure 47 : Détails de la décomposition additive du scénario marchandises de la SNBC

3.3.Détails des contributions par levier

Points et messages clés :

- ✓ La **demande de transport** a des hypothèses d'évolution très variées selon les scénarios, surtout pour les marchandises.
- ✓ Le **report modal** apparaît contrasté selon les scénarios, jusqu'à atteindre -20 % de CO_2, surtout par le report vers le vélo, les trains de voyageurs et le fret ferroviaire.
- ✓ Les **taux de remplissage** évoluent peu dans certains scénarios, et augmentent jusqu'à +30 % pour les voitures et +25 % pour les poids-lourds.
- ✓ L'**efficacité énergétique** s'améliore fortement dans tous les scénarios, par les progrès sur les moteurs thermiques, l'électrification, et/ou la sobriété sur le poids et la vitesse.
- ✓ L'**intensité carbone** de l'énergie s'améliore progressivement et surtout après 2030 par le passage à l'électrique surtout, le biogaz et les agrocarburants.

Les deux premières sous-parties des résultats donnent déjà un certain nombre d'éléments sur **l'impact de chaque facteur sur les émissions de CO_2 des transports**. Il est question ici de les rappeler, et de les détailler pour certains facteurs, en particulier pour le report modal, l'efficacité énergétique et l'intensité carbone. L'analyse s'appuiera notamment sur les éléments résumés dans le Tableau 11, et sur les détails des décompositions additives de la SNBC en Figure 46 et Figure 47. L'objectif est aussi d'expliquer certaines **évolutions sous-jacentes** de ces facteurs. Cependant, les publications des scénarios donnent souvent peu de détails sur les narratifs, les conditions d'évolution ou les politiques publiques nécessaires. La discussion sur la faisabilité des évolutions, les freins existants et les leviers à activer pour les politiques publiques n'est donc pas discutée ici, mais plutôt en chapitre 4 de la thèse.

Tableau 11 : Impact des 5 facteurs sur les émissions d'ici 2050 dans les scénarios voyageurs et marchandises
(intervalle maximal, scénarios tendanciels, 4 scénarios voyageurs et 3 marchandises les plus ambitieux par facteur, et SNBC)

Facteurs		Evolution (en multiplicatif, en %)				Abattement (en additif, $MtCO_2$)			
	Mesures / Evolutions	**Intervalle**	**Tend.**	**Amb.**	**SNBC**	**Intervalle**	**Tend.**	**Amb.**	**SNBC**
DT	**Voyageurs**	+30% à -21%	22%	-9%	+26%	+19 à -9	+14	-2,5	+11
	Marchandises	+79% à -26%	19%	-17%	+39%	+21 à -4	+5,1	-3,2	+7,2
RM	**RM Voyageurs**	0% à -21%	-2%	-20%	-8%	0 à -11	-1,4	-9,1	-4,5
	Train voyageurs					0 à -6,7	-1,2	-5,4	-2,4
	Vélo (et marche)					0 à -6,4	-0,2	-4,3	-1,8
	TC routiers					+0,5 à -1,1	0,0	-0,4	-0,4
	RM Marchandises	+2% à -26%	-5%	-22%	-4%	+0,5 à -3,6	-1,6	-3,3	-0,8
	Fret ferroviaire					0 à -4,1	-1,0	-3,5	-0,4
	Fret fluvial					0 à -0,7	-0,3	-0,5	0,0
TR	**Voitures**	+6% à -19%	-2%	-16%	-11%	+4 à -12	-1,8	-10	-5,0
	Poids-lourds	-3% à -19%	-6%	-15%	-14%	-0,2 à -3,1	-1,7	-3,0	-3,0
EE	**EE Voyageurs**	-36% à -73%	-40%	-64%	-68%	-30 à -58	-36	-46	-47
	dont VP thermique								-22
	dont électrification VP								-22
	EE Marchandises	-5% à -63%	-18%	-56%	-52%	-1 à -19	-5,7	-15	-12
IC	**Voyageurs**	-3% à -100%	-19%	-85%	-97%	-2 à -50	-14	-38	-44
	Marchandises	-1% à -100%	-3%	-100%	-100%	0 à -30	-0,8	-22	-24
	Total								-68
	Electrique								-45
	Biogaz								-15
	Agrocarburants								-8

3.3.1. Demande de transport

La demande de transport apparaît comme un **facteur aux évolutions très contrastées entre les scénarios voyageurs** (Figure 37) **et encore plus pour les scénarios marchandises** (Figure 40). C'est le seul facteur des décompositions à apparaître avec un effet souvent à la hausse sur les émissions des transports, en raison d'une demande généralement croissante (jusqu'à +30 % pour les voyageurs et +79 % pour les marchandises). Même les scénarios les plus volontaristes n'obtiennent que des baisses relativement faibles par ce facteur, jusqu'à -21% et -26 % au minimum pour les scénarios voyageurs et marchandises, et -9 % et -17 % pour la moyenne des scénarios les plus ambitieux. Cependant, les fortes différences possibles par rapport à des évolutions tendancielles en croissance de +22 % et +19 %, font apparaître le facteur de demande comme le **second facteur le plus important** en termes de potentiel de baisse d'émissions par rapport à la tendance. Les décompositions additives font apparaître un potentiel cumulé pour les voyageurs et marchandises de **-24 $MtCO_2$**, après l'intensité carbone (-45 $MtCO_2$), mais devant l'efficacité énergétique (-21 $MtCO_2$), le report modal et le taux de remplissage (quasiment -10 $MtCO_2$ chacun ; voir Figure 43, Figure 45 et Tableau 11). L'écart est également très important entre les projections les plus extrêmes, ce qui en fait un facteur d'incertitudes et de risques importants pour l'avenir. Cela devrait jouer en faveur d'une prise en compte bien plus forte de ce facteur par les politiques publiques à l'avenir, d'autant plus que son rôle par le passé a été majeur et le restera au moins pour les évolutions à court terme, pour lesquelles le parc de véhicules sera encore largement carboné.

Les **évolutions les plus récentes ont été irrégulières**, avec pour les voyageurs un pic dans les kilomètres parcourus par personne au début des années 2000 suivis d'une reprise à la hausse, et une demande de transport de marchandises généralement en hausse mais qui a fortement subi la crise de 2008-2009. Dans un tel contexte, prévoir des évolutions tendancielles n'est pas aisé, et ces dernières sont très variées parmi les scénarios. La vision des scénarios du MTES traduit des croissances de la demande particulièrement fortes aussi bien en tendanciel (+30 % voyageurs, +79 % marchandises) que pour le scénario volontariste (+26 % et +39 %), dont les croissances sont plus fortes que la moyenne des scénarios tendanciels.

Ces évolutions sont calées notamment sur la croissance de la **population**, qui est prévue à la hausse d'environ +12 % d'ici 2050, de manière assez proche selon les scénarios (passage de 66,4 à 74 millions d'habitants dans la SNBC, soit +11,5 %). Aussi la **croissance prévue du PIB** est structurante en particulier pour le trafic de marchandises. Si la donnée n'est pas disponible pour tous les scénarios, il est généralement prévu une hausse continue du PIB au cours du temps, par exemple entre +1,3 % et +1,7 %/an dans les scénarios du MTES, soit +73 % sur 2015-2050, expliquant la croissance similaire dans la demande de fret en tendanciel. Il est possible de questionner une telle évolution, quand historiquement les taux de croissance sont orientés à la baisse depuis des décennies, et alors que les évolutions sont généralement plus chaotiques, tout comme pour le prix du pétrole.

Les **évolutions les plus citées pour la modération de la demande** de transport sont (voir aussi le mémoire décrivant ces mesures dans les scénarios, Bigo, 2016 ; puis chapitre 4) : essentiellement l'aménagement du territoire favorisant la réduction des distances et la proximité ; le télétravail, les incitations à la sobriété ou les changements de comportements pour les voyageurs ; le développement de l'économie circulaire, des productions et consommations locales ou de la livraison à domicile pour les marchandises.

3.3.2. Report modal

Le report modal apparaît comme un facteur qui évolue peu dans les scénarios tendanciels, avec des parts de chaque mode qui restent à peu près constantes d'ici 2050. **Dans les scénarios volontaristes, une baisse des émissions de -20 %** en ordre de grandeur se retrouve pour plusieurs scénarios voyageurs (ADEME, EV30 de l'IEA, MOB-first de l'IDDRI, Proximobilité de la SNCF, ou négaWatt), tandis que les évaluations sont un peu plus divergentes pour les marchandises mais sont de nouveau de cet ordre de grandeur (-22 % pour la moyenne des 3 scénarios les plus ambitieux, dont -34 % pour le scénario S2 de l'IDDRI, -22 % pour l'ADEME et -17 % pour négaWatt ; voir Tableau 11 et détails par scénario dans le Tableau 25 en annexe).

Le potentiel de report modal dépend très fortement de l'évolution de la demande totale de transport, car de forts reports modaux nécessitent que la demande du mode en question augmente bien plus fortement que la demande totale. Le Tableau 12 ci-dessous illustre cela pour le trafic ferroviaire : si par exemple le trafic ferroviaire voyageurs augmente de 79 % dans le scénario de la SNBC, cela ne permet qu'un report de +4 % vers le train, car la demande totale augmente de +26 % ; alors que le trafic ferroviaire augmente d'une manière similaire de +89 % dans le scénario de l'ADEME, et mène à un report modal de +13 % dans un contexte de demande totale en baisse de -21 %. Aussi, un report d'1 % de part modale d'un mode carboné (voiture, avion, camion) vers un mode majoritairement décarboné (train, vélo) permet en multiplicatif une baisse des émissions de l'ordre d'1 %. En additif cependant, le lien entre l'augmentation de la part modale et les baisses d'émissions (en $MtCO_2$) dépend du moment où a lieu le report modal, et des émissions totales à ce moment-là. Cela est particulièrement visible pour le scénario SNBC en Figure 46 où les baisses d'émissions liées aux reports modaux sont plutôt au début de la période 2015-2050, bien que le trafic ferroviaire augmente de manière régulière au cours du temps dans le scénario.

Tableau 12 : Evolution du trafic ferroviaire, de sa part modale, et impact CO_2 dans les 13 scénarios voyageurs

	MTES		EpE	négaWatt		ADEME	IEA		IDDRI		SNCF		
	AME	SNBC	ZEN	Tend	nW	Vision	NPS	EV30	MOB	TECH	Ultra	Alter	Proxi
Trafic	+58%	+79%	+50%	+29%	+89%	+89%	+52%	+168%	+61%	+23%	+18%	+60%	+50%
%RM	+2%	+4%	+2%	+1%	+7%	+13%	+4%	+19%	+7%	+1%	-1%	+6%	+6%
$\Delta MtCO_2$	-1,9	-2,4	-1,4	-0,6	-4,6	-5,7	-2,8	-8,7	-3,5	-0,3	0,0	-3,9	-4,2

La Figure 48 montre que le report modal voyageurs se fait essentiellement depuis le transport routier individuel (voitures, deux-roues, VUL) **vers le ferroviaire, les modes actifs** (surtout le vélo), et de manière moins marquée vers les bus et les cars parfois. Le gain associé est de 5,4 et 4,3 $MtCO_2$ respectivement pour le train et le vélo pour les 4 scénarios les plus ambitieux (Tableau 11). Pour le transport de marchandises (Figure 49), le report modal se fait essentiellement de la route vers le **fret ferroviaire**, dans les quelques scénarios ambitieux. Au contraire, les scénarios tendanciels, majoritairement technologiques et/ou prévoyant une forte croissance de la demande totale ne prévoient quasiment pas de report modal d'ici 2050.

Les **mesures citées pour favoriser le report modal** sont : le développement de l'offre et des infrastructures pour les modes bas-carbone, les mesures fiscales incitatives (subventions) ou dissuasives (taxe carbone, taxe sur le kérosène, redevance poids-lourds, etc.), ainsi que plus marginalement l'information et les changements de comportements des voyageurs.

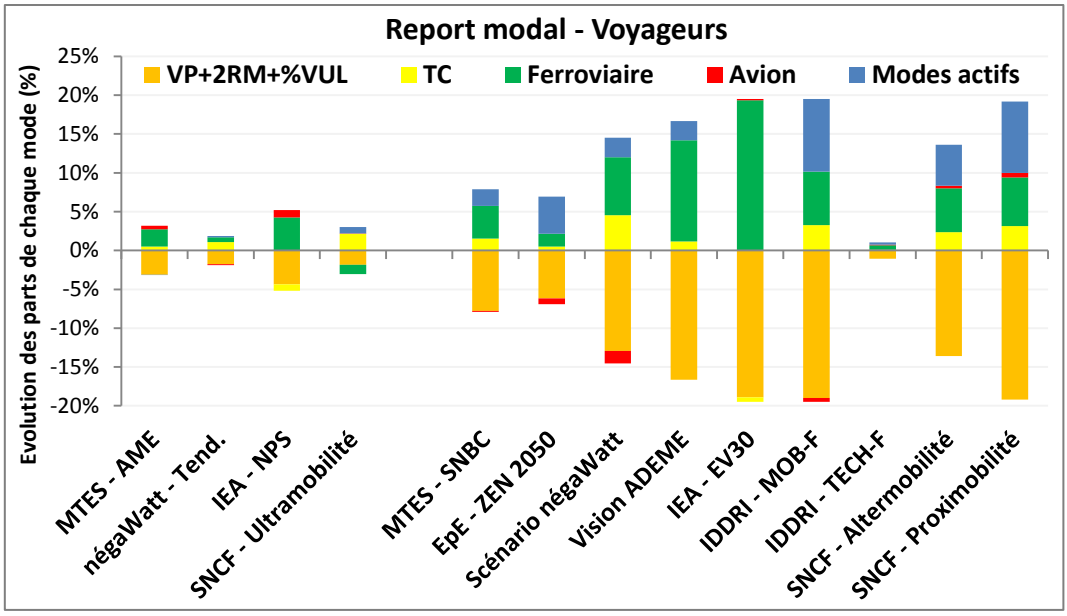


Figure 48 : Evolution des parts modales d'ici 2050 pour les scénarios voyageurs étudiés
(scénarios tendanciels à gauche, volontaristes à droite)

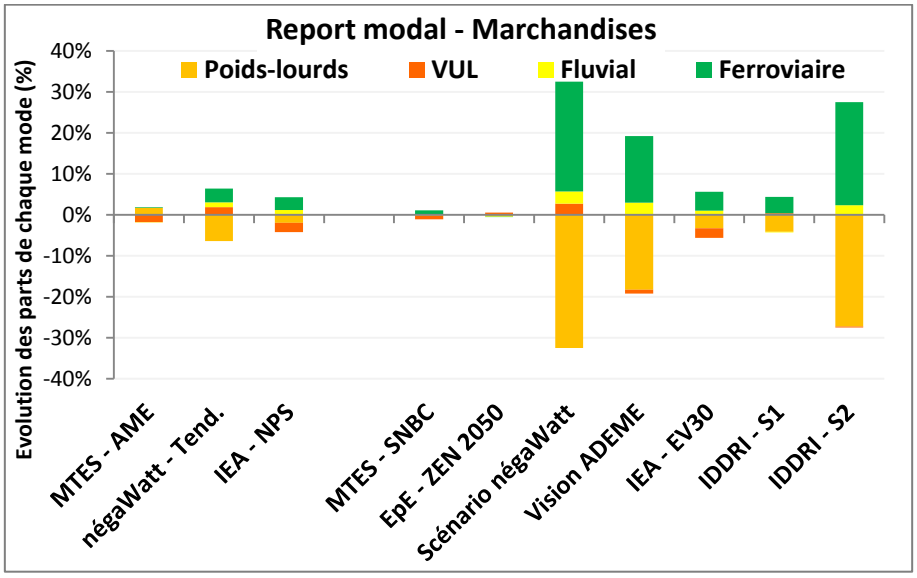


Figure 49 : Evolution des parts modales d'ici 2050 pour les scénarios marchandises étudiés
(scénarios tendanciels à gauche, volontaristes à droite)

3.3.3. Taux de remplissage

Le taux de remplissage des véhicules présente des similarités avec le report modal concernant son potentiel : s'il évolue généralement peu dans les scénarios tendanciels, **son potentiel est de l'ordre de -15 % sur les émissions** aussi bien pour les voyageurs que pour les marchandises, soit un potentiel assez similaire bien qu'un peu plus faible que le report modal. Des évolutions relativement contrastées apparaissent entre les scénarios, comme l'illustre la Figure 50, la SNBC étant plutôt ambitieuse sur ce facteur, surtout pour les marchandises.

Les évolutions reflètent le développement du covoiturage pour les voyageurs et l'optimisation et la massification essentiellement des poids-lourds pour le transport de marchandises. Comme cela sera évoqué de nouveau plus loin, les **potentiels effets rebonds** sur les facteurs de demande et de report modal peuvent cependant annuler une partie des gains présentés ici.

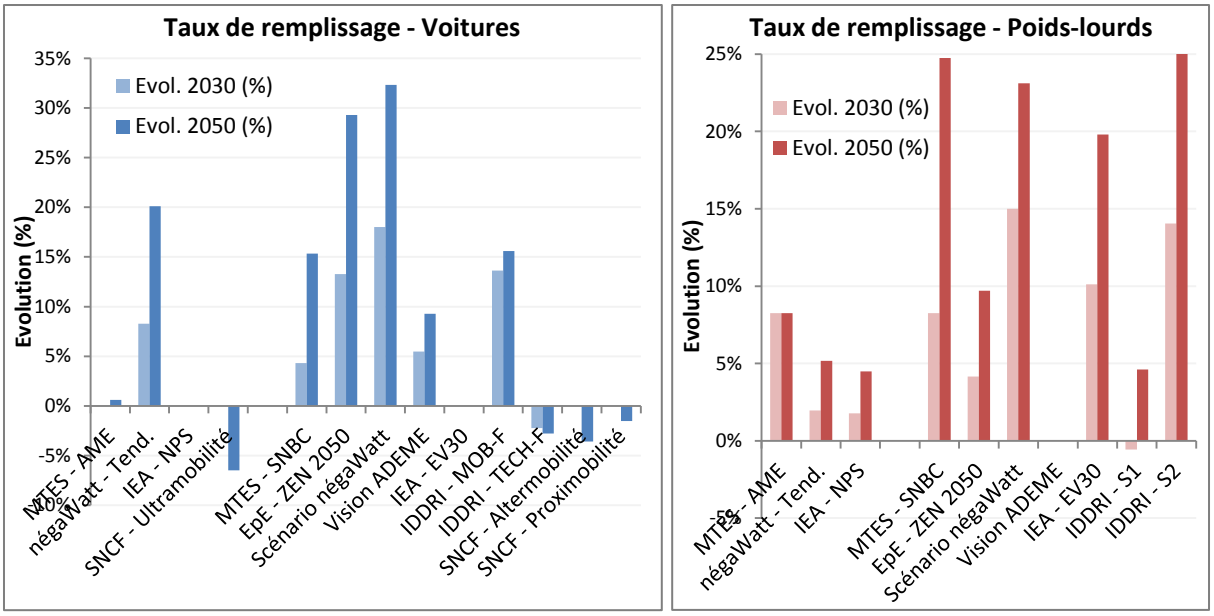


Figure 50 : Evolution du taux de remplissage des voitures (à gauche) et des poids-lourds (à droite) d'ici 2050

3.3.4. Efficacité énergétique des véhicules

L'amélioration de **l'efficacité énergétique apparaît comme un levier majeur dans l'ensemble des scénarios**, aussi bien pour les évolutions tendancielles où il est prévu une amélioration de -40 % des consommations d'énergie par veh.km pour les voyageurs et -18 % pour les marchandises, que dans les scénarios ambitieux et la SNBC où les gains sont respectivement de -64 % et -68 % pour les voyageurs, et -56 % et -52 % pour les marchandises (Tableau 11).

La comparaison directe des résultats de différents scénarios est compliquée, car ce facteur peut regrouper des évolutions assez diverses. Evolutions technologiques premièrement, où se combinent les **progrès d'efficacité énergétique sur les véhicules thermiques au pétrole, les progrès liés à l'électrification du parc**, et plus marginalement les progrès d''efficacité énergétique au sein des véhicules électriques ou au gaz. Une décomposition spécifique a été conduite pour le scénario de la SNBC afin de séparer ces différents effets et les intégrer dans les décompositions détaillées en Figure 46 et Figure 47 : pour les voyageurs, il apparaît que sur les -47 $MtCO_2$ de baisses d'émissions liées à l'efficacité énergétique, 22 Mt sont liées à l'amélioration de l'efficacité des véhicules individuels thermiques (catégorie VP + 2RM + 60% VUL ; notée "EE VP VT" en Figure 46) surtout en début de période ; 22 Mt également sont liées à l'électrification du parc au fur et à mesure de son déploiement, en raison de la meilleure efficacité des véhicules électriques (valable en énergie finale, utilisée ici dans l'équation ; notée "EE VP Elec") ; enfin, le reste des gains provient de l'efficacité énergétique des autres modes ou des progrès d'efficacité au sein des véhicules électriques (gains plus faibles, en "EE VP VE"). A noter que le déploiement des véhicules électriques permet aussi une amélioration de l'intensité carbone de l'énergie en passant du pétrole à l'électricité (notée "IC VP VE" en Figure 46). Pour les marchandises, l'électrification du parc de véhicules est bien moins forte que pour les voyageurs dans la SNBC, ainsi les gains d'efficacité énergétique apparaissent moins forts, et sont davantage liés aux progrès des seuls véhicules thermiques.

Si ces mesures technologiques peuvent être encouragées par les pouvoirs publics, par exemple par la poursuite et le renforcement des actions normatives de bonus-malus français ou des normes européennes, **d'autres gains d'efficacité énergétique** sont permis davantage **par la sobriété et les changements de comportements**. Il s'agit notamment de la baisse du poids des véhicules, soit de manière marginale pour faciliter les gains d'efficacité énergétique pour les véhicules neufs, soit de manière plus forte par le développement de petits véhicules de quelques centaines de kg (de type Renault Twizy) comme cela est prévu dans le scénario négaWatt. Le scénario prévoit également une baisse de vitesse sur les routes les plus rapides, comme cela a été évoqué en 3.1.3, permettant des gains à court terme. Enfin, l'écoconduite est parfois évoquée dans les scénarios comme un moyen de réduire les consommations.

3.3.5. Intensité carbone de l'énergie

L'intensité carbone de l'énergie apparaît aussi bien dans les analyses temporelles que dans les analyses comparatives entre scénarios tendanciels et ambitieux, comme un **levier majeur de baisse d'émissions de CO_2 des transports**. En effet, alors que les scénarios tendanciels le voient assez peu évoluer d'ici 2050, il est le seul levier à pouvoir permettre d'atteindre 0 émission directe, ce qui rend l'ambition des scénarios sur ce facteur très dépendante du niveau d'ambition global du scénario. Un scénario souhaitant la sortie complète des énergies fossiles et 0 émission en 2050 devra nécessairement ramener l'intensité carbone de l'énergie à 0, cette décarbonation étant cependant plus ou moins facile selon le niveau de demande en énergie.

Il est cependant important de noter que **la méthodologie développée a tendance à fournir une évaluation haute du potentiel de l'intensité carbone** en additif. Il a déjà été signalé que pour les scénarios de neutralité carbone, tous les gains se retrouvaient dans l'intensité carbone pour la dernière période de la décomposition. Cela est valable en partie pour les périodes précédentes aussi, où toutes les évolutions des facteurs sont prises simultanément : dans le cas fictif d'une baisse simultanée de -50 % de l'efficacité énergétique et de l'intensité carbone, les baisses d'émissions de -75 % sont réparties à égalité entre les deux facteurs dans la méthode de décomposition LMDI, et non à -50 % pour l'efficacité énergétique, puis -50 % des 50 % restants soit -25 % pour l'intensité carbone. Ainsi, si jamais la décomposition était réalisée avec un ordre pour chaque facteur d'évolution (en considérant d'abord la demande, ensuite le report modal, etc. comme en Figure 42 pour comparer AME et SNBC) et que l'intensité carbone était considérée comme le dernier facteur, davantage de baisses d'émissions seraient accordées aux facteurs précédents et donc moins de baisses à l'intensité carbone.
Par exemple pour le scénario de la SNBC, les gains d'intensité carbone sont donnés à -68 $MtCO_2$ pour voyageurs et marchandises confondus. Le développement des énergies décarbonées sur la période équivaut à 12 Mtep, soit un gain de 38 $MtCO_2$ en substitution des carburants pétroliers. Cet ordre de grandeur est bien moindre qu'avec le LMDI. Il aurait aussi sa pertinence, sachant que la décarbonation de l'énergie est conditionnée à des ressources limitées en absolu, en particulier pour la biomasse (ou dans une moindre mesure au niveau mondial pour une contrainte sur les métaux plus difficile à évaluer concernant les véhicules électriques). Pour la biomasse seule, les 4,1 Mtep de surplus d'agrocarburants et de biogaz dans la SNBC sont équivalent à 13 $MtCO_2$, au lieu des 23 $MtCO_2$ calculés avec le LMDI.

En second lieu, le gain d'émissions dans l'évaluation de l'intensité carbone est potentiellement surestimé car uniquement les émissions directes sont comptées. Il serait nécessaire de regarder plus globalement l'**impact en analyse de cycle de vie** (ACV) pour comparer les avantages et inconvénients des nouvelles énergies de manière plus globale par rapport aux carburants pétroliers. Si de nombreuses études existent sur le sujet, les ACV ne sont quasiment jamais intégrées dans les scénarios, ou bien les émissions au-delà du scope 1 (émissions directes des transports) sont dans d'autres secteurs, tels que ceux de la production d'énergie ou de l'industrie pour la production des véhicules. Les scénarios fret de l'IDDRI proposent une évaluation des émissions liées à la production de l'énergie consommée. Une évaluation plus globale pourrait calculer également les émissions liées à la production des véhicules (que l'on sait plus élevées pour les véhicules électriques que pour les véhicules thermiques), voire même les émissions liées à la construction et la maintenance des infrastructures de transport. Ce point sera discuté dans le chapitre 4.

Un point mis en évidence dans les décompositions temporelles des scénarios voyageurs et marchandises (Figure 36 et Figure 39) concerne l'évolution temporelle de l'intensité carbone de l'énergie, qui est relativement faible au début de la période et devient **significative surtout à partir de 2030**. Cela est visible pour les quelques scénarios dont le périmètre concerne l'ensemble des transports, dont l'évolution de l'intensité carbone entre l'année de référence et 2050 est donnée sur la Figure 51. Cette spécificité s'explique surtout par le nécessaire temps de renouvellement des flottes de véhicules que nécessitent le passage à l'électrique et au (bio)gaz, les deux principaux vecteurs énergétiques développés dans les scénarios (Figure 52). La part des véhicules électriques et au GNV (gaz naturel véhicule) étant faible aujourd'hui dans les ventes, il faudra du temps pour que cette part dans les véhicules vendus soit significative, et encore plus de temps pour que la part du parc de véhicules soit suffisamment forte pour avoir de forts impacts à la baisse sur les émissions.

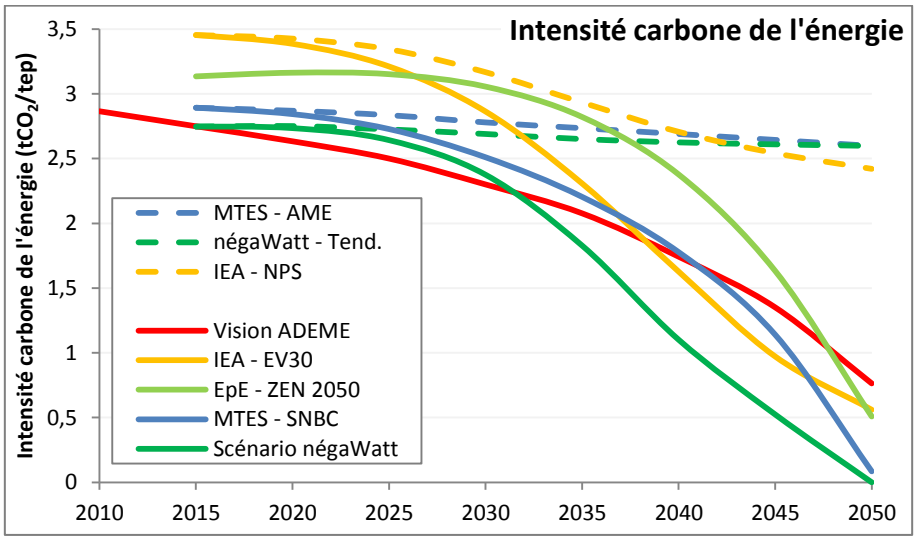


Figure 51 : Evolution de l'intensité carbone totale des transports de l'année de référence à 2050

Les **mix énergétiques** ne sont disponibles que pour les scénarios du MTES, de négaWatt et de l'ADEME. D'autres scénarios ne sont que sur les voyageurs ou les marchandises (IDDRI, SNCF), ne donnent pas le mix énergétique pour l'IEA, ou n'ont pas fait l'objet de consensus pour l'étude EpE. La Figure 52 indique donc également des scénarios plus anciens.

Parmi les scénarios existants, la SNBC présente un mix énergétique des transports en 2050 fortement tourné vers l'électrique qui représente la moitié des consommations. Cette proportion apparaîtrait même plus forte en veh.km parcourus, en raison de la meilleure efficacité énergétique des véhicules électriques. Les scénarios négaWatt et ADEME se montrent plus fortement tournés vers le vecteur du gaz.
La décomposition de l'intensité carbone par énergie pour la SNBC montre ainsi de l'ordre de 45 $MtCO_2$ en moins par l'électrique, 15 Mt par le biogaz et 8 $MtCO_2$ grâce aux agrocarburants (Tableau 11).

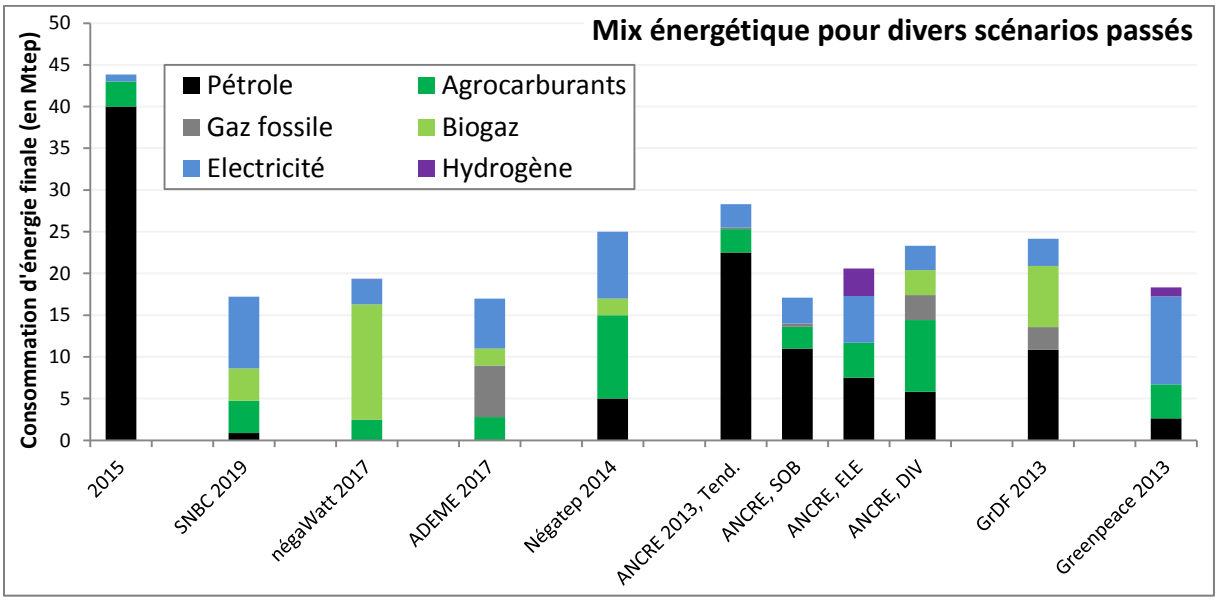


Figure 52 : Mix énergétique en 2015 et en 2050 pour divers scénarios dans les transports en France

Au-delà du mix énergétique total, la Figure 53 permet de différencier le **mix par mode ou type de véhicules** pour la SNBC. L'électrique est plutôt utilisé pour les véhicules légers et le ferroviaire (complété par l'hydrogène pour certains lignes), le biogaz pour les véhicules routiers lourds et le fluvial, et les agrocarburants pour le routier, le fluvial et l'aérien, tandis qu'il ne reste des carburants pétroliers que dans l'aviation.

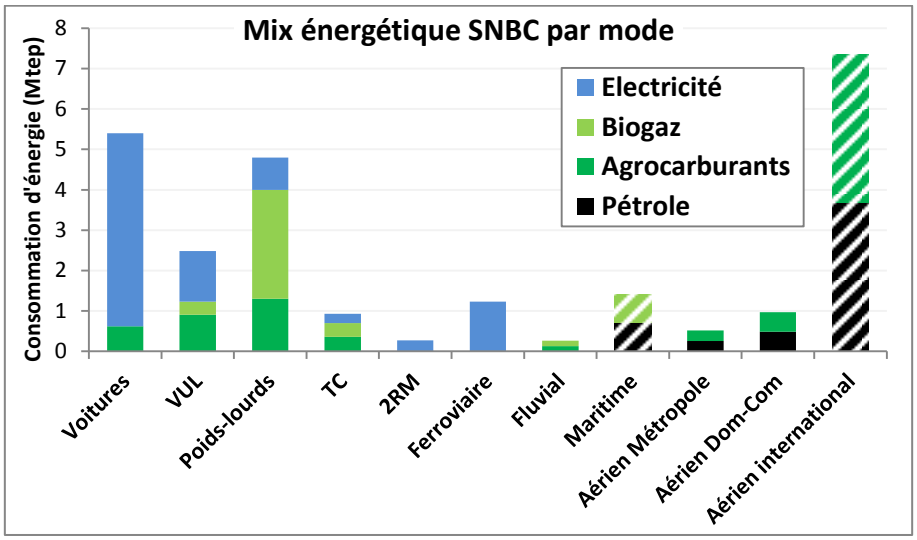


Figure 53 : Mix énergétique par mode de transport en 2050 dans la SNBC
(le transport international, qui n'est pas dans le périmètre de la SNBC, apparaît en hachuré ; VUL véhicules utilitaires légers, TC transports en commun routiers, et 2RM deux-roues motorisés)

4. Discussion et conclusion

Points et messages clés :

- ✓ La **SNBC** est fortement tournée vers les **leviers technologiques**, peu vers la sobriété ; les potentiels additionnels des leviers de demande, report modal et remplissage sont de **-40 %** pour les voyageurs et **-50 %** pour les marchandises, par rapport à la SNBC.
- ✓ **Comparé au passé**, la SNBC prévoit : une inversion des tendances à la baisse du remplissage des voitures ; une forte accélération des gains d'efficacité énergétique et d'intensité carbone ; une croissance de la demande marchandises qui peut sembler surestimée ; une poursuite des tendances historiques ou récentes des autres facteurs.
- ✓ D'autres scénarios volontaristes tablent sur des **ruptures** plus fortes sur la demande de transport, ainsi que sur le report modal, en particulier pour les marchandises.
- ✓ Les fortes croissances de la demande dans la SNBC nécessitent une **accélération des baisses d'émissions unitaires** historiques: de **-0,5 %/an à -3,8 %/an** pour 2015-2030 pour les voyageurs, et de **-0,6 à -2,2 %/an** pour les marchandises.
- ✓ Les principaux points nécessitant des **approfondissements** sont listés en fin de partie.

La présente étude a porté sur la **comparaison et la quantification des baisses d'émissions de CO_2** dans **13 scénarios de prospectives voyageurs et 10 scénarios marchandises** à l'horizon 2050. Ce travail s'est fait à partir d'une analyse de décomposition des émissions en 5 facteurs, qui sont les 5 leviers de la stratégie nationale bas-carbone (SNBC) française : la demande de transport, le report modal, le taux de remplissage des véhicules, leur efficacité énergétique, et l'intensité carbone de l'énergie.

Le principal point commun de l'analyse des scénarios, concerne **l'ordre d'importance des 5 leviers en termes de baisses d'émissions d'ici 2050** par rapport à l'année de référence. Cet ordre est similaire entre les scénarios volontaristes, aussi bien pour les voyageurs que les marchandises, et suit à peu près l'ordre des 5 facteurs de la décomposition utilisée.
Ainsi la demande est le seul facteur à participer à la hausse des émissions dans un grand nombre de scénarios. Les facteurs de report modal et de taux de remplissage montrent des évolutions proches, avec un impact sur les émissions généralement compris entre 0 et -20 %. Enfin, les facteurs d'efficacité énergétique et d'intensité carbone permettent les plus fortes baisses d'émissions d'ici 2050, pour tous les scénarios. Pour l'efficacité énergétique, elle s'améliore y compris dans les scénarios tendanciels, et est liée à l'amélioration des moteurs thermiques dans un premier temps, à l'électrification du parc de véhicules, et pour certains scénarios à des mesures de sobriété sur le poids ou la vitesse des véhicules. L'intensité carbone s'améliore peu dans les scénarios tendanciels, et s'approche nécessairement de 0 pour les scénarios de neutralité carbone, pour lesquels les émissions directes sont proches de 0 en 2050. Les différences d'intensité carbone d'un scénario à l'autre reflètent donc davantage l'objectif de réduction visé par le scénario (décidé en amont pour les scénarios normatifs) que des différences de vision. Les gains d'intensité carbone sont obtenus grâce à l'électrification des transports et aux carburants à base de biomasse (biogaz et biocarburants), avec des variations dans les proportions selon les scénarios.
Au-delà de ces principaux points communs, des **différences significatives** existent entre les scénarios, y compris entre les **scénarios tendanciels**. Ces différences sont notamment marquées sur le facteur de demande de transport, en particulier pour les marchandises.

Parmi les scénarios volontaristes, les **hypothèses de demande et de report modal** sont variées et reflètent pour beaucoup la vision de la transition énergétique portée par les producteurs de scénarios. Les scénarios fortement tournés vers la technologie prévoient généralement une plus forte croissance de la demande et peu de report modal, tandis que les scénarios davantage tournés vers la sobriété énergétique prévoient des demandes plus limitées voire en baisse, et des reports modaux permettant de l'ordre de -20 % d'émissions. De plus, ces deux facteurs sont fortement liés, une faible croissance de la demande permettant plus facilement d'opérer des reports modaux significatifs. Si ce clivage entre scénarios sur ces deux facteurs est assez fortement marqué et bien illustré par les scénarios de l'IDDRI, le facteur de taux de remplissage est varié selon les scénarios, sans forcément se rattacher à un type de scénario en particulier. Par ailleurs et comme noté précédemment, les contributions des facteurs plus technologiques que sont l'efficacité énergétique et l'intensité carbone, sont très importantes y compris dans les scénarios fortement tournés vers la sobriété, tels que les scénarios IDDRI MOB-first et S2, négaWatt ou Vision ADEME.

Au sein de ces narratifs concernant une sobriété plus ou moins forte, **la SNBC se trouve très clairement parmi les scénarios fortement tournés vers la technologie, et peu sur la sobriété**. Ainsi, les hypothèses de croissance de la demande de transport sont même plus fortes que la moyenne des scénarios tendanciels étudiés. Elles sont certes moins élevées dans le scénario de la SNBC que dans le scénario tendanciel (dit AME) produit par le même ministère, mais restent fortes comparées aux autres scénarios. En raison notamment de cette forte demande, la contribution du report modal est relativement faible. Cela est valable aussi bien pour les voyageurs où elle est de -8 % pour un potentiel de -20 % identifié dans plusieurs scénarios, que pour le transport de marchandises où l'évolution de la SNBC en multiplicatif apparaît plus faible que dans la moyenne des 3 scénarios tendanciels.
Ainsi, les scénarios les plus ambitieux sur ces premiers leviers de la décomposition montrent des **marges de sobriété très importantes pour la SNBC**. La demande en énergie pourrait être réduite de **-40 %** pour le transport de voyageurs et de **-50 %** pour le transport de marchandises par une contribution ambitieuse sur les trois premiers leviers de la décomposition. Les marges sont les plus importantes sur le facteur de demande, puis sur le facteur de report modal, et enfin plus marginalement sur le taux de remplissage pour lequel la SNBC est proche des scénarios ambitieux.

Le **faible volontarisme sur le facteur de demande dans la SNBC pose question**, car elle se reflète par une absence de débats sur le sujet et de faibles ambitions dans les politiques publiques mises en œuvre. Bien que le levier soit cité dans la SNBC, la récente loi d'orientation des mobilités (LOM) n'a par exemple pas prévu de dispositions importantes dans un objectif de modération de la demande.
Comme discuté au chapitre 1, cela est aussi problématique car la demande a été le **principal facteur d'évolution par le passé, et restera majeur à court terme** et tant que les parcs de véhicules ne seront pas fortement décarbonés. De plus, la SNBC repose fortement sur l'efficacité énergétique qui semble ralentir ces dernières années (stagnation des émissions des voitures neuves sur 2015-2019), ainsi que sur l'intensité carbone qui est le facteur aux plus faibles évolutions depuis 1960, questionnant l'atteinte des objectifs de court terme.

La décomposition des émissions passées montrait une baisse des émissions unitaires de seulement **-0,5 %/an** pour les voyageurs et de **-0,6 %** pour les marchandises depuis le début des années 90. Pour le reste, les émissions ont fluctué surtout sous l'effet de la demande. Ces pourcentages considèrent les émissions de CO_2 de la combustion de la biomasse et en particulier des biocarburants, dont l'analyse plus globale a révélé une intensité carbone similaire au pétrole. Ces pourcentages passent à -0,8 % et -0,9 %/an en moyenne respectivement, avec la convention de neutralité carbone des biocarburants.
La baisse des émissions unitaires nécessite une forte accélération, étant donné que la SNBC prévoit un objectif de baisse des émissions très ambitieux tout en poursuivant une croissance relativement forte de la demande. Dans le scénario de la SNBC, la baisse doit être en moyenne de **-3,8 %/an** pour le transport de voyageurs entre 2015 et 2030, et de **-2,2 %/an** pour le transport de marchandises. Le rythme historique des baisses d'émissions unitaires doit donc être multiplié par plus de 7 pour les voyageurs et quasiment par 4 pour les marchandises d'ici 2030 pour s'aligner avec la SNBC. Cette accélération ne s'étant pas produite sur les 5 premières années, ce rythme devrait en réalité être encore plus fort dans la décennie à venir.

Cela pose plus globalement la question de la **comparaison des tendances identifiées dans les scénarios avec les tendances passées**, représentée en Figure 54 pour les voyageurs et en Figure 55 pour les marchandises (voir également en annexe pour les décompositions additives en Figure 94 et Figure 95 pour la SNBC).

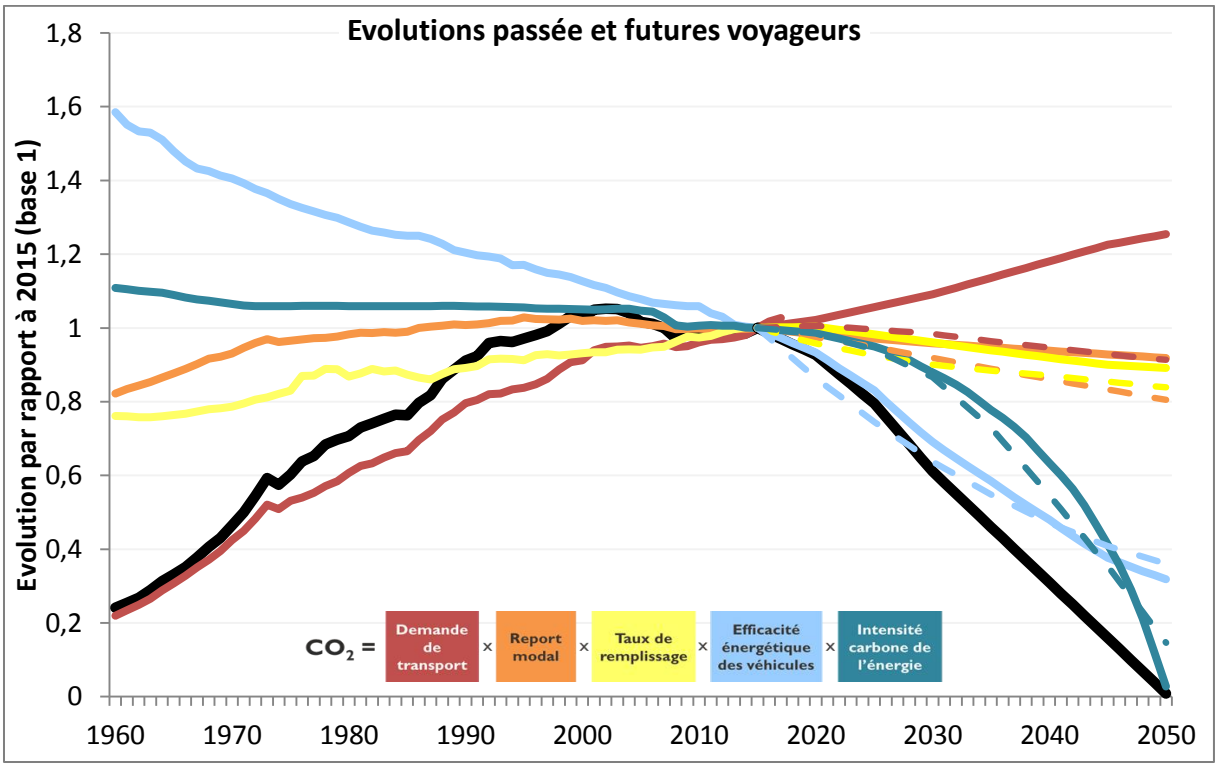


Figure 54 : Evolutions passées (1960-2017) et d'ici 2050 de la SNBC (lignes continues, dont CO_2) et de la moyenne des 4 scénarios les plus ambitieux (en pointillés), pour les 5 facteurs d'évolution des émissions voyageurs

Le **scénario voyageurs de la SNBC** montre par rapport au passé : une croissance de la demande relativement proche de celles depuis le début des années 2000, confirmant une faible ambition de modération par rapport aux tendances historiques ; le report modal apparaît

également aligné avec les tendances historiques, bien que l'analyse des trafics montre un besoin d'une forte accélération des trafics vélo d'ici 2030 ; le taux de remplissage doit inverser la tendance historique, pour agir dans le sens d'une réduction des émissions ; l'efficacité énergétique doit s'accélérer par rapport à la tendance de long terme, et apparaît a priori plutôt alignée avec les tendances récentes, bien qu'en réalité les progrès sur les ventes s'affaiblissent et se répercuteront sur les gains des prochaines années encore ; enfin, le facteur d'intensité carbone nécessite une très forte accélération d'ici 2050.

La **moyenne des 4 scénarios les plus ambitieux** sur chaque facteur montre des tendances proches de la SNBC sur les derniers facteurs de la décomposition, bien que l'efficacité énergétique apparaisse en plus forte rupture en début de période. Le report modal et le remplissage montrent des ambitions possibles plus fortes, mais c'est surtout sur la demande de transport que la SNBC apparaît loin des scénarios les plus ambitieux. Dans ces scénarios, la demande montre une inversion de la tendance historique qui était à la hausse. Bien que la baisse paraisse relativement modérée dans la moyenne de ces scénarios, cela demanderait toutefois une baisse plus importante encore de la demande individuelle en raison de la croissance de la population.

Au total, **l'inversion de la courbe des émissions de CO_2 par rapport au passé** apparaît très importante, avec une pente de baisse des émissions à peu près aussi forte que celle de la croissance des dernières décennies du XXème siècle.

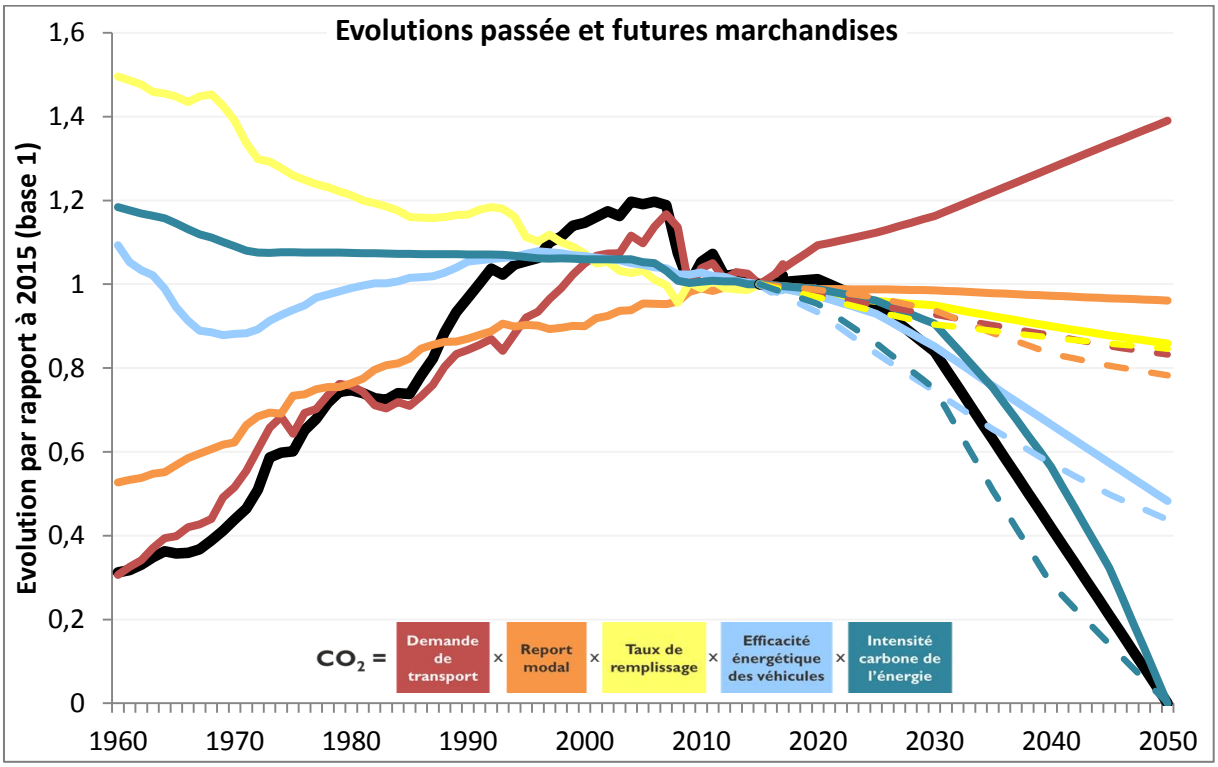


Figure 55 : Evolutions passées (1960-2017) et d'ici 2050 de la SNBC (lignes continues, dont CO_2) et de la moyenne des 4 scénarios les plus ambitieux (en pointillés), pour les 5 facteurs d'évolution des émissions marchandises

Pour les marchandises, la pente des baisses d'émissions apparaît encore plus forte, en particulier à partir de 2030, posant d'autant plus la question du réalisme d'évolutions si rapides en reposant quasiment uniquement sur des facteurs technologiques. Ce rythme de baisse très important est d'autant plus compliqué que la croissance de la demande est très

forte, mettant en évidence un découplage extrêmement fort entre la demande et les émissions. Un tel découplage n'a pas été réussi sur l'ensemble de la période 1960-2017, bien que les émissions unitaires soient en légère baisse depuis le début des années 90. Par ailleurs, au vu des tendances historiques, il est possible de supposer voire d'espérer que la croissance prévue est surestimée. En effet, la demande marchandises en 2017 est au même niveau qu'en 2000, et la tendance est relativement stable sur les années 2010, après la forte baisse liée à la crise.
A l'inverse de la SNBC et avec un écart important avec celle-ci, d'autres scénarios prévoient une baisse de la demande à l'horizon 2050. Le report modal nécessite une inversion des tendances historiques, de manière relativement faible pour la SNBC mais de manière beaucoup plus importante pour certains scénarios orientés vers la sobriété, la relocalisation des activités et vers des transports longue distance fortement tournés vers le rail. Le taux de remplissage nécessite une poursuite de la tendance historique à son amélioration, après quelques années de relative stagnation. Comme pour les voyageurs, l'efficacité énergétique et l'intensité carbone de l'énergie nécessitent de fortes accélérations. Les rythmes apparaissent relativement limités à court terme mais une accélération très importante est visible ensuite, questionnant la possibilité d'avoir de tels déploiements technologiques.

Enfin, l'analyse réalisée ici est essentiellement quantitative. Les **limites de l'approche** adoptée amènent donc à un certain nombre d'**éléments de discussion** qui seront plus amplement abordés en chapitre 4, en s'appuyant sur les éléments fournis dans les scénarios et d'autres éléments de la littérature existante. Pour un certain nombre d'entre eux, ces éléments sont peu présents ou peu discutés dans les publications des scénarios, ne facilitant pas leur comparaison ni une analyse critique constructive sur ces éléments.
Cela concerne en premier lieu la **discussion des évolutions projetées, en termes de réalisme**, d'acceptabilité, de freins et de leviers, ou encore de politiques publiques nécessaires pour obtenir les évolutions prévues.
Certaines de ces politiques publiques impactent simultanément plusieurs facteurs, nécessitant une analyse des **interactions positives ou négatives** (effets rebonds) qui peuvent exister entre les différentes évolutions. Cela a été évoqué sur les liens entre demande de transport et report modal, ou sur l'électrification qui a un impact simultané sur l'efficacité énergétique et l'intensité carbone. Plus largement et comme évoqué en chapitre 1, l'amélioration du taux de remplissage peut par exemple présenter des effets rebonds sur d'autres facteurs, limitant l'impact direct identifié dans les décompositions présentées ici. La baisse des vitesses limites sur routes a également des effets simultanés sur l'efficacité énergétique, la demande ainsi que le report modal, avec des effets qui peuvent varier selon les types de routes.
Parmi les impacts indirects, la question de **l'analyse de cycle de vie** des technologies déployées a également été évoquée, comme pouvant réduire certains gains d'émissions identifiés, notamment sur l'intensité carbone. Les impacts et bénéfices des leviers doivent ainsi être évalués de manière plus large, non seulement au-delà des émissions directes pour le CO_2, mais également sur les **autres externalités** (pollutions diverses, congestion, bruit, etc.), les **ressources** nécessaires ou encore les **coûts** économiques de mise en œuvre.
Enfin, la vision globale à l'échelle de la France doit aussi être complétée par la prise en compte des **spécificités et inégalités** existantes au sein des territoires, entre les ménages ou selon les facilités d'accès aux aménités, aux technologies ou aux modes de transport évoqués.

Bibliographie

ADEME, 2013a. *Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050*. Synthèse et document technique. https://www.ademe.fr/contribution-lademe-a-lelaboration-visions-energetiques-2030-2050

ADEME, 2013b. *Evaluation macroéconomique des visions énergétiques 2030-2050 de l'ADEME. Document technique*. 36 p. http://www.ademe.fr/evaluation-macroeconomique-visions-energetiques-2030-2050-lademe-l

ADEME, 2014. *Visions énergie climat 2030/2050 : quels modes de vie pour demain ?* https://www.ademe.fr/visions-energie-climat-20302050-modes-vie-demain

ADEME, 2016. *Mix électrique 100% renouvelable ? Analyses et optimisations*. ADEME, Artelys, ARMINES-PERSEE, Energies Demain. 32 p. https://www.ademe.fr/mix-electrique-100-renouvelable-analyses-optimisations

ADEME, 2017a. *Actualisation du scénario énergie-climat ADEME 2035-2050*. 44 p. http://presse.ademe.fr/2017/10/lademe-actualise-son-scenario-energie-climat.html

ADEME, 2017b. *Mesures et instruments de politiques publiques pour l'atteinte d'un scénario bas carbone*. Synthèse de l'étude. ADEME, I Care & Consult, ENERDATA, ENERGIES DEMAIN. 32 p. https://www.ademe.fr/propositions-mesures-politiques-publiques-scenario-bas-carbone

ADEME, 2018. *Mix de gaz 100 % renouvelable en 2050 ?* Synthèse de l'étude. 22 p. https://www.ademe.fr/mix-gaz-100-renouvelable-2050

ADEME, 2019. *Climat air et énergie, Chiffres clés - édition 2018*. 224 p. https://www.ademe.fr/climat-air-energie-0

Agnolucci, P., Ekins, P., Iacopini, G., Anderson, K., Bows, A., Mander, S., Shackley, S., 2009. *Different scenarios for achieving radical reduction in carbon emissions: A decomposition analysis*. Ecological Economics, Volume 68, Issue 6, pp. 1652-1666. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.09.005

Anable, J., Brand, C., Tran, M., Eyre, N., 2012. *Modelling transport energy demand: A socio-technical approach*. Energy Policy, Volume 41, pp. 125-138. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.08.020

ANCRE, 2013. *Scénarios pour la transition énergétique*. Rapport 2013.

Ang, B. W., 2004. *Decomposition analysis for policymaking in energy: which is the preferred method?* Energy Policy, Volume 32, Issue 9, pp. 1131-1139. https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00076-4

Ang, B.W., Goh, T., 2019. *Index decomposition analysis for comparing emission scenarios: Applications and challenges*. Energy Economics, Volume 83, pp. 74-87. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2019.06.013

Bibas, R., Mathy, S., Fink, M., 2012. *Un scénario bas carbone "acceptable" pour la France : Elaboration participative et analyse macroéconomique*. Projet ENCI-LowCarb. CIRED, RAC. 49 p. https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00797980

Bigo, A., 2016. *Comment atteindre le facteur 4 dans les transports ? Analyse comparée de scénarios de prospectives à 2050*. Mémoire de Master 2 EDDEE. 159 p. http://www.chair-energy-prosperity.org/publications/working-papers/atteindre-facteur-4-transports/

Briand, Y., Lefevre, J., Cayla, J.-M., 2017. *Pathways to deep decarbonization of the passenger transport sector in France*. [Research Report] IDDRI, UMR 8568 CIRED, EDF R&D. 36 p. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01688931

Briand, Y., Svensson, J., Koning, M., Combes, F., Lamy, G., Pourouchottamin, P., Cayla, J.-M., Lefevre, J., 2019. *Trajectoires de décarbonation profonde du transport de marchandises en France*, Rapport descriptif. 48 p. https://www.iddri.org/fr/publications-et-evenements/rapport/trajectoires-de-decarbonation-profonde-du-transport-de

Carbone 4. 2014. *Etude des 4 trajectoires du Débat National sur la Transition Energétique*. 147 p. http://www.carbone4.com/etude-des-4-trajectoires-du-debat-national-sur-la-transition-energetique-2/

Cerema, 2015. *Revue comparée des études de prospectives de transports à l'international*. Rapport d'étude. 47 p. https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/revue-comparee-etudes-prospectives-transports-international

CGDD, 2019. *Les comptes des transports en 2018. 56e rapport de la Commission des comptes des transports de la Nation*. 212 p. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-comptes-des-transports-en-2018-56e-rapport-de-la-commission-des-comptes-des-transports-de-la

CGPC, 2006. *Démarche prospective transports 2050*. Eléments de réflexion. 54 p.

Creutzig, F., 2016. *Evolving Narratives of Low-Carbon Futures in Transportation*. Transport Reviews, Vol. 36, No. 3, pp. 341–360. http://dx.doi.org/10.1080/01441647.2015.1079277

Creutzig, F., Fernandez, B., Haberl, H., Khosla, R., Mulugetta, Y., Seto, K. C., 2016. *Beyond Technology: Demand-Side Solutions for Climate Change Mitigation*. Annual Review of Environment and Resources, Volume 41, pp. 173–198. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-110615-085428

Crozet, Y., Lopez-Ruiz, H.G., Chateau, B., Bagard, V., 2008. *Comment satisfaire les objectifs internationaux de la France en termes d'émissions de gaz à effet de serre et de pollution transfrontières ?* Programme de recherche consacré à la construction de scénarios de mobilité durable. Rapport final. https://hal.archives-ouvertes.fr/halshs-00293725/

DGEC, 2015. *Scénarios prospectifs Energie-Climat-Air pour la France à l'horizon 2035*. Rapport final, synthèse des résultats. 87 p. https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/scenarios-prospectifs-energie-climat-air

Edelenbosch, O.Y., McCollum, D.L., van Vuurena, D.P., Bertram, C., Carrara, S., Daly, H., Fujimori, S., Kitous, A., Kyle, P., Broin, E.Ó., Karkatsoulis, P., Sanol, F., 2017. *Decomposing passenger transport futures: Comparing results of global integrated assessment models*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 55, pp. 281-293. https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.07.003

EpE, 2019. *ZEN 2050 – Imaginer et construire une France neutre en carbone*. 88 p. http://www.epe-asso.org/zen-2050-imaginer-et-construire-une-france-neutre-en-carbone-mai-2019/

Förster, H., Schumacher, K., De Cian, E., Huebler, M., Keppo, I., Mima, S., Sands, R., 2013. *European energy efficiency and decarbonization strategies beyond 2030 - a sectoral multi-model decomposition*. Climate Change Economics. Volume 4, p. 4, https://doi.org/10.1142/S2010007813400046

Gambhir A, Drouet L, McCollum D, Napp T, Bernie D, Hawkes A, Fricko O , Havlik P, Riahi, K., Bosetti, V., Lowe, J., 2017. *Assessing the Feasibility of Global Long-Term Mitigation Scenarios*. Energies, Volume 10, Issue 1, p. 89. https://doi.org/10.3390/en10010089

Girod, B., van Vuuren, D.P., de Vries, B.J.M., 2013. *Influence of travel behavior on global CO2 emissions*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 50, pp. 183-197. https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.01.046

GrDF, 2013. *Scénario facteur 4 GrDF*. Synthèse et description des hypothèses. 33 p.

Greenpeace, 2013. *Scénario Transition Energétique*. 27 p. https://www.greenpeace.fr/energie/enjeux/ajax/scenario/scenario-transition.html

Grübler, A., Wilson, C., Bento, N. et al, 2018. *A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target and sustainable development goals without negative emission technologies*. Nature Energy, Volume 3, pp. 515–527. https://doi.org/10.1038/s41560-018-0172-6

IEA 2017. *The Future of Trucks. Implications for Energy and the Environment*. 164 p. https://webstore.iea.org/the-future-of-trucks

IEA, 2019. *Global EV Outlook 2019. Scaling up the transition to electric mobility*. 232 p. https://www.iea.org/gevo2019/

Kesicki, F., Anandarajah, G., 2011. *The role of energy-service demand reduction in global climate change mitigation: Combining energy modelling and decomposition analysis*. Energy Policy, Volume 39, Issue 11, pp. 7224-7233. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.08.043

Le Gallic, T., Assoumou, E., Maïzi, N., 2017. *Future demand for energy services through a quantitative approach of lifestyles*. Energy, Volume 141, pp. 2613-2627. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.065

Lin, B., Xie, C., 2014. *Reduction potential of CO_2 emissions in China's transport industry*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 33, pp. 689-700. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.017

Mathy, S., Menanteau, P., Criqui, P., 2018. *After the Paris Agreement: Measuring the Global Decarbonization Wedges From National Energy Scenarios*. Ecological Economics, Volume 150, pp. 273-289. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.04.012

McCollum, D., Yang, C., 2009. *Achieving deep reductions in US transport greenhouse gas emissions: Scenario analysis and policy implications*. Energy Policy, Volume 37, Issue 12, pp. 5580-5596. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2009.08.038

Mittal, S., Dai, H., Fujimori, S., Hanaoka, T., Zhang, R., 2017. *Key factors influencing the global passenger transport dynamics using the AIM/transport model*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 55, pp. 373-388. https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.10.006

MTES-DGEC,2020. *Synthèse du scénario de référence de la stratégie française pour l'énergie et le climat*. 46p. https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/scenarios-prospectifs-energie-climat-air

MTES, 2020. *Stratégie nationale bas-carbone. La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone*. Mars 2020. 192 p. https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc

négaWatt, 2013. *Scénario négaWatt. Dossier de synthèse*. 28 p. https://negawatt.org/Scenario-negaWatt-2011-2050-39

négaWatt, 2014. *Scénario négaWatt 2011-2050. Hypothèses et méthode. Rapport technique.* 211 p. https://negawatt.org/Rapport-technique-du-scenario-negaWatt-2011-2050-189

négaWatt, 2017. *Scénario négaWatt 2017-2050. Dossier de synthèse*. 48 p. https://negawatt.org/Scenario-negaWatt-2017-2050

Samadi, S., Gröne, M.-C., Schneidewind, U., Luhmann, H.-J., Venjakob, J., Best, B., 2017. *Sufficiency in energy scenario studies: Taking the potential benefits of lifestyle changes into account*. Technological Forecasting and Social Change, Volume 124, pp. 126-134. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2016.09.013

SLoCaT, 2018. *Transport Knowledge Base (TraKB)*. http://www.slocat.net/trakb

Solagro, 2016. *Le scénario Afterres 2050, version 2016*. 96 p. https://afterres2050.solagro.org/a-propos/le-projet-afterres-2050/

SNCF, 2015. *Vers une mobilité sobre en CO_2 : Une opportunité pour vivre mieux ? Regards croisés pour éclairer les choix de société en matière de mobilité des voyageurs*. 42 p. https://www.sncf.com/fr/groupe/newsroom/etude-facteur4

SNCF Voyages, 2015. *Etude prospective 2050, mobilité longue distance. Prospective 2030 & 2050*. Voyages SNCF – FSJ / DGPP.

Spencer, T., Pierfederici, R., Sartor, O., Berghmans, N., Samadi, S., Fischedick, M., Knoop, K., Pye, S., Criqui, P., Mathy, S., Capros, P., Fragkos, P., Bukowski, M., Śniegocki, A.,

Virdis, M. R., Gaeta, M., Pollier, K., Cassisa, C., 2017. *Tracking sectoral progress in the deep decarbonisation of energy systems in Europe*. Energy Policy, Volume 110, pp. 509-517. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2017.08.053

Steckel, J.C., Jakob, M., Marschinski, R., Luderer, G., 2011. *From carbonization to decarbonization? Past trends and future scenarios for China's CO_2 emissions*. Energy Policy, Volume 39, Issue 6, pp. 3443-3455. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.03.042

Steenhof, P., Woudsma, C., Sparling, E., 2006. *Greenhouse gas emissions and the surface transport of freight in Canada*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 11, Issue 5, pp. 369-376. https://doi.org/10.1016/j.trd.2006.07.003

TSP, IFPEN, 2019. *Comprendre les enjeux de la modélisation énergie-climat-économie*. Disponible sur : https://theshiftproject.org/article/comprendre-modelisation-energie-climat-economie-scenarios/

Van Sluisveld M.A., Martínez S.H., Daioglou V., van Vuuren D.P., 2016. *Exploring the implications of lifestyle change in 2 °C mitigation scenarios using the IMAGE integrated assessment model*. Technological Forecasting and Social Change, Volume 102, pp. 309-319. https://doi.org/10.1016/j.techfore.2015.08.013

Waisman, H., Guivarch, C., Lecocq, F., 2013. *The transportation sector and low-carbon growth pathways: modelling urban, infrastructure, and spatial determinants of mobility*. Climate Policy, Volume 13, pp. 106-129. https://doi.org/10.1080/14693062.2012.735916

Waisman, H. Bataille, C., Winkler, H. et al., 2019. *A pathway design framework for national low greenhouse gas emission development strategies*. Nature Climate Change, Volume 9, pp. 261-268. https://doi.org/10.1038/s41558-019-0442-8

Yang, C., McCollum, D., McCarthy, R., Leighty, W., 2009. *Meeting an 80% reduction in greenhouse gas emissions from transportation by 2050: A case study in California*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 14, Issue 3, pp. 147-156. https://doi.org/10.1016/j.trd.2008.11.010

Yeh, S., Mishra, G.S., Fulton, L., Kyle, P., McCollum, D.L., Miller, J., Cazzola, P., Teter, J., 2017. *Detailed assessment of global transport-energy models' structures and projections*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 55, pp. 294-309. https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.11.001

III. Vitesses des déplacements : accélération au XXème siècle, ralentissement au XXIème ?

Résumé

Les temps de déplacements apparaissent proches d'une heure par jour et par personne en moyenne, aussi bien entre différentes sociétés qu'au cours du temps. Si les distances par personne ont été multipliées par plus de 10 depuis deux siècles en France, c'est donc en raison d'une hausse similaire de la vitesse moyenne, depuis la vitesse du pas à une vitesse estimée à 48 km/h en 2017. Le chapitre a pour objectifs de caractériser les attributs de cette vitesse moyenne et par mode pour 2017, ainsi que son évolution passée et à venir, avec une analyse quantitative sur la période 1960-2017. Les temps de déplacements ont légèrement augmenté sur les dernières décennies, toujours proches d'une heure par jour. Les durées de déplacements sont également proches entre les modes, de l'ordre de 15 minutes pour les modes de déplacements du quotidien, et entre 2h30 et 4h en moyenne pour la longue distance. Au contraire, les vitesses sont très contrastées selon les modes, expliquant ainsi des portées de déplacements variées entre les modes. Aussi plus la distance à parcourir est importante, et plus les modes et infrastructure rapides sont utilisés, ainsi la vitesse moyenne augmente avec la distance des déplacements. Historiquement, 4 phases d'évolution de la vitesse sont distinguées : à une première conquête de la vitesse en voitures attelées, suit l'invention de modes rapides sur 1817-1945, une phase de diffusion de la vitesse sur 1950-2000, puis une saturation au tournant du millénaire. La phase de diffusion s'est faite essentiellement vers la voiture jusqu'au début des années 90 et vers le transport aérien depuis, et plus faiblement par l'augmentation de la vitesse de la voiture via la hausse du trafic sur autoroute. La mise en place des radars, à partir de 2003, fait chuter les vitesses pratiquées sur routes. Cela entraîne une baisse de la vitesse moyenne durant la décennie 2000, au même moment que la baisse des kilomètres parcourus, fournissant une hypothèse complémentaire à l'explication de ce pic de la demande. Cette saturation est particulièrement visible pour les seuls trajets intérieurs (hors aérien international), et pourrait perdurer : de nombreuses évolutions favorables à la transition énergétique vont dans le sens d'un ralentissement de la vitesse moyenne des déplacements.

1. Introduction

Points et messages clés :

- ✓ Le chapitre étudie la **vitesse des mobilités** en France (y compris aérien international).
- ✓ Le premier objectif est de **caractériser la vitesse** des mobilités pour l'année 2017.
- ✓ Le second objectif est d'étudier l'**évolution de la vitesse**, sur une période longue s'étendant de 1800 à 2050, avec une analyse quantitative sur 1960-2017.

L'analyse des émissions passées des transports de voyageurs a mis en évidence le **rôle prépondérant de la demande de transport**. Elle a été le principal facteur explicatif de l'évolution des émissions, et notamment du pic ou du plateau des émissions (selon l'inclusion de l'aérien international) observé au début des années 2000. Aussi les scénarios de prospectives ont fait ressortir des visions contrastées sur ce facteur, reflétant des incertitudes importantes sur ses évolutions possibles. Cela met en évidence l'importance de mieux comprendre ses déterminants.
Alors que les temps de déplacements quotidiens sont connus pour être relativement stables et proches d'une heure par personne, l'**évolution de la vitesse** joue ainsi un rôle majeur dans l'évolution des distances parcourues.

Le **double objectif de ce chapitre** est donc : de mieux caractériser le rôle que joue la vitesse dans l'explication des comportements de mobilité ; ainsi que les déterminants de son évolution par le passé, et de son évolution possible à l'avenir.

Le **périmètre** utilisé est celui des transports de voyageurs, tel que présenté dans l'analyse des émissions. Le transport aérien international est généralement inclus dans l'analyse, modifiant sensiblement certaines conclusions, ainsi les résultats pour le seul transport intérieur seront également régulièrement précisés. Les analyses porteront globalement sur une période qui s'étend de 1800 à 2050.
Les **analyses quantitatives** se focaliseront dans un premier temps sur des estimations des temps et des vitesses de déplacements pour l'année 2017. Ces analyses seront différenciées selon les modes de transport, les distances, le périmètre des temps liés aux déplacements (temps en circulation, temps de retard, d'attente, d'accès aux modes, ou encore de préparation) et des autres temps de transport qui ne sont pas inclus dans l'analyse (transports durant les activités professionnelles, les loisirs, etc.). Une analyse sera réalisée sur l'évolution de la vitesse moyenne sur la période 1960-2017, à partir des données de trafics utilisées en chapitre 1, en détaillant les trafics par type de réseau et en évaluant l'évolution des vitesses par réseau. Cette analyse a pour but d'évaluer la contribution relative de 3 déterminants que sont la diffusion des mode rapides, des infrastructures rapides, et des vitesses par réseau, et d'évaluer leur rôle éventuel dans le pic de la demande individuelle au début des années 2000.

Ce chapitre est structuré différemment des deux premiers. La bibliographie, les résultats, ainsi que leur discussion se font directement dans les deux principales parties de l'analyse.
Suite à cette introduction, la partie 2 présente les grandes lignes de la méthodologie utilisée pour les analyses quantitatives, la partie 3 discute du rôle de la vitesse et son évaluation pour l'année 2017, la partie 4 discutera de son évolution passée et à venir, et la partie 5 conclura.

2. Méthodologie

Points et messages clés :

- ✓ Les principales **analyses quantitatives** du chapitre portent sur : l'estimation de vitesses moyennes par mode et pour l'ensemble des déplacements en 2017 ; et sur leur évolution sur la période 1960-2017.
- ✓ Les temps de parcours par mode et par réseau (urbain / rural / autoroutes par ex. pour le routier) sont estimés à partir des données de km et de vitesse par réseau ; la **vitesse moyenne** s'obtient en divisant les km totaux par la somme des temps de parcours.
- ✓ L'**évaluation pour 2017** estime les vitesses moyennes commerciales, puis en tenant compte des retards, du temps d'attente, des temps d'accès et de préparation.
- ✓ L'**évolution sur 1960-2017** décompose l'évolution de la vitesse en 3 effets : le report modal, le report entre infrastructures d'un même mode, et la vitesse sur chaque réseau

2.1. Les modes et infrastructures de transport considérés

La méthodologie d'analyse de la vitesse moyenne des déplacements est résumée en Figure 56. Les modes de transport considérés sont sensiblement les mêmes que pour les précédents chapitres, avec une décomposition plus approfondie afin de préciser les vitesses variées au sein d'un même mode selon les types de trajets considérés :

- ✓ Les **modes actifs** sont séparés entre marche à pied et vélo ;
- ✓ Le **transport ferroviaire** est décomposé en 6 sous-modes, qui ont pour certains d'entre eux des infrastructures spécifiques : les trains à grande vitesse (TGV), y compris ceux qui roulent sur ligne classique ; les Intercités (IC) ; les trains express régionaux (TER) ; les Transilien (TN), qui correspondent aux trains de banlieue en Île-de-France, y compris les RER ; les métros ; et enfin les tramways d'Île-de-France et des réseaux de province ;
- ✓ Les trafics en **bus et cars** sont séparés selon les routes urbaines, rurales et les autoroutes, comme pour les autres transports routiers détaillés ci-dessous ;
- ✓ Le **transport routier individuel** sépare pour les calculs les deux-roues motorisés (2RM), les voitures particulières (VP) et 60 % du trafic des véhicules utilitaires légers (VUL). Leurs proportions de trafics sur les différents types de routes considérés varient selon les modes, de même que leurs vitesses par type de réseau (les cyclomoteurs ont par exemple une vitesse limitée à 45 km/h), d'où leur séparation pour les calculs. En revanche, les voitures dominant très largement cette catégorie et leurs vitesses étant proches en 2017, ces modes sont regroupés en une seule catégorie "Voiture" sur certaines figures, ce que préciseront les légendes correspondantes ;
- ✓ Enfin, le **transport aérien** est séparé dans les calculs entre les trajets de Métropole, les trajets avec l'Outre-mer (OM) et les trajets internationaux, car la vitesse commerciale augmente avec la distance des trajets. Selon les analyses, le trafic intérieur (Métropole + OM) sera considéré pour mieux correspondre aux précédentes analyses, ou alors le trafic total sera pris en compte pour être davantage représentatif des utilisations de ce mode. Ces différences seront précisées en légende selon les figures.

En plus de ces catégories, des calculs seront réalisés pour l'année 2017, afin de séparer les modes routiers et ferroviaires en trajets de **courte** (CD) et **longue distance** (LD).

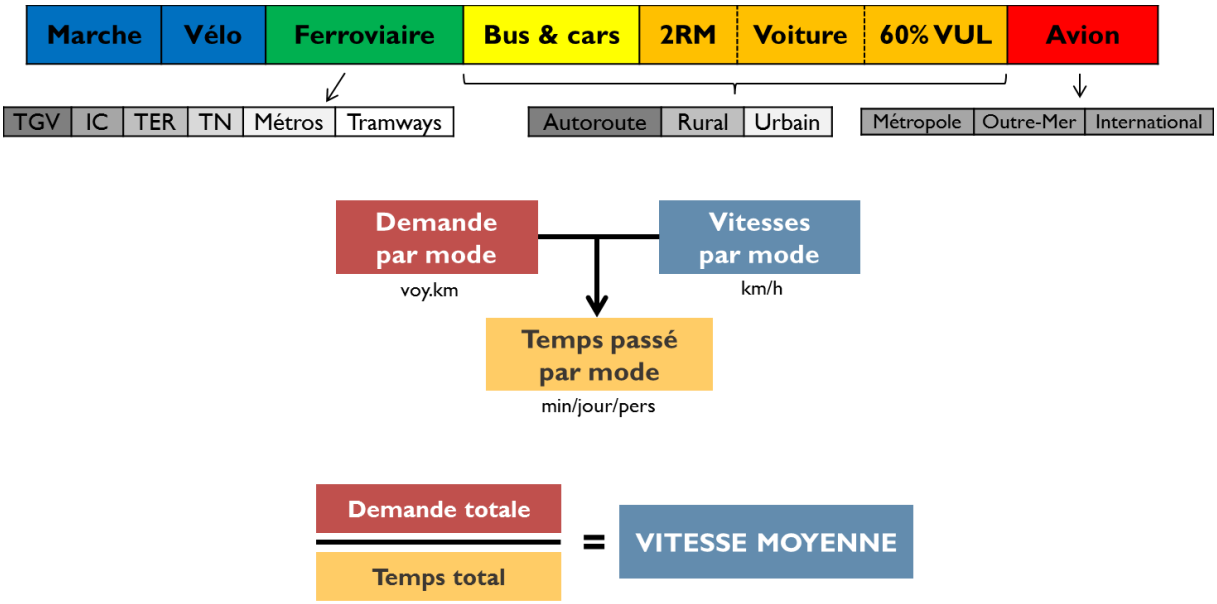


Figure 56 : Méthodologie générale de calcul de la vitesse moyenne des déplacements
La demande et la vitesse pour chaque mode et sous-mode ou type d'infrastructure sont réunis, afin d'estimer leurs temps de transport respectifs. La vitesse moyenne est estimée à partir du nombre de kilomètres parcourus divisés par la somme des temps de parcours.

2.2.Calcul d'une vitesse moyenne et décomposition de ses déterminants

Le principe général de l'**évaluation de la vitesse moyenne des déplacements** est de rassembler les données de demande de transport pour chaque mode et sous-mode considéré (en voy.km), ainsi que leur vitesse moyenne (en km/h). Cela permet d'estimer les temps de parcours pour chaque sous-mode considéré puis pour l'ensemble des modes.
Enfin, la vitesse moyenne est calculée comme la demande divisée par les temps de parcours (Figure 56). Les kilomètres parcourus et les heures de transport seront évoqués au total ou par personne, par an ou par jour, selon les chiffres et résultats présentés.

Dans les parties 3.2 et 3.2, une **estimation** des temps et de la vitesse moyenne des déplacements par mode sera présentée pour **2017**, selon les périmètres successifs suivants :

- ✓ Vitesse dite commerciale ou en circulation, entre la gare de départ et d'arrivée pour le train par exemple, ou la vitesse moyenne de la voiture quand elle est en circulation ;
- ✓ Vitesse en tenant compte des retards pour les transports en commun (trains, bus et cars, avions) ;
- ✓ Vitesse tenant compte également des temps d'attente, en gare ou en aéroport ;
- ✓ Vitesse porte-à-porte, tenant compte des temps de pré- et post-acheminement, appelés temps d'accès ici ;
- ✓ Enfin, une estimation intègre également les temps de préparation du trajet.

L'analyse de **l'évolution** de la vitesse moyenne des déplacements **sur la période 1960-2017** est réalisée à partir des vitesses commerciales (donc hors retards, temps d'attente, et de préparation), qui inclut les distances et temps de parcours des modes utilisés en intermodalité. Les distances et temps de marche pour rejoindre le métro ou le bus sont par exemple inclus.

Avec une méthodologie similaire à ce qui est appliqué aux émissions des transports dans les deux précédents chapitres, une décomposition de l'évolution de la vitesse moyenne est réalisée, à partir du log-mean divisia index (**LMDI** ; Ang, 2004), en considérant l'équation :

$$V = \sum_i \sum_j \frac{t_i}{T} \cdot \frac{t_{ij}}{t_i} \cdot V_{ij}$$

Avec i le mode de transport, j le type de réseau ou d'infrastructure du mode i ; T le temps de transport total, t_i le temps de transport du mode i, t_{ij} le temps du mode i sur le réseau j ; enfin, V_{ij} correspond à la vitesse commerciale du mode i sur le réseau j.

Ainsi, l'évolution de la vitesse au cours du temps est décomposée en **3 effets**, que sont les effets des temps de parcours par mode et par réseau et un effet lié à la vitesse par réseau :

$$\Delta V = \Delta V_{mode} + \Delta V_{réseau} + \Delta V_{vitesse/réseau}$$

Le premier terme $\mathbf{\Delta V_{mode}}$ tient compte de l'effet structurel du report modal, mesuré comme l'évolution de la part de chaque mode dans les temps de parcours ; cet effet peut rendre compte par exemple de l'effet sur la vitesse moyenne d'un report de 5 % des temps de transport de la marche vers la voiture. Le second terme $\mathbf{\Delta V_{réseau}}$ permet d'évaluer pour les modes routiers et ferroviaires l'effet d'une variation du temps de parcours par type de réseau ; cela permet de capturer par exemple l'impact sur la vitesse moyenne d'un transfert de 10 % du temps de parcours en voiture sur autoroute, ou d'un transfert des Intercités vers le TGV pour le ferroviaire. Enfin, l'effet $\mathbf{\Delta V_{vitesse/réseau}}$ rend compte des variations des vitesses d'un mode sur un réseau en particulier, comme la variation de la vitesse moyenne des voitures sur autoroutes.
Les résultats de cette décomposition sur la période 1960-2017 et la discussion des 3 effets se retrouvent en partie 4.

2.3.Données utilisées et principales incertitudes

Les **données nécessaires** pour les analyses quantitatives incluent : la demande de transport par mode et par réseau ; une estimation des vitesses commerciales et de leurs évolutions, ces données étant rarement disponibles telles que souhaitées pour cette analyse, ce qui nécessite des estimations spécifiques expliquées ici ; enfin, des ordres de grandeur des temps de retard, d'attente, d'accès et de préparation par mode sont estimés pour l'année 2017.

2.3.1. Demande de transport

Les **données de demande** sur la période 1960-2017 sont très similaires à celles utilisées dans l'analyse de décomposition des émissions. Cependant, des détails par réseaux sont apportés.
Ainsi, les données du Citepa sont utilisées pour décomposer les trafics urbains, ruraux et sur autoroutes des modes routiers, en l'occurrence les voitures, 2RM, VUL, et les bus et cars (trafics exprimés en veh.km). Pour obtenir des demandes de transport en voyageurs.km, l'évolution des taux de remplissages est différenciée selon les réseaux. Par exemple, pour les voitures, le taux de remplissage est plus élevé pour les déplacements longue distance, ainsi le taux de remplissage passe d'environ 2,7 à 2,0 personnes/véhicule pour les autoroutes (il est ici considéré plus faible pour les VUL, de 1,8 à 1,5), de 2,45 à 1,45 pour le rural, et de 1,9 à 1,25

pour l'urbain entre 1960 et 2017. Le taux de remplissage total est similaire à l'analyse de décomposition et passe de 2,3 à 1,6 sur la période.
Pour décomposer la demande ferroviaire, les données des comptes des transports, des mémentos des transports, de l'Arafer (désormais ART, autorité de régulation des transports) et de l'observatoire de la mobilité en Île-de-France sont utilisées (CGDD, 2019a, 2019b ; Arafer, 2018a ; Omnil, 2019).
Enfin, les distances de marche à pied effectuées en intermodalité avec les autres modes de transport sont intégrées (Papon, 1999).

2.3.2. Vitesse des modes de transport

Concernant la **vitesse des modes**, les chiffres sont récupérés de manières bien plus variées car peu d'estimations existent concernant les vitesses moyennes et leurs évolutions.
Pour **les transports routiers**, des estimations sont utilisées dans des études sur le parc, l'usage et les émissions des véhicules routiers (Hugrel et Joumard, 2004 ; Kolli, 2012 ; André et al, 2013).
Les vitesses utilisées pour la **voiture** reprennent souvent les chiffres de 23 km/h en ville, 56 km/h en urbain et 108 km/h sur autoroute (André, 1999). Ces chiffres ont désormais été réévalués en croisant pour chaque mode les kilométrages et les vitesses moyennes sur 12 types de routes, les limitations de vitesse et les conditions de circulation de trafic fluide à "*stop&go*" (André, 2020). Le tableau de données a été utilisé pour caler sur l'année 2010 les vitesses moyennes par type de réseau, qui sont de 83 km/h sur autoroute, 56 km/h en rural et 30 km/h en urbain. Chaque catégorie regroupe des routes aux limitations de vitesse très variées (de 30 à 90 km/h pour l'urbain, de 30 à 110 pour le rural et de 60 à 130 pour les autoroutes), ce qui explique notamment la vitesse moyenne sur autoroutes relativement loin de la vitesse maximale autorisée (VMA) de 130 km/h. Aussi, les données intègrent les situations de ralentissement (quasi-saturé, chargé) et de congestion (*stop&go*), réduisant encore les moyennes, afin d'être représentatives des conditions de circulation réelles. Seules des données sur l'évolution de la congestion sur le réseau principal hors agglomérations sont disponibles, et la série a été reconstituée pour les années 1982-2017 (données CNIR-DGITM dans URF, 2018). La série montre des encombrements essentiellement en Île-de-France, avec une hausse générale, interrompue par une faible baisse sur les années 2000 avant une forte hausse depuis le début des années 2010. La hausse des encombrements est plus régulière dans les autres régions. Cette évolution est intégrée dans les calculs en faisant varier la proportion de trafic en *stop&go*. Cette proportion est estimée par André (2020) à environ 36 % des temps de parcours et 16 % des distances parcourues en urbain, respectivement 7 % et 2 % sur les routes rurales, et 16 % du temps et 3 % des distances sur autoroutes, des ordres de grandeur qui paraissent plausibles. L'évolution des vitesses en cas de circulation fluide est intégrée à partir des données de l'observatoire national interministériel de la sécurité routière (ONISR, 2019, 2020a), qui donne depuis 1987 l'évolution des vitesses pratiquées sur les réseaux routiers. Comme il sera vu plus loin, ces données montrent de forts ralentissements sur la période 2002-2005, en relation avec l'introduction des radars en 2003.
Les **véhicules utilitaires légers** (VUL) sont assimilés aux voitures en termes de vitesse par réseau, bien que leur vitesse moyenne ne soit pas équivalente en raison des différences dans la part des kilomètres par réseau. L'estimation de l'évolution de la vitesse de l'ensemble des

voitures et VUL est très importante dans l'analyse, en raison de leur large proportion des temps de transport depuis plusieurs décennies.

Pour les **autres modes routiers**, ils représentent des parts bien plus faibles des temps de transport, ainsi l'évolution de leur vitesse est moins structurante pour l'évaluation de la vitesse moyenne.

Pour les **bus et cars**, les valeurs de 80 km/h sur autoroute, 45 km/h en rural et 18 km/h en urbain sont retenues comme constantes sur la période. Ces valeurs sont suggérées par certaines études sur les parcs routiers citées ci-dessus, et la valeur de 18 km/h pour les bus se retrouve dans d'autres sources, avec des valeurs parfois plus élevées pour les réseaux des petites villes (CGDD, 2013 ; Cerema, 2019).

Pour les **deux-roues motorisés** (2RM), la vitesse moyenne par réseau est évaluée en séparant les motocyclettes des cyclomoteurs. Il est considéré que les motocyclettes ont des vitesses identiques aux voitures en rural et sur autoroutes, et 10 % supérieures aux voitures en urbain. Pour les cyclomoteurs, leur vitesse a été limitée à la construction à 50 km/h en 1962-63 puis à 45 km/h en 1969 (Orselli, 2009). Il est donc considéré une baisse de leur vitesse moyenne en début de période, avant des valeurs stables à 30 km/h de moyenne en rural et 23 km/h en urbain, comme suggéré par les études de parcs précédemment citées. La vitesse moyenne des 2RM est fortement influencée par les variations de parts respectives des cyclomoteurs et motocyclettes, comme évoqué en 3.3.1 du chapitre 1.

Concernant les **vitesses du transport ferroviaire**, l'Arafer donnait pour l'année 2016 des vitesses commerciales de 155 km/h pour le TGV (une partie du trafic étant sur ligne classique, souvent à 160 km/h maximum), 103 km/h pour les Intercités et 83 km/h pour les TER (Arafer, 2018b). L'évolution de ces vitesses pour chaque activité ferroviaire est estimée à partir des meilleurs temps de parcours de nombreuses lignes, en tenant compte des transferts de lignes aux TGV (SNCF OpenData, 2019). Il est donc supposé qu'aucun changement majeur dans les politiques d'arrêts n'a été effectué à l'échelle de la France sur la période, le nombre d'arrêts sur une ligne conditionnant fortement la vitesse commerciale pour une distance donnée.

Les vitesses des **transports ferroviaires de courte distance** ont bien moins évolué au cours du temps. La vitesse du tramway est donnée constante à 18 km/h, les métros à 25 km/h à Paris et 32 km/h hors Île-de-France, et enfin les RER à 50 km/h et les Transilien à 55 km/h en supposant une hausse en début de période (données RATP ; CGDD, 2013 ; Cerema, 2019).

En raison de la part importante de la **marche à pied** dans les temps de déplacements, la vitesse utilisée pour convertir les données de distances en temps de transport a un impact significatif sur les temps de transport totaux. La vitesse de 3,6 km/h, calculée dans l'enquête nationale transports déplacements (ENTD) de 1994 et réutilisée pour celle de 2008, est retenue (CGDD, 2010).

Pour le **vélo**, une vitesse de 12 km/h est prise, soit une vitesse intermédiaire entre les 9,7 km/h calculés dans l'ENTD de 1994 (qui correspondent probablement à un temps porte-à-porte et non de circulation) et les 15 km/h récemment estimés dans les grandes villes européennes (6t, 2015). Les temps de transport à vélo étant moins significatifs que pour la marche, le choix est bien moins structurant pour les résultats globaux.

Enfin, pour le **transport aérien**, la vitesse commerciale moyenne est différente pour les liaisons métropolitaines (fixée à 500 km/h en moyenne en 2017), les liaisons internationales (750 km/h) et les liaisons avec l'Outre-Mer (850 km/h). Comme cela a pu être fait pour

d'autres modes pour vérifier la cohérence des chiffres, ces vitesses ont été estimées à partir d'horaires de vols commerciaux et des distances entre aéroports fournies par la DGAC (2020). L'évolution des vitesses sur le début de la période est obtenue à partir des données de Peeters et al (2005) et du mémento des transports (CGDD, 2019b).

2.3.3. Temps de transport

Les **temps de transport** des différents modes sont estimés à partir des distances et vitesses commerciales. Des temps de transport liés aux retards, aux temps d'attente, de pré- et post-acheminement et de préparation sont également évalués (cf partie 3.2).

Des données de **retards** moyens sont disponibles pour les transports ferroviaires opérés par la SNCF (Arafer, 2018a) et les transports aériens (AQST, 2020), tandis que des données de régularité sont disponibles pour les autocars en services librement organisés (SLO ; Arafer, 2018c), ainsi que les tramways, métros, RER et bus en Île-de-France (Omnil, 2020).

Les indicateurs de qualité de service d'Omnil cités ci-dessus permettent également d'estimer certains **temps d'attente** moyens pour les transports en commun d'IDF. Pour la longue distance, une étude de Systra donne une décomposition des temps de transport porte-à-porte de différents modes pour des trajets types en France, en évaluant les temps moyens d'attente et de **pré- et post-acheminement** (Systra, 2016). Des chiffres spécifiques aux autocars SLO sont également donnés par l'Arafer (2018d), et par le Cerema pour une étude spécifique aux TER (Hasiak et al, 2018). Enfin, les **temps de préparation** au voyage ont été estimés sans source, afin de fournir des ordres de grandeur sur la significativité ou non sur la vitesse moyenne des déplacements.

2.3.4. Principales incertitudes et implications

Comme pour l'étude des émissions passées, certains manques de données et incertitudes demandent de prendre des précautions sur l'interprétation de certains résultats, en particulier pour les **périodes les plus anciennes**. C'est le cas en premier lieu de la **marche à pied**, qui représente des temps de transport très significatifs mais ne présente que des estimations dans les ENTD à des intervalles de temps souvent de 5 à 10 ans (et même plus entre 1994 et 2008), avec des niveaux de précision incertains. Ainsi, bien que cette hypothèse sera discutée, il n'est pas possible à partir de la présente analyse de conclure avec certitude à l'éventuelle stabilité des temps de transport sur la période, ou à son augmentation comme suggéré par l'évaluation.

L'autre mode majeur en termes de temps de transport est la **voiture**. Le principal manque de données constaté concerne l'évaluation de la congestion routière et de son évolution. Si des données d'évolution sont disponibles sur le réseau principal, elles sont difficiles à convertir en temps de transport, tandis qu'aucune donnée n'a été trouvée pour suivre la congestion urbaine à l'échelle de la France. L'analyse fait donc l'hypothèse qu'il n'y a pas eu de changement majeur sur la période qui pourrait fortement modifier les résultats de vitesse de la voiture.

Enfin, les données nécessaires pour l'analyse sur l'**année 2017** étaient généralement disponibles, avec des ordres de grandeur qui semblent réalistes. Les principaux manques de données officielles concernent les trajets en autocars occasionnels, en autocars interurbains conventionnés, et la vitesse des transiliens. Enfin, les enquêtes capturent généralement assez mal les **trajets intermodaux** (impliquant plusieurs modes de transport). Ces manques ne nuisent cependant pas aux principaux chiffres présentés dans l'analyse.

3. Caractériser la vitesse et son rôle clé

3.1. Différentes définitions de la vitesse des mobilités

Points et messages clés :

- ✓ Les notions de temps, de vitesse et d'accélération se retrouvent au cœur de nombreuses **disciplines** et **bouleversement sociétaux**, à l'interface entre sciences de l'ingénieur, philosophie, sport, sociologie, ou encore économie et sciences de la terre.
- ✓ La vitesse des mobilités a été beaucoup étudiée sous l'angle des **budgets-temps de transport (BTT** ; proches d'1h/jour), et ses implications sur les comportements de mobilité, l'aménagement du territoire ou l'évaluation socio-économique.
- ✓ Au-delà de la **vitesse physique** étudiée dans ce chapitre (vitesse = distance/temps), les notions de vitesses économique, généralisée, socio-économique ou optimale, ont été développées pour étudier les coûts et avantages de la vitesse des mobilités.

3.1.1. La vitesse, à l'interface de nombreux bouleversements et disciplines

La vitesse des transports, leur accélération, ainsi que le rapport au temps dans les mobilités sont au cœur des évolutions passées des transports et des comportements de mobilité. Ces trois notions de **vitesse**, d'**accélération** et de rapport au **temps**, sont aussi au cœur d'autres activités et de bouleversements récents qui ont été étudiés dans de nombreux domaines et disciplines.

Si le rapport au temps tient une place importante dans la **philosophie**, la mythologie ou la religion, la vitesse est bien moins présente. Ainsi les travaux sur la vitesse en philosophie ne débutent réellement qu'à la fin du XXème siècle, avec les bouleversements et coûts sociétaux liés à l'accélération des techniques, de l'économie et des rythmes de vie. Les inventions et **progrès techniques** récents ont en effet pour but d'accélérer l'action ou l'obtention d'un résultat, faisant de la vitesse un axe majeur des travaux des **ingénieurs** (Portier, 2019). Ainsi la vitesse est souvent associée dans les transports comme dans d'autres domaines à un idéal de progrès.

Les progrès techniques et la croissance économique très forte des dernières décennies s'est accompagnée d'une accélération de nombreuses variables **socio-économiques** : croissance de la population, du PIB, des transports, des télécommunications, des flux financiers ou encore des consommations d'énergie. Ces tendances, documentées dans un article sur la grande accélération (Steffen et al, 2015), sont également visibles pour les tendances du **système terre**, en termes de consommations de ressources et de pressions environnementales. L'article en question montre les coûts environnementaux de cette accélération et propose de dater l'entrée dans l'ère de l'Anthropocène à 1950, soit au début de cette accélération.

Par ailleurs, les gains de pouvoir d'achat permis par la croissance économique couplés aux facilités de transport multiplient les possibilités d'activités. Le temps devient alors le bien le plus précieux de notre époque selon l'économiste Gary Becker (1965). L'augmentation du pouvoir d'achat permet d'accéder à des biens et des services de plus en plus variés, tandis que le temps disponible pour en profiter reste contraint à 24 heures par jour, ce qui encourage des programmes d'activités de plus en plus contraints. Cette **accélération sociale** a été étudiée en **sociologie** et notamment par l'allemand Hartmut Rosa, qui distingue trois types d'accélérations évoquées ci-dessus : l'accélération technique, l'accélération des changements sociaux (valeurs, attitudes, relations, etc.), et celle des rythmes de vie qui se traduit par

l'impression de toujours manquer de temps (Rosa, 2010). Des enquêtes sociologiques viennent confirmer la critique de la vitesse que formule l'auteur, 65 % des Français ayant le sentiment que le monde autour d'eux change trop vite, 58 % aspirant au ralentissement dans leur vie quotidienne (ObSoCo, 2019).

Cette accélération a également des implications pour les **politiques** publiques, qui sont destinées à agir avec un horizon de long terme, et dont les temps du droit, du politique et le temps social ne peuvent s'accélérer indéfiniment. Face la vitesse des transformations économiques, des innovations, des flux financiers, ou encore de l'information et des médias, l'inadéquation du temps politique fait pointer le risque de le voir réagir tardivement aux évolutions. Cela peut expliquer pour partie une certaine impuissance du politique à traiter les problèmes existants, à réguler efficacement et à réduire les inégalités (Vignes, 2019).

Enfin, le **sport** est un domaine où la recherche de la performance par la vitesse est évidente, puisque de nombreuses épreuves sportives récompensent les plus rapides (athlétisme, cyclisme, natation, ski, voile, ou plus largement encore les courses automobiles ou hippiques). Les expertises associées sont de nouveau nombreuses (fabrication de matériels performants, bio-mécanique, médecine du sport, etc.) et montrent que les progrès des performances et notamment des vitesses se confrontent à des limites et plafonds (Toussaint, 2010).

La **notion de vitesse** se rattache donc à de nombreux domaines, de nombreuses transformations de nos sociétés, et a donc été étudiée par différentes disciplines scientifiques. Si la vitesse est régulièrement associée à la notion de progrès, les recherches pointent également les limites physiques, sociales ou environnementales face aux accélérations constatées dans nos sociétés.

3.1.2. La vitesse des transports et ses implications

Si d'importantes évolutions économiques et sociétales des dernières décennies sont liées aux évolutions des transports, leur accélération est sans doute un élément clé de ces transformations. L'**accélération des transports de marchandises** a permis d'intensifier les échanges commerciaux, de faciliter la spécialisation des économies et de créer des chaînes logistiques à flux tendu, qui ont eu des impacts majeurs sur l'économie et la mondialisation actuelles.

La question de la **vitesse des mobilités**, dont il est question dans ce chapitre, a également eu un rôle majeur dans l'évolution des déplacements et dans les accélérations sociales décrites ci-dessus. La vitesse des déplacements a ainsi été étudiée sous divers angles et disciplines, dont certains éléments de la littérature existante sont rappelés ici (voir aussi Crozet, 2019).

L'**histoire** des transports évoque notamment cette question de la vitesse, comme objet principal d'étude (Studeny, 1995) ou comme un élément important de l'évolution des mobilités et des transitions énergétiques passées (Lay, 1992 ; Fau, 2015 ; Castaignède, 2018). La partie 4 reviendra sur ces éléments historiques d'évolution de la vitesse.

Une partie importante des travaux sur la vitesse des mobilités fait suite aux travaux publiés par l'économiste Yacov Zahavi de la Banque Mondiale dans les années 70 et 80 (voir notamment Zahavi, 1974). A partir de données issues des mobilités quotidiennes dans de nombreuses villes de pays développés et en développement, une stabilité relative des **budgets-temps de transport (BTT)** autour d'une heure par personne et par jour a été

trouvée. De même, l'analyse pointait une part du budget monétaire des ménages attribuée aux mobilités également constante. Ces analyses ont été poursuivies par de nombreuses autres publications au niveau mondial, notamment sur ces budgets-temps et les constantes des mobilités (Marchetti, 1994 ; Schafer, 2000), ou leur intégration dans les modèles économiques des transports et les travaux prospectifs (Goodwin, 1981 ; Schafer et Victor, 2002). Pour la France, ces thèmes de la vitesse des mobilités et des BTT ont été étudiés en particulier par Yves Crozet et Iragaël Joly, abordant les aspects relatifs aux comportements des voyageurs, à l'aménagement du territoire et l'urbanisme, et aux choix de politiques publiques (voir notamment Crozet et Joly, 2003 ; Joly, 2004 ; Crozet, 2005 ; Crozet, 2016).

Les **critères de coûts et de temps de transport** sont devenus des variables majeures dans l'étude des transports, les modèles de choix modal ou encore dans les études socio-économiques accompagnant les projets d'infrastructures de transport ou les politiques publiques. Si l'importance de ces critères et leur portée pratique sont indéniables, la focalisation sur ces critères a pu parfois faire oublier d'autres variables pourtant déterminantes dans le choix modal, telles que le poids des habitudes ou le chaînage des trajets (De Witte, 2013 ; Bouscasse, 2017).

Aussi les gains de temps mis en évidence par les **études socio-économiques** représentent une part majeure des bénéfices ayant justifié les constructions de nouvelles infrastructures rapides, telles que les autoroutes ou les lignes à grande vitesse. Ces "gains de temps" ont été très tôt remis en question, dans une note intitulée "A la recherche du temps gagné", pointant notamment le temps nécessaire pour payer des trajets plus rapides (Dupuy, 1975). Plus récemment, un papier suivi par des réponses de nombreux chercheurs, dénonçait le mythe des gains de temps de trajet, ce temps étant réinvesti dans des trajets plus long, tandis que les BTT totaux restent constants (Metz, 2008). Dans un registre similaire, l'autorité environnementale en France pointe régulièrement le faible poids des externalités environnementales dans ces évaluations par rapport aux gains de temps, entraînant entre autres de possibles non compatibilités des scénarios présentés avec les objectifs climatiques nationaux (Ae, 2017).

La vitesse des mobilités a également un impact majeur sur l'**aménagement du territoire et des villes**. Certaines des études citées ci-dessus mettant en évidence également une relative stabilité du nombre de trajets quotidiens, les gains de vitesse permettent un allongement des distances moyennes parcourues par trajet. Ainsi, Marchetti montre que le rayon d'une ville était d'environ 2,5 km du temps où la marche était le seul mode, soit l'équivalent d'une heure aller-retour entre la périphérie et le centre-ville. Au fur et à mesure de l'introduction de modes de transport plus rapides (traction hippomobile, vélo, métro et chemins de fer, voiture), le rayon des villes a grandi rendant possible le phénomène d'**étalement urbain** (Wells, 1901, dans Castaignède, 2018 ; Marchetti, 1994 ; Héran, 2015 ; Marc Wiel, dans Brun, 2013). La comparaison entre différentes villes montre que de manière contre-intuitive, l'augmentation des vitesses ne réduit pas les BTT mais aurait même tendance à les augmenter pour les seuls transports motorisés (Crozet et Joly, 2003). Les modes utilisés influencent également la forme de la ville et de son étalement. Si les possibilités de trajets en porte-à-porte du vélo et de la voiture favorisent un étalement diffus, les lignes de chemin de fer favorisent une forme de ville en doigts de gants, avec un développement surtout autour des axes de transports en commun et des gares, tel que prôné par le *transit-oriented development* (TOD).

Au-delà de la dilatation des villes, l'augmentation des vitesses sur des axes particuliers à longue distance entraîne un processus de **contraction différentielle de l'espace** entre certaines métropoles, associée à un **court-circuitage** des villes petites et moyennes qui ne sont pas desservies par ces transports rapides (Bretagnolle, 2005). Cette contraction différentielle s'illustre par exemple par le fait que Paris-Cherbourg et Paris-Marseille aient des temps de trajets aussi longs alors que la distance est deux fois plus importante pour Marseille. Aussi le court-circuitage s'exprime notamment dans le nombre de villes desservies par un trajet de plusieurs centaines de kilomètres. Si le nombre de relais de poste nécessitant des étapes était très important au XVIIIème siècle (cf historique en 4.1.1), il a d'abord été réduit par les gains de vitesse du transport à cheval, avant que le train classique puis le TGV ne réduisent encore le nombre de villes desservies, tandis que le transport aérien ne compte plus aucun arrêt possible. Les gains de vitesse importants sur la longue distance ont ainsi favorisé la **métropolisation** de ces dernières décennies. L'aire urbaine se construit donc par un double mouvement, à la fois centripète pour la métropolisation et centrifuge concernant la péri-urbanisation (Brun, 2013).

L'augmentation des vitesses s'accompagne également de **coûts économiques, sociaux et environnementaux** des transports, qu'il s'agit de mieux prendre en compte. Ces limites à la recherche de vitesse et à l'hyper-mobilité sont à la fois individuelles et collectives, et mises en évidence notamment par les notions de vitesses généralisées évoquées ci-dessous en 3.1.3 (Crozet, 2016). L'accélération des transports a également eu un rôle majeur sur l'accélération sociale présentée plus haut et sur les modes de vie, comme documenté par de nombreuses recherches du Forum Vies Mobiles. Le chercheur Christophe Mincke développe même l'hypothèse d'une société où la mobilité serait devenue une fin en soi, avec une injonction à la mobilité qui s'articule autour de quatre impératifs : celui de l'activité, qui devrait être permanente, condamnant au contraire les inactifs et sans autoriser le repos ; celui de l'activation, c'est-à-dire d'être actif par soi-même ; l'impératif de participation, selon une logique de projets qui s'enchaînent sans interruption ; enfin, celui d'adaptation, c'est-à-dire l'appel à la flexibilité, l'innovation, l'agilité (Mincke, 2019). L'accélération s'applique ici au champ de la mobilité, sans que cette notion soit restreinte à la notion de déplacements, mais plutôt à une modification plus large dans les modes de vie, telle qu'évoquée par Rosa.

Parmi les coûts de l'hyper-mobilité, la demande a été un facteur majeur de l'évolution des **émissions de CO_2**, et les objectifs climatiques ambitieux nécessiteraient une modération de cette hyper-mobilité (cf chapitre 1 et 2). Certains travaux prospectifs sur les émissions de la mobilité intègrent directement des éléments sur la vitesse et les BTT dans les scénarios étudiés (tels que les études de Crozet et al, 2008 et Mittal et al, 2017, évoquées en chapitre 2). Les budgets temps alloués à différentes activités sont également utilisés pour construire des scénarios prospectifs sur les émissions en Chine (Yu et al, 2019). Les données montrent pour les pays développés que les déplacements correspondent à l'activité la plus intensive en termes d'émissions de CO_2 par heure d'activité. D'autres études font directement le lien entre la vitesse des transports et les émissions, en particulier pour évaluer l'impact des limitations de vitesse des transports routier et maritime (dont la bibliographie sera évoquée en 4.3.3).

Enfin, une raison majeure des limitations de vitesses depuis des décennies est celle de la **sécurité routière**. Le sujet a été l'objet d'une large littérature lié à la vitesse des transports, dont l'histoire et les processus de régulations pour la France sont retracés par Orselli (2009).

3.1.3. Différentes définitions de la vitesse des mobilités

La **vitesse physique** d'un déplacement correspond à la distance entre l'origine et la destination, divisée par le temps du déplacement, exprimée en km/h. C'est de cette simple notion dont il est question dans ce chapitre, en estimant la vitesse moyenne de l'ensemble des déplacements en France selon différents périmètres, ainsi que son évolution depuis 1960. Au-delà de la vitesse physique, les économistes en particulier ont pu développer d'autres notions relatives à la vitesse.

Ainsi la **vitesse économique** correspond à la distance du déplacement divisée par le temps de travail nécessaire au paiement du déplacement. Elle correspond à la distance qu'il est possible d'acheter en travaillant une heure. Le temps généralisé d'un déplacement correspond à l'addition du temps de transport et du temps de travail pour le payer.

La notion de **vitesse généralisée**, qui y est liée, est donc le rapport entre la distance du déplacement et le temps généralisé. Elle permet de réunir en un seul critère les deux principaux critères de temps et de coût du transport évoqués ci-dessus. En plus du temps généralisé et de la vitesse généralisée, leur équivalent monétaire est le coût généralisé, qui correspond au coût monétaire du transport auquel s'ajoute le coût du temps de déplacement, généralement assimilé au temps de transport multiplié par le salaire horaire. La notion de vitesse généralisée avait été développée par Jean-Pierre Dupuy et Ivan Illich (1975) comme une critique de la voiture, les calculs montrant qu'elle possédait une vitesse généralisée plus faible que le vélo. Le concept a notamment été repris par Frédéric Héran (2009) qui a pu montrer que la vitesse généralisée de la voiture dépassait désormais celle du vélo. Le papier rappelait les principales limites du concept et proposait d'ouvrir la voie vers l'étude d'une **vitesse optimale** intégrant les coûts et bénéfices d'une augmentation de vitesse. Le concept a également été étudié par Yves Crozet (2016) pour mettre en avant les limites qui peuvent exister aux gains de vitesse physiques, quand ceux-ci se font à un coût trop élevé pour l'individu ou la société.

Ces deux auteurs ont également développé le concept de **vitesse généralisée sociale** ou **socio-économique**, qui se rapproche de l'idée de vitesse optimale, en cela qu'il a pour but de prendre en compte les externalités générées par le transport et les coûts publics dans le calcul. Ainsi le coût kilométrique individuel du déplacement est remplacé par le coût pour la collectivité.

Comme précisé précédemment, **cette étude se focalise sur la vitesse physique**. Des travaux quantitatifs sur l'évolution de cette vitesse physique et ses déterminants n'ont pas été trouvés dans la littérature. Les analyses statiques existent de par les enquêtes de mobilité qui estiment les distances et temps de déplacement et permettent de déduire des vitesses moyennes, généralement pour des trajets de porte-à-porte. La méthodologie est ici légèrement différente car les temps de transport sont ré-estimés à partir des distances et vitesses de chaque mode, de manière à déduire des temps de transport agrégés puis une vitesse moyenne des déplacements.

Il peut être noté qu'une vitesse généralisée importante pour un mode de transport est une condition pour qu'il modifie substantiellement la vitesse moyenne physique. En effet, si les progrès techniques nous donnent par exemple la possibilité de réaliser des vols supersoniques, c'est sa relativement faible vitesse économique qui empêche sa diffusion au plus grand nombre, et donc un impact significatif sur la vitesse moyenne de l'ensemble de la population.

3.2.Evaluation des temps de déplacements

Points et messages clés :

- ✓ Les budgets-temps de transport (BTT) sont proches d'**une heure par jour et par personne** en France, avec une possible hausse sur les dernières décennies.
- ✓ L'estimation pour 2017 donne des temps de déplacements de **64 min/jour/pers** en moyenne : 53 minutes pour la mobilité locale et 11 minutes pour la longue distance.
- ✓ A cette évaluation basée sur les trafics voyageurs **peuvent s'ajouter** : env. **2 min**/jour pour les retards et temps d'attente des modes collectifs ; **7 min** pour d'autres usages professionnels motorisés ; env. **38 min** de marche et vélo hors déplacements.

3.2.1. Les temps de déplacement, vus par les données d'enquêtes

De nombreuses enquêtes permettent d'évaluer les temps de déplacements des Français, quelques-unes d'entre elles sont résumées en Tableau 13. Etant donné leurs différents périmètres en termes de type de déplacements pris en compte, d'âge des enquêtés, ou d'année de référence, il est parfois difficile de comparer directement les chiffres entre eux. Hormis la première enquête citée qui ne compte que les modes motorisés, les temps de transport sont généralement **proches d'une heure, jusque quasiment 1h30** au maximum.

Tableau 13 : Enquêtes évaluant les temps de transport en France

Temps de transport	Année	Source	Périmètre	Déplacements
Moyenne **42,34** min, écart-type 5,09	1995	Base UITP, Crozet et Joly, 2003	Villes France	Motorisés, quotidiens
63 min hommes **54** min femmes	1998-1999	Eurostat, 2004, enq. emploi du temps	Pop. 20-74 ans, année entière	Tous, hors temps de travail
56,3 min au total **66** min pers. mobiles	2008	CGDD 2010, ENTD	Pop. 6 ans et +, jour ouvrable	Locaux (- 80 km), au quotidien
62 min déplacements, 69 hommes, 57 femmes	2010	Insee (Brousse, 2015), enq. emploi du temps	Pop. 18 ans et +, France urbaine	Tous, hors temps de travail
86 min 7h12 lundi au vendredi	2017	Ipsos, BCG, 2017	Pop. 15 ans et +	Semaine du lundi au vendredi
70 min domicile-travail	2019	Ipsos, Régions de France, Transdev, 2019	Pop. 18 ans et +	Quotidien, domicile-travail
89 min par jour 10h22 par semaine	2019	Forum Vies Mobiles, 2020	Pop. 18-75 ans, sur 2 semaines	Réguliers, dont ceux liés au travail

L'enquête nationale transport déplacements (ENTD) est la plus complète en France. En revanche, sa périodicité est faible et la dernière enquête disponible au moment de l'écriture de ces lignes date de 2008 (les premiers résultats de l'enquête suivante sont prévus au cours de l'année 2020), et les temps de transport sont uniquement disponibles pour la mobilité locale (inférieure à 80 km du domicile) en jour ouvrable. Pour ces déplacements, les temps de transport étaient de 56,3 minutes par jour (et 66 minutes pour les seules personnes mobiles, 85 % de la population) et la vitesse moyenne de 26,5 km/h. Le temps de transport avait légèrement augmenté par rapport aux deux enquêtes précédentes (54,8 min en 1982 et 54,7 min en 1994) tandis que la vitesse avait augmenté (19 km/h en 1982, 25 km/h en 1994) étant ainsi le principal facteur à l'origine des hausses des distances parcourues en local. L'enquête montre des distances locales et des temps de transport qui augmentent avec le revenu, mais la vitesse moyenne est relativement stable selon les catégories de revenus. En revanche, des disparités géographiques importantes existent entre les territoires de résidence, avec des temps

de transport plus élevés et des vitesses plus faibles dans les grandes villes : les durées quotidiennes sont par exemple de 75 et 72 minutes à Paris et en banlieue parisienne, contre moins de 50 minutes dans les communes rurales ; les vitesses des espaces peu denses sont de l'ordre de 35 km/h, contre 12 km/h à Paris et 19 km/h en banlieue parisienne (CGDD, 2010).
La particularité des temps de transport importants en région parisienne ressort également dans les **enquêtes globales transport** (EGT) réalisées en Île-de-France. Il est estimé que les temps de transport en semaine y ont augmenté de 76 minutes par jour en 1976 à 93 minutes en 2010, en raison de l'augmentation des temps de transport pour motif privé (Omnil, 2012 ; IAU-IDF, 2016). Les vitesses atteignent un maximum lors de l'enquête de 1997, puis baissent dans les enquêtes suivantes de 2001 et 2010, un point développé en partie 4.3.1.
Par ailleurs, les **enquêtes ménages-déplacements** (EMD), désormais appelées enquêtes mobilité certifiée Cerema (EMC² ; Cerema, 2020a) documentent les temps de parcours dans les grandes agglomérations françaises. La Figure 57 recense les résultats de 190 enquêtes dans 67 villes entre 1976 et 2018. Cela représente en moyenne quasiment trois enquêtes par ville, une enquête donnée pouvant rassembler plusieurs mesures pour une même agglomération, car comprenant des périmètres différents. Ainsi l'évolution temporelle ne peut pas être suivie de manière fine pour de nombreuses villes, les tendances n'étant pas univoques et en raison notamment des périmètres changeants. Si la droite de régression suggère en moyenne une hausse du temps de déplacement quotidien d'une minute par décennie, cette tendance ne peut être prise que comme une hypothèse. Les enquêtes évaluent la mobilité interne à l'aire d'étude, un jour de semaine, pour la population de 5 ans et plus. La moyenne des temps de déplacement des 190 enquêtes est de 53,8 minutes, et de 62,4 minutes pour les seules personnes mobiles. La part des personnes mobiles est de 14,8 % avec une tendance à la baisse, d'environ 16 à 13 % entre 1976 et 2018, une tendance qui était également identifiée par l'ENTD pour les jours de semaine. Enfin, le nombre de trajets quotidiens est de 4,2 pour les personnes mobiles et de 3,6 en moyenne, avec une durée de trajets proche des 15 minutes. Ces variables montrent aussi une forte stabilité au cours du temps, même si une très légère tendance à la hausse semble apparaître sur ces deux dernières variables.

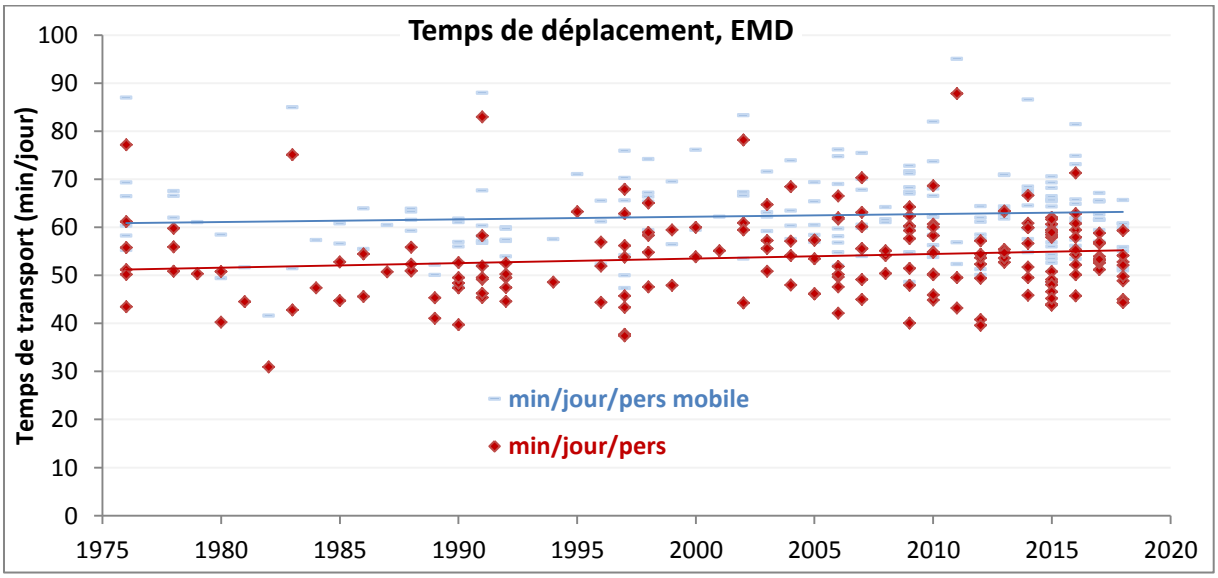


Figure 57 : Temps de déplacement par jour et par personne dans les enquêtes ménages-déplacements des agglomérations françaises de 1976 à 2018
(jour de semaine, population 5 ans et plus, 190 enquêtes dans 67 agglomérations différentes)

Les enquêtes précédemment citées et les temps de transport identifiés sont représentatifs des **déplacements les jours de semaine**, et non de l'ensemble de l'année. La non prise en compte des weekends surestime les résultats, car les déplacements sont moins fréquents le weekend (cf ENTD ; CGDD, 2010), tout comme les EMD se focalisent sur les agglomérations dans lesquelles les temps de transport sont plus élevés. En revanche, la non prise en compte des trajets longue distance ou en dehors de l'aire d'étude pour les EMD peut sous-estimer les temps de transport totaux, de même que l'absence des trajets liés au travail.

Si le Royaume-Uni possède des données d'enquêtes régulières montrant une stabilité des budgets-temps de transport depuis les années 70 malgré une tendance plutôt à la hausse et quelques fluctuations (Metz, 2013), de telles enquêtes manquent en France. Les **enquêtes emploi du temps** permettent cependant une évaluation sur l'année entière, mais à des intervalles moins réguliers, tous les 12 ans (de 1974 à 2010 pour les 4 dernières enquêtes). Les données étudiées par Brousse (2015) pour les trois quarts de la population qui vivent en zone urbaine semblent indiquer une légère hausse des temps de déplacement, surtout chez les femmes : la moyenne pour l'ensemble de la population est de 54 minutes en 1974, 53 minutes en 1986, 52 minutes en 1998 (année avec risque de sous-échantillonnage) et 62 minutes en 2010. Il est probable que ce chiffre de 62 minutes serait légèrement réduit s'il était étendu également aux zones rurales et aux moins de 18 ans pour lesquels les temps de transport sont moindre. A nouveau les chiffres sont à prendre avec précaution, car les périmètres ne sont pas tout à fait constants entre les années et les temps des activités sont arrondis à 10 minutes pour certaines enquêtes, 5 minutes pour d'autres.
La publication d'Eurostat (2004) reprend les résultats de l'enquête emploi du temps de 1998, cette fois pour l'ensemble de la population de 20 à 74 ans et en **comparaison avec 9 autres pays européens**. Les temps de déplacements sur l'année sont de 63 minutes pour les hommes et 54 minutes pour les femmes, hors déplacements liés à l'activité professionnelle. Si la moyenne est légèrement en dessous de l'heure de transport, ce chiffre est le deuxième plus faible parmi les 10 pays étudiés, derrière la Hongrie et loin des temps de transport de 1h27 en moyenne en Belgique et 1h22 par jour en Allemagne. Les temps de déplacements en France sont également les moins élevés parmi les 10 pays européens de l'enquête Ipsos-BCG (2017) qui estimait les temps de déplacements du lundi au vendredi à 9h35 en moyenne en Europe, contre 7h12 en France, soit respectivement 1h55 et 1h26 par jour. En Europe, les transports motorisés représentaient un peu plus de 45 minutes, tout comme les modes actifs, et les transports en commun 20 minutes. Les chiffres ne sont pas donnés pour la France, mais les durées d'enquêtes pour les modes actifs sont généralement bien plus faibles que 45 minutes. Les fortes différences pourraient également être expliquées en partie par la plus faible densité de population française, les durées de déplacements en zones denses étant généralement plus élevées. En revanche, le chiffre d'1h26 est élevé comparé aux autres enquêtes. Il pourrait s'expliquer en partie au moins par la prise en compte des déplacements longs réalisés les jours de semaine, et également par l'inclusion des temps de transport dans le cadre de l'activité professionnelle, qui ne sont généralement pas inclus.
C'était justement un des objectifs de l'**enquête mobilité du Forum Vies Mobiles** (2020) d'inclure également cette mobilité professionnelle (des chauffeurs routiers ou de taxis, plombiers, etc.) dans les déplacements quotidiens et réguliers des 18-75 ans. Il apparaît des

temps de déplacement de 10h22 par semaine, soit 1h29 par jour, bien supérieurs aux temps généralement évalués. L'enquête inclut les weekends et les trajets à longue distance de loisirs uniquement s'ils sont réguliers. Si la tranche d'âge enquêtée est la plus mobile, il est probable que l'inclusion des trajets du quotidien à longue distance et les déplacements effectués dans le cadre de l'activité professionnelle aient un fort impact sur les temps importants qui sont identifiés. L'enquête met en valeur également les disparités importantes qui existent dans la population : les 10 % les moins mobiles (qui rejoignent en partie la part de personnes non mobiles des EMD et ENTD) passent en moyenne un peu moins de 10 minutes par jour à se déplacer, contre près de 5 heures par jour pour les 10 % les plus mobiles. Les disparités observées pour les seules personnes mobiles, et sans inclure les déplacements professionnels (tels que réalisés entre autres par Zahavi), ont tendance à identifier des valeurs davantage concentrées autour de la moyenne.

Un grand nombre d'analyses donne donc des **temps de déplacements proches d'une heure par jour, jusqu'à 1h30** pour certaines. D'un point de vue temporel, une grande stabilité des budgets-temps apparaît. Malgré les incertitudes associées à chaque analyse, plusieurs enquêtes semblent converger vers **l'hypothèse d'une légère tendance à la hausse de ces budgets-temps** ces dernières décennies. Si cette tendance apparaît dans des enquêtes portant sur la seule mobilité locale (ENTD et EMD notamment), cette conclusion pourrait être renforcée par le fait que le nombre de déplacements à longue distance a augmenté sur les dernières décennies (cf ENTD dans CGDD, 2010 ; point discuté en 4.3.1).
Ce premier état des lieux montre également la **diversité des chiffres** selon les périmètres étudiés. Il est important dans l'interprétation des chiffres d'une enquête de comprendre quels déplacements sont pris en compte et quelle est la population étudiée : inclusion ou non des jours de weekend, des trajets à longue distance, des trajets professionnels, des types de territoires, ou encore l'âge des enquêtés, entre autres critères importants.

Cela permet de mieux situer le **périmètre de l'analyse proposée** ici. Etant donné que l'analyse repose pour beaucoup sur les données de trafics en France, elle concerne l'ensemble de la population, tous jours de l'année confondus, aussi bien pour la courte que longue distance. Les trafics pris en compte étant l'ensemble de ceux en voiture et les 60 % de trafics des véhicules utilitaires légers (VUL) utilisés pour du transport de voyageurs, ces trafics incluent des déplacements professionnels ou réalisés dans le cadre du travail (tels que la tournée d'un médecin pour la voiture, plombier pour les VUL). En revanche, ne sont pas inclus les déplacements pour du transport routier de marchandises, ni les temps de conduite ou les temps de déplacements du personnel des avions, trains ou autocars durant leur fonction. Une évaluation de l'impact de leur prise en compte sur les résultats sera proposée en 3.2.3, de même qu'une première estimation des temps de marche à pied hors transport. Enfin, tous les temps de déplacements des modes voyageurs étant inclus, les temps de pré- et de post-acheminement vers les transports sont inclus dans l'analyse. Ne sont pas inclus en revanche les temps de retard ou d'attente en gare ou en aéroport, qui sont généralement inclus dans les enquêtes mobilité qui considèrent des temps de transport porte-à-porte.
Les chiffres et figures présentés ensuite permettront de préciser ce périmètre et l'impact des hypothèses sur les temps de déplacements évalués.

3.2.2. L'estimation des temps de déplacements en 2017

Le Tableau 14 ci-dessous rend compte des principales hypothèses et des résultats du calcul des temps de déplacement pour les modes actifs, les modes routiers individuels et collectifs, le ferroviaire et l'aérien. Au total, les calculs font apparaître des **temps de déplacements de l'ordre de 64 minutes par jour et par personne en moyenne**, dont environ 15 minutes pour les modes actifs (essentiellement la marche), 40 minutes pour les transports routiers individuels (surtout la voiture), 4 minutes pour les transports routiers collectifs et de même pour le train, et moins d'une minute par jour pour l'avion.

Tableau 14 : Estimation des temps de transport des modes de transport et vitesse moyenne des déplacements en 2017
(les temps de transport sont estimés à partir des trafics et vitesses par mode, sous-mode et/ou réseau de transport, et l'agrégation des temps de transport permet de déduire la vitesse moyenne par mode et pour l'ensemble des déplacements ; CD = courte distance, LD = longue distance, SLO = service librement organisé = autocars Macron ; Pop 64,9 M habitants)

	Md voy.km	km/jour	% km	km/trajet	Vitesse	Md h	min/jour	% temps
Marche	**20,1**	**0,8**	**1,7%**	**-**	**3,6**	**5,6**	**14,2**	**22%**
Dont trajets à pied	11,1	0,5	0,9%	0,8	3,6	3,1	7,8	12%
Dont intermodalité	9,0	0,4	0,7%	-	3,6	2,5	6,3	10%
Vélo	**6,3**	**0,3**	**0,5%**	**3,4**	**12**	**0,5**	**1,3**	**2,1%**
Routier individuel	**825**	**35**	**68%**	**16,0**	**53**	**15,6**	**40**	**62%**
2-roues motorisés	17,4	0,7	1,4%		46	0,4	1,0	2%
Voiture	709	30	58%		54	13,2	33,5	52%
VUL	99	4,2	8%		49	2,0	5,1	8%
Autoroute	323	13,7	27%		80	4,0	10,2	16%
Rural	334	14,1	27%		55	6,0	15,3	24%
Urbain	168	7,1	14%		30	5,6	14,1	22%
LD	248	10,5	20%	300	80	3,1	7,8	12%
CD	578	24,4	48%	11,4	46	12,5	31,8	50%
Bus & cars	**58,3**	**2,5**	**5%**	**11,4**	**36**	**1,6**	**4,1**	**6,4%**
Cars	47,4	2,0	4%	22	46,5	1,0	2,6	4,0%
Bus	10,9	0,5	1%	3,7	18,0	0,6	1,5	2,4%
Autocars SLO	2,2	0,1	0,2%	310	80	0,03	0,1	0,1%
LD	29,6	1,3	2,4%	172	51	0,6	1,5	2,3%
CD	28,7	1,2	2,4%	5,8	27	1,0	2,6	4,1%
Ferroviaire	**114,0**	**4,8**	**9%**	**22,7**	**73**	**1,6**	**4,0**	**6,2%**
TGV	59,6	2,5	4,9%	432	158	0,4	1,0	1,5%
Intercités	7,2	0,3	0,6%	258	103	0,1	0,2	0,3%
TER	13,7	0,6	1,1%	50	83	0,2	0,4	0,7%
Transilien	19,5	0,8	1,6%	13,6	54	0,4	0,9	1,4%
Métros	10,4	0,4	0,9%	5,1	26	0,4	1,0	1,6%
Tramways	3,6	0,2	0,3%	3,2	18	0,2	0,5	0,8%
LD	73,7	3,1	6,1%	244	139	0,5	1,3	2,1%
CD	40,3	1,7	3,3%	8,5	39	1,0	2,6	4,1%
Aérien total	**191,6**	**8,1**	**16%**	**2065**	**728**	**0,3**	**0,7**	**1,0%**
Métropole	15,4	0,7	1,3%	595	500	0,03	0,08	0,1%
Outre-mer	15,9	0,7	1,3%	7704	850	0,02	0,05	0,1%
International	160	6,8	13%	2473	750	0,2	0,5	0,8%
TOTAL	**1216**	**51,4**	**100%**	**15,7**	**48,2**	**25,2**	**63,9**	**100%**
Hors international	1056	44,6		13,6	42,2	25,0	63,3	
Longue distance	**543**	**22,9**	**45%**	**390**	**121**	**4,5**	**11,3**	**18%**
Courte distance	**673**	**28,4**	**55%**	**10,8**	**32,5**	**20,7**	**52,6**	**82%**

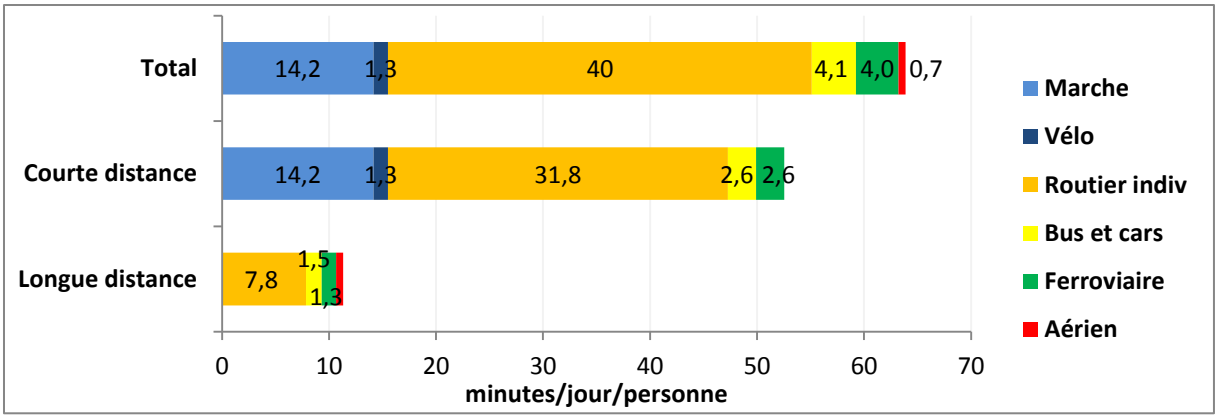


Figure 58 : Temps de transport par jour des principaux modes de transport

L'indicateur des temps de transport permet de donner une appréciation sensible de ce que représente la mobilité dans la vie quotidienne. Si les temps de déplacements sont bien connus au niveau individuel pour différents trajets, leur agrégation au niveau Français en combinant courte et longue distance n'est pas disponible. Les deux indicateurs les plus répandus sont ceux du nombre de trajets et des distances. Ils sont parfois moins pertinents pour répondre à des questions sur l'utilisation des modes de transport, telles que "les Français utilisent-ils davantage le métro ou le TGV ?". Le nombre de trajets donne beaucoup de poids aux modes lents et de faible portée, tels que la marche ou le métro ; ainsi le nombre de trajets en métro est quasiment 6 fois supérieur à ceux en TGV. Les distances donnent du poids aux modes rapides utilisés pour la longue distance, tels que l'avion ou le TGV ; les distances parcourues en TGV sont ainsi 15 fois supérieures au métro. Les temps de transport donnent une mesure intermédiaire reflétant davantage leur utilisation réelle ; les temps de transport des Français en métro et TGV sont équivalents, d'environ 1 minute/jour ou 6 h/an en moyenne.

Une première estimation de la répartition des temps de transport entre courte et longue distance (CD et LD) donne environ **53 minutes par jour en moyenne pour la courte distance et 11 minutes pour la longue distance**, soit une répartition de **82 % / 18 %**. Ici, toute la marche à pied et le vélo sont comptés pour la courte distance ; pour le ferroviaire, les TER sont comptés à moitié pour courte et longue distance, les Intercités et TGV en LD et les transiliens, métros, et tramways en CD ; la répartition est plus difficile pour les bus et cars en raison du manque de données, il est considéré que les bus urbains, le transport scolaire et de personnel sont en CD, de même que les trois-quarts des transports interurbains conventionnés, et le reste est indiqué pour la LD avec les transports occasionnels. Cette première estimation ne tient pas compte des temps d'accès des modes longue distance, comme rejoindre une gare TGV à pied ou en tramway, trajets qui sont comptés dans les déplacements de courte distance.

La **prédominance de la mobilité locale** est logique, car elle représente l'essentiel des trajets du quotidien, tandis que les trajets à longue distance sont plus exceptionnels. La mobilité locale représente ainsi **98,2 % des trajets** (de manière proche de l'ENTD 2008, qui l'estimait à 98,6 %), tandis qu'elle représente **55 % des distances** parcourues (60 % dans l'ENTD, et 70 % des émissions de CO_2). Les écarts entre les critères de distances, temps de transport et nombre de trajets s'expliquent par des distances de trajets très différentes, de respectivement **11 et 390 km** pour la courte et longue distance, des vitesses moyenne de respectivement **32 et 121 km/h**, et des temps de trajets d'environ **15 minutes et plus de 3h** pour la LD, des éléments détaillés dans les prochaines parties.

3.2.3. Vers une évaluation complète des temps de déplacements

La méthodologie met en avant trois types de temps de transport qui ne sont pas ou seulement partiellement inclus dans l'évaluation des temps de transport, et qu'il s'agit d'estimer dans cette partie :

- ✓ Les **temps de retard** et les **temps d'attente** des modes collectifs ; ce qui sera appelé les **temps d'accès** (ou de pré- et post-acheminement), afin d'avoir des temps de trajet porte-à-porte, ces temps étant inclus dans l'analyse sans être affectés aux différents modes (par exemple, le temps de marche pour rejoindre le tramway est inclus dans la marche, non dans le temps de tramway) ; enfin, il peut être ajouté un **temps de préparation**, qui compte la préparation de l'itinéraire, l'achat de billets et/ou la préparation des bagages et affaires pour le trajet ;
- ✓ Les **temps en transports motorisés liés à l'activité professionnelle** qui ne sont pas déjà inclus dans l'analyse, tels que les temps de conduite pour les métiers de conducteurs/chauffeurs, les temps de service en lien avec les transports tels que les contrôleurs ou hôtesses/stewards, ou encore les temps et distances parcourues en tracteurs ou engins de chantier ;
- ✓ Les **déplacements à pied** (ou dans d'autres modes, plus minoritaires) qui ne sont pas comptés dans les enquêtes de mobilité, tels que les déplacements liés aux activités de loisirs (sport, randonnée, etc.), aux activités domestiques, ou aux déplacements non motorisés durant les activités professionnelles.

Concernant le premier élément, les estimations des temps de trajet des différents modes de courte distance sont données en Figure 59, et en Figure 60 pour les trajets à longue distance.
Aussi bien pour les trajets de courte que de longue distance, et alors que les distances moyennes et les vitesses des modes sont très variées, **les temps de déplacements moyens sont très proches selon les modes**, autour de 15 minutes pour la courte distance, et entre 2h30 et 4h pour les trajets à longue distance.

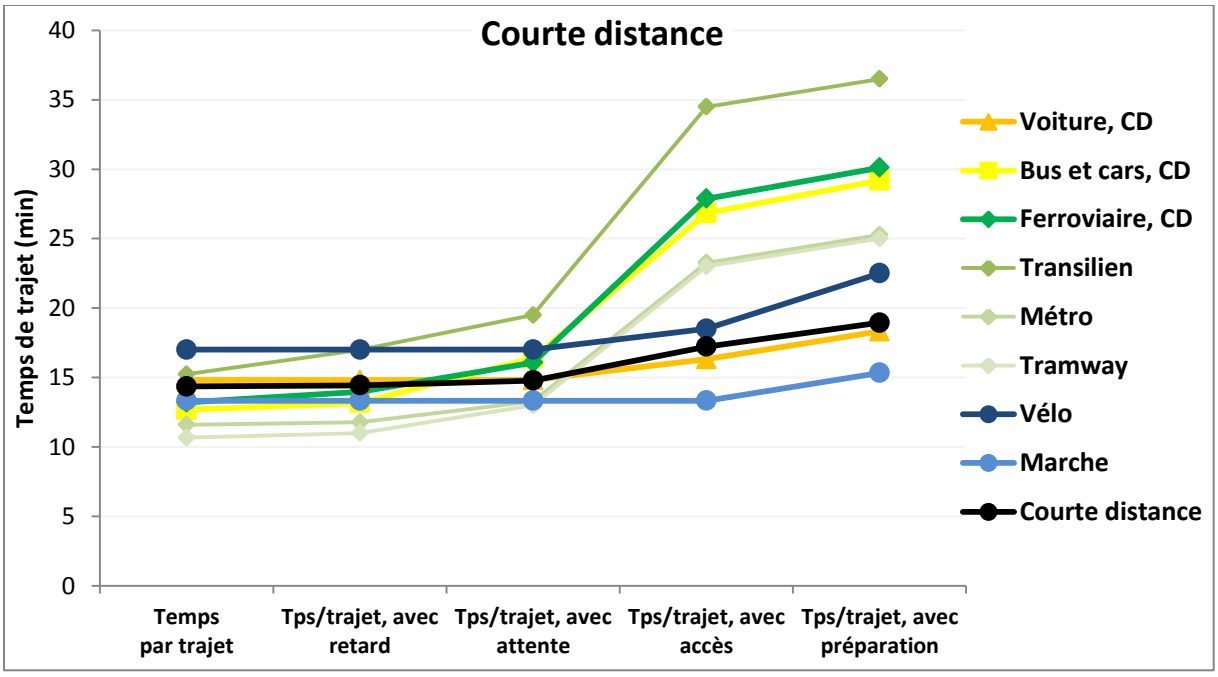


Figure 59 : Temps de déplacements moyens par mode pour les trajets à courte distance

Pour les **déplacements de courte distance**, les estimations des temps de transport par trajet varient entre 11 minutes pour le tramway et 17 minutes pour le vélo. Ces temps sont l'équivalent des temps de transport en véhicule, soit le temps de transport commercial pour les transports en commun. Les temps de retard sont en moyenne peu élevés pour les modes de courte distance et s'élèvent au maximum à 1 minute 46 en moyenne pour les transiliens (Arafer, 2018a), rallongeant les temps de déplacement moyens de l'ordre de 12 %. Les temps d'attente sont faibles pour les modes avec une forte fréquence, et rallongent les trajets d'environ 15 % pour les modes ferroviaires de courte distance, et probablement de l'ordre de 20-25 % pour les bus. La marche, le vélo et la voiture ont l'avantage de ne pas subir de temps de retard (les embouteillages ne sont pas comptés comme tels pour la voiture, mais directement dans la vitesse commerciale du mode) et d'attente. De même, les temps d'accès sont faibles, alors qu'ils sont bien plus significatifs pour les transports en commun, augmentant les temps de parcours de l'ordre de 70 % (avec des hypothèses de temps de pré- et post-acheminement de 2 x 5 minutes pour tramways, métros et bus). Ainsi les temps de transport moyens sont supérieurs pour les trajets porte-à-porte en transports en commun, ce qui peut partiellement expliquer les temps de transport très importants en Île-de-France où leur part modale est importante. Les temps de préparation (qui peuvent inclure des temps de rangement à destination) sont supposés similaires entre les modes, à 2 minutes en moyenne, sauf pour le vélo qui demande parfois de se changer par exemple pour les longs trajets ou les jours de pluie. Sous ces hypothèses, la prise en compte de ces temps de préparation ne change pas fortement les temps de transport moyens.

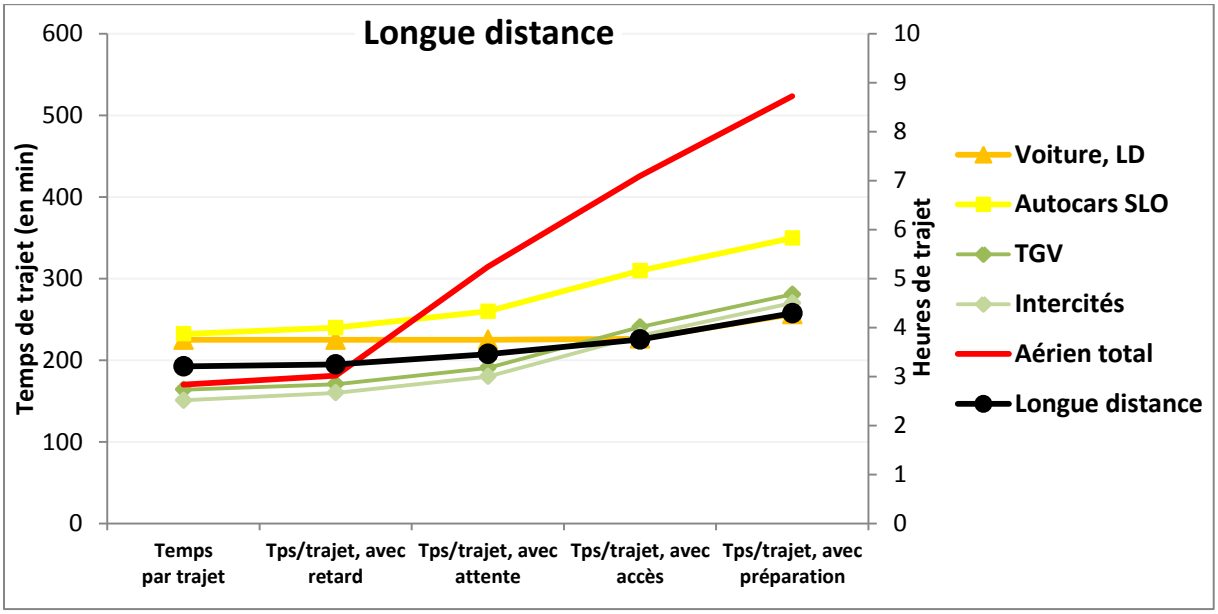


Figure 60 : Temps de déplacements moyens par mode pour les trajets à longue distance

Pour les **déplacements à longue distance**, la moyenne des déplacements est quasiment à 200 minutes de trajets ou un peu plus de 3 heures, avec à nouveau des valeurs proches selon les modes considérés en Figure 60, entre 2h30 et 4h. De nouveau, les temps de retard ont un impact relativement limité, augmentant de 5 % environ les temps de transport ferroviaires (+5 minutes en moyenne) et de 6 % les temps aériens (+11 min). Les temps d'attente ont un impact très significatif pour l'aérien, augmentant en moyenne les temps de parcours de plus

de 70 % par rapport aux temps commerciaux et d'attente (hypothèse d'une heure en amont du départ pour les trajets métropolitains et deux heures pour les trajets internationaux et avec l'Outre-mer, auxquels s'ajoutent 30 minutes à la sortie de l'avion). Pour les TGV, Intercités et autocars SLO (services librement organisés), les 20 minutes supposées d'attente augmentent les temps de transport de 12 % pour les trains et de 8 % pour les autocars. Les temps porte-à-porte, qui incluent les temps de pré- et post-acheminement sont élevés d'un tiers en plus pour le transport aérien (en supposant 2 x 45 minutes de trajets, à l'aéroport de départ et à destination), de l'ordre de +20 % pour les autocars et un peu plus de 25 % pour les trains longue distance (hypothèse 2 x 25 minutes ; voir méthodologie en 2.3.3 pour les sources des hypothèses). Enfin, les temps de préparation sont supposés de 40 minutes pour les trajets métropolitains et 2h pour les autres trajets en avion, qui sont davantage des voyages longs, pour lesquels la recherche des billets peut également être plus importante.
Ainsi, l'avion est le mode qui montre les temps de transport les plus élevés, en tenant compte en particulier des temps d'attente et d'accès. Etant donné que ces voyages sont aussi réalisés pour les séjours plus longs, ces temps de transport porte-à-porte largement au-dessus des autres modes se justifient. Les temps de transport légèrement plus élevés en autocars SLO pourraient être expliqués par les faibles coûts de transport du mode, qui font faire un arbitrage entre coût et temps de déplacement, séduisant davantage des personnes avec un faible coût du temps. Les temps par trajet apparaissent également un peu plus élevés pour la voiture, comparés aux temps commerciaux des autres modes. En revanche, les temps porte-à-porte sont comparables au ferroviaire et plus faibles que les autocars et avions.

Au total et pour l'ensemble des déplacements à courte et longue distance considérés :

- ✓ Les temps de **retard** correspondent à 2h25 par an ou 24 secondes par jour et par personne soit +0,6 % de temps de transport ; en moyenne sur l'année, les 2h25 se répartissent entre environ 1h20 pour le ferroviaire, 50 minutes pour les bus et cars, et 15 minutes pour l'aérien ;
- ✓ Les temps d'**attente** représentent un peu plus de 11h par personne chaque année et 1 minute 50 chaque jour d'après les estimations, soit quasiment +3 % de temps de transport ; le temps se répartit entre 4h20 pour les bus et cars, 3h40 pour le ferroviaire et 3h10 pour l'aérien ;
- ✓ Les temps d'**accès** sont estimés représenter un peu plus de 55 heures par an, soit quasiment 10 minutes par jour soit 14 % des temps de déplacements, des temps déjà inclus dans les temps de trajet initiaux ; même avec une estimation basse d'1 minute 30 pour les trajets en voiture, elle représente plus d'un tiers des temps d'accès estimés, devant les trains (32 %) et les bus et cars (25 %) ;
- ✓ Les temps de **préparation** sont moins tangibles et ne correspondent pas directement à des temps de déplacement à proprement parler ; l'estimation réalisée ici amène à 45 heures par an et un peu plus de 7 minutes par jour, ce qui correspond à un peu plus de 2 minutes par trajet en moyenne.

Etant donné ces **temps de transport similaires selon les modes** pour les déplacements de courte et de longue distance, **la vitesse des modes conditionnera fortement la portée moyenne des trajets**. Cette vitesse moyenne des modes sera l'objet de la partie 3.3.

Au-delà de ces différents temps de déplacements qui n'étaient pas inclus dans les chiffres du Tableau 14, **un deuxième élément important concerne les distances et les temps de parcours professionnels**. Une partie des déplacements professionnels est incluse, si elle concerne des déplacements en transports collectifs, en voiture (chauffeur de taxi, médecin de campagne, trajets pour un rendez-vous, etc.) ou les 60 % de déplacements en VUL qui sont assimilés à du transport de voyageurs (plombier, visite de chantier, ambulance, etc.).
Les déplacements non pris en compte concernent tout d'abord les **métiers mobiles** tels que les chauffeurs et conducteurs (hors taxis, déjà inclus dans les trafics voitures), que ce soit pour les 40 % du trafic en VUL affectés à du transport de marchandises ou des livraisons, les chauffeurs de poids-lourds, de bus, conducteurs de train ou pilotes d'avion. Calculer ces distances et temps de transport est relativement aisé, car ils correspondent aux trafics en veh.km et temps de parcours de ces modes. Pour les trains et davantage encore pour les avions, il s'agit d'inclure également le personnel à bord, tel que les contrôleurs, ou les personnes assurant les services aux voyageurs au wagon-bar ou dans les avions. Enfin, en plus de ces déplacements liés à des activités de transport, il y a également dans les activités professionnelles l'utilisation d'engins mobiles que sont les tracteurs et autres engins agricoles, les machines mobiles utilisées dans la sylviculture ou encore l'industrie. Il est estimé que ces temps de déplacements motorisés professionnels non pris en compte dans l'analyse représentent quasiment 7 minutes par jour, dominés par les temps de conduite de VUL, poids-lourds et engins agricoles (Figure 61 et Figure 62 ; voir annexe 2.1 pour les détails des hypothèses et calculs).
Ces temps de transport représentent quasiment l'équivalent de **10 % de temps supplémentaires** par rapport à l'analyse détaillée en Tableau 14. Etant donné que la majorité de ces temps de déplacements concerne des moyens de transport routiers, leur vitesse moyenne relativement importante implique également des distances significatives. Elles sont estimées à environ 100 Md voy.km environ ou 4,3 km/jour/personne, soit l'équivalent de **8 % des kilomètres** estimés précédemment (de 1216 Md voy.km et 51,4 km/jour ; cf Tableau 14).

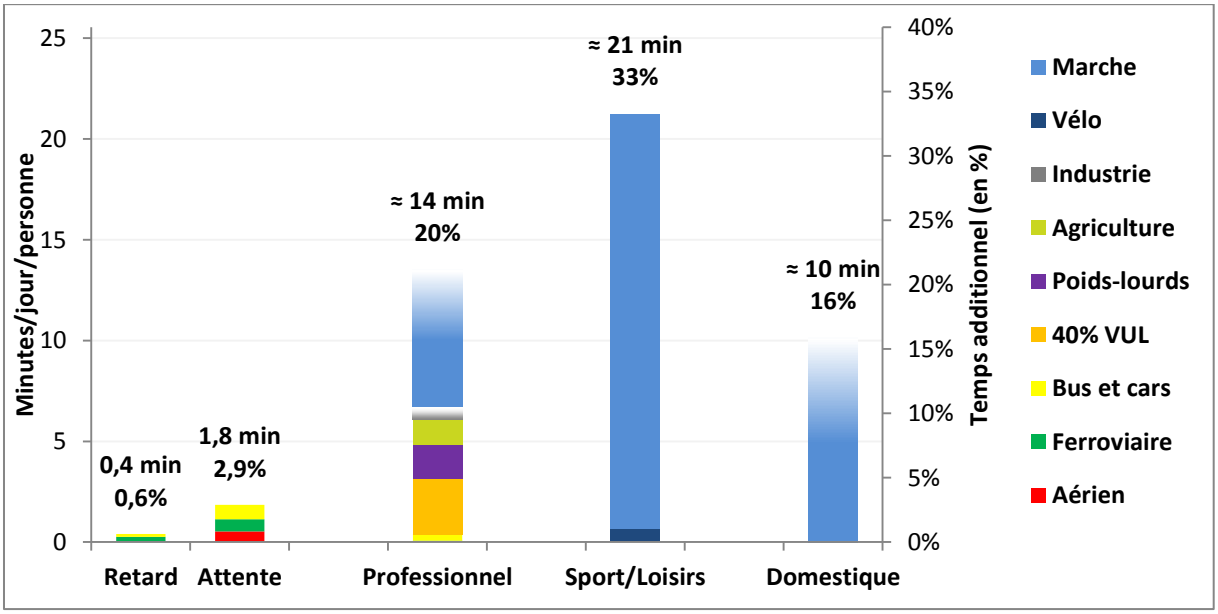


Figure 61 : Estimation des temps de déplacements non pris en compte dans l'analyse : temps de retard, d'attente, la partie des déplacements professionnels non prise en compte, ainsi que les déplacements de loisirs et domestiques
(dégradés pour les incertitudes liées à la marche et l'industrie ; détails des calculs en annexe)

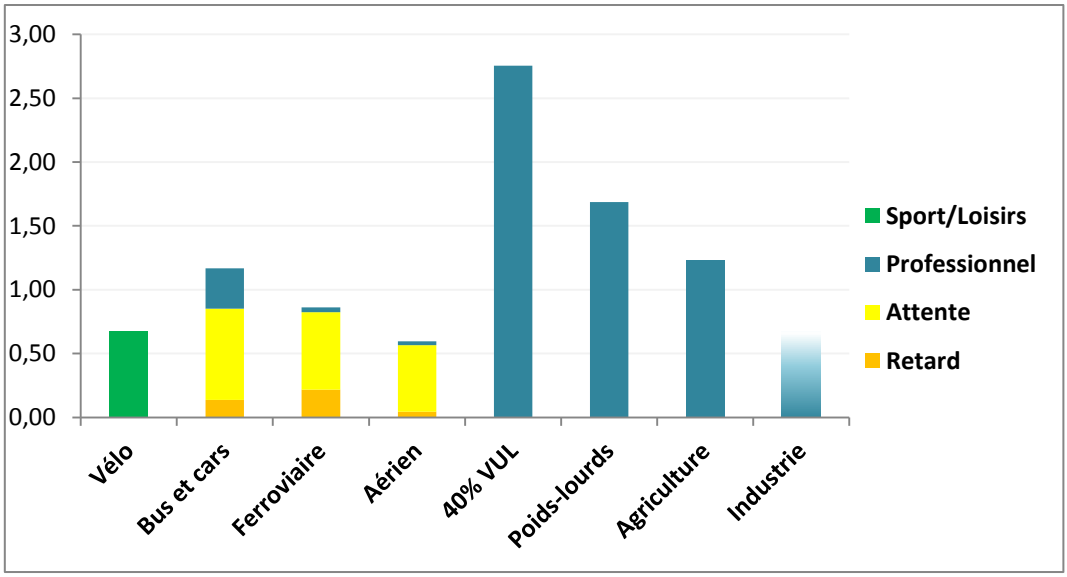


Figure 62 : Estimation des temps de déplacements additionnels par mode, hors marche à pied

Enfin, la dernière estimation, la plus difficile et la plus imprécise, concerne les **temps de déplacements à pied** essentiellement, et dans une moindre mesure à **vélo**, qui ne sont pas inclus dans l'analyse. Les ordres de grandeur de temps de déplacements sont très significatifs, en revanche les distances parcourues ont bien moins d'impacts sur les distances totales.

Ainsi l'analyse inclut les déplacements entièrement à pied et à vélo entre une origine et une destination, ainsi que les déplacements de ces modes en intermodalité, importants surtout pour la marche à pied et négligeables pour le vélo (données reprises de l'ENTD, CGDD, 2010 et Papon, 1999, 2012a). Les motifs de promenade ne semblent renseignés dans les enquêtes que très faiblement au vu des temps qu'ils représentent (en comparant par exemple l'ENTD avec les enquêtes emploi du temps). Les temps de déplacements dans l'analyse indiquent donc environ 14 minutes par jour et par personne en marche à pied, soit 0,8 km, dont quasiment la moitié réalisée en intermodalité. Pour le vélo, la moyenne est faible, avec un peu moins de 0,3 km et 1,3 minute par jour.

Les **temps de marche** au quotidien non inclus dans l'analyse, ont été estimés à partir des enquêtes emploi du temps, afin de fournir des ordres de grandeur probables de ce que représentent ces autres déplacements. Ils portent sur trois types d'usages : ceux de sport et loisirs, les enquêtes emploi du temps indiquant notamment quasiment 20 minutes par jour en moyenne pour les seuls usages de promenade ; la marche durant les activités professionnelles, pour laquelle aucune source de données à ce sujet n'a été trouvé, justifiant les incertitudes importantes ; enfin, les activités domestiques, qui incluent les courses et services, des temps de déplacements liés aux activités de jardinage et de déplacement internes au foyer.

Les résultats suggèrent des temps de marche à pied de l'ordre de **50 minutes par jour** et par personne en tout. La partie liée aux déplacements serait donc très probablement minoritaire (tel que suggéré par Papon, 1999), derrière les temps et distances parcourues dans le cadre des promenades et activités sportives (20 minutes), et probablement devant les activités domestiques et professionnelles (respectivement 7 et 10 minutes), bien que les incertitudes soient importantes pour ces motifs, en raison du manque de données suffisantes (Figure 61 ; voir détails des calculs en annexe 2.2). Les distances parcourues par jour et par personne seraient alors de l'ordre de **3 km** en marche à pied.

Concernant le **vélo**, les distances réelles parcourues pour les usages utilitaires, loisirs et sportifs seraient bien plus importantes que les chiffres de l'ENTD de 2008 (ADEME, 2020). Les chiffres globaux seraient de l'ordre de 11 Md voy.km, au lieu du chiffre de 6,3 Md voy.km utilisé pour l'estimation en 2017 (+0,2 km/jour).

Tous ces chiffres posent la **question de ce qu'il faut inclure ou non comme relevant des déplacements, et du bon périmètre de l'analyse**. L'objectif ici n'est pas de répondre à cette question, car le périmètre le plus pertinent dépend de la question que l'on se pose. Il est important cependant de comprendre les ordres de grandeur en jeu afin de mieux analyser l'impact du choix du périmètre sur les résultats et les phénomènes étudiés.
Le **périmètre utilisé dans l'analyse** du Tableau 14 puis étudié ensuite en évolution temporelle depuis 1960, semble relativement nouveau parmi les évaluations françaises. Il a pour objectif d'inclure l'ensemble des déplacements de voyageurs entre une origine et une destination de deux lieux séparés, pour l'ensemble de la population, pour tous les jours de l'année, déplacements à la fois de courte et longue distance confondus.
Ne sont pas inclus les temps de retard et d'attente des modes collectifs, au contraire des analyses en porte-à-porte. Ces deux éléments représenteraient un ajout de +3,5 % de temps de déplacements s'ils étaient inclus (+24s et 1m50 respectivement), soit un faible impact sur les résultats et l'analyse de leur évolution en partie 4.
Ne sont pas inclus non plus les déplacements motorisés qui ne sont pas considérés ici comme du transport de voyageurs, c'est-à-dire les temps de conduite des chauffeurs/conducteurs et temps de service du personnel des transports collectifs et transports de marchandises, de même que la conduite d'engins agricoles ou industriels. Ces temps en transports motorisés ajouteraient environ 10 % de temps (+7 min) et 8 % de distances (+4,3 km/jour) en plus.
Enfin, ne sont pas inclus les déplacements à pied (ou à vélo) au sein d'un même lieu (maison, magasin, usine, entreprise, etc.) ni ceux réalisés dans le cadre des loisirs, qui multiplieraient les temps et distances de déplacement par quasiment 4 pour la marche à pied et par 2 pour le vélo. Les distances totales seraient augmentées de quasiment 5 % et les temps de transport de 60 % (+38 min dont 0,7 de vélo ; +2,4 km dont 0,2 de vélo).

Ces évaluations complémentaires permettent d'apprécier ce que pourraient être des **distances et temps de déplacements globaux**, avec un périmètre le plus large possible.
Des distances de 1375 Md km auraient été parcourues par les Français en 2017, soit 46 % de plus que les chiffres des comptes des transports pour les voyageurs (de 941 Md km ; CGDD, 2019b). Cela correspond à 21 200 km par personne et par an, ou **58 km par jour**. Ces kilomètres sont réalisés dans des transports motorisés à 96 % (54,6 km) et plus faiblement en modes actifs (3,5 km).
Au total, les Français seraient en déplacement ou en mouvement (non immobiles) de l'ordre d'**1h49** par jour, dans des proportions équivalentes entre modes motorisés (55 minutes) et modes actifs (54 minutes). En ajoutant les temps de retard ou d'attente des modes collectifs qui sont potentiellement des temps immobiles, la durée se porte à 1h51 par jour.
La vitesse des mouvements motorisés atteint quasiment **60 km/h**, et quasiment deux fois moins à **32 km/h** pour l'ensemble des déplacements ou moments en mouvement confondus.

3.3.Estimer une vitesse moyenne des déplacements

Points et messages clés :

- ✓ La vitesse moyenne des déplacements est estimée à **48,2 km/h**, international inclus ; en porte-à-porte, elle est de **32 km/h** et **104 km/h** pour la courte et longue distance.
- ✓ Les principales **limites à la vitesse** sont contrastées selon les modes : physiologiques pour les modes actifs ; insécurité et usage de l'espace pour la voiture ; possibilités techniques et dessertes pour le ferroviaire ; coût notamment énergétique pour l'aérien.
- ✓ Les **vitesses sont croissantes avec la distance parcourue** : plus elle est importante, plus il est possible d'accéder à des modes et des infrastructures rapides, la distance du trajet permettant aussi d'amortir les temps d'attente et d'accès aux modes collectifs.

3.3.1. La vitesse moyenne des déplacements

L'analyse précédente a permis de détailler la méthodologie d'estimation des temps de transport selon les différents périmètres, entre les temps de parcours moyens des modes en circulation, la prise en compte des temps de retard, d'attente, d'accès et de préparation.

De manière symétrique aux temps de parcours qui augmentent lorsque des temps additionnels sont ajoutés, les vitesses moyennes considérées diminuent.

Le Tableau 14 donne une vitesse moyenne des modes en circulation de **48,2 km/h**, et de **42,2 km/h** pour les seuls trajets intérieurs (hors aérien international ; voir les chiffres cités en gras dans le Tableau 15). Ces vitesses incluent les distances et les temps d'accès aux différents modes comme des déplacements de courte distance, tels que la marche réalisée en intermodalité pour accéder à la voiture ou au tramway. En se limitant au seul mode principal de chaque déplacement (temps d'accès exclus), les vitesses apparaissent plus élevées, de **53,5 km/h** pour les trajets international compris.

Sur la courte distance, la vitesse moyenne des modes principaux employés est de **35,9 km/h** (hors temps d'accès, qui sont répartis dans les déplacements à courte et longue distance pour calculer les vitesses porte-à-porte). En incluant les retards, l'attente et les temps d'accès pour ces trajets courte distance, la vitesse porte-à-porte moyenne obtenue est de **32,3 km/h**.

Pour les trajets à longue distance, la vitesse moyenne des modes principaux est de **90 km/h** pour les trajets intérieurs et de **121 km/h** pour l'ensemble des trajets. Les vitesses porte-à-porte sont réduites respectivement à **81** et **104 km/h** en tenant compte des temps de retard, d'attente et d'accès (pré- et post-acheminement).

Enfin, la vitesse porte-à-porte pour l'ensemble des déplacements est de **41,1 km/h** pour les trajets intérieurs et 46,6 km/h pour les trajets totaux, international compris.

Tableau 15 : Vitesse moyenne des déplacements totaux, à courte et longue distance

	International	Temps d'accès	Vitesse en circulation	Vitesse avec retard	Vitesse avec attente	Vitesse porte-à-porte	Vitesse avec préparation
Total	exclus	compris	**42,2**	42,0	41,1	**41,1**	37,0
		exclus	47,2	46,9	45,7		
	compris	compris	**48,2**	47,9	46,6	**46,6**	41,9
		exclus	**53,5**	53,1	51,4		
Courte distance		compris	32,5	32,3	31,7	**32,3**	29,2
		exclus	**35,9**	35,6	34,8		
Longue distance	exclus		**90**	89	86	**81**	72
	compris		**121**	120	113	**104**	91

3.3.2. La vitesse moyenne des modes : des records à la vitesse porte-à-porte

Il a été vu précédemment que les temps moyens des trajets dans les différents modes de transport étaient relativement similaires, lorsque les trajets à courte et longue distance sont séparés. Ces durées d'environ 15 minutes à courte distance et 200 minutes à longue distance reflètent les temps de déplacements que sont prêts à accepter en moyenne les voyageurs pour des trajets du quotidien, ou pour des trajets plus exceptionnels réalisés dans l'objectif de séjours plus longs.

En revanche, **les vitesses moyennes des différents modes apparaissent très contrastées entre les modes, et même au sein d'un même mode**. Ainsi les vitesses commerciales ou en circulation sont en moyenne de plus de 700 km/h pour les trajets en avion, de 73 km/h pour le ferroviaire, 53 km/h pour la voiture (ici considérée au sens large comme le routier individuel, y compris VUL et 2RM), 36 km/h pour les bus et cars, 12 km/h pour le vélo et 3,6 km/h pour la marche. Le rapport est de 1 à 200 entre la marche et l'avion, il est de 1 à 13 pour la courte distance (entre 3,6 km/h pour la marche et 46 pour la voiture) et de manière proche de 1 à 14 pour les modes les plus utilisés à longue distance (51 km/h pour les cars et 728 pour l'avion ; Tableau 14). Ces contrastes sur les vitesses expliquent les différences importantes entre les modes sur les distances moyennes par trajet, étant donné que les temps de trajets sont proches.

Les vitesses moyennes sont également contrastées au sein d'un même mode, notamment pour les modes routiers selon les types de réseaux urbains, ruraux ou autoroutes (respectivement 30, 55 et 80 km/h en moyenne pour les voitures ; ces réseaux regroupant des vitesses autorisées variées, cf méthodologie). Cela est encore plus vrai pour le mode ferroviaire, dont les vitesses commerciales varient entre 18 km/h pour les tramways et 158 km/h pour le TGV, soit environ 9 fois plus.

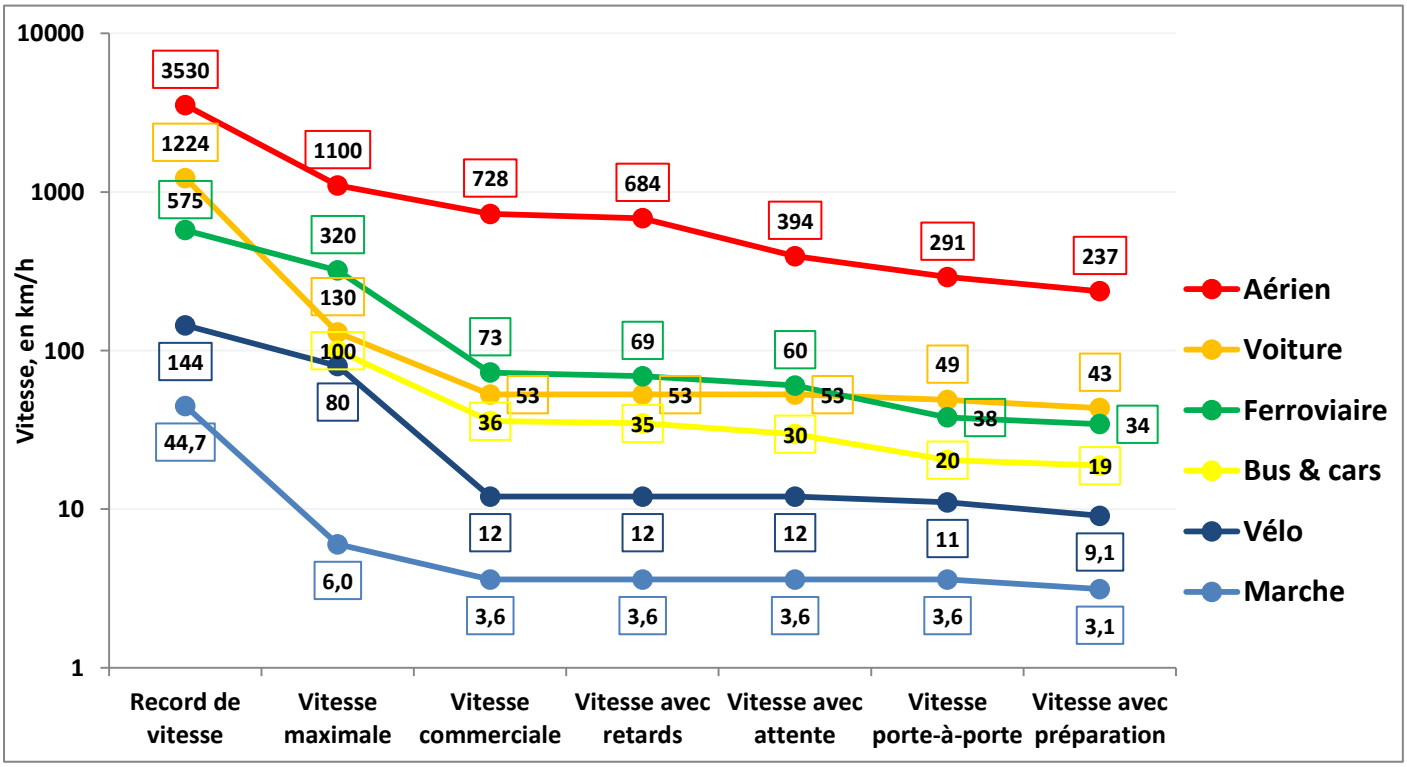


Figure 63 : Records de vitesse, vitesse maximale en circulation, vitesse commerciale (ou en circulation), avec retards, attente, vitesse porte-à-porte et avec temps de préparation, pour les modes considérés (échelle logarithmique)

De plus, les vitesses commerciales moyennes sont pour beaucoup de modes éloignées des vitesses maximales autorisées pour ces modes, et davantage encore des records de vitesse. Ces éléments de vitesses maximales et de vitesses moyennes selon les périmètres considérés sont mis en évidence pour les 6 principaux modes de transport en Figure 63 ci-dessus.
Selon les périmètres, la hiérarchie des modes en termes de vitesse est conservée quelques soient les critères, hormis entre ferroviaire et voiture. Ainsi le record de vitesse pour un mode terrestre (type voiture, bien que le véhicule en soit très différent) est bien supérieur au ferroviaire, mais la vitesse maximale autorisée en France est bien supérieure pour le TGV que pour la voiture. La vitesse commerciale moyenne des trains est un peu plus importante que la vitesse moyenne de circulation des voitures, mais la vitesse porte-à-porte est supérieure pour la voiture en raison essentiellement des temps d'accès et d'attente en gare.

Les écarts entre les records, les vitesses maximales et les vitesses moyennes porte-à-porte permettent aussi de poser la **question des limites à la vitesse** selon les modes : pourquoi les vitesses porte-à-porte s'éloignent autant des capacités techniques atteintes lors des records de vitesse (rapport de 1 à 12 pour l'aérien, la marche et le vélo ; 1 à 15 pour le ferroviaire ; 1 à 25 pour la voiture) ? Qu'est-ce qui limite la diffusion de telles vitesses pour les déplacements quotidiens ? Pourquoi des différences si fortes entre courte et longue distance, y compris pour un même mode ?
Les records de vitesse des différents modes proviennent de **progrès techniques importants** en particulier sur les moteurs, progrès qui se sont diffusés de manière relativement similaire pour les différents modes, couplés à des progrès sur les véhicules ou les infrastructures. En revanche, **les limites à vitesse diffèrent de manière assez significative selon les modes**.

Concernant les **modes actifs** que sont la marche et le vélo, les limites sont avant tout physiologiques, ce qui explique le fait que la vitesse de la marche à pied n'a pas évolué récemment, et que les vitesses à vélo sont proches des débuts de la bicyclette (comme évoqué dans l'historique en 4.1.2).
Les vitesses de la **marche** varient légèrement selon la forme physique des personnes, dans des proportions qui restent limitées tant que la course à pied n'est pas envisagée. Même si Usain Bolt atteignait 44,7 km/h lors de la partie la plus rapide de son record sur 100m en 2009, et que le record du monde du 50 km marche par Yohann Diniz s'est fait à 14,11 km/h de moyenne, il est difficile d'atteindre plus de 6 km/h pour des déplacements du quotidien. La course reste marginale pour des usages de déplacements, en raison de la dépense énergétique qu'elle implique et des possibilités limitées de transport de bagages. Elle se limite surtout pour le moment à des circonstances particulières liées à un retard pour un bus ou un train, permettant d'éviter de perdre beaucoup de temps pour un effort limité. Cependant, la pratique choisie de déplacements utilitaires en courant, tel que du jogging pendulaire, se développe dans le monde, phénomène qui semble peu répandu et étudié en France (Cook, 2019).
Concernant le **vélo**, les progrès successifs apportés en particulier sur la fin du XIXème siècle sur la draisienne et la bicyclette (pédales, chaîne, dérailleur avec différentes vitesses, progrès sur les boyaux et les pneus, sur la réduction du poids, etc.) ont permis de rendre plus facile les parcours à vélo, sans toutefois en augmenter très fortement la vitesse. Aussi la vitesse à vélo dépend de nombreux paramètres, qui tiennent au véhicule lui-même (taille des pneus, poids,

qualité des transmissions, etc.), au type de route et de conditions de circulation (revêtement, pente, vent et nombre d'arrêts en particulier), et enfin au poids et à la puissance développée par le cycliste. Une puissance utile de l'ordre de 100 Watts est généralement considérée pour un cycliste moyen (elle correspond à quasiment 6 METS[1], soit la limite entre activité modérée et intense). Cette puissance permet d'atteindre de l'ordre de 16 km/h. En comparaison, la marche à 5 km/h nécessite une dépense énergétique deux fois inférieure (un peu plus de 3 METS) et la course à pied à 12 km/h une dépense deux fois plus importante (environ 12 METS ou 200 W ; Jetté et al, 1990 ; Ainsworth et al, 2000). Ainsi le vélo apparaît comme le mode de transport le plus efficace d'un point de vue énergétique, devant la marche qui est elle-même bien plus efficace que les transports en commun, puis la voiture (Papon, 2012b). Cependant la puissance disponible de l'être humain est limitée par rapport aux possibilités des transports motorisés : la voiture moyenne vendue en France en 2017 possède une puissance de 86 kW, soit quasiment 1000 fois plus que l'effort modéré d'un être humain (ICCT, 2019). Les deux possibilités les plus fortes pour augmenter la vitesse du vélo à l'avenir concernent le vélomobile et le vélo à assistance électrique (VAE). Le vélo mobile est un tricycle ou un vélo couché caréné, cette carrosserie aérodynamique permettant de gagner fortement en vitesse, c'est d'ailleurs ce type de véhicule qui détient le record mondial de vitesse pour un véhicule à propulsion humaine de 144 km/h sur du plat. Sans grand entraînement, il est possible d'atteindre une vitesse de 40 km/h relativement facilement. Concernant les vélos à assistance électrique, ils apportent un supplément de 250 W au pédalage du cycliste, permettant de faciliter les parcours vallonnés et d'atteindre plus facilement des vitesses jusqu'à 25 km/h. Si l'assistance au pédalage s'arrête au-delà de cette vitesse, c'est en particulier pour des questions de sécurité, une limite majeure aux augmentations de vitesses pour les véhicules routiers motorisés.

En effet, les deux principales externalités limitant les vitesses des **véhicules routiers** depuis de nombreuses décennies sont l'insécurité et la congestion.
Si dès le début du XXème siècle les progrès techniques permettaient de construire des véhicules roulant à plus de 140 km/h, le principal argument des revendications opposées aux vitesses excessives a toujours été celui du danger que cela représentait pour les occupants et les autres usagers. Cette considération est valable aussi bien pour les déplacements urbains et interurbains, pour les différents types de réseaux pour lesquels des limitations de vitesse ont progressivement été mises en place. Ce mouvement étalé sur plusieurs décennies visant à réduire les vitesses pratiquées par type de réseau (par la réglementation, les contrôles, les campagnes de communication, etc.) est toujours en cours, avec la récente baisse à 80 km/h sur les routes secondaires sans séparateur central, et la multiplication des zones et villes à 30 km/h. Des progrès très importants ont été réalisés sur la sécurité routière en général et sur la modération de la vitesse notamment, permettant de faire baisser le nombre de personnes tuées sur les routes d'environ 16 500 en 1972 à environ 3500 ces dernières années (Orselli, 2009 ;

[1] Les METS sont des *Metabolic Equivalent of Task*, ou équivalents métaboliques, qui mesurent l'intensité d'un effort physique et de sa dépense énergétique. 1 METS correspond à la dépense au repos, assis ; 2 METS en étant debout ; l'activité est considérée faible sous 3 METS, modérée jusqu'à 6 METS et intense au-delà. L'OMS (organisation mondiale de la santé) préconise 30 minutes par jour ou 150 minutes par semaine d'activité modérée à intense.

ONISR, 2020). Cependant, la vitesse excessive ou inadaptée reste la première cause d'accidents mortels sur les routes, en étant citée dans 29 % des cas (ONISR, 2019).
La deuxième limite majeure à la vitesse routière concerne la congestion, et plus largement les notions de capacité des infrastructures, de gestion des circulations, d'espace public disponible ou encore de demande d'espace-temps à la mobilité en voiture, qui est minimale autour de 30 km/h (Héran, 2013). Ces phénomènes sont particulièrement sensibles en milieu urbain, et également sur des axes de trafics chargés. Les embouteillages limitent de fait la vitesse, mais plus globalement la rareté de l'espace public disponible en milieu dense et surtout les niveaux importants de trafics obligent à réaliser des aménagements qui ralentissent les circulations même lorsque le trafic est très faible. C'est le cas par exemple des feux de circulation ou ronds-points, qui visent à fluidifier et donc à augmenter les vitesses lorsque le trafic est dense, mais le ralentissent quand le trafic est très faible. Enfin, la rareté de l'espace public et du stationnement dans les zones denses peut impliquer des temps de recherche de stationnements voiture et de s'éloigner de la destination finale pour trouver une place, rallongeant et ralentissant ainsi les trajets porte-à-porte.
Enfin, la modération des vitesses peut également être promue en milieu urbain pour limiter le bruit, les effets de coupure des infrastructures rapides, améliorer la qualité de vie et l'attractivité des villes, ou baisser la pollution (Héran, 2016 ; Desjardins, 2015). Ce dernier effet lié aux consommations de carburants est surtout sensible sur les routes les plus rapides, les effets étant ambivalents pour les vitesses plus réduites. Il est possible que cet effet soit déjà sensible en particulier lors des hausses de prix du pétrole, comme suggéré par deux sondages où la baisse de vitesse était citée comme la deuxième stratégie adoptée par environ 40 % des automobilistes pour réduire la consommation de carburants (IFOP, 2008, 2011). Ce critère pourrait prendre de plus en plus de poids dans les régulations de vitesse futures, comme il sera discuté en partie 4.3.3.

Les limites à la vitesse du transport **ferroviaire** sont encore différentes du routier, pour les plus significatives d'entre elles.
Pour la grande vitesse, les vitesses maximales ont d'abord été de 270 km/h pour la première mise en service en 1981, relevées ensuite à 300 km/h, puis 320 km/h sur les portions de LGV les plus rapides. Le train est le mode motorisé pour lequel la vitesse commerciale est la plus proche des possibilités techniques réalisées à ce jour. Le record du monde sur rail, réalisé en France, est de 574,8 km/h, soit un rapport de 1 à 1,8 entre la vitesse commerciale maximale et le record du monde, contre 3,2 pour l'aérien et 9,4 pour la voiture. Le rame ayant réalisé le record correspond d'ailleurs à du matériel modifié, ayant servi avant le record et étant encore utilisé actuellement pour du service commercial. La grande vitesse nécessite bien évidemment des véhicules plus rapides, mais également voire surtout des contraintes plus fortes sur les infrastructures, tels que des courbes très larges, de faibles pentes ou une adaptation de la signalisation ferroviaire. Ainsi ces vitesses nouvelles demandent des infrastructures spécifiques, bien qu'un grand nombre de TGV roulent également sur des lignes classiques, où la vitesse maximale est généralement de 160 km/h sur les grandes lignes. S'il ne semble pas à l'ordre du jour d'augmenter davantage les vitesses au-delà de 320 km/h, c'est parce que la vitesse a un coût (en énergie, en usure des voies ou du matériel ferroviaire) pour des gains de temps marginaux de plus en plus faibles. Ainsi augmenter les vitesses de 320 à 360 km/h ne

représenterait qu'un gain de l'ordre de 2 minutes pour 100 km parcourus à la vitesse maximale (de 18 min 45 à 16 min 40 pour 100 km, soit -11 %). Ces gains sur les temps de parcours commerciaux seraient relativement faibles en comparaison des temps de parcours porte-à-porte, pour lesquels les retards, et surtout les temps d'attente et d'accès représentent une part importante du temps total, de l'ordre d'1h15 pour le trajet moyen en TGV, soit l'équivalent d'un tiers des temps commerciaux moyens (cf Figure 60). Ces estimations ne prennent pas en compte les éventuels changements de train du voyage, qui réduiraient encore les vitesses porte-à-porte présentées.
Plus les trains réalisent une desserte fine du territoire avec de nombreux arrêts, moins la vitesse maximale entre les gares n'aura d'importance. Sur les TER et davantage encore pour les trains de banlieue, le métro ou le tramway, les facteurs tels que le nombre d'arrêts, le temps de descente et de montée des voyageurs du train, ainsi que l'accélération et la distance de freinage du train ont des impacts très significatifs sur la vitesse commerciale. Aussi, au-delà de la vitesse, la fréquence des trains prend davantage d'importance pour les voyageurs, afin de limiter leurs temps de parcours totaux en réduisant l'attente en gare. Comme pour la longue distance, les temps d'accès influent également de manière forte sur les vitesses porte-à-porte (cf Figure 64).

Enfin, l'**aviation** est le mode de transport le plus rapide, quel que soit le périmètre considéré en Figure 63. Les vitesses commerciales maximales des principaux avions vendus dans le monde approchent les 1100 km/h, soit une vitesse proche de la celle du son (vitesse de Mach 0,89 pour le Boeing 777 ; Mach 1 correspond à la vitesse du son). Le franchissement du mur du son, au-delà du bruit que cela génère, ne constitue pas une limite infranchissable y compris pour l'aviation commerciale. En effet, le Concorde a été en service commercial sur une longue période, entre 1976 à 2003. Sa vitesse, environ deux fois plus élevée que les avions subsoniques actuels, était techniquement possible mais très coûteuse pour du transport de voyageurs, la limitant à une poignée de privilégiés. C'est ainsi qu'un aller-retour Paris - New York coûtait 15 fois plus cher en Concorde qu'en avion subsonique en 2003, lui conférant une vitesse généralisée bien plus faible pour la majorité des passagers réalisant cette relation (Crozet, 2016). Le coût des carburants était notamment un facteur limitant qui a expliqué en partie la fin du Concorde, les consommations par passager étant de l'ordre de 5 fois plus importantes que pour les avions actuels (de l'ordre de 900 L contre 170 L par passager pour un Paris - New York ; DGAC, 2020).
Comme évoqué en partie 3.2.3 sur les temps de transport, la vitesse porte-à-porte de l'aviation est également fortement impactée par les temps d'accès et les temps d'attente, qui sont plus importants que les temps moyens de vol. Ainsi la vitesse commerciale de l'ensemble des avions en France est 2,5 fois plus importante que la vitesse porte-à-porte (728 et 291 km/h), la plus forte différence parmi les modes de transport. Cet écart est plus fort encore pour les courtes distances (3,6 pour les trajets métropolitains) et moins fort pour les trajets à longue distance (1,5 pour les trajets avec l'Outre-mer).

Au final, les limites de la vitesse apparaissent très variées selon les modes. Les **limites à la vitesse moyenne globale** dépendent à la fois des limites de chaque mode, et des possibilités de diffusion des modes les plus rapides dans les déplacements (cf partie 4.2.1 à venir).

3.3.3. Courte distance, longue distance et constantes de mobilité

De nombreuses limites à la vitesse sont particulièrement sensibles pour des déplacements de courte distance. C'est le cas des temps d'accès aux modes ou aux réseaux rapides, qui représentent des fractions d'autant plus importantes du temps de parcours porte-à-porte que la distance du trajet est courte. C'est également le cas des contraintes de sécurité et de congestion routières qui sont fortes en milieu dense, là où se situent la majorité des points d'origine et de destination des déplacements.

C'est ainsi que la vitesse porte-à-porte des déplacements est croissante avec la distance parcourue. Dit autrement, **plus les déplacements sont longs, plus ils sont rapides**. Cela est valable :

- ✓ **Pour l'ensemble des déplacements** : les déplacements à longue distance sont plus rapides que ceux à courte distance comme il a été vu précédemment ; au sein de chaque catégorie, la vitesse augmente également avec la distance parcourue ;
- ✓ **Selon les modes** : plus les déplacements sont longs, et plus ils sont réalisés avec des modes de transport rapides au détriment des plus lents, ainsi la marche n'est plus utilisée comme moyen unique à partir de quelques kilomètres, et l'avion devient possible pour des déplacements d'au moins quelques centaines de km ;
- ✓ **Au sein d'un même mode** : les plus longs trajets permettent d'utiliser des réseaux plus rapides, tels que les autoroutes pour la voiture ; ou d'utiliser des trains plus rapides, passant progressivement du domaine de pertinence du tramway à celui du TER puis du TGV, quand le trajet effectué permet l'utilisation de ces modes ;
- ✓ **Pour un même réseau ou sous-mode de transport** : la vitesse moyenne porte-à-porte du TGV est d'autant plus élevée que le trajet est long, en raison du caractère quasiment incompressible des temps d'accès ou d'attente en gare.

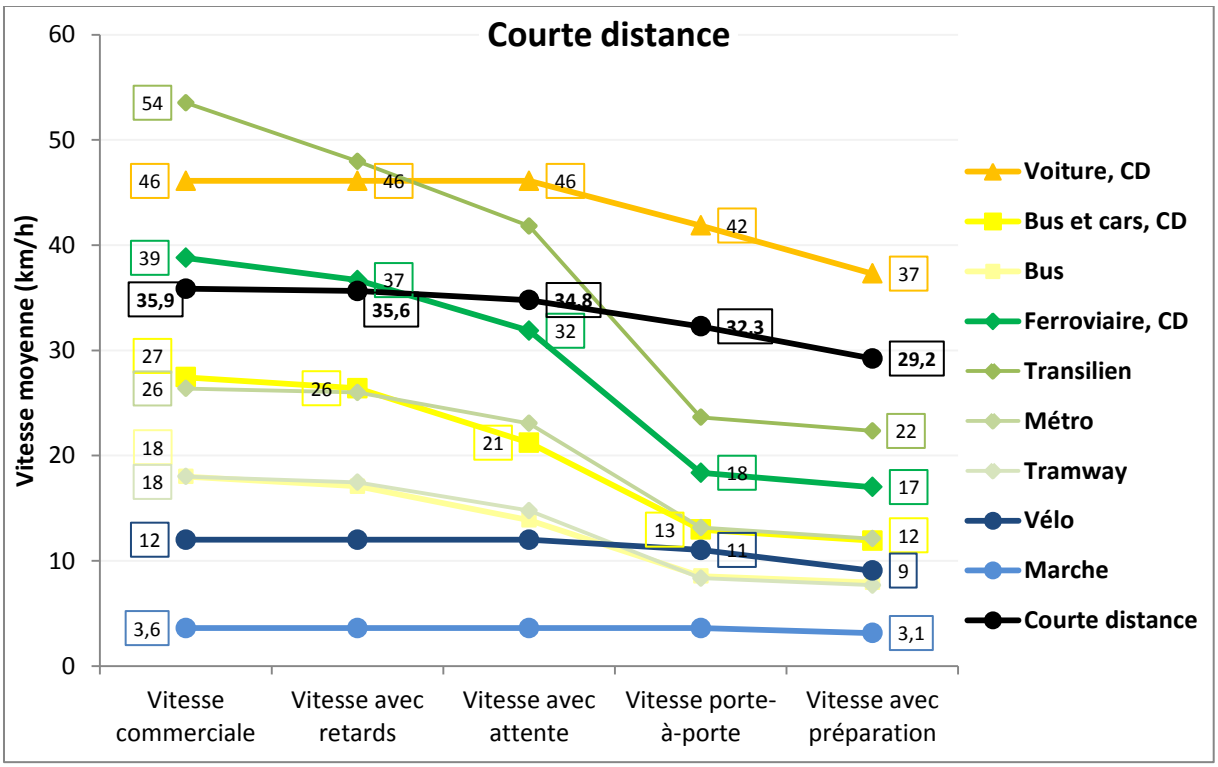


Figure 64 : Vitesse moyenne des modes de transport sur courte distance, selon le périmètre considéré
(calculs en tenant compte des seuls temps de circulation, puis avec les retards, temps d'attente, d'accès et de préparation)

La Figure 64 ci-dessus représente la **vitesse moyenne des modes de déplacements à courte distance**. Si les temps de parcours de ces différents modes apparaissaient très proches (cf partie 3.2.3, Figure 59), les vitesses sont au contraire très contrastées, aussi bien pour les vitesses en circulation (ou commerciales) que les vitesses porte-à-porte. En raison de la relative constance des temps de trajet par mode, cette vitesse est le principal déterminant des distances moyennes des trajets. Ces distances sont elles aussi très contrastées (Tableau 14), variant de 0,8 km pour la marche à pied à 11 km pour la voiture, un écart supérieur à un facteur 12 que l'on retrouve également sur les vitesses porte-à-porte.

La figure indique également que les transports en commun sont fortement impactés par les temps d'accès aux gares et points arrêts, de même que par les temps d'attente. Par exemple, la vitesse moyenne commerciale des trajets en train à courte distance (tramways + métros + Transilien + 50% des TER) est de 39 km/h. Elle descend à 37 km/h en tenant compte des retards, à 32 km/h avec les temps d'attente et 18 km/h avec les temps d'accès.

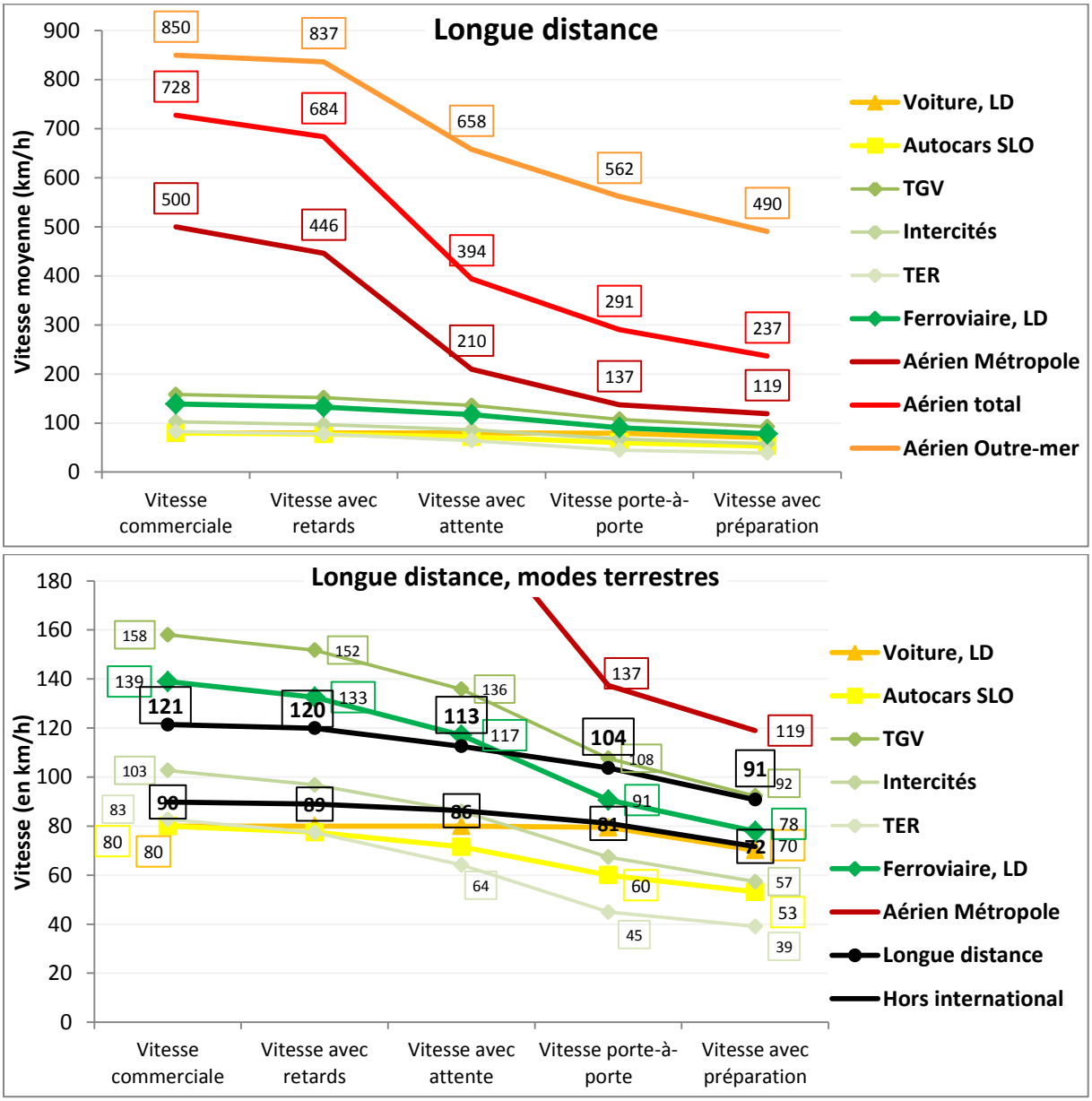


Figure 65 : Vitesse moyenne des modes de transport sur longue distance, selon le périmètre considéré
(tous modes en haut, et détails pour l'aérien ; zoom sur les modes de plus faibles vitesses en bas)

La Figure 65 ci-dessus présente les mêmes résultats de **vitesses moyennes**, mais pour les **modes de transport utilisés pour la longue distance**. La figure du haut montre que le transport aérien est le seul mode à atteindre des vitesses porte-à-porte supérieures à plusieurs centaines de km/h. C'est pourquoi il est le seul mode à réaliser des trajets de plusieurs milliers de kilomètres de manière massifiée. Les autres modes tels que le routier et le ferroviaire sont généralement trop lents pour de telles distances. De plus, ils ne permettent pas de traverser les océans, et le succès de l'aérien n'a pas encouragé à développer d'autres infrastructures adaptées, tel que du TGV de nuit international, qui aurait été théoriquement possible. Aussi les vitesses de l'aérien sont d'autant plus importantes que la distance parcourue est élevé, en raison du poids des temps d'accès et d'attente dans les temps de trajet totaux. Ainsi la vitesse porte-à-porte est estimée à 562 km/h pour les trajets avec l'Outre-mer dont la distance moyenne est de 7700 km, tandis que la vitesse est de l'ordre de 137 km/h pour les seuls trajets métropolitains dont la distance moyenne est d'environ 600 km (Tableau 14).
La figure du bas montre que cette vitesse sur les trajets métropolitains n'est pas beaucoup plus élevée que celle du TGV, qui est de 108 km/h en porte-à-porte. Cette dernière vitesse incluant également les TGV qui roulent sur ligne classique, ces moyennes cachent bien sûr de nombreux trajets pour lesquels le TGV est plus rapide, en particulier entre les centres villes de Paris et Marseille, ou encore Paris et Bordeaux. En revanche, le réseau ferroviaire et en particulier le réseau des LGV étant surtout développé depuis Paris, l'aérien reste plus rapide sur de très nombreux trajets transversaux qui nécessitent facilement des correspondances (non considérées dans les vitesses moyennes présentées), d'où la progression du trafic aérien sur ces relations.
En dehors du transport aérien, les moyennes des vitesses des autres modes sont moins contrastées, autour de 80 km/h en vitesse commerciale pour les autocars SLO et pour la voiture aussi bien en vitesse de circulation qu'en porte-à-porte. Les temps d'accès et d'attente pénalisent en revanche le ferroviaire, comme pour la courte distance, qui reste en moyenne légèrement plus rapide que la voiture sur longue distance (TGV, Intercités et 50 % des TER).

Une accélération significative des déplacements est visible pour les déplacements à longue distance par rapport à ceux à courte distance. Ainsi les vitesses porte-à-porte y sont plus de 3 fois plus élevées, avec 32 km/h à courte distance contre 104 km/h à longue distance, aérien international compris (et 81 km/h hors international).
L'accélération s'explique en partie par l'accès à des modes différents, les trajets aériens étant réservés à la longue distance et ceux uniquement à pied ou à vélo à la courte distance. Mais cette accélération est également valable pour les modes utilisés à la fois sur des trajets de courte et de longue distance : les vitesses porte-à-porte y sont quasiment 2 fois plus élevées pour la voiture (passage de 42 à 79 km/h), plus de 3 fois plus élevées pour les transports collectifs routiers (13 et 46 km/h, et 60 km/h pour les seuls autocars SLO), et 5 fois plus élevées pour le ferroviaire (18 et 91 km/h). Les différences sont très significatives pour ce mode, et d'autant plus en considérant les 6 catégories étudiées : ainsi la vitesse moyenne porte-à-porte est de 8 km/h pour le tramway, 13 km/h pour le métro, 24 km/h pour les RER et Transilien, 45 km/h pour les TER, et 67 km/h pour les Intercités, et 108 km/h pour les TGV. A ces vitesses correspondent des distances parcourues variées. Ainsi la vitesse moyenne des trains augmente régulièrement avec la distance des parcours (Figure 66).

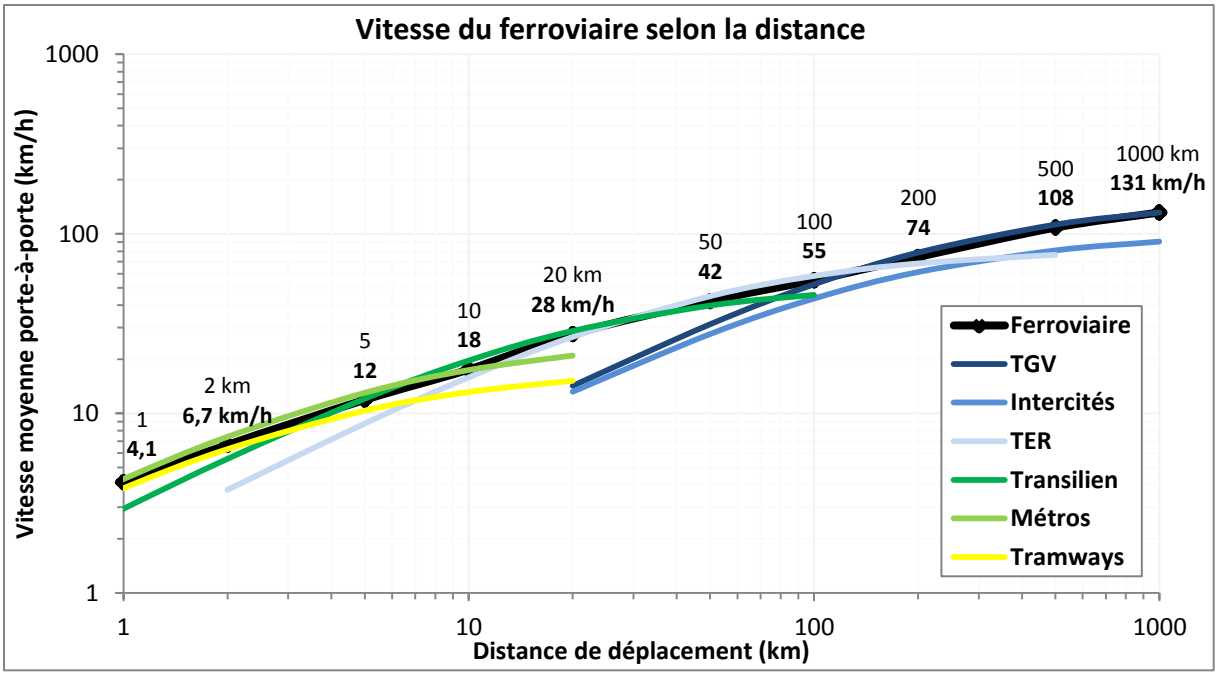


Figure 66 : Vitesse moyenne porte-à-porte des déplacements en train selon la distance parcourue

A un niveau plus global, cette **accélération avec les distances** apparaît de manière quasiment régulière, sous l'effet de l'accès aux modes plus rapides, mais également de l'accélération propre à chaque mode (Figure 67). Un déplacement de 100 m est donc réalisé en moyenne à 3,6 km/h (car réalisé essentiellement à pied), 5,5 km/h pour 1 km, 32 km/h pour 10 km, 65 km/h pour 100 km, 123 km/h pour 1 000 km, et 609 km/h pour 10 000 km (réalisé en avion).

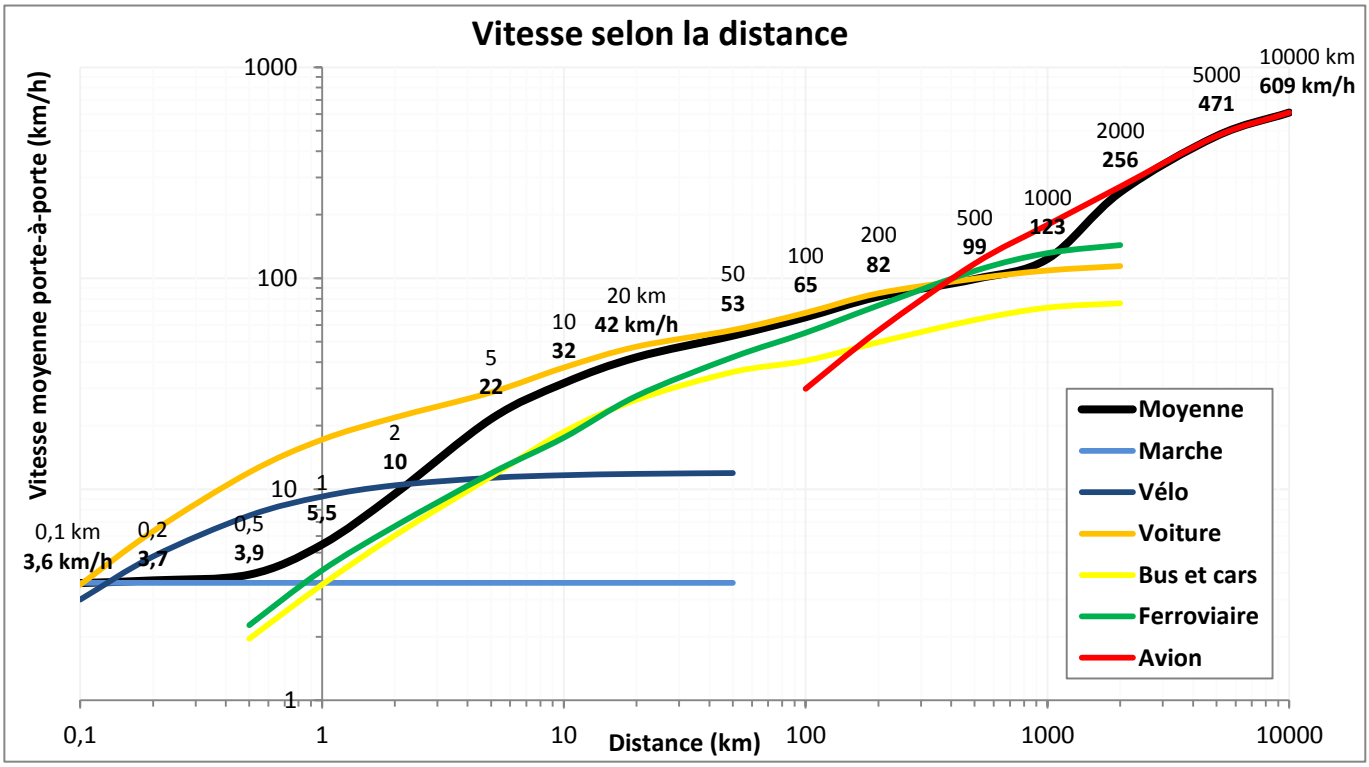


Figure 67 : Vitesse moyenne porte-à-porte des déplacements selon la distance parcourue
(graphique avec échelle logarithmique pour les distances en abscisse et pour les vitesses en ordonnée ; les étiquettes de données donnent les vitesses en gras pour différentes distances ; par exemple, la vitesse moyenne estimée pour les trajets de 20 km est de 42 km/h ; répartition entre les modes et sous-modes pour une distance donnée tirée notamment des distances moyennes et trafics de chaque mode et sous-mode, et de Insee, 2017 pour la courte distance, CGDD, 2018a pour la LD)

La voiture apparaît en moyenne comme le mode le plus rapide jusqu'à des distances de 400 km, où elle est dépassée simultanément par le train et l'avion. Cette moyenne cache bien sûr des disparités importantes selon les lieux, l'état du trafic, ou encore l'accès aux modes et infrastructures rapides (proximité d'une autoroute, d'une gare TGV ou d'un aéroport, notamment). La vitesse moyenne de la voiture utilisée pour les calculs des premiers km en Figure 67 est de 30 km/h, avec des temps de pré- et post-acheminement d'1 min 30. Ces hypothèses peuvent sembler particulièrement optimistes en milieu urbain où le vélo et les transports en commun sont quasiment aussi rapides (6t, 2015), voire plus rapides si le trafic est fortement congestionné. Au contraire, une vitesse porte-à-porte de 22 km/h pour 5 km peut paraître très faible comparée à un trajet rural entre 2 communes où une vitesse porte-à-porte de 60 km/h (5 minutes) est tout à fait possible. Ces écarts à la moyenne sont valables également pour les autres modes, dans des proportions variées.

Malgré les disparités qui existent autour des constantes de mobilité déjà identifiées dans la littérature et étudiées ici, ces **constantes de temps ont un pouvoir explicatif important**. Si elles ont permis ici de mieux expliquer les distances moyennes des trajets, elles peuvent aussi être utilisées pour étudier l'impact climatique d'un changement de mode de transport (en gCO_2/h de trajet, cf partie 4.3.3) ou le coût économique des modes pour les usagers (Figure 68). Ainsi les coûts par heure de trajet donnent une autre lecture à celle généralement utilisée de coûts en kilomètre parcouru (à gauche ; coût marginal ou coût complet en incluant également en particulier l'amortissement du véhicule). Si la mesure par km parcouru montre des ordres de grandeur relativement contenus entre les modes, les disparités sont beaucoup plus fortes par heure de trajet. Cette seconde mesure explique probablement mieux pourquoi le transport aérien ou le TGV sont davantage utilisés par les personnes aux revenus aisés par rapport aux transports en commun urbains ou au TER dont le coût par km leur est proche.

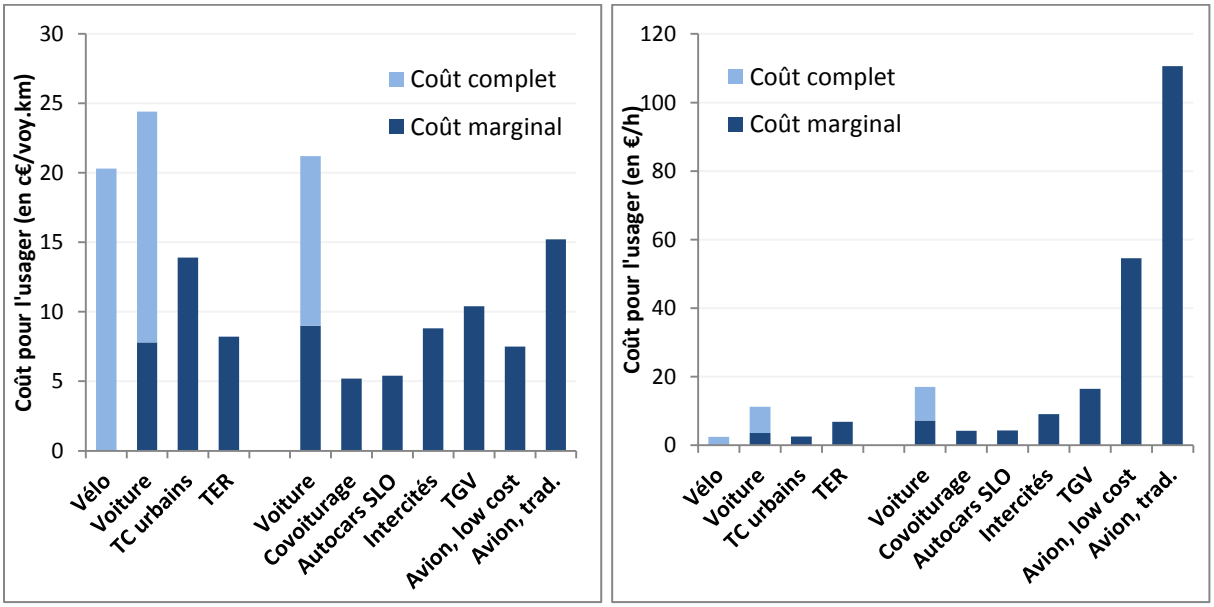


Figure 68 : Coût des modes de déplacement de courte et longue distance en c€/voy.km à gauche, et en €/h à droite
(calculs à partir des chiffres de Jean-Marie Beauvais pour l'année 2018, dans AQM, 2020)

Si ces constantes sur les temps de mobilité quotidiens et par trajet ont été étudiées en statique, elles sont également pertinentes en dynamique, pour étudier **l'évolution de la vitesse et ses impacts passés et à venir sur les comportements de mobilité**.

4. L'évolution passée et future de la vitesse

4.1.Historique : conquête et diffusion de la vitesse

Points et messages clés :

- ✓ La **première accélération** des mobilités a lieu dès le XVIIIème siècle avec les **voitures publiques attelées**, qui donnent un goût nouveau pour la vitesse et les voyages ; cela prépare l'arrivée des chemins de fer, avant que le goût pour le transport individuel ne se développe à la fin du XIXème siècle.
- ✓ Les progrès techniques permettent **l'introduction de nouveaux modes rapides**, avec les chemins de fer, la bicyclette, l'automobile et l'avion.
- ✓ Si la plupart des progrès techniques sont antérieurs à 1945, c'est la période 1950-2000 qui voit une forte **diffusion de la vitesse** portée essentiellement par la voiture, les conditions de **confort** des modes s'étant également largement améliorées.

4.1.1. Sortir de la vitesse du pas : une vitesse d'abord rêvée puis conquise

Jusqu'au milieu du XVIIIème siècle, les trajets à longue distance et la vitesse apparaissent limités à quelques utilisations précises ou circonstances exceptionnelles. Ils sont réservés majoritairement aux guerres et conquêtes, aux explorations, aux commerçants ou messagers. La vitesse du galop est réservée à la chasse, aux courses, à l'entraînement, ou aux professionnels qui livrent le courrier. Jusqu'alors, **la vitesse du pas domine les déplacements**, qu'ils soient à pied ou à cheval. A longue distance, cette vitesse permet de faire de l'ordre de 40 à 50 km par jour, soit une France qu'il est possible de traverser en longueur ou en largeur en 3 semaines, soit une vingtaine de jours. Des performances de plus de 100 km par jour sont possibles à titre exceptionnel à cheval, ou de plus de 200 km à la faveur d'un vent favorable en mer.

A courte distance et pour la majorité des Français qui vit alors de l'agriculture, la vitesse du pas conditionne le rythme des échanges, du travail et les modes de vie et. La portée des déplacements se limite à l'échelle du quartier ou du village. Seuls les jours de marché ou la participation à une grande foire annuelle nécessitent d'aller dans un village ou une ville voisine. Ainsi les activités quotidiennes se font à proximité, et les traditions, dialectes et mœurs changent d'une paroisse à une autre. En ville ou dans les villages, la rue est à la fois un lieu de vie, d'échange et de circulation, sans qu'elle ne soit vraiment dissociée de l'habitation. Dans cet environnement familier, l'intrusion d'une personne étrangère au village apparaît comme gênante, et la tentation du lointain n'existe pas vraiment encore (Studeny, 1995).

C'est dans ce contexte de proximité et de lenteur que se déroule une **première accélération des déplacements, avec la traction animale** dans un premier temps. Comme l'explique Studeny : "Dès le deuxième tiers du XVIIIème siècle gronde l'appel pressant du lointain : il convie au rejet de l'étreinte du voisinage, invite à dédaigner l'étroite proximité". L'auteur montre de manière convaincante que l'accélération des déplacements précède les chemins de fer, qui n'ont fait qu'accélérer un mouvement déjà en cours. Ainsi **"la vitesse fut d'abord rêvée, revendiquée, puis conquise"** (Studeny, 1995).

Les gains de vitesse sont alors sensibles pour les trajets des **voitures publiques tractées par les chevaux**, sur la longue distance : ainsi la vitesse commerciale des voitures de voyageurs, y compris les temps d'arrêt, progresse de 2,2 km/h à la fin du XVIIème siècle, à 3,4 km/h le siècle suivant, puis 4,3 km/h en 1814, 6,5 km/h en 1830, jusqu'à 9,5 km/h en 1847 (Studeny,

1995). L'auteur nous incite à sortir de nos standards de vitesse actuels pour prendre la mesure de ce que pouvait représenter un tel bouleversement à l'époque : "En termes mathématiques, une moyenne générale de 9 km/h ne peut que nous paraître lente, elle ignore les frayeurs du galop et l'importance du franchissement du seuil du pas". Cette forte accélération se perçoit davantage en regardant les temps de parcours, tel que pour le trajet Paris-Bordeaux (Figure 69). De faibles gains de vitesse en absolu font gagner plusieurs jours, ainsi le trajet est passé en moins d'un siècle de 14 jours en 1765 à un jour et demi en 1843 avec la malle-poste, le service le plus rapide (+14 km/h, 12,5 jours en moins). En comparaison, l'accélération de la vitesse moyenne d'environ +100 km/h permise par le prolongement de la LGV jusque Bordeaux en 2017 a permis de réduire le temps de trajet d'à peine plus d'une heure.

Les **services de transport de voyageurs** se sont progressivement développés, essentiellement à partir du XVIIème siècle avec la création des fiacres, utilisés surtout à Paris dans un premier temps. Sur la longue distance, les coches et carrosses vers 1760 font de l'ordre de 40 à 50 km par jour. Les diligences, réputées plus rapides, utilisent les relais des entreprises de messageries (les relais de poste) pour gagner du temps. Une accélération importante sur les grands axes a lieu suite à la centralisation de la régie des messageries en 1775 par Turgot, permettant de diviser par deux à trois les temps de parcours sur certains axes en quelques années. Ainsi les turgotines permettent de faire de l'ordre de 100 km par jour sur certains axes, et les temps de parcours passent par exemple de 11 à 5,5 jours sur Paris-Bordeaux entre 1775 et 1780. En 1793, l'administration postale crée la malle-poste, plus rapide et plus chère que les services de poste déjà existants. Elle réalise l'acheminement du courrier et des dépêches, mais fait également du transport de voyageurs. Si la vitesse moyenne des voitures publiques autour de 1840 est d'environ 9 km/h, les performances montent à 12 km/h pour les voitures de poste, jusqu'à 14 km/h pour la malle-poste, et 16 km/h pour les trajets les plus rapides (Chevalier, 1838 ; Studeny, 1995 ; Fau, 2015).

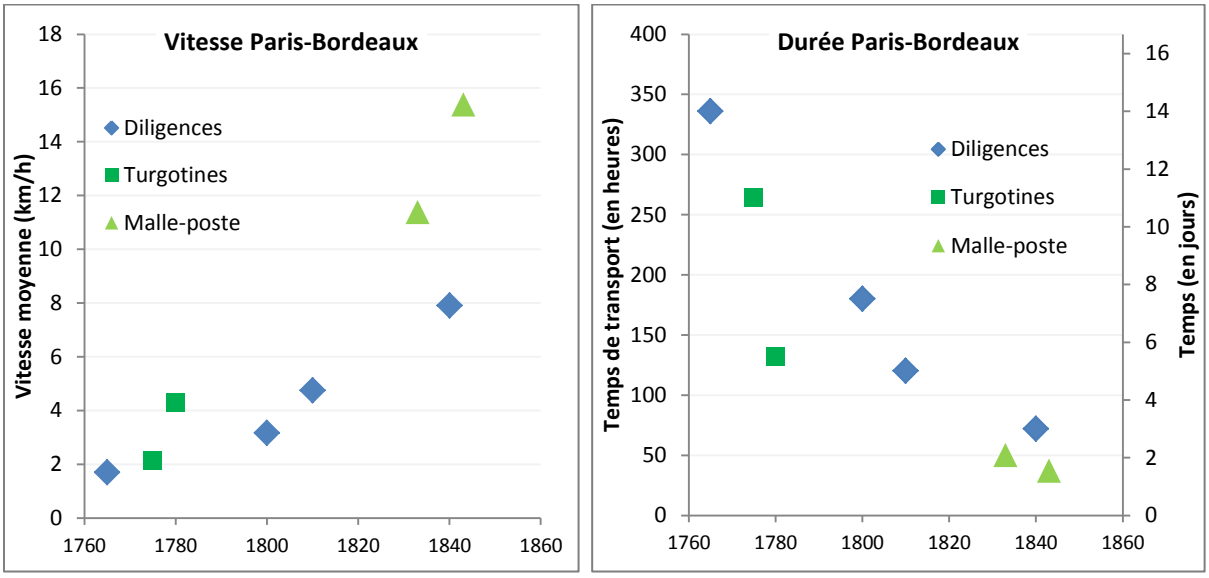


Figure 69 : Vitesses de transport (à gauche) et temps de transport (à droite) en voitures publiques attelées pour le trajet Paris-Bordeaux, 1760-1860 (données Studeny, 1995)

De telles accélérations peuvent surprendre car elles sont réalisées à partir d'un même mode, le cheval, déjà utilisé depuis bien longtemps pour les déplacements. Les progrès réalisés pour passer de la vitesse du pas à celle du trot voire du galop, tiennent au moins à trois facteurs,

dont les deux premiers seront de nouveau étudiés pour la période plus récente : les progrès sur les infrastructures, sur les véhicules, et enfin sur l'organisation des transports.
Concernant les **infrastructures**, des efforts sont réalisés pour évacuer la boue et sortir de l'embourbement régulier, assécher les chemins, normaliser les routes, aligner les tracés, niveler les reliefs… Ces efforts sont manifestes au début du XVIIIème siècle, période durant laquelle un mauvais chemin ralentit d'un tiers la vitesse pratiquée ; puis durant les années 1820 et 1830 sous l'impulsion des préfets et avec les communes, qui sont désormais chargées d'entretenir leurs chemins. Ces mêmes efforts sont également réalisés en ville afin de fluidifier la circulation, les rues étant progressivement libérées des éléments qui pourraient la ralentir, reléguant les piétons sur les trottoirs, créés à partir de 1780 jusqu'à ce que la moitié des rues en soient dotées à Paris en 1850 (Studeny, 1995).
Les **véhicules** ont également été grandement améliorés, afin d'être plus légers et maniables, moins hauts, avec des suspensions permettant d'amortir les chocs et favoriser la vitesse. La diversité de véhicules s'étoffe également selon les trafics, le confort, le nombre de personnes transportées ou les vitesses souhaitées, d'où le nombre important de dénominations différentes traduisant l'époque des véhicules hippomobiles. Aussi les chevaux de trait les plus adaptés aux circulations rapides et/ou à la traction de charges lourdes sont sélectionnés.
Enfin, **l'organisation des transports** permet d'accélérer les déplacements sur longue distance. Les relais de poste, mis en place dès le XVème siècle par l'administration royale, permettent de changer de chevaux tous les 10 à 15 km, soit environ une heure de trajet (Bretagnolle, 2005). Si la vitesse du trot est la plus courante, la malle-poste a le privilège de pouvoir utiliser le galop, un rythme qui épuise particulièrement rapidement les chevaux. Elle a également la priorité aux relais de poste, permettant des changements de monture en seulement 5 minutes. Ces temps de pauses de plus en plus courts ne permettent quasiment plus aux voyageurs de sortir des véhicules durant les trajets, de même qu'un seul point de départ et d'arrivée est prévu dans chaque ville. Les trajets se font progressivement aussi la nuit, qui était initialement réservée à des étapes dans des villes ou relais intermédiaires.

Si cette accélération est initiée sur les longues distances, permettant de s'extraire de la vitesse du pas, le **transport urbain** bénéficie également de ces gains de vitesse. La vitesse commune pour le transport de voyageurs en ville est le trot. Pour le transport de marchandises, elle passe du pas au trot au cours du XIXème siècle. Un service d'**omnibus**, version hippomobile de ce qui deviendra ensuite l'autobus, est mis en place dans Paris à partir de 1828, deux ans après leur réapparition à Nantes (suite à une première expérience échouée). Plus de trente lignes sillonnent la capitale à une vitesse commerciale aux alentours de 8 km/h. Le développement du **tramway** hippomobile en France à partir de 1853 permet ensuite d'augmenter d'un tiers les vitesses grâce à l'utilisation des rails (Du Camp, 1867 ; Bretagnolle, 2005).

Cette première accélération élargit l'horizon, aiguise **l'intérêt pour la recherche de vitesse**, et crée les conditions au développement du chemin de fer et des transports motorisés, qui démultiplient encore les possibilités. Ce n'est que plus tard encore, vers la fin du XIXème siècle, que naîtra le **désir d'un transport individuel** avec la progression des voitures attelées particulières, le développement de la bicyclette et de l'automobile, alors que l'avancée des progrès techniques aurait théoriquement permis de développer ces modes plus tôt.

4.1.2. Une chronologie marquée par l'invention de nouveaux modes

Après une première accélération due à un mode de transport utilisé depuis bien longtemps, c'est **l'introduction de nouveaux modes de transport rapides** qui a permis une accélération quasi-continue des mobilités en France depuis deux siècles. Les progrès techniques sur les modes de transport sont illustrés par les records de vitesse successifs compilés en Figure 70.

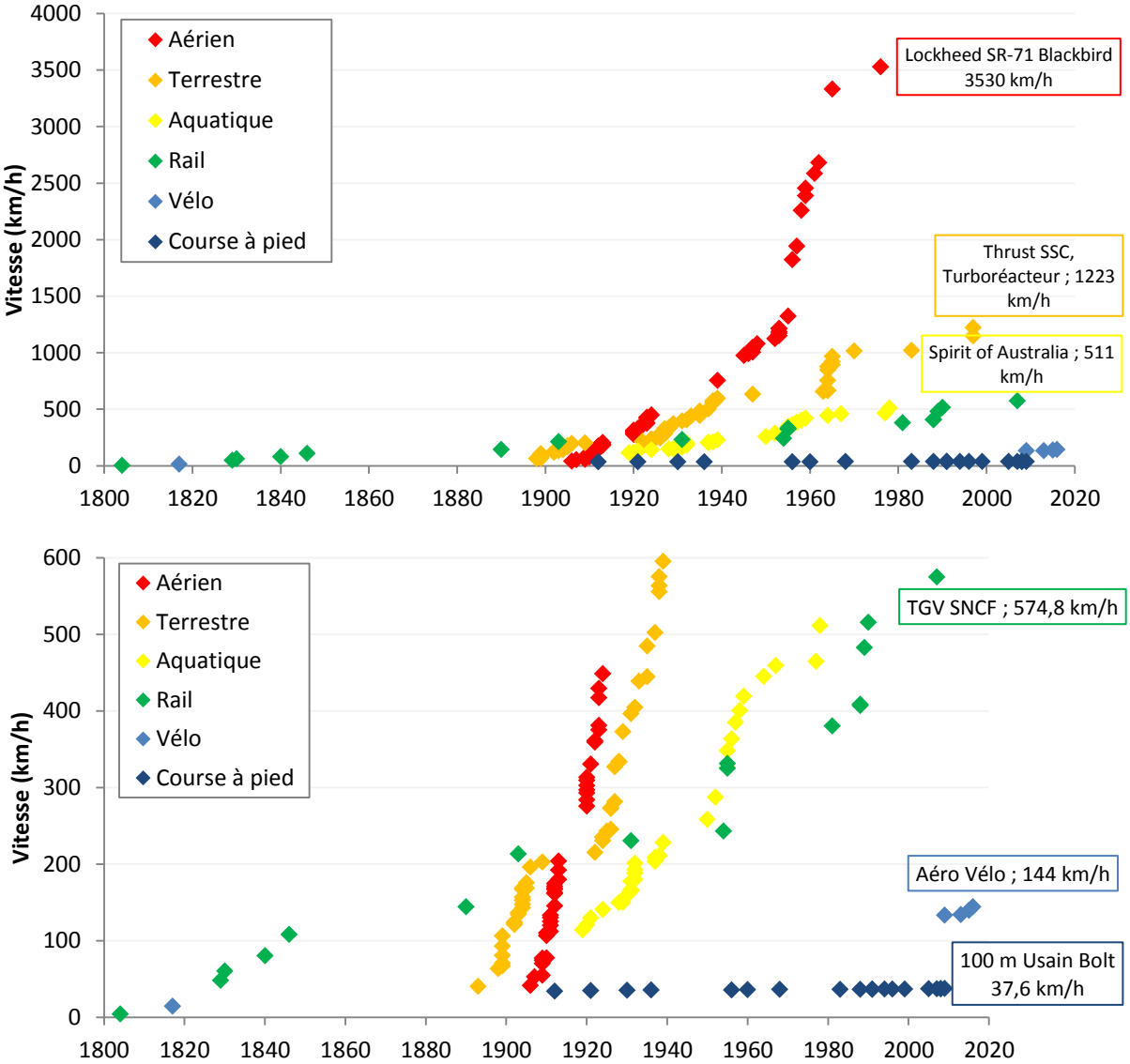


Figure 70 : Records de vitesse entre 1800 et 2020 pour différents modes de transport
(échelle plus basse en bas ; compilation pages Wikipédia, Studeny, Lay ; le graphique ne prétend pas à l'exhaustivité)

Ce sont d'abord les **chemins de fer** qui à partir des années 1830 permettent d'accélérer le transport de voyageurs. Inaugurés d'abord en Angleterre avec la première locomotive à vapeur en 1804 et la première ligne voyageurs en 1825, les débuts en France se font avec la ligne de Saint-Etienne à Andrézieux ouverte en 1827. Les chemins de fer sont d'abord utilisés pour le transport de marchandises et en particulier du charbon, ils fonctionnent initialement grâce à la traction animale ou par gravité, avec des premiers tronçons relativement isolés. La première ligne dédiée aux voyageurs est celle de Paris à Saint-Germain-en-Laye ouverte en 1837, et l'établissement d'un programme de 9 grandes lignes partant essentiellement de Paris est voté en 1842. A partir des années 1850, ce sont de l'ordre de 1000 km de lignes qui sont ajoutées au réseau chaque année, jusqu'à une taille de réseau de 63 000 km dans les années

1920, dont plus de 40 000 km de lignes d'intérêt général, et plus de 20 000 km d'intérêt local. Les vitesses pratiquées en 1855 sont en moyenne de 40 km/h, avec de fortes disparités selon les lignes, les vitesses variant entre 20 et 72 km/h. Dès le départ, le transport de voyageurs se fait principalement sur les grandes lignes, aussi sur des lignes en banlieue parisienne, avant de mailler progressivement le territoire et desservir des communes rurales. Sur les grandes lignes dont le réseau est achevé vers 1870, l'accélération est très importante et concurrence rapidement les 14 à 16 km/h de la malle-poste. L'apogée de son rayonnement est située à 1840, et il est prescrit dès 1870 de fermer les relais inactifs, entraînant la disparition des lignes de la poste aux chevaux et des diligences dans les années suivantes (Studeny, 1995).

La traction hippomobile résiste davantage pour le transport urbain où la concurrence est moins forte et plus tardive. C'est la **bicyclette** qui vient en particulier concurrencer l'omnibus et le tramway à la fin du XIXème siècle. Elle est à ce moment-là le mode le plus rapide en ville, étant donné sa vitesse moyenne plus importante, mais également par la possibilité de faire des trajets porte-à-porte et sans attente du passage du transport public. Si les débuts de la bicyclette datent de la fabrication de la draisienne en 1817 en Allemagne, permettant au baron Drais de réaliser 14,4 km en à peine plus d'une heure, les principales innovations sur le vélo et sa diffusion se font surtout à partir des années 1860 (Héran, 2015). Ces innovations ont permis de faciliter et démocratiser l'usage, mais l'on peut remarquer que la vitesse n'a pas que peu évolué depuis l'invention de la draisienne.

Il en est de même pour le **métro**, qui dès l'inauguration de la ligne 1 en 1900 traversa Paris de la Porte Maillot à la Porte de Vincennes en 27 minutes seulement. Si toutes les stations n'étaient pas encore ouvertes ce jour-là, la vitesse moyenne des débuts du métro était de 20 km/h, soit une valeur proche de la vitesse commerciale moyenne de 25 km/h actuellement (Studeny, 1995). Le métro permet donc une nouvelle accélération des transports urbains, par une vitesse plus élevée, une régularité qui permet de diminuer les temps d'attente, tout en permettant des capacités d'emport plus élevées que les omnibus et tramways.

Le début du XXème siècle voit également l'essor de **l'automobile**. Si la France avait pris du retard sur ses voisins pour les transports ferroviaires, elle est parmi les pays en pointe sur l'automobile, dont elle sera le premier constructeur mondial jusqu'en 1905 (Lay, 1992). Le parc de véhicules et les records de vitesse sont en très forte augmentation. Les premiers records de vitesse sont le fait de voitures électriques à la fin des années 1890, dont la Jamais Contente du belge Camille Jenatzy qui dépasse le premier la barre des 100 km/h en 1899. La vitesse maximale actuelle de 130 km/h est atteinte dès 1903 et la barre des 200 km/h en 1909, proche du record ferroviaire de l'époque qui sera dépassé après la première guerre mondiale. Seules les deux guerres mondiales stoppent un temps la progression des records et du parc de véhicules. Alors que la 1ère vente mondiale a lieu en France en 1887, le parc passe de 350 véhicules en 1895 à dix fois plus soit 3 500 en 1900, 140 000 à la veille de la 1ère guerre mondiale et quasiment deux millions en 1939 (Orselli, 2009 ; Castaignède, 2018). En 1908, la Ford T, première voiture dite accessible au plus grand nombre, permettait d'atteindre les 70 km/h, et dans les années 20 des voitures ont une vitesse dépassant les 140 km/h. Les vitesses moyennes réelles sont plus difficiles à estimer, mais seraient d'abord autour de 25-40 km/h pour les routes interurbaines durant les décennies 1900 et 1910, avec des pointes autour de 80 km/h (Lay, 1992 ; Studeny, 1995). Il sera vu plus loin que les vitesses moyennes des débuts de l'automobile ont augmenté, surtout pour l'interurbain et les réseaux rapides, sans toutefois

s'éloigner fortement des possibilités de certains véhicules lors des premières décennies. Comme pour la traction hippomobile un siècle plus tôt, les vitesses nouvelles atteintes par les voitures amènent à de nouvelles adaptations des infrastructures, telles que l'élargissement et l'alignement des routes, ainsi que le progrès du goudronnage qui apporte davantage de confort pour les bicyclettes et automobiles, et permet de se débarrasser du fléau de la poussière. Les décennies suivantes voient la réglementation progressive des vitesses, après que le code de 1921 se contente de fixer comme règle que le conducteur doit rester maître de son véhicule. La limitation de vitesse est fixée à 60 km/h en agglomération en 1954 (puis 50 km/h en 1990), 90 km/h sur les routes les plus chargées aux week-ends en 1961, avant les limites de 90, 110 et 130 km/h sur les routes rapides en 1973-1974 (Studeny, 1995 ; Orselli, 2009).

En ville, à l'apparition de l'automobile suit celle de l'**autobus** dès 1900 en France et à partir de 1906 dans Paris, ce qui précipite la fin de la traction hippomobile pour les tramways et omnibus, arrêtée en 1913.

Enfin, le début du XXème siècle voit également naître l'**aviation**. Si la progression des records est plus rapide que pour la voiture qu'elle dépasse au moment de la première guerre mondiale, il faut néanmoins quatre décennies de progrès techniques réguliers pour dépasser les vitesses commerciales actuelles de l'ordre de 1000 km/h. Un saut sur les vitesses des avions sera permis par le passage des moteurs à hélices aux premiers avions à réaction utilisés durant la deuxième guerre mondiale, ce qui permet un passage de moins de 600 à plus de 900 km/h. Les vitesses ont relativement peu évolué depuis, hormis l'expérience de l'utilisation commerciale des avions supersoniques. Le Concorde, utilisé entre 1976 et 2003, dépassait Mach 2 (deux fois la vitesse du son), soit plus de 2100 km/h en vitesse maximale de croisière. Par ailleurs, l'utilisation commerciale de l'avion en France a démarré en 1919 avec une liaison entre Paris et Londres, emmenant 11 passagers à la vitesse moyenne de 125 km/h. L'aérien est utilisé dans un premier temps pour les destinations internationales, et le trafic intérieur ne se développe qu'après la seconde guerre mondiale (Studeny, 1995).

Le **train** continuera ses progrès de manière progressive, étalés sur plusieurs décennies. Le TGV inauguré en 1981 en France constitue la dernière accélération majeure, le dernier record en date de la SNCF à 574,8 km/h en 2007 constituant le record mondial sur rail, tandis que le Maglev japonais, train à sustentation magnétique, a atteint les 605 km/h en 2016.

A titre plus anecdotique, des records de vitesse ont été battus récemment pour les modes non motorisés. L'Aéro Vélo, un **vélo** couché caréné (vélomobile) a battu successivement des records de vitesse lors d'une course dans le désert du Nevada, jusqu'à dépasser 144 km/h en 2016. Si ce véhicule n'est utilisé que par un faible nombre de personnes en France, il pourrait se développer à l'avenir, profitant des vitesses importantes que permet son aérodynamisme. Aussi les records de vitesse de **course à pied** et en particulier du 100 mètres en Figure 70 ont été battus de nombreuses fois au cours du XXème siècle, jusqu'à la performance d'Usain Bolt en 9 secondes 58 en 2009, soit une vitesse moyenne de 37,6 km/h et une vitesse de pointe de 44,7 km/h entre les 60 et 80 m de la course.

L'analyse des records de vitesse met en évidence des **contrastes sur l'évolution technique des vitesses des différents modes**, en ce qui concerne : la rapidité des progrès réalisés, lents pour le ferroviaire et rapides pour la voiture ou l'avion ; des records datant de plusieurs décennies pour certains modes ; enfin, des vitesses réelles parfois très loin des capacités techniques, comme cela a été vu concernant les limites à la vitesse, évoquées en 3.3.2.

4.1.3. La diffusion d'une vitesse confortable

La vitesse a été d'abord rêvée puis conquise par des accélérations successives pour plusieurs modes. Leur vitesse n'a que peu évolué depuis désormais plusieurs décennies pour la majorité des modes de transport : marche, vélo, métro, tramway, bus ou voiture étaient déjà capables des vitesses actuelles il y a un siècle, il y a 70 ans pour l'avion, et depuis bientôt 40 ans pour le TGV. Pourtant, la vitesse moyenne des déplacements a fortement évolué ces dernières décennies, par la diffusion de ces modes rapides, et leur accès progressif au plus grand nombre. Cette évolution peut être appréhendée au travers de l'indicateur du nombre de kilomètres parcourus par les Français chaque jour (estimations depuis 1800 en Figure 71). Cela peut être assimilé dans une certaine mesure à une vitesse, étant donné que l'indicateur correspond à une distance divisée par un temps, ici la journée, comprenant aussi les moments non mobiles. En supposant un budget temps de transport (BTT) constant d'environ une heure par jour et par personne en moyenne, ce qui est fait dans la construction de la figure ci-dessous pour l'estimation de la marche à pied, les kilomètres parcourus par jour devraient également correspondre à peu près à la vitesse moyenne des déplacements. Ainsi les kilomètres journaliers et la vitesse sont passés de l'ordre de 4 à 5 kilomètres par jour en 1800 (Marchetti, 1994 ; Metz, 2013) à plus de 50 kilomètres aujourd'hui.

Si les progrès sur la vitesse des modes datent généralement d'avant la seconde guerre mondiale, l'accélération des mobilités lui est postérieure, et advient essentiellement dans la seconde moitié du XXème siècle avec la diffusion de l'automobile. Cette croissance des kilomètres parcourus a seulement été stoppée par les guerres et les chocs pétroliers. Puis le tournant du millénaire coïncide avec un pic marqué pour les seuls trajets intérieurs, tendance sur laquelle nous reviendrons largement, avant une nouvelle hausse sur la décennie 2010.

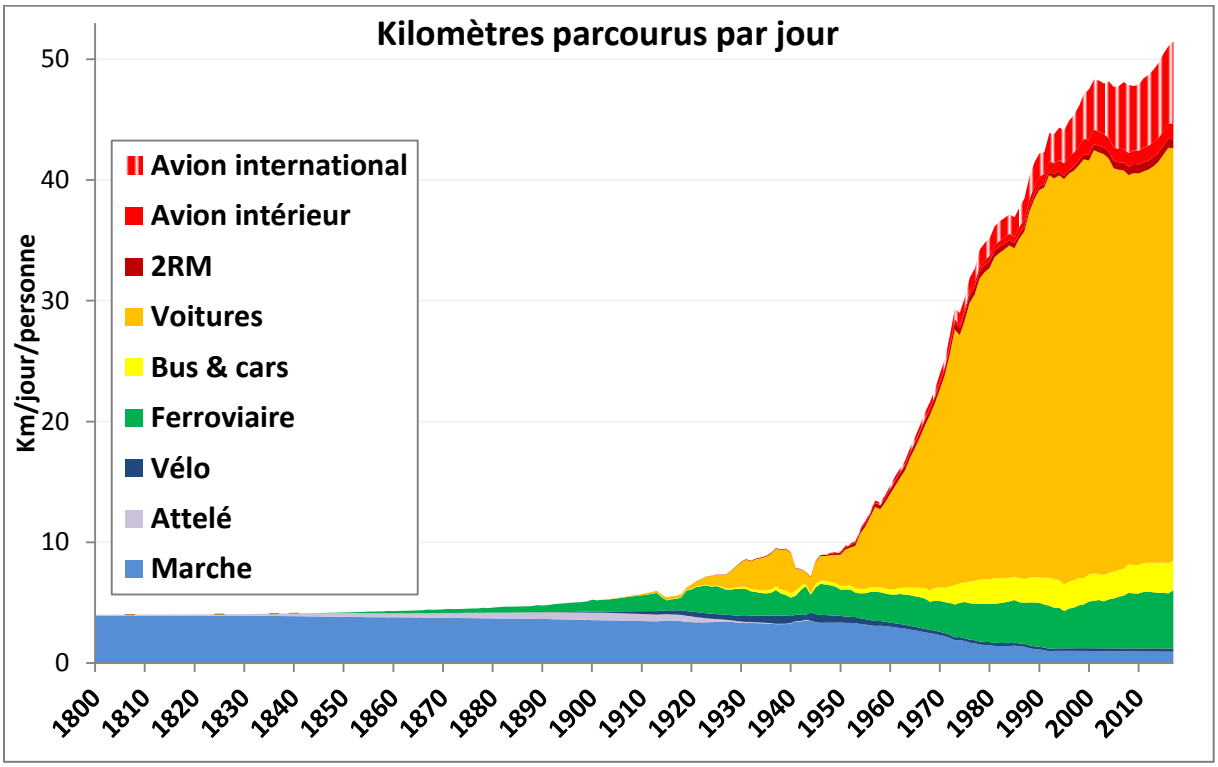


Figure 71 : Estimation du nombre de kilomètres par jour et par personne en France, 1800-2017
Schéma à partir de nombreuses données compilées, en particulier CGDD, SNCF, DGAC, Orselli, Grübler, Papon ; incertitudes importantes plus les périodes sont éloignées ; 2RM = deux-roues motorisés ; Voitures comprend aussi les VUL

Si les premières accélérations des transports de la poste aux chevaux et les débuts des chemins de fer n'ont pas permis une accélération substantielle de la vitesse moyenne de l'ensemble des mobilités, c'est qu'ils ont surtout concerné des **trajets à longue distance** peu fréquents, privilège essentiellement réservé à une **élite** peu nombreuse. Ainsi les nouveaux modes ont toujours été adoptés historiquement par les catégories les plus aisées, que ce soit pour les voitures publiques à cheval, les chemins de fer, la bicyclette, la voiture ou l'avion, avant que le mode se diffuse plus largement dans la population. Cette **diffusion** a fonctionné avant tout pour le transport urbain et de courte distance, pour lequel les accélérations sont moins fortes que pour la longue distance en raison de l'encombrement des villes. Les classes populaires sortent de la vitesse du pas essentiellement par le développement des transports collectifs à la fin du XIXème siècle, avant que la bicyclette ne devienne accessible surtout au début du XXème siècle (Studeny, 1995). Mais c'est la voiture qui réussira le mieux à accélérer substantiellement les vitesses moyennes pour les trajets de courte et de longue distance, tout en se diffusant très largement dans la population.

En plus de la diffusion massive de la rapidité au sein de la population, un autre fait marquant de la période concerne les **gains de confort** extrêmement forts réalisés dans cet accès à la vitesse. Les récits des premières accélérations des voitures publiques attelées insistent sur les difficultés de la vitesse nouvelle et la rigueur des voyages, l'inconfort des secousses, les nuits difficiles et dangereuses, les routes impraticables hors été et la banalité de l'embourbement, les retards, la fatigue, les risques d'accidents, la peur qui gagne les voyageurs. Ainsi les débats ressurgissent régulièrement sur les vitesses qu'il ne sera pas possible de dépasser sans poser des problèmes de santé ou de sécurité importants, limite fixée à 25 km/h pour certains, à 50 km/h pour d'autres (Lay, 1992). De tous temps, l'introduction des nouveaux modes a été contestée pour les nuisances qu'elle engendrait également pour autrui, en termes de sécurité notamment, les frayeurs pour les piétons ou les chevaux, la poussière dans les rues, le bruit, ou encore l'usure des routes. Des voix dissonantes questionnant cette quête effrénée de vitesse se sont fait régulièrement échos notamment chez les écrivains et intellectuels, tels que Rousseau et Victor Hugo qui dénoncent la rapidité de voyages qui ne laisse pas le temps de découvrir le pays, ou l'envie de toujours vouloir être ailleurs (Studeny, 1995).

Si la littérature sur la vitesse met en lumière les coûts associés à l'accélération des mobilités, il est cependant important de noter également les **incroyables réussites de la conquête de la vitesse**. Des progrès techniques inimaginables il y a deux siècles ont été réalisés, la vitesse s'est diffusée au plus grande nombre en France, permettant de démultiplier les activités accessibles, de développer les voyages à longue distance et le tourisme, tout en traitant un certain nombre de nuisances qui lui étaient initialement reproché (inconfort, boue et poussières, bruit et sécurité dans une certaine mesure). Des vitesses de 130 km/h sur route, de 320 km/h sur rail, ou 1000 km/h dans les airs sont aujourd'hui possibles dans un niveau de confort très important, qui peut permettre d'utiliser ce temps de transport aux activités professionnelles, au sommeil, à la lecture ou aux divertissements. Comparés à la vitesse du pas d'il y a seulement deux siècles, ces progrès apparaissent vertigineux.
Cet historique invite à un **questionnement sur le futur de cette quête de vitesse** (traité en partie 0), entre l'atteinte de premières limites et l'urgence du défi environnemental.

4.2.Les déterminants de l'évolution de la vitesse

Points et messages clés :

- ✓ Le principal moteur des gains de vitesse a été la **diffusion des modes rapides**, surtout des modes routiers individuels, passée d'environ 20 % du temps de transport en 1960 à 62 % depuis 1992 ; depuis, c'est le transport aérien qui est le moteur de la diffusion.
- ✓ La diffusion des **autoroutes** a permis d'augmenter la vitesse moyenne des voitures.
- ✓ La **vitesse technique** maximale des modes a très peu évoluée sur 1960-2017, hors création du TGV ; à partir de 2003, les radars entraînent la **chute des vitesses pratiquées** sur les réseaux routiers et un pic sur la vitesse moyenne des déplacements

Suite à l'historique sur la vitesse, une **analyse quantitative** est réalisée pour la **période 1960-2017**, et résumée en Figure 72. Comme détaillé dans la méthodologie en 2.2, la décomposition permet d'isoler trois effets qui influencent la vitesse moyenne des déplacements : l'effet de report modal ou de diffusion des modes rapides en termes de pourcentage du temps de déplacement ; l'effet de diffusion des infrastructures ou réseaux rapides sur la vitesse des modes routier et ferroviaire, mesuré en pourcentage des temps de déplacement en voiture ou train sur les différents types de réseaux ; enfin, l'effet de la vitesse des modes sur chaque réseau ou type d'infrastructure.

La figure ci-dessous indique que la croissance de la vitesse a été régulière sur la période 1960-2000, avec une stagnation depuis le début des années 2000. En ne considérant que le trafic intérieur, la vitesse moyenne des déplacements en 2017 est estimée inférieure à celle en 2000, cette saturation ou ce pic des vitesses étant davantage discuté en partie 4.3.1. Il sera d'abord question de revenir sur chacun des trois déterminants et leur rôle sur la période étudiée.

Il apparaît que le déterminant majeur à la hausse des vitesses sur la période concerne la diffusion des modes rapides, suivi de loin par l'effet de diffusion des réseaux rapides. Au contraire, les vitesses pratiquées par réseau ont un effet variable au cours du temps, intervenant particulièrement à la baisse dans les années récentes (Figure 72).

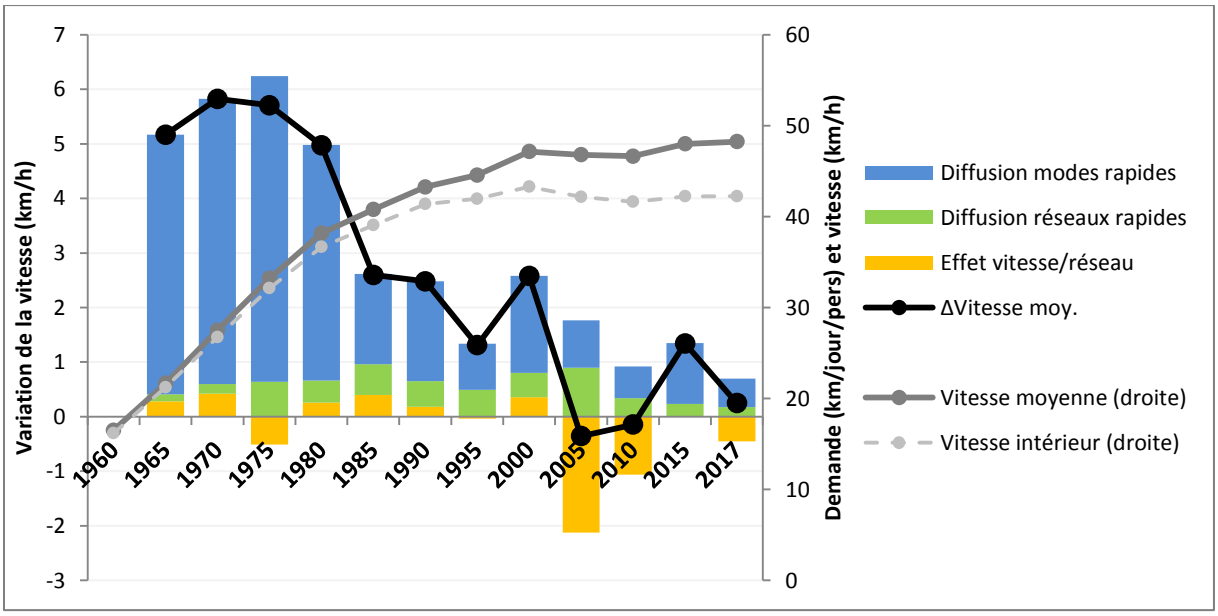


Figure 72 : Décomposition de l'évolution de la vitesse moyenne sur 1960-2017 en trois effets explicatifs
Les courbes en gris donnent les estimations des vitesses moyennes pour les années considérées, avec international et trafic intérieur seul (échelle de droite) ; la courbe noire donne la variation pour chaque pas de temps de la vitesse moyenne (international inclus), et les barres colorées décomposent cette variation en trois facteurs explicatifs (échelle de gauche)

4.2.1. La diffusion des modes rapides, ou l'effet du report modal

L'historique de la vitesse des mobilités montre que les progrès techniques sur la vitesse des mobilités ont généralement précédé la diffusion des modes rapides, mis à part pour le transport ferroviaire pour lequel l'accélération a été plus progressive, en particulier sur la longue distance. La Figure 73 et les détails en Figure 74 permettent de représenter cette diffusion des modes de transport, mesurée en proportion des temps de transport, et non en kilomètres parcourus comme en Figure 71.

Les **transitions en termes de comportements de mobilité** apparaissent progressivement. Le trafic attelé, dont les estimations sont soumises à de fortes incertitudes, s'est diffusé progressivement au cours du XIXème siècle, avant de disparaître au début du siècle suivant. Il a été progressivement remplacé par des modes plus rapides, en particulier par le transport ferroviaire, proche des 5 % de temps de déplacement depuis la sortie de la première guerre mondiale, mais également par la progression des trafics à vélo et en voiture au début du XXème siècle. Le trafic à vélo est maximum durant les années 30 et décline fortement après la seconde guerre mondiale, remplacé par la progression du trafic en deux-roues motorisés et en voiture (Papon, 2016 ; Héran, 2015). Il n'a toutefois pas disparu, et est probablement à peu près constant ces dernières années, entre renouveau dans les centres villes et poursuite du déclin en périphérie et zones rurales (ADEME, 2020). Les deux-roues motorisés, qui s'y sont partiellement substitués, représentent entre 1 et 2 % des temps de transport depuis 1960. Loin d'être substituts, les transports collectifs routiers et la voiture semblent s'être développés en parallèle, les données (possiblement sous-estimées en début de période, cf chapitre 1, 3.3.1) montrant une forte croissance sur les années 60-70 avant une stagnation autour de 6 % des temps de transport depuis la fin des années 70. Enfin, le trafic aérien s'est développé mais ne représente qu'une faible partie des temps de transport, de l'ordre d'1 % en 2017 en comptant le trafic international.

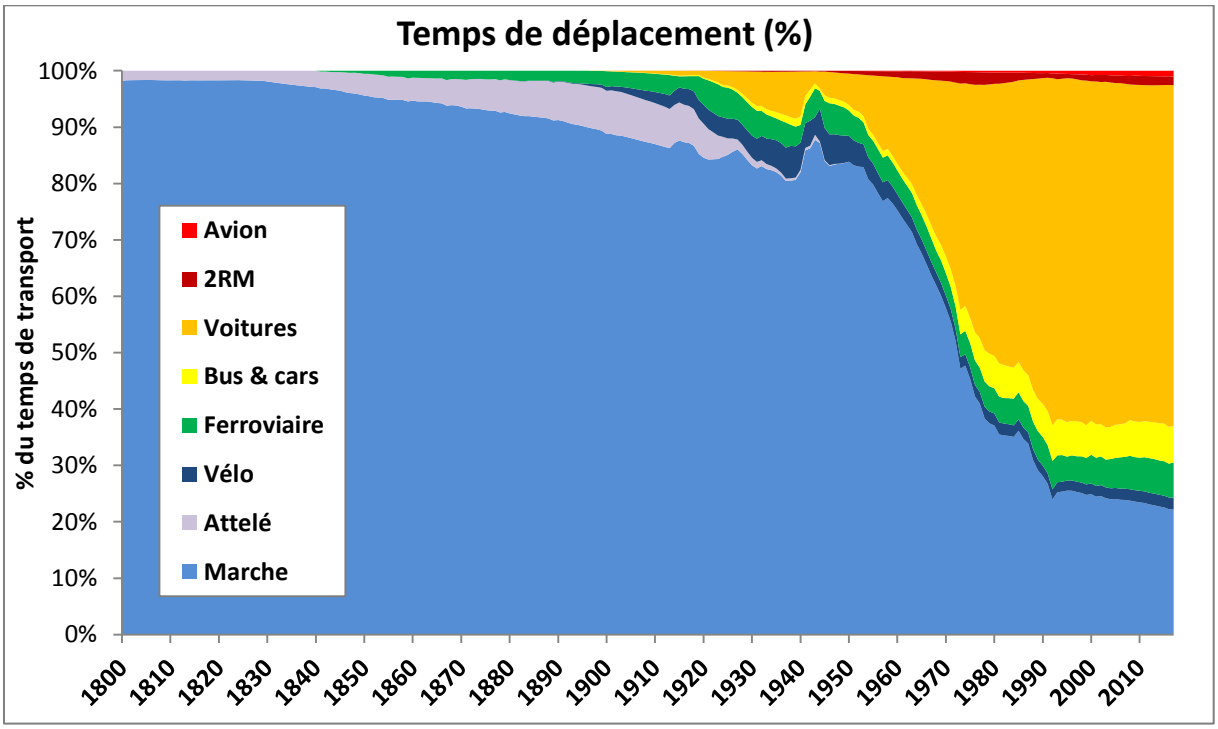


Figure 73 : Part des modes de transport dans les temps de déplacements de 1800 à 2017
Le terme Voitures inclut également les 60 % de VUL ; même périmètre et même données qu'en Figure 71

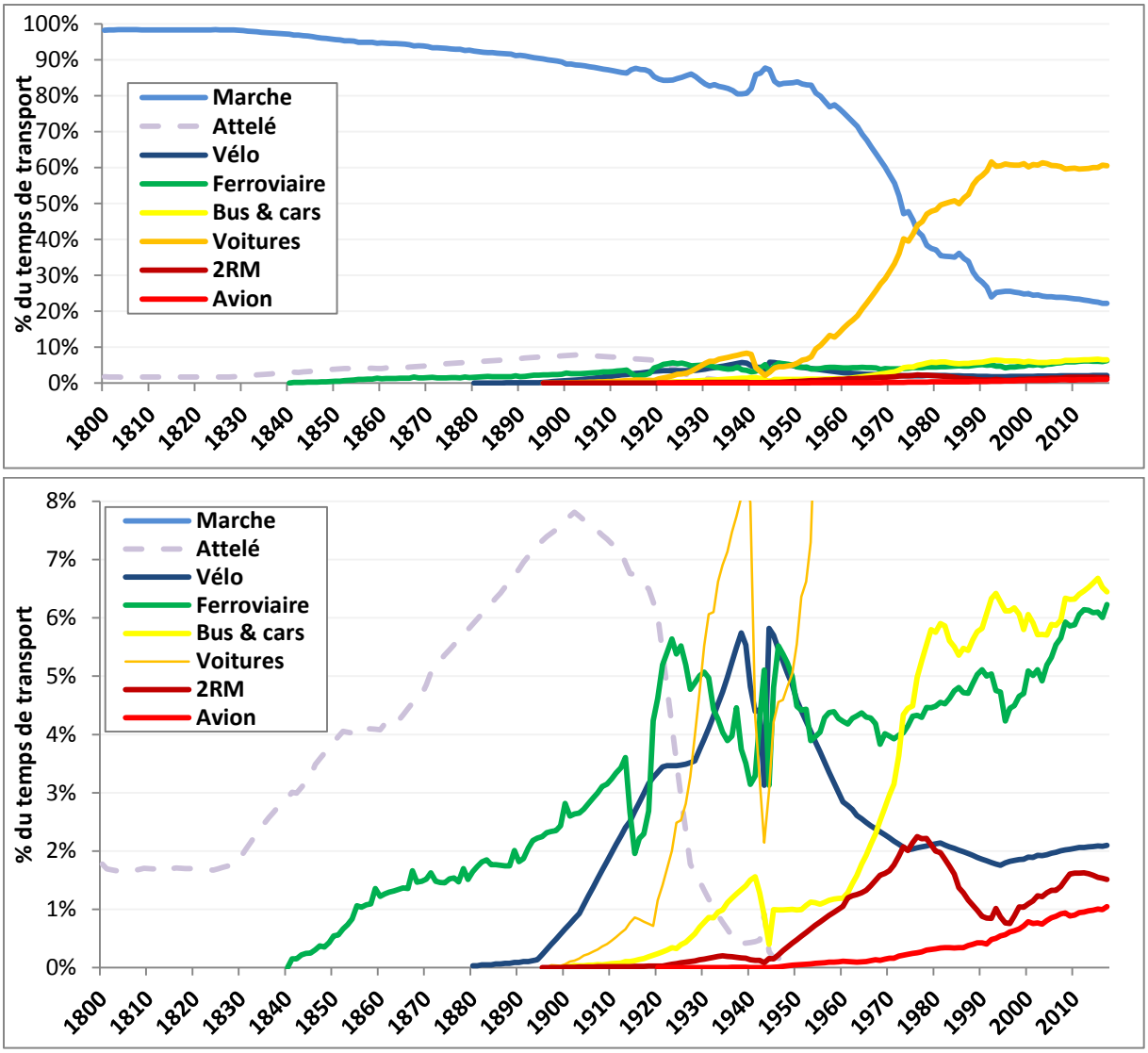


Figure 74 : Evolution des pourcentages de temps de transport par mode sur 1800-2017
Tous modes en haut, détails pour les modes moins importants en bas

Si de nombreux modes sont ainsi en concurrence depuis plusieurs décennies, les **deux faits majeurs** qui ressortent sur la période (en particulier la figure du haut, ci-dessus) sont **le déclin de la marche à pied et la forte progression de l'automobile**, seuls modes à dépasser la barre des 10 % des temps de transport par le passé.

La **marche** représentait la quasi-totalité des temps de transport il y a deux siècles, encore quasiment 90 % en 1900, et de l'ordre de 70 à 75 % des temps de déplacements en 1960, au début de la période étudiée dans la décomposition. Cette proportion a baissé aux alentours de 25 % au début des années 90, une proportion qui a probablement peu baissé depuis, à 22 % en 2017 d'après les chiffres compilés (les estimations sur la marche sont disponibles qu'à intervalles réguliers de l'ENTD, la dernière provenant de 2008). Les estimations réalisées précédemment en 3.2.3 montrent que la marche utilisée dans le cadre des déplacements est désormais minoritaire dans l'ensemble de ses usages. Aussi la hausse observée ces dernières décennies de la randonnée et des pratiques sportives, estimées à environ 20 minutes par jour en moyenne sur les années récentes, ne compense pas la baisse du temps de marche à pied

dans les déplacements (Eurostat, 2004). En effet, ces derniers ont baissé d'environ 20 à 30 minutes par jour depuis 1960, et davantage encore depuis le début des transports motorisés[2]. Cela a des implications fortes en termes de santé, au vu de la baisse d'activité physique que cela implique au sein de la population. Qui plus est, cette baisse touche également d'autres domaines et comportements, et en particulier les activités professionnelles, menant à des modes de vie de plus en plus sédentaires (Ng et Popkin, 2012 ; Proper et Hildebrandt, 2006 ; Saidj et al, 2015).

Le deuxième fait majeur de la période concerne la **diffusion de la voiture** au sein des déplacements. Cette part apparaît étonnamment stable à 60 % des temps de déplacement depuis le début des 90, tandis que le temps de transport en voiture apparaît légèrement croissant en absolu sur cette période, en raison de la hausse des temps de transport totaux. Ce report modal vers la voiture, essentiellement depuis des temps de marche, a été le principal moteur de la hausse de la vitesse moyenne des déplacements sur la première partie de la décomposition (Figure 75). L'effet de report modal permet ainsi une hausse de la vitesse moyenne d'environ +1 km/h chaque année sur les décennies 1960 et 70, alors que l'effet des deux autres déterminants de la vitesse est bien plus faible sur ces décennies (Figure 72). La contribution du report modal devient plus faible, de l'ordre de +0,3 km/h chaque année sur la décennie 80, toujours dominé par la croissance de la voiture, avant que sa contribution soit nulle en moyenne depuis le début des années 90.
La diffusion de la voiture a donc semble-t-il atteint un point de saturation sur les temps de déplacement depuis trois décennies. L'usage de l'automobile au sein de la population a seulement augmenté très légèrement d'environ 36 à 39 minutes par jour et par personne entre le début des années 90 et 2017. L'analyse en termes de distances en chapitre 1 montrait des parts modales des transports routiers à peu près constantes à 80 % des kilomètres parcourus depuis le choc pétrolier de 1973 (Figure 18). Ainsi, si la voiture a continué à représenter une part croissante des temps de parcours au détriment de la marche sur la période 1973-1992, les autres modes ont également augmenté leurs trafics de manière similaire, de sorte à ce que la part de la voiture en distance parcourue ne change que très peu. Aussi, si les temps de parcours en voiture sont restés relativement constants sur la décennie 1990, ce sont les gains de vitesse moyenne de la voiture liés aux deux déterminants étudiés ensuite qui ont permis de continuer à augmenter les distances parcourues par personne.

A partir des années 90, l'effet du report modal sur la vitesse moyenne reste positif malgré les fluctuations selon les années (Figure 72 et Figure 75), en revanche il devient dominé par la croissance du **trafic aérien** (essentiellement l'international), et dans une moindre mesure par la hausse du trafic ferroviaire.

[2] Les chiffres utilisés dans la décomposition proviennent de l'ENTD, qui sous-estime possiblement les temps de marche pour les périodes les plus anciennes. Ainsi d'après les données compilées, les temps de transport augmentent sur la période, un point qui sera discuté plus loin. Les figures ci-dessus pour remonter jusqu'à 1800 considèrent que la marche réalise le complément de mobilité pour atteindre des budgets-temps de transport d'une heure par jour et par personne. Cela change relativement peu les pourcentages de temps de transport de la marche, qui passent de 70 % avec la compilation des données à 75 % avec le BTT d'1h. Cela augmente davantage les temps en absolus, d'environ 35 à 45 minutes pour la marche en 1960 (le temps de transport global estimé pour 1960 dans la compilation des données étant de 50 minutes, point développé en partie 4.3.1).

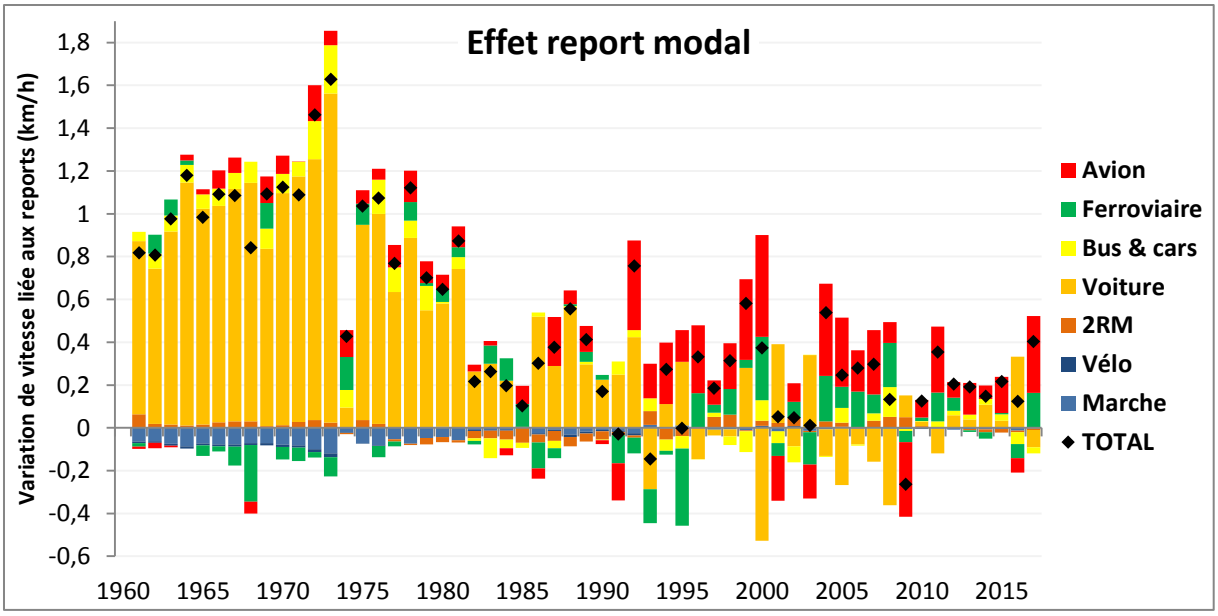


Figure 75 : Effets du report modal sur la vitesse moyenne des déplacements de 1960 à 2017
Le point noir représente l'effet du déterminant du report modal sur la vitesse moyenne des déplacements, les barres colorées représentent la contribution à la hausse des modes en croissance, ou à la baisse des modes qui perdent des parts modales

Les modes rapides ont toujours été accessibles d'abord aux plus riches, avant de s'étendre davantage au reste de la population. Les **inégalités d'accès à la vitesse** sont encore importantes aujourd'hui sur la longue distance, mais sont relativement limitées sur la courte distance et les déplacements quotidiens.

Les voyages à longue distance, qui sont plus rapides, sont croissants avec le revenu : en 2008, leur nombre était environ 3 fois plus élevé chez les personnes du 10ème décile que pour les personnes des deux premiers déciles, une situation qui n'avait pas beaucoup évolué par rapport à 1994 (CGDD, 2010). Le rapport était d'un peu plus de 3 pour la voiture, moins fort pour le train dans son ensemble (rapport de 1 à 2, sûrement davantage pour le TGV), et bien plus fort pour l'avion (rapport de 1 à 8 environ), le plus rapide des modes à longue distance. Si les inégalités d'accès aux modes les plus rapides sont visibles par tranche de revenu, elles le sont aussi selon les types de territoires. Le nombre de voyages en voiture est similaire selon les territoires, en revanche les voyages en train et en avion, les deux modes les plus rapides au-delà de 400 km, sont croissants avec la taille de la commune de résidence, et selon la position dans l'aire urbaine : le nombre de voyages en train et en avion en 2008 est environ 5 fois plus important pour les habitants de l'aire urbaine de Paris que ceux des zones rurales.

Ainsi l'accès à la vitesse à longue distance est plus aisé en zones denses grâce à la connexion aux modes et infrastructures rapides. Au contraire, pour les mobilités quotidiennes, la vitesse est plus faible en zones denses en raison de la congestion routière et de l'utilisation de modes plus lents, effet compensé par une meilleure accessibilité. Aussi les inégalités selon les revenus apparaissent bien plus faibles que pour la longue distance. Sur les trajets domicile-travail, les distances et temps de parcours augmentent avec le revenu, mais la vitesse reste similaire. Cela s'explique par une diffusion très large de la voiture au sein de la population, avec seulement 16 % de ménages non motorisés en 2017, dont une partie importante par choix (URF, 2018 ; CGDD, 2010). La vitesse y reste plus faible pour les bas revenus, en raison d'une plus faible utilisation de la voiture au profit de la marche et des transports en commun, plus lents. La différence est cependant bien plus forte pour la longue distance.

4.2.2. La diffusion des infrastructures rapides

Historiquement, l'amélioration des chemins et infrastructures routières a permis des accélérations notables des moyens de transport, pour le trafic attelé en particulier et dans une moindre mesure l'enrobé a permis d'améliorer le confort et d'accélérer les déplacements aux débuts de la bicyclette et de la voiture.

Dans la décomposition de la Figure 72, l'effet de diffusion des infrastructures ou réseaux rapides a pour objectif de capturer l'effet de la construction des **autoroutes** et des **lignes à grande vitesse** (LGV) sur la vitesse des transports routiers individuels et du ferroviaire. Les figures Figure 76 et Figure 77 donnent l'évolution des kilomètres construits et des trafics sur ces réseaux, ainsi que les temps de transport passés sur les différents types de réseaux routiers et ferroviaires.

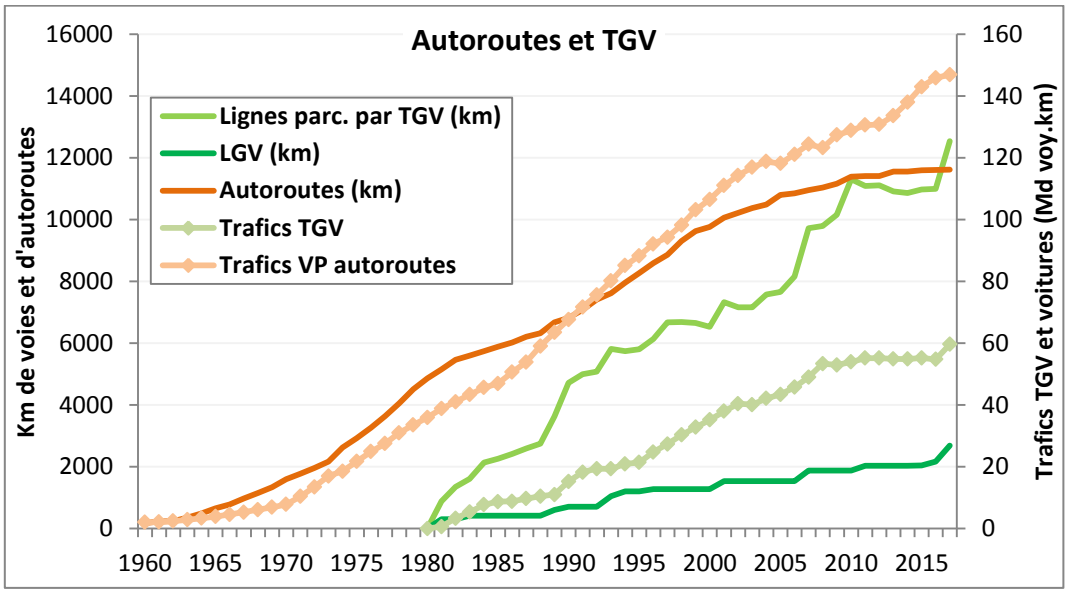


Figure 76 : Longueur des infrastructures et trafics sur les autoroutes et LGV, 1960-2017 (CGDD, 2019b ; CITEPA)
Les kilomètres de LGV et les kilomètres totaux de voies parcourues par des TGV sont indiqués ; les échelles de gauche (pour les km d'infrastructures) et de droite (pour les trafics TGV et voitures sur autoroutes) sont les mêmes pour les deux modes

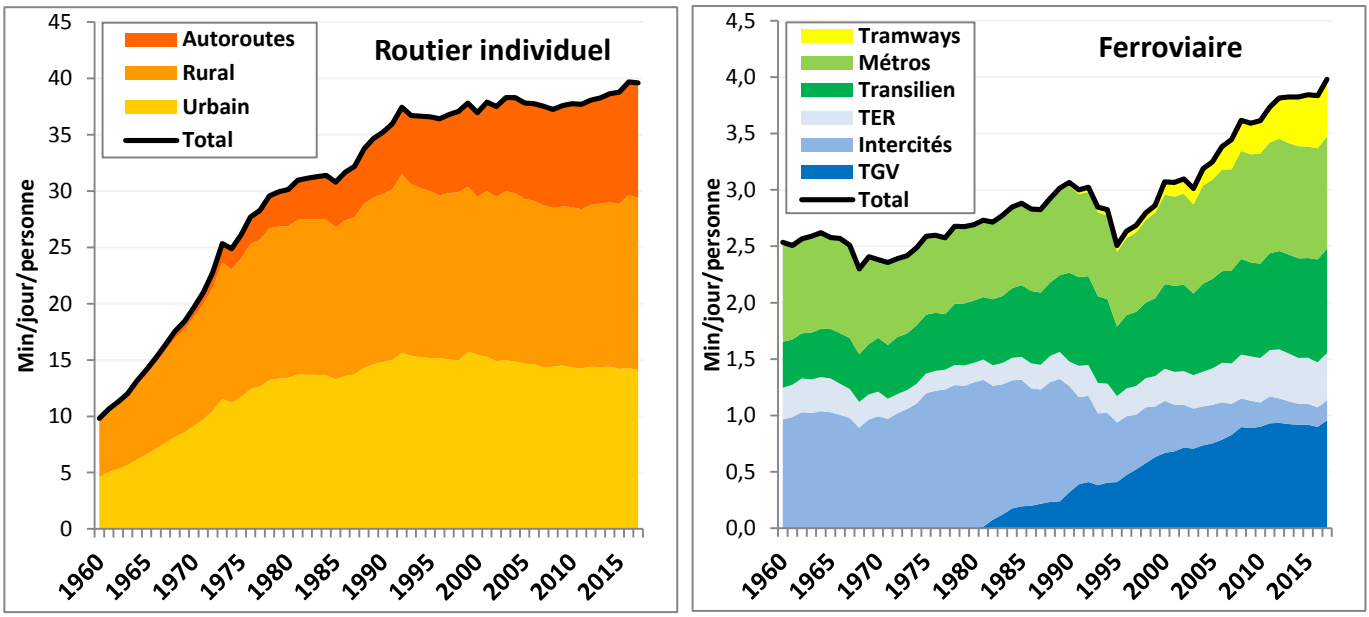


Figure 77 : Répartition des temps de transports routiers individuels et ferroviaires par réseau de 1960 à 2017
Le trafic routier individuel regroupe ici les voitures, 60 % des VUL et les 2-roues motorisés

Concernant les **infrastructures**, la période a vu le développement régulier des autoroutes à partir des années 1960, avec un ralentissement sur les dernières années jusqu'à environ 11 600 km en 2017. Le trafic des voitures personnelles (VP) sur la Figure 76 montre une progression forte sur l'ensemble de la période 1960-2017, sans ralentissement important sur les dernières années. Pour le ferroviaire et le TGV, les lignes à grande vitesse se sont développées de manière progressive sur le territoire à partir de 1981, atteignant cependant un nombre de kilomètres cumulés beaucoup plus faible, de quasiment 2700 km fin 2017 avec les prolongements jusque Rennes et Bordeaux mis en service durant l'été. Cependant, le trafic des TGV s'étend également sur des lignes classiques, limitées à des vitesses plus faibles, si bien que les TGV circulent en tout sur plus de 12 500 km de lignes en 2017. Les vitesses des TGV sont de 320 km/h sur les quasiment 1000 km de portions les plus rapides (sur Paris-Strasbourg ou Tours-Bordeaux notamment), 270 et 300 km/h pour 1400 km (sur des lignes telles que Paris à Marseille, Lille ou Le Mans), complété par des portions à 220 km/h. Ces vitesses de 200 ou 220 km/h sont également présentes pour certaines portions de lignes classiques, qui sont plus fréquemment limitées à 140 ou 160 km/h, tandis que de nombreuses lignes sont soumises à des vitesses plus faibles (Figure 78, SNCF, 2020 ; Douté, 2017).

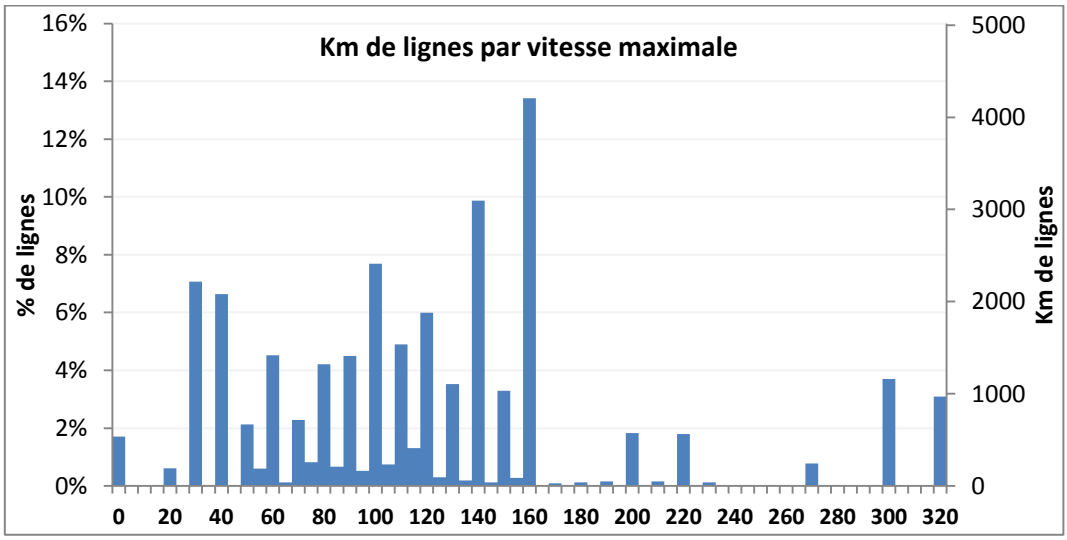


Figure 78 : Kilométrage des lignes du réseau ferré national selon la vitesse maximale nominale (SNCF, 2020)

La Figure 77 montre que les circulations sur autoroutes par les **véhicules routiers individuels** (VP, 60% VUL et 2RM) représentent de l'ordre de 10 minutes par jour et par personne en 2017. Cela correspond à un quart des temps de déplacements dans ces modes, ou 17 % des temps totaux. Ces trafics semblent principalement additifs et non substituts aux temps de déplacements urbains et ruraux, bien que ces derniers diminuent légèrement depuis le début des années 90. Ce sont donc les trafics sur autoroutes qui portent la légère hausse des temps de déplacements en véhicules routiers individuels sur ces dernières années, participant dans le même temps à l'accélération de ces modes. Même avec des hypothèses de vitesses moyennes sur autoroute relativement conservatrices, de l'ordre de 80-90 km/h sur la fin de période (en tenant compte des portions d'autoroutes inférieures à 130 km/h et des situations congestionnées), le passage de vitesses de 30 km/h en urbain ou 56 km/h en rural à 80 km/h est très significatif sur les temps de parcours.

A l'inverse, **le développement du TGV** s'est fait davantage en substitut aux Intercités en termes de temps de transport, bien que les trafics cumulés sur longue distance mesurés en voy.km aient augmenté avec l'introduction du TGV (cf chapitre 1, Figure 30). Les temps de déplacements cumulés des Intercités et TGV restent proches d'une minute par jour et par personne en moyenne sur 1960-2017, et étaient légèrement supérieurs à l'actuel sur la période 1975-1990 (Figure 77). Les hausses de trafic ont donc été rendues possibles par l'augmentation des vitesses, mais non par une hausse de l'usage du ferroviaire pour la longue distance. Les Français passent à peu près autant de temps dans les trains longue distance en 2017 qu'en 1960. C'est là une différence notable entre courte et longue distance pour les trafics ferroviaires. Pour ces deux catégories, les distances parcourues par personne ont plus que doublé entre 1960 et 2017, mais avec des facteurs explicatifs différents. Pour la longue distance, c'est principalement sous l'effet de la hausse de la vitesse commerciale, qui a augmenté de 81 km/h en 1960 à 139 km/h en 2017 d'après les estimations (soit +71% ; la longue distance incluant 50 % des TER), tandis que les temps de transport évoluaient peu (+22 %). Au contraire, la multiplication par deux des trafics sur courte distance s'explique très peu par la hausse de vitesse (estimée de 35 à 39 km/h entre 1960-2017, avec une légère tendance à la baisse sur les dernières années avec le développement des tramways), mais au contraire par des temps de transport croissants (+84 %, de 1,4 à 2,6 min/jour en moyenne). Au global, la vitesse moyenne du ferroviaire augmente de 55 à 73 km/h sur 1960-2017 (+32 % ; Figure 79). Cette augmentation a relativement peu d'impact sur la hausse de la vitesse moyenne des déplacements, car le train ne représente qu'environ 5 % des temps de déplacements, et que sa vitesse est relativement proche de la vitesse moyenne globale.

Ainsi **l'effet de diffusion des infrastructures rapides sur la hausse de la vitesse moyenne** des déplacements est essentiellement **le fait du développement des autoroutes**. Cet effet agit à la hausse sur la vitesse pour l'ensemble de la période 1960-2017, et de manière plus régulière que l'effet de report modal. L'impact est cependant plus faible, et proche d'une hausse de +0,1 km/h par an en moyenne, ou de 5 km/h sur l'ensemble de la période, soit 6 fois moins que l'effet de report modal.

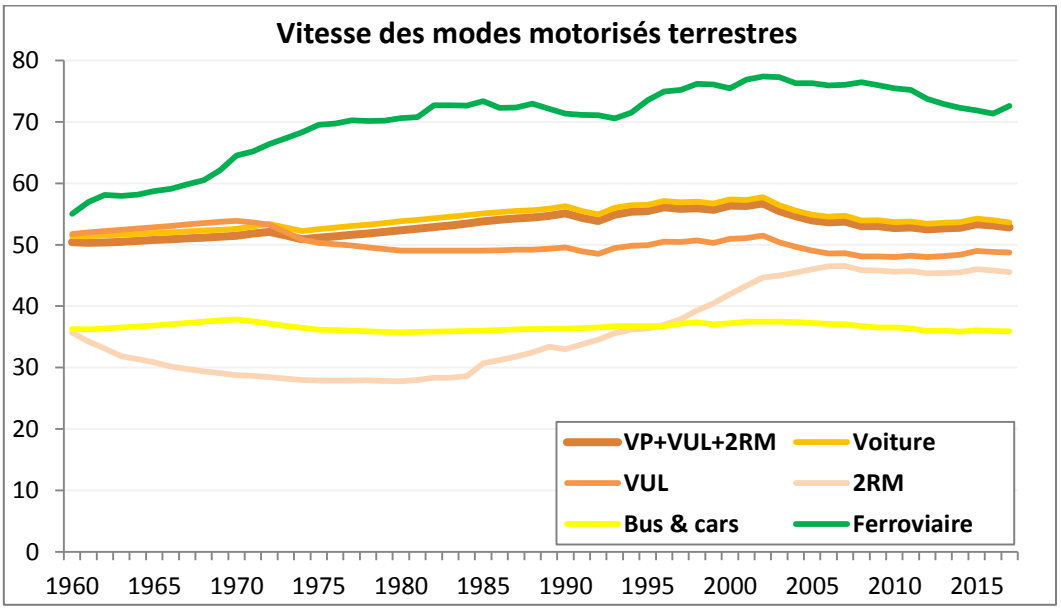


Figure 79 : Estimation de la vitesse moyenne des modes routiers et ferroviaires de 1960 à 2017

4.2.3. L'évolution des vitesses pratiquées par (sous-)mode

L'évolution des vitesses pour chaque mode est influencée par des **facteurs à la hausse** tels que le progrès technique, et des **facteurs limitants**, très variés selon les modes, tels que l'insécurité et la congestion pour les modes routiers (voir respectivement les parties 4.1.2 et 3.3.2 pour les facteurs à la hausse et les limites à la vitesse).

Les deux modes ayant les temps de parcours les plus significatifs sur la période sont les transports routiers individuels, ainsi que la marche à pied, essentiellement en début de période. C'est donc sur ces deux modes que les évolutions peuvent avoir des impacts les plus significatifs sur la vitesse moyenne. Pour la marche, une vitesse constante a été retenue (3,6 km/h), au vu des imprécisions des éventuelles évolutions temporelles des enquêtes.

Pour les **transports routiers individuels**, il est important de regarder l'impact des politiques de **sécurité routière** sur les vitesses pratiquées, et deux évolutions importantes que sont la mise en place des vitesses limites sur les routes rapides en 1973-1974, et des radars en 2003.

Pour 1973-1974, qui a vu la mise en place des limitations à 90, 110 et 130 km/h pour les réseaux rapides, il n'y a pas de données disponibles pour suivre l'évolution des vitesses pratiquées suite à ce changement. En revanche, les données d'accidents mortels sur les routes, qui dépendent fortement des vitesses pratiquées, montrent une rupture suite à l'introduction de cette mesure, qui concorde cependant avec l'obligation du casque à motos et de la ceinture de sécurité à l'avant hors agglomérations. Le nombre d'automobilistes tués sur les routes, qui était en forte augmentation par l'augmentation du trafic, chute de quasiment 25 % entre 1972 et 1974. Rapporté au trafic, le nombre de morts était relativement constant sur les 15 années précédentes ; en 2 ans, il chute de 32 % (d'environ 42 à 29 tués/Md veh.km ; Orselli, 2009). Les études sur la sécurité routière indiquent par ailleurs qu'une réduction des vitesses de 10 % réduit de 10 % les accidents matériels, de 20 % les accidents corporels et de 40 % le nombre de tués (Sétra, 2006). En tenant compte de ces ordres de grandeur, les vitesses auraient pu être réduites de 8 % si c'était le seul facteur, donc moins en réalité, sachant aussi que le nombre de tués rapporté au trafic a continué à baisser de quasiment 4 %/an les années suivantes.

Pour la période plus récente, l'observatoire national interministériel de la sécurité routière (ONISR) donne les vitesses pratiquées pour les routes à 50, 90, 110 et 130 km/h. Il est possible de reconstruire l'évolution sur la période 1987-2017, en corrigeant les ruptures de série dans les chiffres des bilans de sécurité routière et de l'observatoire des vitesses (Figure 80 ; ONISR, 2019, 2020a). Ces vitesses correspondent à des situations sans congestion, en ligne droite et sans obstacle particulier, c'est-à-dire les vitesses en circulation fluides intégrées dans la décomposition. Les données montrent une rupture importante suite à l'introduction des radars sur les routes à partir de 2003 : alors qu'elles avaient augmenté respectivement de 15 et 12 km/h entre 1987 et 2002 (env +12 %), les vitesses sur les routes à 130 et 110 km/h chutent de 7 et 8 km/h entre 2002 et 2005 ; sur cette même période de 3 ans, les vitesses pratiquées ont baissé de 7 km/h sur les routes à 90 km/h, et de 5 km/h sur les routes d'agglomérations à 50 km/h, alors que leurs tendances étaient stable et en légère baisse avant 2002. Ces évolutions se traduisent par une baisse de la vitesse moyenne des modes routiers individuels de -2,8 km/h entre 2002 et 2005 (soit -4,8 % ; Figure 79). La baisse est moins forte que pour les chiffres de l'ONISR, car elle s'applique aux seules situations non congestionnées, et la diffusion vers les autoroutes est toujours en cours sur cette période.

L'impact sur la vitesse moyenne de l'ensemble des déplacements est estimé à -0,9 km/h (soit -1,8 %), alors que la vitesse augmente avant 2002 ; pour les seuls trajets intérieurs, la baisse est estimée à -1,6 km/h (soit -3,6 %). Ainsi la baisse des vitesses moyennes via le déterminant de la vitesse par réseau fait plus que compenser les facteurs à la hausse du report vers les modes et infrastructures rapides, aussi bien pour les pas de temps 2000-2005 que 2005-2010 (voir pour la décomposition avec international compris, en Figure 72).

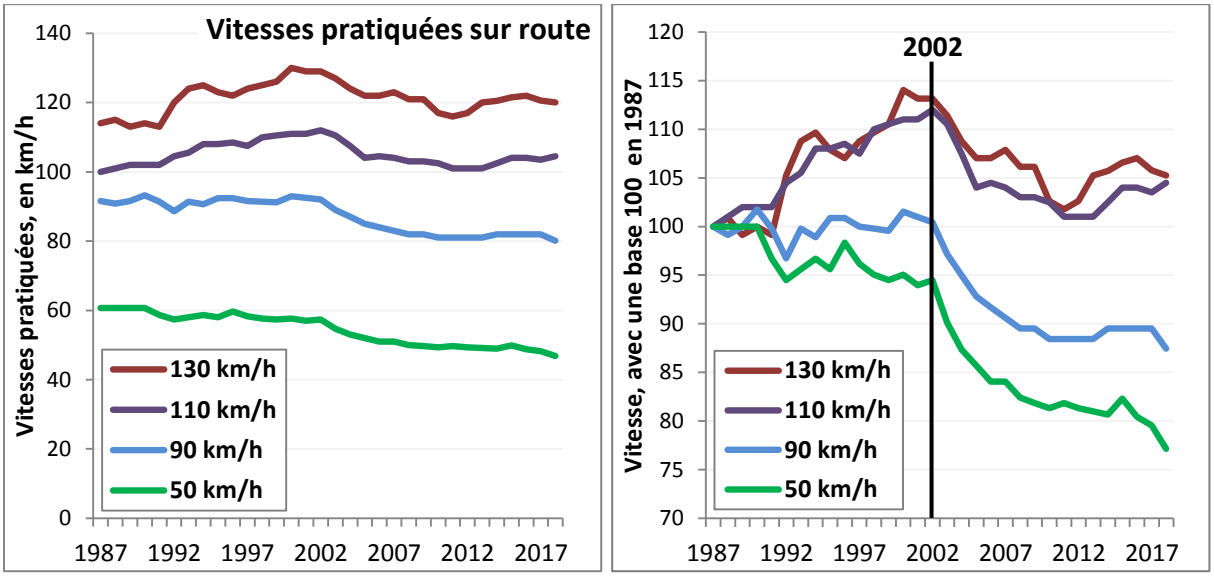


Figure 80 : Vitesses pratiquées sur les routes à 50, 90, 110 et 130 km/h entre 1987 et 2017
Données de l'ONISR, corrigées des ruptures de séries

L'autre évolution d'importance pour les transports routiers concerne la **congestion routière**, et son éventuelle évolution au cours du temps. Il existe peu de données pour répondre à la question posée ici. Les principales données concernent les encombrements sur le réseau principal, dont l'évolution est suivie sur la période 1982-2017 sur le périphérique parisien, le reste du réseau principal de la région et en province (Figure 81 ; CNIR, dans URF, 2018). Plusieurs enseignements sont à retenir. Bien que les mesures les plus récentes sont automatisées et pourraient être plus complètes que pour les années les plus anciennes, une forte augmentation est visible sur la période, avec une multiplication des encombrements par 5,7. Cette augmentation est stoppée sur le début des années 2000. Cela coïncide logiquement avec le ralentissement du trafic routier total sur cette période, et donc indirectement avec les baisses de vitesses vues précédemment qui ont pu inciter à réduire les distances parcourues (point discuté en 4.3.1). Aussi ces encombrements semblent très sensibles à l'évolution de ce trafic routier total, et une hausse de 10 % du trafic se traduit par une augmentation bien plus forte de la congestion. Le graphique et les données complémentaires montrent également que les embouteillages sont concentrés à 65 % en Île-de-France en 2017, une proportion en baisse depuis 1982 due à des encombrements relativement constants sur le boulevard périphérique au cours de la période. Hors Île-de-France, les encombrements se concentrent essentiellement autour des plus grandes villes françaises, comme Lyon, Bordeaux, Marseille ou Lille.

Ces embouteillages étant croissants aux mêmes moments que les vitesses pratiquées sur les routes, il est important d'évaluer si ceux-ci pourraient compenser les gains de temps sur les parties non congestionnées. Pour cela, il faut convertir les données d'encombrement évaluées à environ 2,2 millions d'heures.km en temps de parcours. Un tel calcul montre la hausse des

encombrements entre 2010 et 2017 pourrait représenter +0,3 min/jour/personne de transport[3] (moins de +0,1 %/an), ce qui est relativement faible par rapport aux tendances identifiées sur la vitesse et les temps de transport sur cette période.

En revanche, ces données ne permettent pas de suivre l'évolution de la congestion dans les zones urbaines. Il est probable qu'elle n'ait pas fortement évolué ces dernières années, car les trafics routiers tous véhicules sont à peu près constants depuis le début des années 90 en milieu urbain. La Figure 77 montrait ainsi des temps individuels de déplacements en légère baisse en urbain, ce qui donne des temps relativement constants au global, en tenant compte de l'augmentation de la population. Les chiffres parfois relayés par la presse se concentrent surtout sur quelques grandes villes où les temps passés dans les embouteillages (ce qui est différent du temps perdu) peuvent parfois être importants, de l'ordre de 69 heures/an à Paris ou environ 30 h/an à Lyon, Bordeaux ou Marseille, soit respectivement 11 et 5 min/jour (Cebr, 2014 ; INRIX, 2018). Ramenés sur la moyenne des villes françaises, dont le périmètre n'est pas explicité, ces chiffres baissent à 22 heures annuelles soit 3,6 min/jour ; sur l'ensemble de la population, ils baissent à moins d'une minute par jour.

Ces éléments convergent pour indiquer un faible impact de la congestion sur l'évolution des vitesses de déplacement, bien que celle-ci puisse être importante à certains endroits, comme en Île-de-France où son augmentation a probablement un rôle dans l'augmentation des temps de déplacements observés ces dernières décennies. La décomposition inclut l'évolution récente sur le réseau principal, et des temps de stop&go de l'ordre de 22 % des temps de déplacements en voiture pour obtenir les moyennes globales, soit environ 8,3 min/jour sur la période récente (le stop&go inclut par exemple les temps d'arrêts aux feux, hors congestion, d'où des temps plus élevés que les chiffres d'encombrements ; données André, 2020).

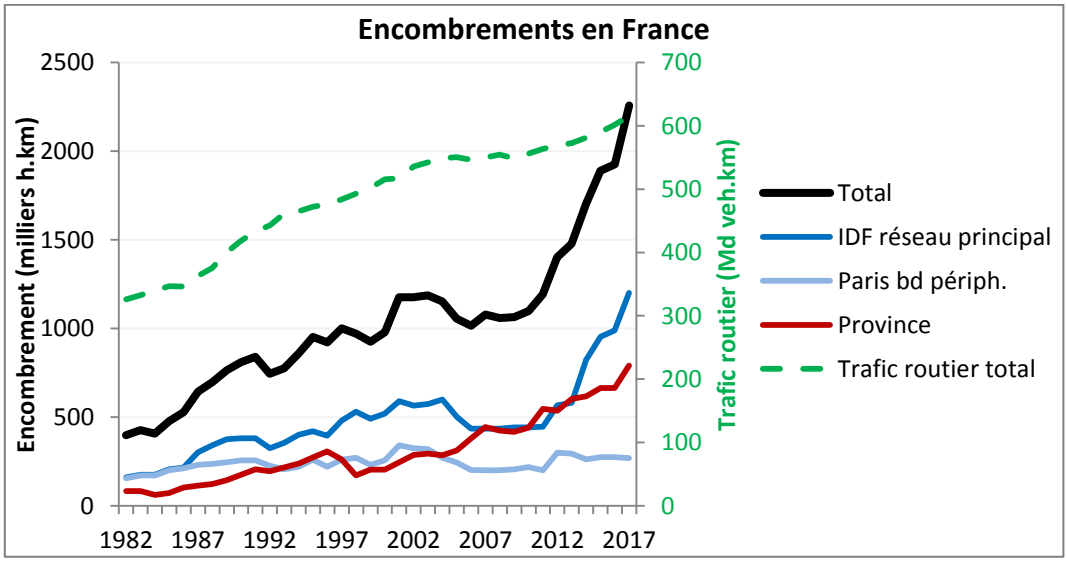


Figure 81 : Encombrements routiers et trafic total sur le réseau principal français, de 1982 à 2017
Données du Centre National d'Iinformation Routière (CNIR), corrigées des ruptures de séries (dans URF, 2018)

[3] Une voiture fait environ 4 mètres de long (ICCT, 2019), en considérant toutes les voitures à l'arrêt dans les files d'encombrement, avec 1 m d'écart entre elles, et 1,58 personnes par voiture en moyenne (davantage sur les trajets longue distance, moins sur les trajets quotidiens qui concentrent la majorité des encombrements), ces 2,2 M h.km correspondraient à 714 M heures (2,2 x 200 voitures par km x 1,58), soit 11 heures par an et 1,8 minutes par jour. Avec l'hypothèse plus raisonnable d'une vitesse moyenne dans les encombrements de 20 km/h, la distance de sécurité est de 11 mètres, soit une voiture tous les 15 mètres, soit un temps de 0,6 minute/jour dans les embouteillages, et un temps perdu un peu inférieur.

Les estimations de vitesses des modes routiers sont présentes en Figure 79 plus haut. Elles sont essentiellement marquées par des tendances croissantes relatives à la diffusion des autoroutes et à des périodes d'augmentation des vitesses pratiquées, et par des tendances à la baisse en 1973-74 et 2002-2005 par les politiques de sécurité routière.
Les **deux-roues motorisés** ont la particularité d'avoir des vitesses bien plus faibles que les voitures sur les décennies de la fin du XXème siècle, en raison de la forte proportion de cyclomoteurs dont la vitesse est plus faible, tel qu'expliqué dans la méthodologie en 2.3.2.

Pour le **transport ferroviaire**, les vitesses ont peu évolué sur la courte distance, mais bien plus sur la longue distance, comme cela a été détaillé sur l'impact des LGV (4.2.2). Les meilleurs temps de parcours des trajets ferroviaires interurbains sont disponibles sur de nombreuses relations (SNCF, 2019). Ils permettent de suivre l'évolution des vitesses pour les trains les plus rapides sur chaque relation, depuis 1877 et jusqu'aux évolutions les plus récentes liées à l'introduction du TGV (Figure 82 ; données 1877-1907 pour les seuls trains de 3ème classe ; RGCF, 1909). L'augmentation de la vitesse pour la moyenne des relations considérées apparaît régulière sur les dernières décennies, seulement interrompue de manière marquée par les deux guerres mondiales. L'introduction du TGV constitue une rupture sur les liaisons concernées, créant un réseau longue distance à deux vitesses. Dans le même temps, les vitesses moyennes sur les lignes Intercités stagnent depuis le début des années 70 autour de 120 km/h de vitesse commerciale pour les trains les plus directs. Seul le développement des TGV, qui a progressivement concerné un nombre croissant de lignes et de relations, a permis d'augmenter la vitesse moyenne sur longue distance.

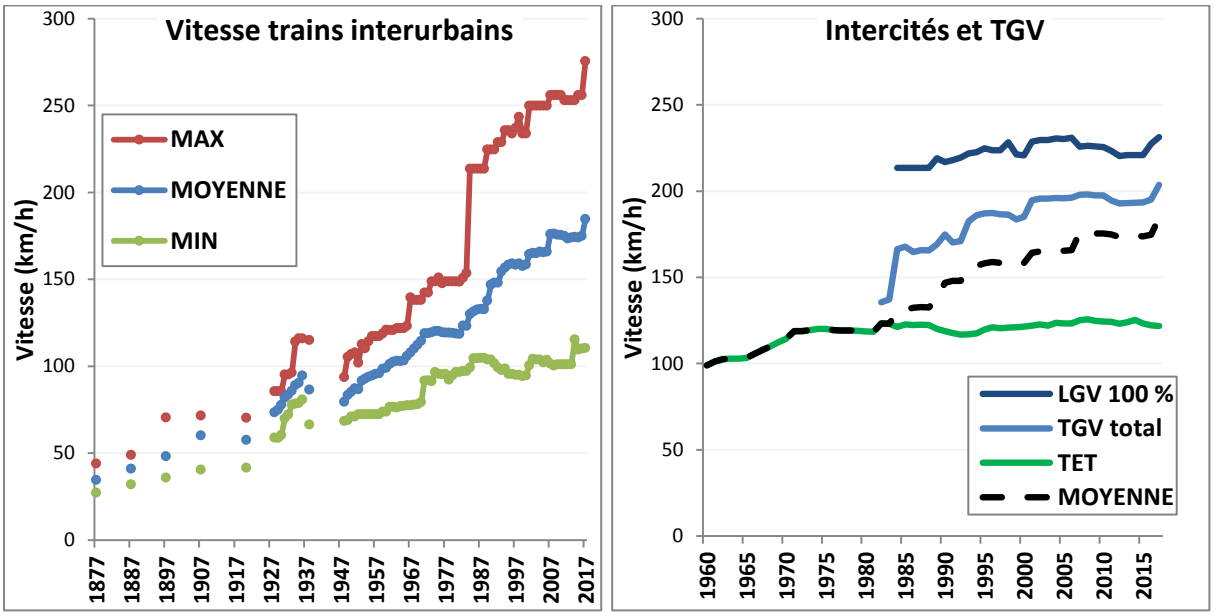


Figure 82 : Vitesses commerciales des trains interurbains pour les meilleurs temps de parcours
Moyenne pour 7 à 18 relations pour les premières années, 36 à partir de 1963, 44 relations sur la fin de période (à gauche) ; vitesses moyennes pour les meilleurs temps de parcours des relations desservies par des lignes Intercités et TGV, y.c. quand une partie du parcours est sur ligne classique pour TGV total, et 100 % sur LGV sinon (à droite ; SNCF, 2019 ; RGCF, 1909)

Enfin, le **transport aérien** voit sa vitesse commerciale augmenter en début de période sous l'effet du renouvellement progressif de la flotte pour passer aux avions à réactions, plus rapides. Ces gains de vitesses sont d'autant plus forts pour les trajets internationaux, dont les temps de décollage et d'atterrissage sont plus amortis (Peeters et al, 2005 ; CGDD, 2019b).

4.3.L'évolution des vitesses : une saturation durable ?

Points et messages clés :

- ✓ Au début des années 2000, le pic de la demande concorde avec un **pic sur les vitesses** moyennes des transports, apportant une nouvelle clé de lecture au *peak travel*.
- ✓ **A l'avenir**, la poursuite de la croissance du trafic aérien et du trafic sur autoroutes pourrait contribuer à la hausse de la vitesse moyenne ; au contraire, le renouveau des modes actifs et les baisses de vitesses sur routes pourraient la faire baisser.
- ✓ Les principales évolutions qui vont dans le sens de la **transition énergétique** vont également dans le sens d'un **ralentissement** de la vitesse moyenne des mobilités.

4.3.1. Saturation de la vitesse et de la demande ?

Les analyses précédentes ont permis de mettre en avant l'évolution des temps de transport en pourcentage depuis 1800 (Figure 73), et de la vitesse avec un pas de temps de 5 ans (Figure 72). La Figure 83 ci-dessous reprend les temps de déplacements en minutes par jour, et les deux courbes comparent les distances moyennes effectuées par jour avec la vitesse moyenne estimée. **Les deux courbes de demande et de vitesse sont logiquement proches sur l'ensemble de la période**, étant donné que les temps de déplacements sont proches d'une heure de transport par jour, conformément à ce que postule la conjecture de Zahavi.

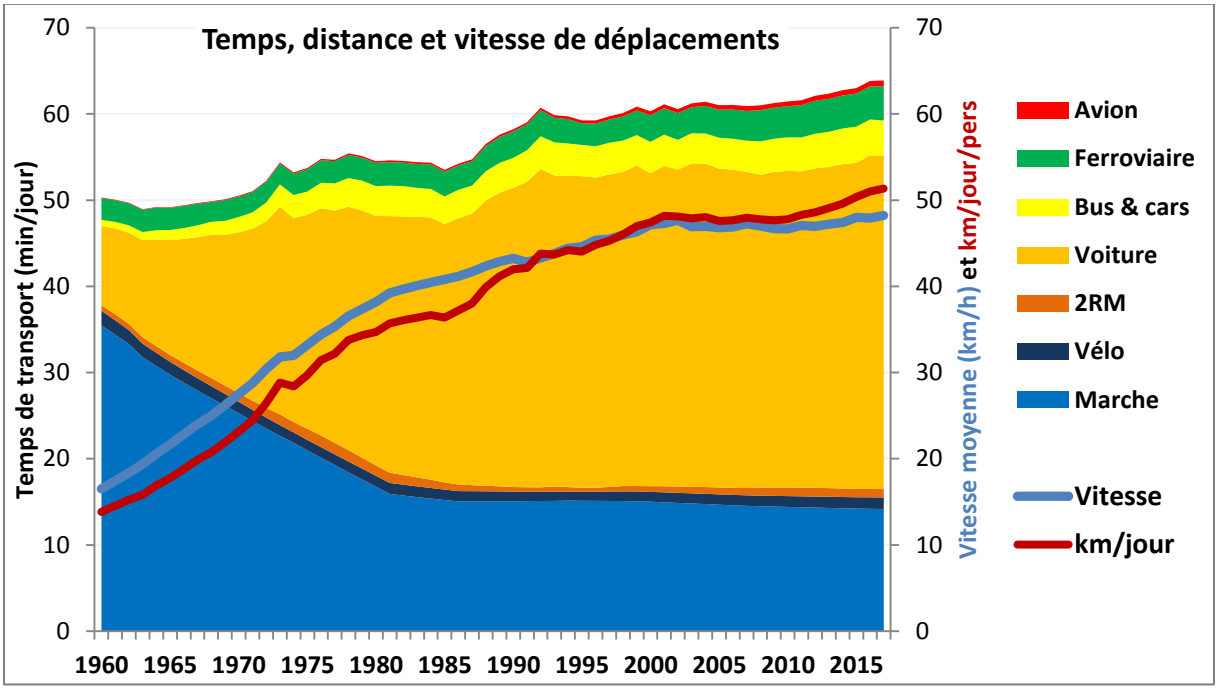


Figure 83 : Estimation des temps de déplacements par mode de déplacement sur 1960-2017, vitesse et demande
Temps de déplacements en minutes et demande en kilomètres, par jour et par personne ; vitesse en km/h ; transport aérien international inclus, sans lequel la vitesse moyenne est maximale en 2002

Cependant, **les temps de déplacements apparaissent croissants sur la période**, de 50 minutes en 1960 à 64 minutes en 2017, avec des tendances étranges notamment sur la fin des années 80. Il est possible que certaines tendances inexpliquées reflètent essentiellement les incertitudes liées à l'évolution de la marche à pied, surtout pour les périodes les plus anciennes marquées par une forte proportion du budget-temps de transport qui lui est consacré. Il a également été noté que les données pour la marche ne sont disponibles qu'aux intervalles des ENTD, qu'elles sont potentiellement sous-estimées (par omission de petits

trajets notamment), et que la valeur de la vitesse choisie a aussi un impact important sur les temps de déplacements calculés. Ici la valeur de 3,6 km/h est choisie, une valeur plus faible rendrait les temps de marche plus importants ; par exemple, choisir une vitesse de 3 km/h donne des temps de déplacements de 57 minutes en 1960 et réduit donc la tendance à la hausse sur la période.

Malgré ces incertitudes, **la tendance à la hausse des budgets-temps de transport (BTT) est tout à fait probable**, certaines enquêtes passées l'ayant déjà suggéré (3.2.1). Cette hausse est notamment très claire pour les déplacements quotidiens en Île-de-France, qui concentre 20 % de la population française. L'ENTD suggérait également une légère hausse des temps quotidiens entre 1994 et 2008 alors qu'ils étaient constants de 1982 à 1994. Dans le même temps, le nombre de trajets à longue distance augmentait de 74 % par personne sur 1982-2008, témoignant d'une hausse potentielle de l'ordre de 3 min/jour une fois ramenée sur l'année (d'environ 4-5 minutes à 7-8 min/jour en moyenne). Couplée à la hausse de 1,5 min/jour pour les déplacements du quotidien, la hausse cumulée de 4,5 min/jour entre 1982 et 2008 serait relativement proche des +6,5 min/jour entre ces deux dates dans la décomposition.

L'autre point important de l'évaluation temporelle concerne **l'évolution régulière des temps estimés depuis le début des années 90**, période qui a vu des variations plus fortes sur les distances de déplacements. Cette relative stabilité, ou plutôt la lente augmentation des temps de déplacements permet d'étudier plus facilement le lien entre l'évolution de ces distances journalières avec l'évolution calculée de la vitesse moyenne.

En effet, la comparaison des courbes de **distances et de vitesses montrent des tendances très proches depuis 1993**, avec seulement une courbe des distances qui augmente plus fortement en raison de la faible augmentation des budgets-temps. Cela est visible pour la voiture seule, ou pour l'ensemble des modes confondus (Figure 84). Lorsque l'aérien international est inclus, une très légère baisse de la vitesse et de la demande apparaît sur la décennie 2000. En revanche, pour le seul trafic intérieur, périmètre plus généralement utilisé, **un pic des kilomètres et de la vitesse** apparaissent très clairement au début des années 2000.

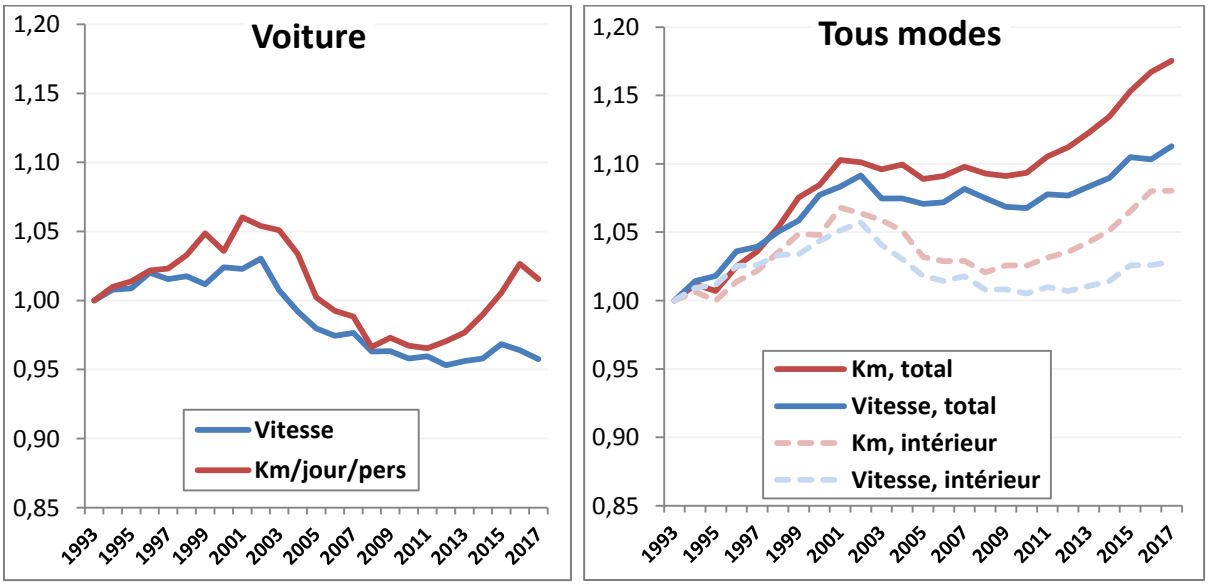


Figure 84 : Evolution de la vitesse et des kilomètres en voiture (à gauche), et tous modes de transport (à droite)
Kilomètres par jour et par personne ; à droite, le total inclut l'aérien international, contrairement au trafic intérieur seul

Ainsi cette analyse donne un nouvel éclairage sur la question du ***peak car*** et du ***peak travel***, qui pourraient être dus en partie au plafonnement et même au pic des vitesses moyennes de déplacements, notamment sous l'effet de la mise en place des radars. Cette hypothèse est complémentaire des autres explications généralement avancées pour ce phénomène qui a été observé dans de nombreux pays (Millard-Ball et Schipper, 2011 ; Newman et Kenworthy, 2011 ; Goodwin, 2012 ; Metz, 2010, 2013 ; Bastian et al, 2016, 2017 ; Wadud et Baierl, 2017 ; Grimal, 2015, 2017).

Comme évoqué en chapitre 1 (3.2.1), les débats portent notamment sur le caractère temporaire ou permanent du phénomène, la question qui lui est liée de savoir si les variables économiques (PIB et prix du pétrole) suffisent à expliquer le phénomène ou non, et les autres facteurs qui pourraient rentrer en compte. Les questions de budgets-temps de transport (BTT) et de vitesse sont parfois évoquées, sous des formes différentes de la méthode quantitative utilisée ici ; Newman et Kenworthy (2011) donnent comme première des six raisons évoquées l'incapacité à continuer l'étalement urbain en préservant les BTT ; Metz (2010) évoque aussi bien les BTT que le facteur vitesse dans les évolutions constatées, et fait l'hypothèse d'une saturation de la demande par la baisse d'utilité marginale liée à ces hausses de vitesses ; Grimal (2015) cite parmi les explications du plafonnement de l'automobile en France la volonté des ménages de préserver leurs BTT quotidiens, une hypothèse qui semble ici confirmée. L'analyse conclue également à l'importance des variables économiques conjoncturelles, couplée à des effets de saturation sur la motorisation des ménages et des comportements générationnels liés d'une part au vieillissement de la population ou à une moindre utilisation de la voiture chez les plus jeunes. **Ces différents facteurs sont complémentaires et ont donc pu se combiner**. Par ailleurs, le pic sur la vitesse peut expliquer la tendance à la baisse des kilomètres qui arrive légèrement plus tôt que ce que suggèrent un modèle les seules variables économiques (Wadud et Baierl, 2017).

Les évolutions identifiées sur la vitesse permettent d'expliquer les tendances à la baisse sur la décennie 2000, mais aussi la hausse récente des distances parcourues. Ces tendances sont aussi mises en évidence par les enquêtes globales transport pour l'Île-de-France (Figure 85). Cela pose la question de la permanence de cette hausse et des évolutions futures possibles.

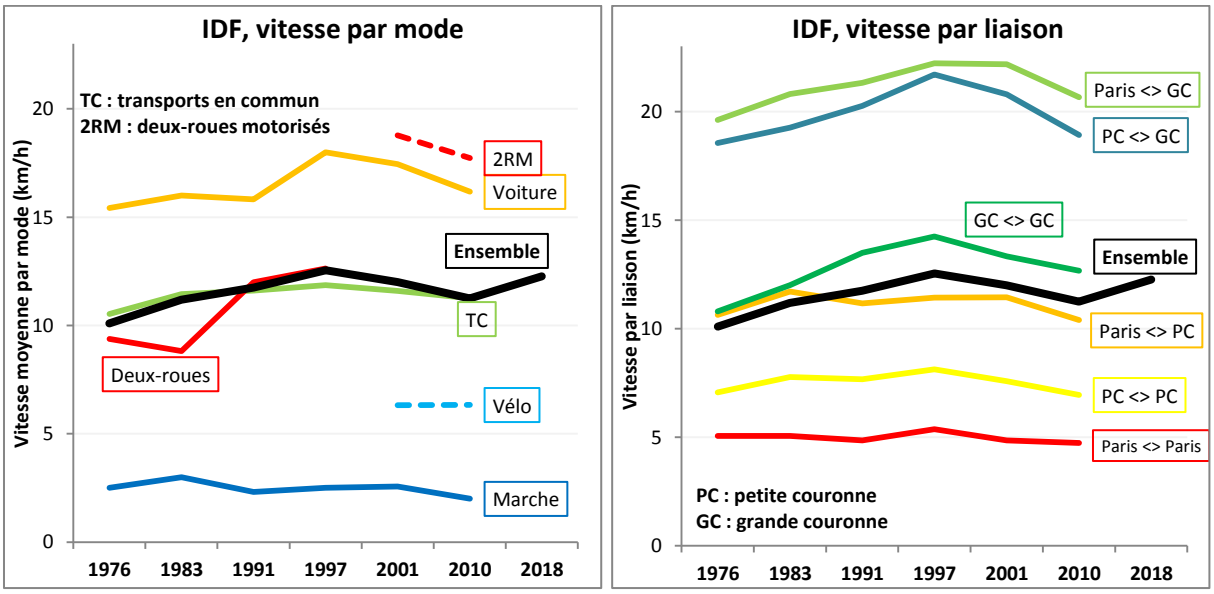


Figure 85 : Vitesses par mode et par type de liaison dans les enquêtes globales transport d'Île-de-France (Omnil)

4.3.2. Evolutions futures possibles de la vitesse

Les évolutions récentes et en cours des mobilités et des politiques publiques peuvent renseigner les possibles évolutions futures de la vitesse moyenne, et l'éventualité de la saturation voire du pic de celle-ci.

Concernant le **facteur de report modal** (4.2.1), il semble relativement saturé sur les transports intérieurs, mais pourrait continuer à contribuer à la hausse de la vitesse moyenne sur longue distance. Le recul historique a mis en évidence que les temps de transport en voiture ou plus largement en transports routiers individuels sont relativement stagnants depuis le début des années 90. Les temps sont légèrement en hausse, mais c'est l'augmentation en termes de budget-temps de transport (BTT) qui peut faire augmenter les vitesses. Par ailleurs, un report modal supplémentaire vers la voiture n'augmenterait que très faiblement la vitesse moyenne, étant donné que la vitesse de la voiture (53 km/h) n'est pas beaucoup plus élevée que la vitesse moyenne (48 et 42 km/h avec et hors international ; Tableau 14). Aussi le gain de parts modales (en termes de BTT) par la voiture semble peu probable, en raison de taux de motorisations qui semblent saturés et des trafics des modes alternatifs plutôt dynamiques. Ainsi les transports en commun routiers et ferroviaires ont des BTT plutôt en hausse depuis plusieurs décennies (Figure 74), en particulier sur les déplacements quotidiens, une tendance qui ne devrait pas évoluer significativement. Enfin, pour les déplacements quotidiens, le regain d'intérêt pour les modes actifs devraient avoir un effet de ralentissement de la vitesse moyenne si cela se traduit par une augmentation significative des proportions de BTT. L'objectif que la France s'est fixée de passer à 12,5 % de parts modales du vélo d'ici 2030 (en nombre de trajets, par rapport à 2,7 % en 2008) reviendrait à passer le BTT du vélo de 2 % à 10 % environ. Si cet objectif venait à être atteint, ces gains de 8 % de BTT se feraient probablement au détriment de modes plus rapides en moyenne, bien que le vélo puisse être plus rapide sur certains trajets urbains (en particulier en vitesse porte-à-porte), par rapport au bus ou à la voiture. Enfin, sur la longue distance, le nombre de voyages pourrait encore augmenter selon l'évolution du pouvoir d'achat et des comportements de mobilité, augmentant de fait la vitesse moyenne du fait de la vitesse moyenne plus forte à longue distance. L'effet est particulièrement significatif pour le transport aérien international, dont la dynamique est la cause principale de l'effet du report modal à la hausse sur les dernières décennies (l'aérien s'attribue 73 % de la hausse sur 1990-2017, les autres modes se compensant en partie ; Figure 75). La question reste cependant soumise à de nombreuses incertitudes, en particulier en raison des effets potentiellement durables que pourraient avoir la crise du coronavirus, et la montée des préoccupations climatiques qui pourraient encourager à la modération du trafic aérien.

Le **facteur de diffusion des infrastructures rapides** (4.2.2) a également participé à la hausse de la vitesse moyenne sur l'ensemble de la période, et pourrait être proche de la saturation. En effet, la construction des infrastructures ralentit fortement sur les dernières années pour les autoroutes, qui ont permis des accélérations importantes pour les modes routiers individuels. L'état des finances publiques encourage désormais à limiter les nouveaux projets, en plus des contestations locales et des problématiques environnementales qui devraient contribuer au plateau sur les kilomètres d'infrastructures autoroutières. Malgré cela, le trafic autoroutier continue d'augmenter ces dernières années même si cette croissance a ralenti, elle pourrait se poursuivre dans la limite des BTT et de la saturation des infrastructures, qui sont de plus en

plus soumises aux encombrements, y compris pour les trajets quotidiens. Le développement des lignes à grande vitesse pour le ferroviaire a également permis une accélération de ses vitesses à longue distance depuis les années 80. Mais comme pour les autoroutes, les projets sont de plus en plus remis en question en raison de la problématique du financement de ces nouvelles infrastructures, une situation que pourrait aggraver la crise liée au coronavirus. Les trafics TGV peuvent encore augmenter à infrastructure constante, mais la problématique de saturation du réseau va également se poser de manière croissante, sur certaines lignes ou nœuds ferroviaires, en particulier pour les périodes et horaires de forte fréquentation (weekends, vacances, heures de pointe). Si la question des horaires décalés se pose régulièrement pour les transports en commun du quotidien, notamment en Île-de-France, elle devrait également se poser de plus en plus pour la longue distance ferroviaire, plutôt sous la forme de séjours décalés.

Enfin, les **vitesses pratiquées par réseau** (4.2.3) semblent plutôt orientées sur des tendances de long terme à la baisse, bien que marquées par des évolutions fluctuantes selon les politiques de sécurité routière mises en œuvre et les comportements des usagers. La réglementation semble toujours orientée vers la baisse des vitesses, avec pour dernières évolutions en date la mise en place des radars à partir de 2003 et le passage à 80 km/h sur les routes secondaires sans séparateur central à l'été 2018. Ces politiques sont généralement très contestées, par les automobilistes dont le 80 km/h était un des motifs déclencheurs du mouvement des gilets jaunes, et par certains politiques, comme en témoigne la volonté de certains départements de revenir sur la mesure, phénomène qui devrait toutefois se limiter à quelques portions de routes. Malgré ces contestations, en particulier pour les politiques nationales, il est probable que le mouvement à la baisse perdure, car il est également amplifié au niveau local par de nombreuses baisses récentes de vitesse sur les rocades, ou par la multiplication du 30 km/h en ville, qui permet en retour de favoriser les modes lents que sont la marche et le vélo (Héran, 2018). Ainsi les baisses sur certains réseaux encouragent aussi à ralentir ceux qui sont restés à des vitesses plus élevées, faisant progressivement accepter une tendance au ralentissement des vitesses limites. Dans ce mouvement, il serait possible que la vitesse maximale soit abaissée sur les autoroutes, une mesure qui était présente dans la stratégie nationale bas-carbone de 2015 (MEDDE, 2015).

Si les tendances sur ces trois principaux facteurs ont été citées sans focus spécifique sur la transition énergétique, les mesures dans son sens vont plutôt vers un ralentissement, point qui sera abordé ensuite en 4.3.3 afin de faire le lien avec les deux chapitres précédents.

Au-delà de l'évolution de ces trois déterminants, il pourrait être argué que de **nouveaux modes ou de nouveaux usages** pourraient apparaître, bousculant les prévisions précédentes : Hyperloop, Maglev, taxis volants, véhicules autonomes ou livraisons par drones pour les marchandises, les idées futuristes ne manquent pas de séduire régulièrement les médias et certains politiques. Les effets d'annonce et de communication, parfois dans le but d'organiser une levée de fond, cachent souvent des réalités plus compliquées qu'annoncées. Ainsi les véhicules autonomes ont récemment retenu une grande attention dans les médias, auprès des constructeurs, et dans les débats sur les transports et les politiques publiques. Finalement, la révolution annoncée par certains pour 2019 ou 2020 n'aura pas lieu à la vitesse prévue, et les coûteux projets montrent des signes de ralentissements qui devraient être renforcés par la crise

actuelle. Au-delà des limites techniques, économiques, ou environnementales qui peuvent compromettre ces projets (Crozet, 2015 ; Lacôte, 2018 ; OPECST, 2018), l'exploration de la diffusion passée de la vitesse invite à prendre avec précaution l'impact que pourraient avoir ces innovations sur la vitesse moyenne. En effet, les progrès technologiques ont généralement largement précédé la diffusion des modes : l'Hyperloop, qui n'est techniquement pas prêt aujourd'hui, ne pourrait pas représenter des trafics significatifs avant plusieurs décennies ; aussi sa probablement faible capacité de transport et le coût le limiteraient probablement à un faible nombre d'usagers, tandis que les contraintes foncières, économiques et environnementales liées aux infrastructures le limiterait sûrement à quelques rares liaisons ; enfin, la vitesse annoncée supérieure à 1000 km/h nécessite des relations directes ou avec un très faible nombre d'arrêts ; couplé au faible nombre de relations et aux contraintes d'emplacement des infrastructures, les temps d'accès pèseraient fortement sur les temps de parcours à longue distance, limitant l'intérêt de telles vitesses de pointe pour améliorer les vitesses porte-à-porte. Les taxis volants présentent certaines contraintes similaires, en particulier sur l'utilisation de l'espace public mais aussi sur les coûts énergétiques et financiers d'une telle technologie.

La question des véhicules autonomes pose une question plus large et non spécifique à cette innovation, qui concerne **le coût ou la valeur du temps de déplacement**. Le rêve vendu avec le véhicule individuel autonome est celui d'un salon ambulant dans lequel on pourrait à la fois se déplacer, tout en occupant le temps de déplacement par des activités diverses que ne permettent pas la conduite : travailler, dormir ou encore se divertir. Dans un tel cas, se pose la question du maintien ou non de la contrainte de budget-temps de transport, si le déplacement n'est plus ressenti comme un coût important. Pourquoi alors ne pas vivre encore plus loin de son travail, si l'on peut occuper le temps de déplacement par d'autres activités ? Si la question s'est posée récemment avec une plus forte acuité dans les débats sur le véhicule autonome, elle est tout à fait valable également pour d'autres modes. Les transports en commun ou le taxi permettent d'utiliser le temps de déplacement pour d'autres activités, ce que font une partie des voyageurs. Cela est d'autant plus facile : que le trajet est confortable, tel un trajet assis en TGV ou dans un avion, contrairement aux bus ou métros congestionnés aux heures de pointe ; que le niveau d'attention nécessité par le voyage est faible (routine du trajet, temps assez long entre les changements, fiabilité du temps de transport, peu de bruit, etc.) ; que les outils numériques permettent de réaliser des activités sur un téléphone ou un ordinateur portable (accès au wifi, échanges de SMS ou de mails, films ou jeux, information, etc.), une tendance qui s'est développée plus récemment. Le confort en conduite pour la voiture s'est également amélioré, et permet aussi certaines activités qui demandent peu d'attention, telles que la discussion avec les passagers ou l'écoute de la radio. Par le passé, ces modes motorisés ont également remplacés des modes actifs, pour lesquels la question du coût du temps est plus contrastée : l'effort physique qu'ils nécessitent encourage à limiter les temps de déplacements ; en revanche, l'activité physique est bonne pour la santé, et les déplacements peuvent être appréciés en partie comme des moments de détente ou d'activité physique pour préserver la santé, le coût du temps peut alors devenir négatif pour certains usagers. Ces questions sont particulièrement présentes dans l'évaluation socio-économique des politiques publiques de transport (voir notamment CGSP, 2013 ; Gössling et Choi, 2015).

La **hausse constatée sur les temps de déplacements** ces dernières décennies peut également être questionnée à la lumière de ces **gains de confort** : ont-ils permis de relâcher la contrainte des BTT ? Le pourront-ils davantage encore à l'avenir ? Si la réponse à cette question n'influence pas forcément beaucoup la vitesse moyenne des déplacements, elle influence indirectement les projections sur la demande de mobilité (les km par personne). Ceux-ci pourraient continuer à croître même en cas de saturation de la vitesse, si jamais les temps de déplacements continuaient à augmenter.

Ces éléments doivent en tous cas être **intégrés aux scénarios de prospectives** afin d'évaluer les effets des projections de demande de transport par mode sur les budgets-temps de transport (une notion développée par certains scénarios, tels que ceux du LET-Enerdata ou de l'IDDRI cf chapitre 2). Ainsi, le scénario de la stratégie nationale bas-carbone (SNBC) française prévoit une hausse du nombre de kilomètres par personne de l'ordre de +14 % entre 2015 et 2050. En estimant que la vitesse des modes sur courte et longue distance va rester stable sur la période, le développement des trafics et du report modal vers des modes plus lents (modes actifs, transports en commun sur courte distance) amènent à des temps de déplacements qui augmentent de 10 minutes (de 55 à 65 minutes par jour, soit +18% ; Figure 86)[4]. La désirabilité d'une telle évolution pose question, tout comme la faisabilité d'une telle hausse de la demande en cas de report modal vers les modes lents.
Le lien entre saturation possible de la vitesse moyenne pour les trafics intérieurs et demande, est seulement un des aspects concernant les **liens entre vitesse des déplacements et transition énergétique des mobilités**, un aspect qu'il s'agit désormais d'approfondir.

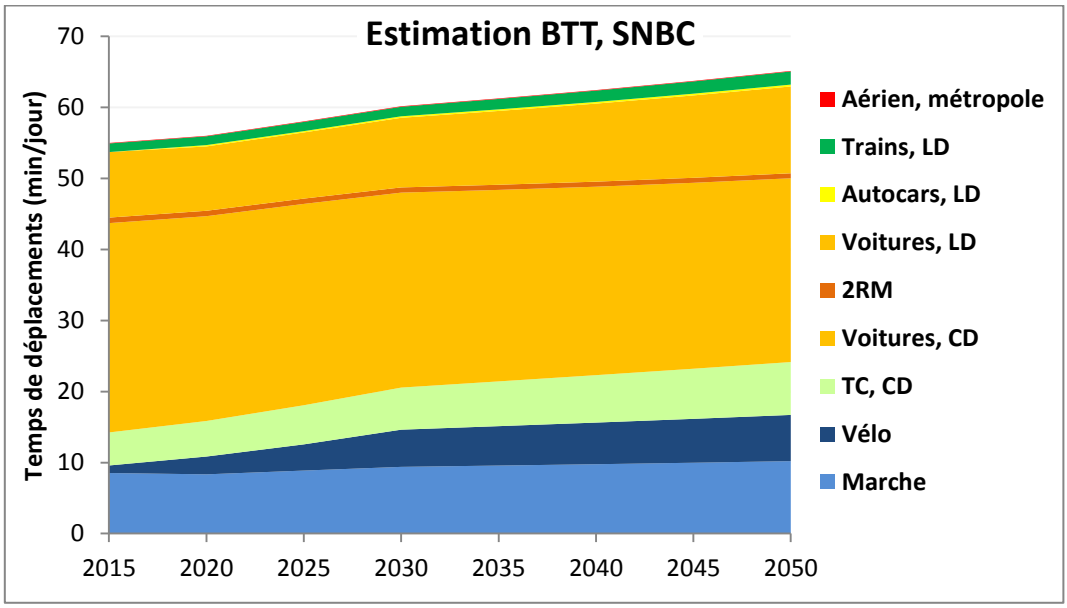


Figure 86 : Estimation des budgets-temps de transport (BTT) moyens en min/jour/personne dans la SNBC, 2015-2050
SNBC : stratégie nationale bas-carbone ; TC : transports en commun ; 2RM : deux-roues motorisés ; CD et LD : courte et longue distance ; hypothèses de calcul en note de bas de page

[4] Le calcul est réalisé en reprenant les vitesses moyennes en circulation (et non porte-à-porte) de cette analyse, pour les déplacements en Métropole, en intégrant 60% des VUL à l'analyse ; les détails ne sont pas disponibles entre trafics routiers et ferroviaires sur la courte distance, les vitesses y sont considérées constantes à 33 km/h entre 2015 et 2050 ; les détails sont en revanche disponibles pour le ferroviaire entre TGV, Intercités et TER, dont les vitesses sont considérées constantes ; les différences de temps de déplacements en début de période s'expliquent essentiellement par l'hypothèse des kilomètres en marche à pied, plus faibles dans la SNBC

4.3.3. La transition énergétique, synonyme de ralentissement ?

Parmi les éléments clés de l'évolution possible de la vitesse moyenne des déplacements, celles qui vont dans le sens de la transition énergétique sont généralement celles qui tendraient à limiter la hausse voire à faire baisser la vitesse moyenne. Ainsi les principaux facteurs possibles à la hausse concernent le développement du transport aérien et du trafic sur autoroutes, des tendances qu'il faudrait modérer pour limiter les émissions des transports. A l'inverse, les principaux facteurs possibles à la baisse de la vitesse sont le report modal vers les modes actifs et les transports en commun pour les déplacements de courte distance, et la baisse des vitesses pratiquées sur les routes, deux évolutions favorables à la transition énergétique.

Parmi les 5 facteurs étudiés dans les deux chapitres précédents, 3 d'entre eux ont des évolutions influencées de manière relativement forte par la vitesse des modes : la demande de mobilité, le report modal, et l'efficacité énergétique.

Le **lien entre vitesse et demande** a été largement explicité précédemment, en lien avec des temps de déplacements relativement constants au cours du temps. Etant donné que ce lien entre vitesse et demande est important, et que la demande est le principal facteur d'évolution des émissions (cf chapitre 1), la vitesse a un rôle important dans l'évolution des émissions. Ainsi les courbes de vitesse moyenne et d'émissions par personne sont également proches sur la période étudiée de 1960-2017.

A l'avenir, la modération de la demande pourrait être obtenue pour partie par une modération des vitesses, par les différentes évolutions explicitées ci-dessus, participant ainsi à la limitation des émissions de CO_2. La relation entre demande et vitesse est valable dans les deux sens, ainsi les actions visant à limiter les distances auront également pour effet de réduire la vitesse moyenne des déplacements, étant donné que la vitesse est croissante avec la distance (Figure 67). A longue distance, éviter les voyages à très longue distance aurait pour effet de réduire les distances parcourues en avion, qui ne dispose pas de solution technologique à l'échelle pour sa décarbonation. Pour les déplacements quotidiens, les évolutions dans l'aménagement du territoire sont indispensables pour permettre une réduction des distances. Elles sont également une condition nécessaire pour que les baisses de vitesse des déplacements du quotidien (par exemple par un usage croissant du vélo) ne se traduisent pas par des hausses des temps de déplacements.

Les liens entre demande et report modal sont très importants comme cela a été vu dans les chapitres précédents, ainsi le **lien entre vitesse et report modal** est tout aussi évident. Pour aller dans le sens de la transition énergétique, il faut prioriser la réduction des distances parcourues pour les modes les plus consommateurs d'énergie, éventuellement en baissant leur vitesse. A l'opposé, le report modal peut être favorisé en améliorant la vitesse des modes les plus vertueux, quand cela est possible et souhaitable. Par exemple, en ville, limiter la vitesse à 30 km/h et réduire la place accordée aux modes motorisés au profit d'aménagements cyclables efficaces, est une double incitation qui permet de favoriser le report modal par l'évolution des vitesses de deux modes en concurrence. De nouveau, cette stratégie est complémentaire d'un aménagement du territoire qui viserait une réduction des distances domicile-travail ou domicile-achats, qui permet de faciliter en retour la réalisation de ces

trajets en modes actifs, qui sont à la fois des modes lents, particulièrement adaptés aux courtes distances, et non émetteurs de CO_2.

En raison des durées de trajets relativement constantes selon les modes, l'impact des changements de modes sur les émissions peuvent être regardés en émissions par kilomètre parcouru, mais également en émissions de CO_2 pour un temps de transport donné. Car **si la distance à parcourir influence le choix du mode de transport, l'inverse est également vrai** dans une certaine mesure. Ainsi le choix du mode conditionne également les destinations, que ce soit sur le choix d'un trajet ou sur des choix de long terme. Par le passé, l'accélération s'est par exemple traduite par un éloignement progressif des distances domicile-travail. Si à l'avenir une part croissante de la population souhaite pouvoir se rendre sur son lieu de travail à pied ou à vélo, cela se matérialisera nécessairement par des choix de localisation visant à réduire les distances, en faisant de la proximité entre domicile et travail un critère important de la recherche du logement ou de l'emploi. A longue distance, partir en vacances en avion donne la possibilité d'atteindre des destinations très lointaines. Au contraire, partir en vacances en cyclotourisme avec éventuellement des trajets en TER ou Intercités conditionne également fortement les destinations possibles. Les émissions rapportées à l'heure de transport permettent donc de comprendre l'impact sur les émissions du choix de l'allocation des (environ) 15 minutes des déplacements quotidiens ou des quelques heures de déplacement des départs en vacances (Figure 87 ; émissions rapportées à l'heure de déplacement porte-à-porte). La mesure ne change pas vraiment l'ordre des modes, mais défavorise les modes rapides par rapport à la mesure conventionnelle par kilomètre parcouru. Par exemple, la voiture et l'avion ont des émissions similaires par kilomètre parcouru, en revanche les émissions par heure sont bien plus importantes pour l'avion car celui-ci permet de réaliser des distances bien plus longues pour un budget-temps de transport donné. L'écart est encore plus important en ne comptant que les émissions par temps de vol, qui sont proches des 100 $kgCO_2/h$. Sous budget-temps de transport contraint, le train est donc le plus vertueux pour la courte distance comme pour la longue distance (avec la majorité des émissions liées au pré- et post-acheminement, devant les bus et cars, la voiture, et loin devant l'aérien.

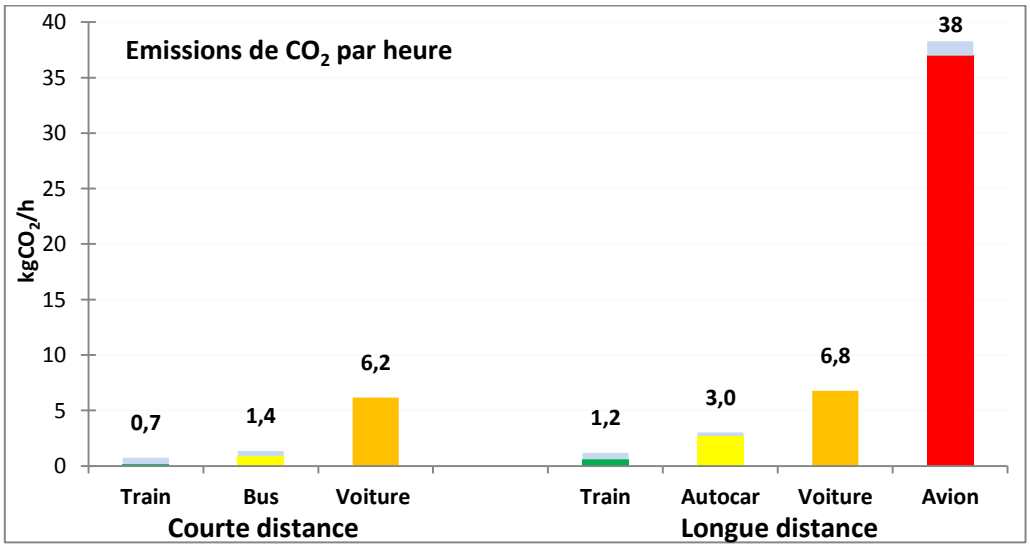


Figure 87 : Emissions de CO_2 moyennes par heure de déplacement, modes de courte et longue distance
Les calculs sont réalisés en tenant compte des émissions et des vitesses porte-à-porte, ce qui explique les principales différences avec les chiffres dans l'article de The Conversation en annexe, calculés avec des vitesses commerciales ; les émissions en bleu pour chaque mode correspondent à celles des modes d'accès à la gare / l'arrêt / l'aéroport

Enfin, les **vitesses pratiquées ont un lien fort avec l'efficacité énergétique**, étant donné les différences de consommations des véhicules selon la vitesse (Figure 88). Pour les voitures thermiques, il apparaît une courbe en forme de U avec des consommations minimales autour de 70 km/h. Les courbes de référence pour les consommations des véhicules ont été changées entre 2017 et 2019, avec une courbe bien moins marquée pour l'évaluation la plus récente (MTES, 2017, dans Prud'homme, 2019 ; MTES, 2019 ;). En raison de cette courbe en U, les études sont unanimes pour relever des baisses de consommation et d'émissions pour les limitations de vitesse sur les routes les plus rapides (ADEME, 2014 ; CGDD, 2018b). Cet effet est d'autant plus important que les vitesses concernées sont éloignées de 70 km/h : la baisse est par exemple de 10 % en passant de 130 à 120 km/h, et de -5,5 % en passant de 110 à 100 km/h (MTES, 2019).

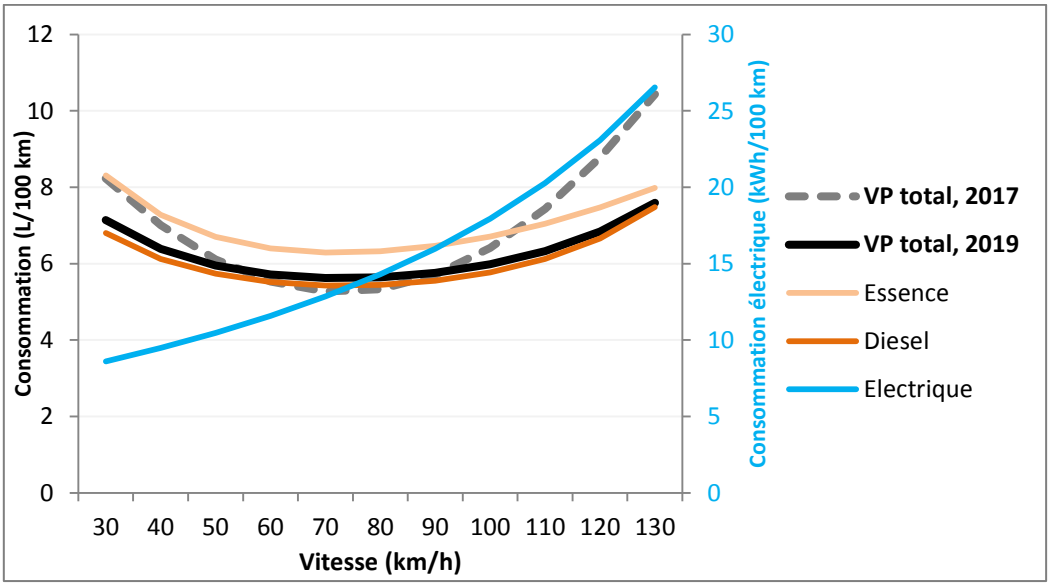


Figure 88 : Consommations énergétiques des voitures personnelles (VP) thermiques et électriques
Données MTES, 2017, 2019

Ainsi les baisses de vitesses pratiquées sur les routes à 90, 110 et 130 km/h suite à l'introduction des radars a permis des réductions substantielles d'émissions par ces gains d'efficacité énergétique. L'estimation en Tableau 16 donne un effet direct de la mesure de 0,9 $MtCO_2$ en raison des moindres consommations (et 3,1 $MtCO_2$ avec la courbe MTES, 2017). Cela correspond à l'équivalent d'un tiers de ce qu'a permis le report modal vers le transport ferroviaire de voyageurs depuis le milieu des années 90. L'effet des autres publiques environnementales ayant été faible par le passé (cf chapitre 1), cette baisse d'émissions est loin d'être négligeable pour une mesure dont ce n'était pas l'objectif.

Tableau 16 : Calcul de l'impact des baisses de vitesses sur les routes rapides entre 2002 et 2005 sur les émission
Vitesses pratiquées d'après ONISR ; courbe des consommations d'après MTES, 2019 ; pourcentages de trafic (400 Md veh.km environ) selon la limitation et pourcentage du trafic fluide d'après André, 2020

	Vitesses pratiquées		Consommations				Trafic			Impacts	
Routes	**2002**	**2005**	**2002**	**2005**	**ΔL/100 km**		**%trafic**	**%fluide**	**Md km**	**Md L**	**$MtCO_2$**
90	92	85	6,4	6,3	-0,12	-1,9%	16%	84%	54	-0,07	-0,16
110	112	104	7,1	6,8	-0,33	-4,6%	7%	72%	19	-0,06	-0,16
130	129	122	8,2	7,6	-0,53	-6,5%	18%	60%	43	-0,23	-0,58
										-0,36	**-0,90**

Aussi cet effet direct sur l'efficacité ne concerne qu'une partie de l'impact. La réduction de la demande a probablement eu un impact plus important : de 1990 à 2002, les trafics en VP ont augmenté en moyenne de 1,9 %/an ; entre 2002 et 2005, les trafics baissent en moyenne de 0,3 %, et ne ré-augmentent vraiment qu'après la crise de 2008 (trafics en Md veh.km ; Citepa). A un moment où les émissions des VP étaient d'environ 75 $MtCO_2$, si la mise en place des radars et la baisse des vitesses moyennes étaient responsables de la moitié cette rupture de tendance (l'autre moitié à la conjecture économique notamment ; voir fin 4.3.1), l'impact indirect de la mesure pourrait être de l'ordre de -2,4 $MtCO_2$.
L'impact global est difficile à établir précisément, car : les calculs sur l'efficacité montrent des chiffres différents avec les deux courbes (-0,9 $MtCO_2$ avec les chiffres de 2019 ; -3,1 Mt avec ceux de 2017) ; et la rupture sur la demande est possiblement liée à plusieurs facteurs (effet total de la rupture de la demande de VP sur 2002-2005 de -4,8 $MtCO_2$). Malgré les incertitudes, les ordres de grandeur disponibles suggèrent que **la mise en place des radars est possiblement la mesure de politiques publiques qui a eu l'impact le plus important sur les émissions des transports** par le passé, et un rôle important dans le pic des émissions intérieures de voyageurs constaté au début des années 2000.

Un tel impact pour une mesure peut questionner sur l'intérêt d'une **baisse des limites de vitesse sur les routes les plus rapides**, notamment sur les autoroutes à 130 km/h. La principale limite concerne l'acceptabilité d'une telle mesure, surtout après les contestations récentes du passage à 80 km/h sur les routes secondaires. Quelques éléments permettent cependant de penser que la mesure pourrait de nouveau être proposée dans les années à venir.
Tout d'abord, elle pourrait s'inscrire dans un mouvement général à la baisse des vitesses, déjà en cours et qui pourrait se poursuivre. Il pourrait aussi être encouragé au-delà des frontières, les Pays-Bas ayant par exemple récemment décidé d'abaisser de 130 à 100 km/h les vitesses sur autoroutes en journée afin de respecter leurs engagements climatiques. Comme suggéré plus haut avec l'exemple des radars, la mesure a en effet de forts impacts sur les émissions à court terme, comparé aux autres mesures possibles qui ont jusqu'à maintenant des effets plus limités et dont les effets sont généralement plus lents (cf chapitres 1 et 2). Pour un passage de 130 à 110 km/h, les consommations des véhicules thermiques passent de 7,6 à 6,3 L/100 km, soit -1,3 L ou -17 % de consommations. Les baisses de consommations sont de -24 % pour les véhicules électriques, dont les consommations sont croissantes avec les vitesses y compris pour les vitesses les plus faibles. Ainsi une baisse sur autoroute serait positive pour préserver l'autonomie, permettre des trajets plus longs ou limiter la taille des batteries, des évolutions très favorables pour le déploiement de ces véhicules. Les baisses de consommations permettent également de réduire le coût marginal des trajets de manière quasi-similaire, ainsi la mesure permet aux automobilistes de faire des économies, tandis que le coût financier de mise en œuvre pour les politiques publiques est très limité. L'évolution se fait au détriment de temps de transport un peu plus longs, de l'ordre de 8 minutes pour 100 km pour un trafic fluide qui passerait de 130 à 110 km/h. L'acceptabilité sociale en resterait pour autant potentiellement meilleure que les solutions de tarification du carbone ou la mesure du 80 km/h : l'impact sur les inégalités sociales et le pouvoir d'achat est favorable en raison des baisses de consommation, réduisant ainsi les dépenses de l'ensemble des usagers ; par rapport à la tarification qui impacte proportionnellement davantage les plus démunis, d'après la

théorie économique la baisse des vitesses a plutôt tendance à impacter davantage les plus aisés, dont la valeur du temps est plus élevée ; par ailleurs, les autoroutes sont davantage utilisées par les personnes aux revenus plus élevés (les voyages à longue distance et les longs trajets domicile-travail sont croissants avec le revenu), contrairement à la mesure des 80 km/h, accusée d'impacter essentiellement les trajets du quotidien dans les zones rurales. Enfin, la mesure a finalement été retenue par la Convention Citoyenne pour le Climat, et semblait souhaitable pour 40 % de la population en 2019 (15 % très et 25 % assez souhaitable ; contre 26 % pas vraiment et 31 % pas du tout ; 3 % NSP). Elle semblait souhaitable à la majorité de la population entre 2005 et 2013, puis le support est tombé à 34 % en 2014, remonté à 45 % en 2017 puis descendu à 37 % en 2018 au moment du passage au 80 km/h (ADEME, 2019a).
Au-delà de la vitesse limite, les expériences de limitations de vitesse montrent que l'impact sur les vitesses pratiquées est toujours inférieur à la baisse de la limitation. Ainsi une baisse de 10 km/h de vitesse maximale entraîne une baisse de l'ordre de 3 à 5 km/h des vitesses pratiquées (-3,4 km/h par exemple sur l'année qui a suivi les 80 km/h, Cerema, 2020b ; CGDD, 2018b). Les impacts sur les émissions ne sont donc pas aussi importants que le gain direct d'efficacité, et le passage de 120 à 110 km/h mène par exemple à des baisses d'émissions de l'ordre de -2 à -3 % des consommations réelles (EEA, 2011 ; Asensio et al, 2014). Cela montre l'importance des comportements, des **contrôles**, et de la répression qui a été la plus efficace pour contenir les accidents par le passé (Orselli, 2009).
Une autre stratégie serait de **limiter la vitesse maximale des véhicules**. En effet, la voiture neuve moyenne en 2018 peut atteindre une vitesse maximale de 185 km/h (L'Argus, 2019), ce qui est à la fois dangereux, encourage des moteurs puissants qui consomment davantage, et inutile quand la vitesse maximale sur les routes est de 130 km/h. Par ailleurs, des limitations sur les véhicules existent déjà sur de nombreux véhicules sous différentes formes. Ainsi l'assistance des vélos à assistance électrique est limitée à 25 km/h, le bridage des cyclomoteurs à 45 km/h, la vitesse maximale de la Renault Zoé est de 135-140 km/h, et les poids-lourds sont soumis à des limiteurs de vitesse embarqués depuis 1985.
En raison de la courbe en U des consommations avec la vitesse, **l'effet des limitations de vitesse en ville est plus contrasté**. Les consommations des véhicules thermiques augmentent quand la vitesse diminue, mais les conditions de circulation changent également, rendant potentiellement les baisses de vitesse positives pour les consommations des véhicules (ADEME, 2014 ; Madireddy et al, 2011). Aussi les effets indirects sur la demande et le report modal, par exemple en encourageant la réduction des distances et en sécurisant les modes actifs, améliorent encore l'intérêt de ce genre de mesure. Cette interaction entre effets directs potentiellement négatifs et effets indirects positifs a été formalisée à l'aide d'un modèle de transport, dans le cadre de travaux de la présente thèse. L'article est disponible en annexe 2.3.

Enfin, des vitesses réduites sur le **transport aérien** permettraient potentiellement de réutiliser des avions à hélices, moins rapides mais également moins consommateurs que les avions à réactions qui les ont remplacés (Castaignède, 2019).
Dans le **transport de marchandises**, la baisse des vitesses est également citée parmi les stratégies prioritaires pour décarboner le transport maritime. Le relâchement de la contrainte temporelle permettrait également de favoriser le transport ferroviaire, moins flexible et réactif que le transport routier (Briand et al, 2019 ; points davantage développés en chapitre 4).

5. Conclusion

Points et messages clés :

- ✓ Etant donné les temps de déplacements d'environ **1 h/jour** en moyenne, 15 min pour les déplacements quotidiens et 2h30 à 4h pour ceux de longue distance, les **vitesses** variées des modes conditionnent fortement les comportements et distances parcourues
- ✓ Par le passé, la vitesse moyenne a fortement augmenté sous l'effet de la diffusion des modes et réseaux rapides, jusqu'à atteindre un **pic au début des années 2000** pour les déplacements intérieurs, au même moment que la distance parcourue par personne.
- ✓ La **saturation** de la vitesse moyenne pourrait perdurer à l'avenir, surtout pour les déplacements intérieurs ; les évolutions favorables à la **transition énergétique** vont principalement dans le sens d'un **ralentissement** de la vitesse moyenne des mobilités.

Au terme de cette exploration sur les **vitesses de déplacements en France**, il est possible de tirer quelques grandes conclusions sur l'importance de celles-ci dans l'explication des comportements de mobilité, et sur l'évolution de ces vitesses par le passé et à l'avenir.

L'importance de la vitesse prend ses racines profondes dans l'observation de **temps de déplacements proches d'une heure par jour et par personne**, à la fois en comparaison entre différentes sociétés, pays ou villes, et à différentes époques. Cette constante est connue sous le nom de conjecture de Zahavi, et a donné lieu à de nombreuses analyses sur les budgets-temps de transport, en plus de travaux sur la vitesse généralisée ou sur les liens entre vitesse et aménagement du territoire. Si les temps de déplacements varient selon le périmètre des enquêtes et apparaissent contrastés selon les individus ou les territoires, cette constance relative est un outil puissant pour comprendre l'évolution des comportements de mobilité avec l'introduction des modes rapides.
L'analyse quantitative réalisée à partir des trafics par mode en 2017 mène à une **estimation de 64 minutes par jour et par personne de temps de transport de voyageurs** en moyenne. Ainsi les distances journalières et les vitesses moyennes estimées sont proches, de l'ordre de **51 km/jour** à **48 km/h** en moyenne pour l'ensemble des transports de voyageurs, et 45 km/jour et à 42 km/h pour les seuls déplacements intérieurs (hors aérien international). Par ailleurs, à ces temps en circulation s'ajoutent un peu plus de 2 minutes relatives aux temps de retard et d'attente (estimés respectivement à 24 s et 1 minute 50 par jour), environ 7 minutes de temps de transports motorisés réalisés dans le cadre de l'activité professionnelle (conducteur, agriculteur, etc.), auxquels s'ajoutent également des temps de marche à pied dans le cadre professionnel, domestique ou de loisirs estimés à environ 37 minutes, et quasiment 1 minute pour le vélo. Au total, chaque personne passerait environ 1h51 en déplacements ou en mouvement chaque jour, pour moitié dans des modes de transport ou engins motorisés (55 minutes), quasiment autant en modes actifs (54 minutes) et le reste en temps de retard ou d'attente (2 minutes). Avec les estimations complémentaires, les distances totales passeraient à 58 km/jour/personne en moyenne. Ces chiffres illustrent l'hyper-mobilité et la place que les déplacements motorisés ont pris dans les modes de vie. Cette mobilité motorisée s'est pour beaucoup substituée aux mobilités actives, rendant dans le même temps les modes de vie de plus en plus sédentaires, avec une baisse de l'activité physique globale, particulièrement visible dans les déplacements.

Différents éléments rassemblés convergent également vers une **possible hausse des temps de déplacements** ces dernières décennies, en particulier lorsque les déplacements de longue distance sont comptés, étant donné leur augmentation. Malgré tout, les temps de transport totaux restent proches d'une heure par jour en moyenne.

La **durée des déplacements apparait également proche selon les modes**, en séparant ceux utilisés au quotidien, et ceux utilisés pour la longue distance : ces durées sont de l'ordre de 15 minutes pour les déplacements locaux, et environ 2h30 à 4h pour les déplacements à longue distance. A ces temps dans le mode principal utilisé, s'ajoutent des temps d'attente et surtout d'accès (pré- et port-acheminement) qui pèsent particulièrement lourd dans les trajets en avion et dans les trajets en transports en commun ferroviaires et routiers en particulier pour la courte distance.
Ces temps de circulation proches selon les modes de déplacement permettent de mettre en évidence **l'importance de la vitesse des modes dans la distance moyenne** qu'ils permettent de parcourir en un temps donné.
Car à l'opposé des constantes de temps, **les vitesses des modes apparaissent très contrastées**, variant de 3,6 km/h pour la marche à quasiment 1000 km/h de vitesse commerciale pour les vols les plus longs. Même entre les modes de courte distance, un rapport de 1 à 13 est présent (entre 3,6 km/h pour la marche et 46 pour la voiture) tandis que ce même rapport pour la longue distance est évalué de 1 à 14 (entre 51 km/h pour la moyenne des cars longue distance et environ 730 km/h pour l'avion). Aussi, plus la distance est longue, et plus les modes rapides (voiture, train, puis avion) et les réseaux rapides (autoroutes, TGV notamment) sont utilisés. **La vitesse moyenne des déplacements apparaît donc croissante avec la distance parcourue**, mettant en évidence les domaines de pertinence des différents (sous-)modes de transport, selon leur vitesse commerciale mais également les temps d'accès qu'ils nécessitent. Ainsi la voiture apparaît en moyenne comme le mode le plus rapide pour les courtes distances et jusqu'à environ 400 km, distance à partir de laquelle le train et l'avion atteignent des vitesses moyennes porte-à-porte plus importantes. Au-delà de 1000 km, l'avion domine très largement les déplacements de par sa vitesse et le réseau de destinations nombreuses et lointaines qu'il permet d'atteindre.
Les vitesses au sein d'un même mode sont elles-mêmes très variées, questionnant les **facteurs rendant possible la vitesse**, mais également ses **facteurs limitants**. Les facteurs la rendant possible s'articulent autour des progrès passés sur les moteurs, les véhicules et/ou les infrastructures. Les facteurs limitants sont bien plus variés selon les modes : ils sont principalement physiologiques pour les modes actifs ; liés essentiellement à l'insécurité et à la congestion pour les modes routiers ; aux potentiels techniques, au nombre d'arrêts et aux temps d'accès pour le ferroviaire ; et au coût notamment énergétique pour les vitesses commerciales de l'aérien, complétés par les temps d'attente et d'accès pour les vitesses porte-à-porte.

Les vitesses des modes étant très contrastées, il est d'autant plus intéressant de comprendre comment leur développement a influencé **l'historique des vitesses** et des comportements de mobilité, et comment ils pourraient évoluer à l'avenir, dans un contexte de nécessaire transition énergétique.

L'historique distingue **4 phases de l'histoire de la vitesse** des mobilités en France, étudié plus particulièrement depuis 1800 : la première phase commence dès le XVIIIème siècle, et concerne la phase de rêve et de première conquête de la vitesse, par l'accélération des services de transports attelés sur longue distance ; la seconde phase de 1817 à 1945 voit l'invention de nouveaux modes et les progrès techniques, avec l'invention de la draisienne et du train au début du XIXème siècle, la bicyclette et la voiture à la fin du siècle, et l'avion au début du XXème siècle, accéléré par l'introduction des avions à réaction durant la seconde guerre mondiale ; la troisième phase, de la décennie 1950 jusqu'en 2000, est celle de la diffusion de la vitesse, marquée en particulier par le remplacement progressif des temps de marche à pied par la voiture ; enfin, le tournant du millénaire voit une phase de saturation sur la vitesse moyenne des déplacements, en particulier pour les déplacements internes, tandis qu'un ralentissement apparaît quand les transports internationaux sont inclus.

Pour la période la plus récente, une **analyse quantitative de l'évolution de la vitesse moyenne sur 1960-2017** est réalisée.
Il apparaît que le principal déterminant historique de l'augmentation de la vitesse est sans surprise la **diffusion des modes rapides**, report modal qui est ici mesuré en pourcentage des temps de parcours par mode. Ainsi la part des modes routiers individuels (voitures, 60% VUL, 2-roues motorisés) était de 20 % des temps de déplacements en 1960 (environ 10 min/jour/pers) et la marche en constituait 70 %. Ces rapports se sont inversés, et les modes routiers individuels représentent environ 62 % des temps de trajets depuis le début des années 90, tandis que la marche est tombée à 22 % des temps de déplacements. Depuis les années 90, les trois quarts de l'augmentation de vitesse liée au report modal proviennent de la croissance du trafic aérien, en particulier du trafic international.
Le second facteur, caractérise la **diffusion des infrastructures rapides** (autoroutes et LGV) montre essentiellement un impact à la hausse des vitesses par la partie croissante du trafic routier qui a lieu sur autoroutes. Les temps des transports des véhicules routiers individuels sur ces infrastructures rapides représentent environ 10 minutes par jour et par personne, soit 25 % du temps de déplacements dans ces modes.
Enfin, le dernier déterminant concerne la **vitesse pratiquée par réseau**, qui a vu une forte inflexion au début des années 2000 sur les routes. En effet, la mise en place des radars en 2003 a fait baisser les vitesses des voitures en situation de trafic fluide d'environ 7 km/h sur les routes à 90, 110 et 130 km/h entre 2002 et 2005.

Il est estimé que ces évolutions ont été suffisantes pour obtenir une **baisse de la vitesse moyenne** des modes routiers individuels de 2,8 km/h, entraînant la baisse de la vitesse moyenne de l'ensemble des déplacements entre 2002 et 2005 (de -0,9 % au total, et de -1,6 % pour les seuls déplacements intérieurs). Cette évolution concorde avec la baisse des distances parcourues par les Français au début des années 2000, un phénomène interrogé au premier chapitre qui a eu un impact fort sur la baisse des émissions à ce moment-là.
Il est probable que cette baisse des vitesses fasse partie des **causes du *peak travel* ou pic de la demande** observé, de manière complémentaire avec les autres évolutions généralement avancées, telles que la hausse du prix du pétrole ou la saturation de la motorisation des ménages. Aussi la baisse de vitesse a également permis des gains d'efficacité énergétique

évalués à 0,9 $MtCO_2$. Ajoutée aux baisses d'émissions liées à la rupture de tendance sur le trafic (-4,8 $MtCO_2$ au total, toutes causes confondues), la mise en place des radars est possiblement la mesure de politiques publiques qui a eu le plus fort impact à la baisse sur les émissions des transports par le passé. En effet, selon la part de la baisse du trafic qui est liée aux baisses de vitesse, les ordres de grandeur en jeu pourraient dépasser les -2,7 $MtCO_2$ qui avaient été calculés pour le report modal vers le transport ferroviaire de voyageurs.
A ce pic du début des années 2000 a suivi une reprise à la hausse de la vitesse moyenne et des distances parcourues, confirmant le lien étroit entre les deux variables.

La question de l'**avenir de la demande** est déterminante pour les trajectoires d'émissions de CO_2, et regarder cette question sous l'angle de **l'évolution de la vitesse moyenne** permet d'identifier quelques variables clés. Parmi les déterminants qui pourraient participer à l'augmentation de la vitesse moyenne, se trouve en premier lieu la poursuite de la croissance du trafic aérien (bien que la crise du coronavirus pourrait, remettre en cause cette tendance, au moins temporairement) et des trafics sur autoroutes. Au contraire, les facteurs qui pourraient jouer à la baisse de la vitesse concernent le développement des modes actifs et en particulier du vélo surtout s'il s'étend au-delà des centres villes (où sa vitesse est comparable aux modes qu'il remplace), et l'éventuelle poursuite de la baisse des vitesses pratiquées sur les routes. Aussi, l'aménagement du territoire sera déterminant, car il agit au moins sur 3 facteurs impactant les évolutions de la vitesse : la distance des déplacements, la vitesse étant croissante avec la distance ; des vitesses des modes routiers plus élevées dans les zones peu denses ; des difficultés à développer les modes actifs dans ces zones peu denses en raison des distances plus importantes, de la moindre accessibilité et des aménagements manquants à ce jour.
Au regard de ces principaux facteurs d'évolution, **les mesures favorables à la transition énergétique semblent toutes orientées vers un ralentissement de la vitesse moyenne** des déplacements. Ainsi c'est le cas pour la modération du trafic aérien, des vitesses sur les routes, le développement des modes actifs, ou la réduction des distances de déplacements. L'accélération des mobilités s'est réalisée principalement au profit de modes fortement consommateurs en énergie (voiture et avion en tête) rendue possible par l'accès à une énergie abondante et peu chère qu'est le pétrole. Il est assez logique que la sortie de cette dépendance énergétique au pétrole puisse au contraire nécessiter un certain ralentissement.

Si le ralentissement des mobilités peut sembler peu souhaitable à première vue, les évolutions qui le sous-tendent peuvent se révéler bien plus favorables.
Tout d'abord, la vitesse moyenne des mobilités n'est pas une donnée perçue par les usagers des transports, qui perçoivent essentiellement des temps de parcours. Si la réduction des distances ou l'utilisation d'un mode plus lent participent au ralentissement, ils ne sont pas perçus comme tel, au contraire des baisses de la limitation de vitesse. Ainsi l'accélération passée des mobilités s'est probablement faîte de manière relativement inconsciente pour les usagers, tout comme le pic ou le plateau (selon l'inclusion de l'international) dans la vitesse des mobilités au début des années 2000 qui n'a jamais retenu l'attention, tant que des calculs agrégés le mettant en évidence ne sont pas réalisés.
Certaines mesures tendant vers le ralentissement ne semblent pas souhaitables à une majorité de Français : la densification des villes en limitant l'habitat pavillonnaire au profit

d'immeubles collectifs est perçue positivement par seulement 38 % des Français, et 40 % pour la baisse de vitesse à 110 km/h sur les autoroutes. Mais d'autres évolutions reçoivent un soutien bien plus important de la population : taxer davantage le transport aérien pour favoriser le transport par le train est soutenu par 66 % de la population (+11 % par rapport à 2018), la limitation de la vitesse maximale autorisée en ville par 69 %, la mise en place de mesures favorisant la circulation à vélo par 82 %, et par 87 % des Français pour les déplacements à pied (ADEME, 2019a, 2019b).

Ensuite, les principales évolutions vers un ralentissement des mobilités vont dans le sens d'une réduction des coûts, et donc possiblement des inégalités d'accès à la mobilité. Cela est loin d'être négligeable en temps de crise économique, au vu des vulnérabilités mises en évidence par la crise de gilets jaunes, et alors que nombre de solutions technologiques pour réduire les émissions auront plutôt tendance à augmenter le coût de la mobilité.

Le ralentissement des mobilités pourrait également rejoindre plus largement les **aspirations à un ralentissement des rythmes de vie**, exprimées par une majorité de la population, face à une société aux évolutions jugées trop rapides (L'ObSoCo, 2020).

Pour la courte distance, à la condition majeure que l'aménagement du territoire et des activités se tournent vers des objectifs de réduction des distances, le ralentissement favoriserait un mode de vie plus en proximité, plus résilient, favorisant des productions et consommations plus locales, en lien avec la transition écologique des autres secteurs (agriculture et industrie notamment). Loin de l'immobilisme, le ralentissement pourrait se traduire de manière contre-intuitive plutôt par des mobilités plus actives, dans le sens où les déplacements quotidiens seraient davantage réalisés à pied ou en vélo. A longue distance, le ralentissement pourrait se traduire par des tendances vers des voyages moins fréquents mais d'une durée plus longue, à du tourisme de proximité, au redéploiement des trains de nuit ou encore à l'essor du cyclotourisme.

Impacts de long terme, urgence de l'action, accélération de certaines technologies, ralentissement de la consommation de ressources, inertie du système, irréversibilités… les défis climatiques et environnementaux interrogent sous de multiples facettes notre rapport au temps et à la vitesse.

Entre accélération et ralentissement, la transition écologique des mobilités nécessite une combinaison bien choisie des deux, selon l'évolution à traiter. Si par le passé, vitesse, demande et émissions de CO_2 des mobilités ont évolué de concert, le défi de la décarbonation d'ici 2050 semble d'autant plus faisable et réaliste que nous saurons accepter et mettre en œuvre un certain ralentissement dans les déplacements.

Bibliographie

6t-bureau de recherche, 2015. *Le vélo à assistance electrique, un nouveau mode métropolitain ? Enquête européenne*. 44 p.

ADEME, 2014. *Impacts des limitations de vitesse sur la qualité de l'air, le climat, l'énergie et le bruit*. Cap Environnement. 54 p. https://www.ademe.fr/impacts-limitations-vitesse-qualite-lair-climat-lenergie-bruit

ADEME, 2019a. *Représentations sociales du changement climatique, 20ème vague*. 184 p. https://www.ademe.fr/representations-sociales-changement-climatique-20-eme-vague

ADEME, 2019b. *Baromètre les français et l'environnement - vague 6*. 159 p. https://www.ademe.fr/barometre-francais-lenvironnement-vague-6

ADEME, 2020. *Impact économique et potentiel de développement des usages du vélo en France en 2020*. Inddigo, Vertigo Lab, DGE, DGITM, FFC. https://www.ademe.fr/impact-economique-potentiel-developpement-usages-velo-france-2020

Ae, 2017. *Évaluations socio-économiques des projets d'infrastructures linéaires de transport*. Note N° 2017-N-05 de l'Autorité environnementale. http://www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr/les-notes-deliberees-de-l-ae-a1788.html

Ainsworth, BE., Haskell, WL., Whitt, MC., Irwin, ML., Swartz, AM., Strath, SJ., O'Brien, WL., Bassett, DR. Jr, Schmitz, KH., Emplaincourt, PO., Jacobs, DR. Jr, Leon, AS., 2000. *Compendium of physical activities: an update of activity codes and MET intensities*. Med. Sci. Sports Exerc., Volume 32, No. 9, Suppl., pp. S498-S516. https://doi.org/10.1097/00005768-200009001-00009

André, M., 1999. *Pollution de l'air due aux transports - Statistiques de parc des véhicules et d'activité de transports pour la France*. Rapport INRETS-LTE N° 9930. 28 p.

André, M., Roche, A-L., Bourcier, L., 2013. *Statistiques de parcs et trafic pour le calcul des émissions de polluants des transports routiers en France*. Rapport Ifsttar-LTE, Bron (France). 132p.

André, M., 2020. *Classeur de construction des "Situations de trafic agrégées" pour HBEFA*. Fichier Excel. IFSTTAR-LTE, Bron (France).

Ang, B. W., 2004. *Decomposition analysis for policymaking in energy: which is the preferred method?* Energy Policy, Volume 32, Issue 9, pp. 1131-1139. https://doi.org/10.1016/S0301-4215(03)00076-4

AQST, 2020. *Les chiffres de la ponctualité*. http://www.qualitetransports.gouv.fr/les-chiffres-de-la-ponctualite-r2.html

Arafer, 2018a. *Le marché français du transport ferroviaire de voyageurs, 2017*. L'observatoire des transports et de la mobilité. 65 p. https://www.autorite-transports.fr/observatoire-des-transports/marche-du-transport-ferroviaire/

Arafer, 2018b. *Le marché français du transport ferroviaire de voyageurs 2015-2016*. L'Observatoire des transports et de la mobilité. Mise à jour du 23 janvier 2018. 86 p. https://www.autorite-transports.fr/observatoire-des-transports/marche-du-transport-ferroviaire/

Arafer, 2018c. *Marché du transport par autocar et gares routières*. Rapport annuel, Exercice 2017. 112 p. https://www.autorite-transports.fr/observatoire-des-transports/marche-du-transport-par-autocar/

Arafer, 2018d. *Les pratiques de mobilité des voyageurs sur les lignes régulières d'autocar librement organisées. Enquête de terrain réalisée entre le 15 octobre et le 15 novembre 2017*. L'Observatoire des transports et de la mobilité. 12 p. https://www.autorite-transports.fr/observatoire-des-transports/marche-du-transport-par-autocar/

Asensio, J., Gómez-Lobo, A., Matas, A., 2014. *How effective are policies to reduce gasoline consumption? Evaluating a set of measures in Spain*. Energy Economics, Volume 42, pp. 34-42. https://doi.org/10.1016/j.eneco.2013.11.011

Bastian, A., Börjesson, M., Eliasson, J., 2016. *Explaining "peak car" with economic variables*. Transportation Research Part A, Volume 88, pp. 236-250. https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.04.005

Bastian, A., Börjesson, M., Eliasson, J., 2017. *Response to Wadud and Baierl: "Explaining 'peak car' with economic variables: An observation"*. Transportation Research Part A, Volume 95, pp. 286–289. https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.11.001

Becker, G.S., 1965. *A theory of the allocation of time*. Economic Journal, Volume 75, Issue 299, pp. 493–517.

Bouscasse, H., 2017. *Essays on travel mode choice modeling: a discrete choice approach of the interactions between economic and behavioral theories*. Economics and Finance. Université de Lyon, 2017. English. 414 p. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01661687v2

Briand, Y., Svensson, J., Koning, M., Combes, F., Lamy, G., Pourouchottamin, P., Cayla, J.-M., Lefevre, J., 2019. *Trajectoires de décarbonation profonde du transport de marchandises en France*, Rapport descriptif, 48 p. https://www.iddri.org/fr/publications-et-evenements/rapport/trajectoires-de-decarbonation-profonde-du-transport-de

Brousse, C., 2015. *La vie quotidienne en France depuis 1974. Les enseignements de l'enquête Emploi du temps*. Insee, Economie et Statistique, N° 478-479-480. https://www.insee.fr/fr/statistiques/1303224

Bretagnolle, A., 2005. *Les villes dans l'espace-temps : vitesse des communications et structuration des territoires à l'échelle intra et interurbaine*, in VOLVEYA. (dir.),Echelles et temporalités, Paris, Editions Atlande, pp. 180-187.

Brun, 2013. *Ville et mobilité : Nouveaux regards*. Sous la direction de Gérard Brun. Economica, collection Méthodes et approches, Paris, 352 p.

Castaignède, L., 2018. *Airvore ou la face obscure des transports. Chronique d'une pollution annoncée*. Ed. Ecosociété. 344 p. https://ecosociete.org/livres/airvore

Castaignède, L., 2019. *Pour le climat, il faut limiter la vitesse des avions*. Reporterre, 27 mars 2019. https://reporterre.net/Pour-le-climat-il-faut-limiter-la-vitesse-des-avions

Cebr, 2014. *The future economic and environmental costs of gridlock in 2030. An assessment of the direct and indirect economic and environmental costs of idling in road traffic congestion to households in the UK, France, Germany and the USA*. Report for INRIX. 67 p. https://cebr.com/reports/the-future-economic-and-environmental-costs-of-gridlock/

Cerema, 2019. *Transports collectifs urbains de province évolution 2011-2016. Annuaire statistique*. 623 p. https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/transports-collectifs-urbains-province-evolution-2011-2016

Cerema, 2020a. *Chiffres-clefs des EMC²/EMD/EDGT*. In *Les Enquêtes Mobilité EMC². Observation et analyse de la mobilité* [en ligne]. Consulté le 10/04/2020. https://www.cerema.fr/fr/activites/mobilite-transport/connaissance-modelisation-evaluation-mobilite/observation-analyse-mobilite/enquetes-mobilite-emc2

Cerema, 2020b. *Abaissement de la vitesse maximale autorisée à 80 km/h - Évaluation : les éléments disponibles après 18 mois*.

CGDD, 2010. *La mobilité des Français. Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008*. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/la-mobilite-des-francais-panorama-issu-de-lenquete-nationale-transports-et-deplacements-2008

CGDD, 2013. *Indicateurs de suivi de la politique de transport. Evolution 1999/2009*. RéférenceS. 192 p. http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/document.html?id= Temis-0044404

CGDD, 2018a. *La mobilité à longue distance des Français en 2016*. Datalab, Essentiel. 4 p.

CGDD, 2018b. *Réduction des vitesses sur les routes. Analyse coûts bénéfices*. THEMA. 102 p. http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/document.html?id=Temis-0087258&requestId=0&number=1

CGDD, 2019a. *Les comptes des transports en 2018 - 56e rapport de la Commission des comptes des transports de la Nation*. 212 p. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-comptes-des-transports-en-2018-56e-rapport-de-la-commission-des-comptes-des-transports-de-la

CGDD, 2019b. *Mémento de statistiques des transports*. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/memento-de-statistiques-des-transports-2018

CGSP, 2013. *Evaluation socioéconomique des investissements publics*. Rapport de la mission présidée par Emile Quinet. Sept. 2013. 352 p. https://www.strategie.gouv.fr/espace-presse/levaluation-socioeconomique-investissements-publics

Chevalier, M., 1838. *Chemins de fer comparés aux lignes navigables*. Revue des Deux Mondes, période initiale, tome 13, p. 789-813. https://fr.wikisource.org/wiki/Chemins_de_fer_comparés_aux_lignes_navigables

CITEPA, 2019. *Inventaire SECTEN*. https://www.citepa.org/fr/secten/

CITEPA, 2020. *OMINEA*. Base de données Ominea édition 2020. https://www.citepa.org/fr/ominea/

Cook, S., 2019. *Le jogging pendulaire, un mode de transport en plein essor*. Forum Vies Mobiles, 7 février 2019. https://fr.forumviesmobiles.org/mobilithese/2019/02/07/jogging-pendulaire-mode-transport-en-plein-essor-12852

Crozet, Y., Joly, I., 2003. *De l'hypothèse de la constance du budget-temps de transport à sa remise en cause : une double interpellation des politiques de transport urbain. La "Loi de Zahavi" : quelle pertinence pour comprendre la construction et la dilatation des espaces-temps de la ville ?* 72 p. https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00087658

Crozet, Y., 2005. *Le temps et les transports de voyageurs*. CEMT, Table ronde 127, Le temps et les transports, 2005, Paris, France. pp. 33-40. https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00194583

Crozet, Y., Lopez-Ruiz, H.G., Chateau, B., Bagard, V., 2008. *Comment satisfaire les objectifs internationaux de la France en termes d'émissions de gaz à effet de serre et de pollution transfrontières ?* Programme de recherche consacré à la construction de scénarios de mobilité durable. Rapport final. https://hal.archives-ouvertes.fr/halshs-00293725/

Crozet, Y., 2015. *Maglev (603 km/h), Hyperloop (1 102 km/h)… Vers un « retour sur terre » de la très grande vitesse ?* Transports n° 491 - mai - juin 2015. https://hal.inria.fr/halshs-01327296/

Crozet, Y., 2016. *Hyper-mobilité et politiques publiques. Changer d'époque ?* Economica, pp.190, Coll. Méthodes et Approches, Gérard Brun, 9782717868623. https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01328814

Crozet, Y., 2019. *Vitesse des déplacements*. Forum Vies Mobiles, 3 juin 2019. https://fr.forumviesmobiles.org/reperes/vitesse-des-deplacements-12976

Desjardins, X., 2015. *La ville lente : utopie, audace ou régression ? Réflexions libres autour d'écrits de Marc Wiel*. Carnets de géographes [En ligne], 8 | 2015. https://journals.openedition.org/cdg/307

DeWitte, A., Hollevoet, J., Dobruszkes, F., Hubert, M., and Macharis, C., 2013. *Linking modal choice to motility: A comprehensive review*. Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volume 49, pp. 329–341. https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.01.009

DGAC, 2018. *Statistiques du trafic aérien*. https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/statistiques-du-trafic-aerien#e3

DGAC, 2020. *Calculateur d'émissions de gaz à effet de serre de l'aviation*. [en ligne] https://eco-calculateur.dta.aviation-civile.gouv.fr/

Douté, R., 2017. *Vitesses limites supérieures à 160 km/h*, 01/01/2017. http://www.rd-rail.fr/

Du Camp, M., 1867. *Les Voitures publiques dans la ville de Paris - les Fiacres et les Omnibus*. Revue des Deux Mondes, 2e période, tome 69, p. 318-352. https://fr.wikisource.org/wiki/Les_Voitures_publiques_dans_la_ville_de_Paris_-_les_Fiacres_et_les_Omnibus

Dupuy, J.-P., 1975, *A la recherche du temps gagné*, annexe de Illich, Énergie et équité, réédité dans OEuvres complètes, vol. 1, Paris : Fayard, 2003, p. 433-440.

EEA, 2011. *Reducing speed limits on motorways: how good is it for the environment?* Published 30 Mar 2011, Last modified 20 Mar 2018. https://www.eea.europa.eu/articles/reducing-speed-limits-on-motorways

Eurostat, 2004. *How Europeans spend their time. Everyday life of women and men. Data 1998-2002*. https://ec.europa.eu/eurostat/fr/web/products-pocketbooks/-/KS-58-04-998

Fau, E., 2015. *Le cheval dans le transport public au XIXe siècle, à travers les collections du musée national de la Voiture et du Tourisme, Compiègne*. In Situ, 27 p. https://doi.org/10.4000/insitu.12124

Forum Vies Mobiles, 2020. *Enquête Nationale Mobilité et Modes de vie*. 48 p. https://fr.forumviesmobiles.org/projet/2019/01/07/enquete-nationale-mobilite-et-modes-vie-12796

Goodwin, P.B., 1981. *The usefulness of travel budgets*. Transportation Research Part A: General, Volume 15, Issue 1, pp. 97-106. https://doi.org/10.1016/0191-2607(83)90019-5

Goodwin, P., 2012. *Peak Travel, Peak Car and the Future of Mobility. Evidence, Unresolved Issues, Policy Implications, and a Research Agenda*. ITF Discussion Paper No. 2012-13. 41 p. https://www.itf-oecd.org/peak-travel-peak-car-and-future-mobility

Gössling, S., Choi, A.S., 2015. *Transport transitions in Copenhagen - Comparing the cost of cars and bicycles*. Ecological Economics, Volume 113, pp. 106-113. https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2015.03.006

Grimal, R., 2015. *L'auto-mobilité au tournant du millénaire : une approche emboîtée, individuelle et longitudinale*. Sociologie. Université de Paris Est. 473 p. https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01313626

Grimal, R., 2017. *Plafonnement de la circulation automobile : les prémisses d'un déclin ?* Forum Vies Mobiles, 28 septembre 2017. https://fr.forumviesmobiles.org/mobilithese/2017/09/28/plafonnement-circulation-automobile-premisses-dun-declin-3694

Hasiak, S., Hasiak, F., Bodard, G., 2018. *Understanding Access Mobility To Railway Stations*. Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018, April 16-19, 2018, Vienna.

Héran, F., 2009, *A propos de la vitesse généralisée des transports, un concept d'Ivan Illich revisité*, Revue d'économie régionale et urbaine, n°3, pp.449-470.

Héran, F., 2013. *La consommation d'espace-temps des transports en milieu urbain*, in Gérard Brun (dir.), Ville et mobilité. Nouveaux regards, Economica, collection Méthodes et approches, Paris, p. 177-191.

Héran, F., 2015. *Le retour de la bicyclette. Une histoire des déplacements urbains en Europe de 1817 à 2050*. Ed. La Découverte. 256 p.

Héran, F., 2016. *Pourquoi modérer la vitesse en agglomération ?* Transports, n° 495, janv.-fév., p. 26-35. http://hdl.handle.net/20.500.12210/1073

Héran, F., 2018. *La modération de la circulation en Europe*. Présentation M1 AUDT – ENVAR et SVET, 43p.

Hugrel, C., Joumard, R., 2004. *Transport routier – Parc, usage et émissions des véhicules en France de 1970 à 2025*. Rapport INRETS-LTE 0420. Bron, France, 133p.

IAU-IDF, 2016. *L'évolution des modes de vie accroît le temps passé à se déplacer*. Jérémy Courel, Simon Gloaguen. Note rapide n° 714, Mars 2016. www.institutparisregion.fr/nos-travaux/publications/levolution-des-modes-de-vie-accroit-le-temps-passe-a-se-deplacer.html

ICCT, 2019. *European vehicle market statistics, Pocketbook 2019-2020*. 56 p. http://eupocketbook.org/

IFOP, 2008. *Les Français et leur budget automobile*. Etude IFOP pour Direct Assurance. 30 p. https://www.ifop.com/publication/les-francais-et-leur-budget-automobile/

IFOP, 2011. 2ème édition du baromètre "Les Français & l'automobile". Etude IFOP pour AramisAuto. Conférence de Presse, 25 avril 2011. 31 p.

Illich, I., 1975, *Énergie et équité*, Paris : Seuil, 59 p.

INRIX, 2018. *INRIX Global Traffic Scorecard*. INRIX Research, Graham Cookson, February 2018. 44 p. https://inrix.com/scorecard/

Insee, 2017. *Partir de bon matin, à bicyclette…* Insee Première No 1629, Paru le : 17/01/2017. https://www.insee.fr/fr/statistiques/2557426

Ipsos, BCG, 2017. *Observatoire Européen des Mobilités, Première édition. Les attentes des Européens en matière de mobilité*. Avril 2017. 29 p. https://www.ipsos.com/fr-fr/du-lundi-au-vendredi-les-europeens-passent-en-moyenne-9h35-se-deplacer

Ipsos, Transdev, Régions de France, 2019. *Enquête sur les mobilités du quotidien des Français dans les territoires et en régions*. 30 Septembre 2019. 43 p. http://regions-france.org/actualites/actualites-nationales/enquete-inedite-mobilite-quotidien/

Jetté, M., Sidney, K., Blumchen, G., 1990. *Metabolic Equivalents (METS) in Exercise Testing, Exercise Prescription, and Evaluation of Functional Capacity*. Clin. Cardiol. Volume 13, pp. 555-565.

Joly, I., 2004. *Travel Time Budget – Decomposition of the Worldwide Mean.* IATUR, ISTAT. Italian National Statistical Institute. Time Use: What's New in Methodology and Application Fields?, 27-29 October 2004, Rome, Italy, 2004, 23p. https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00087433

Kolli Z., 2012. *Dynamique de renouvellement du parc automobile, Projection et impact environnemental*. Thèse de doctorat, Université de Paris 1, Panthéon-Sorbonne. 311p.

L'Argus, 2019. *Voiture moyenne neuve 2018 : son évolution depuis 1953*. Publié le 13/06/2019. https://www.largus.fr/actualite-automobile/voiture-moyenne-neuve-2018-son-evolution-depuis-1953-9833394.html

L'ObSoCo, 2019. *L'Observatoire des perspectives utopiques*. Vague 1 – Octobre 2019. Rapport d'analyse. 154 p. http://lobsoco.com/lobservatoire-des-perspectives-utopiques/

Lacôte, F., 2018. *Hyperloop, formidable escroquerie technico-intellectuelle*. Club Pangloss, La lettre n° 83, avril 2018. 6p.

Lay, M.G., 1992. *Ways of the world: A history of the world's roads and of the vehicles that used them*. Rutgers University Press, 423 p.

Madireddy, M., De Coensel, B., Can, A., Degraeuwe, B., Beusen, B., De Vlieger, I., Botteldooren, D., 2011. *Assessment of the impact of speed limit reduction and traffic signal coordination on vehicle emissions using an integrated approach*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 16, Issue 7, pp. 504-508. https://doi.org/10.1016/j.trd.2011.06.001

Marchetti, C., 1994. *Anthropological invariants in travel behavior*. Technological Forecasting and Social Change, Volume 47, Issue 1, pp. 75-88. https://doi.org/10.1016/0040-1625(94)90041-8

MEDDE, 2015. *Stratégie nationale bas-carbone*. 227 p. https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc

Metz, D., 2008. *The myth of travel time saving*. Transport Reviews, Volume 28, No. 3, pp. 321-336. https://doi.org/10.1080/01441640701642348

Metz, D., 2010. *Saturation of demand for daily travel*. Transport Reviews, Volume 30, No. 5, pp. 659–674. https://doi.org/10.1080/01441640903556361

Metz, D., 2013. *Peak Car and Beyond: The Fourth Era of Travel*. Transport Reviews, Volume 33, No. 3, pp. 255–270. http://dx.doi.org/10.1080/01441647.2013.800615

Millard-Ball A, Schipper L., 2011. *Are we reaching peak travel? Trends in passenger transport in eight industrialized countries*. Transport Reviews, Volume 31, pp. 357–378. https://doi.org/10.1080/01441647.2010.518291

Mincke, C., 2019. *L'injonction à la mobilité*. Forum Vies Mobiles, 16 Mai 2019, consulté 22 Avril 2020. https://fr.forumviesmobiles.org/video/2019/05/16/linjonction-mobilite-12970

Mittal, S., Dai, H., Fujimori, S., Hanaoka, T., Zhang, R., 2017. *Key factors influencing the global passenger transport dynamics using the AIM/transport model*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 55, pp. 373-388. https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.10.006

MTES, 2019. *Évaluation des projets de transport. Fiche 5 : Valeurs recommandées pour le calcul socio-économique*. Version du 3 mai 2019. Consulté le 02/02/2020. 8 p. https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/evaluation-des-projets-transport

MVJS, INSEP, 2012. *La pratique des activités physiques et sportives en France*. 73 p.

Newman, P., Kenworthy, J., 2011. *'Peak Car Use': Understanding the Demise of Automobile Dependence*. World Transport Policy & Practice. Volume 17, Issue 2, pp. 31-42. http://trid.trb.org/view.aspx?id=1106687

Ng S.W., Popkin B.M., 2012. *Time use and physical activity: a shift away from movement across the globe*. Obesity Reviews, Volume 13, Issue 8, pp. 659-680. https://doi.org/10.1111/j.1467-789X.2011.00982.x

Omnil, 2012. *Enquête Globale Transport 2010. Résultats détaillés*. http://www.omnil.fr/spip.php?article81

Omnil, 2019. *Trafic annuel et journalier*. http://www.omnil.fr/ spip.php?article119

Omnil, 2020. *Qualité de service*. http://www.omnil.fr/spip.php?article111

ONISR, 2019. *La sécurité routière en France. Bilan de l'accidentalité de l'année 2018*. 201 p. https://www.onisr.securite-routiere.gouv.fr/etat-de-l-insecurite-routiere/bilans-annuels-de-la-securite-routiere/bilan-2018-de-la-securite-routiere

ONISR, 2020a. *Observatoire des vitesses*. https://www.onisr.securite-routiere.gouv.fr/contenus/etudes-et-recherches/comportements-en-circulation/observations/observatoire-des-vitesses

ONISR, 2020b. *Bilan 2019 de la sécurité routière*. https://www.onisr.securite-routiere.gouv.fr/etat-de-l-insecurite-routiere/bilans-annuels-de-la-securite-routiere/bilan-2019-de-la-securite-routiere

OPECST, 2018. *Le transport à hypergrande vitesse sous vide (Hyperloop).* Les notes scientifiques de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, Note n°5, juillet 2018. Cédric Villani. 6 p.

Orselli, J., 2009. *Usages et usagers de la route, mobilité et accidents 1860-2008*. Rapport n° 2005-0457-01. CGEDD. 1380 p. http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/document.html?id=Temis-0075250&requestId=0&number=3

Papon, F., 1999. *La marche et la bicyclette en France depuis 1967*. Rapport INRETS. 17 p. http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/document.html?id=Temis-0061106

Papon, F., 2012a. *The evolution of bicycle mobility in France*. Conference Paper XXII nd International Cycle History Conference. https://www.researchgate.net/ publication/258160941_The_evolution_of_bicycle_mobility_in_France

Papon, F., 2012b. *Le retour du vélo comme mode de déplacement*. Sociologie, HDR. Université Paris-Est. 185 p. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00852427

Papon, F., 2016. *The evolution of bicycle mobility in France*. 22 septembre 2016. IFSTTAR.

Peeters P.M., Middel J., Hoolhorst A., 2005. *Fuel efficiency of commercial aircraft. An overview of historical and future trends*. National Aerospace Laboratory NLR. 37 p. http://www.transportenvironment.org/Publications/prep_hand_out/lid/398

Portier, S., 2019. *La vitesse c'est le pouvoir ? Critique de l'instantanéité* [vidéo]. 35 min. https://www.youtube.com/watch?v=WOvRhcE6WDk

Proper, K.I., Hildebrandt, V.H., 2006. *Physical activity among Dutch workers - differences between occupations*. Preventive Medicine, Volume 43, Issue 1, pp. 42-45 https://doi.org/10.1016/j.ypmed.2006.03.017

Prud'homme, R., 2019. *Les 80 km/h : autopsie d'un fiasco*. Comité indépendant d'évaluation des 80 km/h. 2 septembre 2019. 34 p.

RGCF, 1909. *La démocratisation de la vitesse et le déclassement des voyageurs sur les Chemins de Fer français*. BnF Gallica. RGCF, p. 359-365.

Rosa, H., 2010. *Accélération. Une critique sociale du temps*, La Découverte, coll. « Théorie critique », 474 p.

Saidj, M., Menai, M., Charreire, H., Weber, C., Enaux, C., Aadahl, M., Kesse-Guyot, E., Hercberg, S., Simon, C., Oppert, J.-M., 2015. *Descriptive study of sedentary behaviours in 35,444 French working adults: cross-sectional findings from the ACTI-Cités study*. BMC Public Health, Volume 15, No 379. https://doi.org/10.1186/s12889-015-1711-8

Schafer, A., 2000. *Regularities in travel demand: an international perspective*. Journal of Transportation and Statistics. https://doi.org/10.21949/1501657

Schafer, A., Victor, D.G., 2000. *The future mobility of the world population*. Transportation Research Part A, Volume 34, pp. 171-205. https://doi.org/10.1016/S0965-8564(98)00071-8

Sétra, 2006. *Vitesse et mortalité*. Savoirs de base en sécurité routière. 9 p. http://dtrf.setra.fr/pdf/pj/Dtrf/0004/Dtrf-0004058/DT4058.pdf

SNCF, 2019. *Trafic de voyageurs et marchandises depuis 1841* [en ligne]. Open data SNCF. Consulté le 21/05/2019. https://data.sncf.com/explore/dataset/trafic-de-voyageurs-et-marchandises-depuis-1841/

SNCF, 2020. *Vitesse maximale nominale sur ligne* [en ligne]. Open data SNCF. Consulté le 29/02/2020. https://data.sncf.com/explore/dataset/vitesse-maximale-nominale-sur-ligne/

Steffen, W., Broadgate, W., Deutsch, L., Gaffney, O., Ludwig, C., 2015. *The Trajectory of the Anthropocene - the Great Acceleration*. 26 p.

Studeny, C., 1995. *L'invention de la vitesse, France, XVIIIe-XXe siècle*. Paris, Gallimard, Collection NRF, Bibliothèque des Histoires. 416 p.

Systra, 2016. *Status of the competition for long distance trips at the aggregated level*. Carpooling, bus, train, private car and air competition on long distance trips. UIC, DB, Systra. 30/09/2016. 276 p.

Toussaint, J.-F., 2010. *Confrontation aux limites*. Présentation 24 mars 2010. https://vimeopro.com/maisondelachimie/chimie-et-sport/video/264041404

URF, 2018. *Faits et chiffres. Statistiques de mobilités en France et en Europe*. 144 p. https://www.unionroutiere.fr/ publications/faits-et-chiffres/

Vignes, R., 2019. *La valeur du temps, au cœur du grand bouleversement de nos sociétés*. The Conversation, 9 octobre 2018. https://theconversation.com/la-valeur-du-temps-au-coeur-du-grand-bouleversement-de-nos-societes-97504

Wadud, Z., Baierl, M., 2017. *Explaining "peak car" with economic variables: A comment*. Transportation Research Part A, Vol. 95, 381-385. https://doi.org/10.1016/j.tra.2016.11.002

Yu, B., Zhang, J., Wei, Y.-M., 2019. *Time use and carbon dioxide emissions accounting: An empirical analysis from China*. Journal of Cleaner Production, Volume 215, pp. 582-599. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.01.047

Zahavi, Y., 1974, *Traveltime budgets and mobility in urban areas*. Report prepared for the U.S Department of transportation. 49 p.

IV. Sur quels leviers compter, quelles politiques publiques ?

Résumé

L'objectif de ce 4ème et dernier chapitre est de présenter une vision plus large des 5 leviers de décarbonation, et d'en tirer des enseignements et des options de politiques publiques à mettre en œuvre. Sont ainsi discutés les éléments qualitatifs et quantitatifs qui relatifs : au potentiel des 5 leviers, en termes de baisses d'émissions ; au réalisme et aux conditions de réalisation des évolutions prévues dans les scénarios ; et à leur caractère souhaitable, en termes de coûts et bénéfices pour la société. Pour renseigner ces éléments, une méthodologie d'évaluation est d'abord proposée, en 3 étapes. (1) L'évaluation temporelle rappelle les décompositions passées et d'ici 2050 pour chaque levier, en les complétant si besoin de tendances récentes. (2) L'analyse plus large des émissions met en évidence les interactions positives (synergie) ou négatives (effets rebonds) entre les mesures et les leviers, puis l'impact sur les émissions en analyse de cycle de vie plus globale. (3) Enfin, les coûts et bénéfices sociétaux sont renseignés, par l'impact sur les externalités (congestion, pollution, sédentarité, etc.), puis par les éléments renseignant la facilité ou la difficulté de mise en œuvre des évolutions (coûts pour l'usager ou les politiques publiques, acceptabilité, impacts sur l'emploi, etc.). Les mesures de sobriété, qui peuvent faire de l'ordre de la moitié du chemin vers la décarbonation du secteur, présentent davantage de co-bénéfices sur les autres externalités et autres impacts environnementaux, et permet de limiter le coût de la transition, au contraire des évolutions technologiques souvent plus chères, avec des impacts indirects et des ressources parfois limitées. Les freins à la sobriété concernent davantage les comportements, l'acceptabilité et les impacts sur l'emploi pour certains sous-secteurs. Technologie et sobriété sont confrontés au frein d'inertie du système à transformer en comparaison de transitions qu'il faudrait engager très rapidement. L'analyse montre le caractère indispensable de combiner technologie et sobriété, pour profiter de leurs interactions, limiter leurs inconvénients et profiter de leurs avantages respectifs.

Introduction

Points et messages clés :

- ✓ **Résumé des 3 chapitres** : lien historique très fort entre les 3 variables de vitesse moyenne des déplacements, demande individuelle et émissions de CO_2 par personne de la mobilité ; ces 3 variables sont passées par un maximum au début des années 2000, par la combinaison d'effets structurels et conjoncturels ; à l'avenir, la stratégie nationale bas-carbone prévoit un découplage très fort entre demande et émissions de CO_2, questionnant le réalisme des évolutions prévues et l'alignement des politiques publiques actuelles avec l'objectif de neutralité carbone.
- ✓ Afin de tirer des recommandations de **politiques publiques** de la présente étude, il est nécessaire de mobiliser une méthodologie et une vision plus large des 5 leviers de décarbonation, afin de pallier aux limites de l'angle d'approche, des méthodes et des résultats obtenus dans les 3 premiers chapitres.
- ✓ Ainsi le 4ème chapitre discute des éléments qualitatifs et quantitatifs qui sont relatifs au **potentiel** des 5 leviers de décarbonation, au **réalisme** des évolutions prévues et à leur caractère **souhaitable** (coûts et bénéfices associés pour la société).

Les 3 chapitres précédents permettent de tirer **3 enseignements principaux**, qui peuvent être résumés par la **thèse suivante**, résumée en Figure 89 : vitesse, demande et émissions individuelles ont été fortement corrélés par le passé, en hausse jusqu'à la fin du XXème siècle avant de plafonner au début des années 2000, tandis que la stratégie nationale bas-carbone fait le pari d'un très fort découplage entre demande et émissions d'ici 2050.

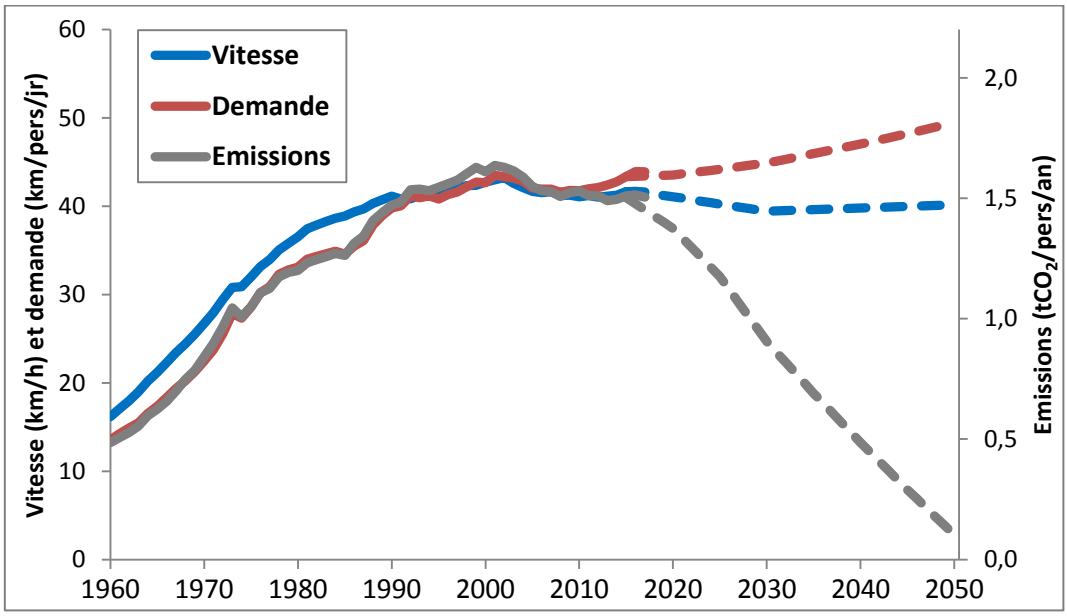


Figure 89 : Evolution de la vitesse moyenne, de la demande et des émissions individuelles de 1960 à 2050
Périmètre : Métropole seule ; mobilité des voyageurs, avec 60% des VUL inclus ; émissions de CO_2 issues de la combustion de la biomasse incluses (échelle de droite) ; trajectoire 2015-2050 prévue par la SNBC

Les 3 principaux éléments de cette thèse ont été mis en évidence de la manière suivante :

1. Lien historique entre vitesse, demande et émissions.

Le couplage entre demande de transport et émissions de CO_2 a d'abord été mis en évidence dans le chapitre 1, aussi bien pour le transport de voyageurs que de marchandises. Le lien entre ces 2 variables, et la très faible baisse des émissions unitaires (par voy.km et t.km) qui

en est la cause, s'expliquent par le fait que les 4 facteurs influençant ces émissions unitaires (report modal, taux de remplissage, efficacité énergétique, et intensité carbone) se sont pour beaucoup compensés entre eux. Par ailleurs, le chapitre 3 est revenu sur le lien entre demande de mobilité individuelle et vitesse moyenne des déplacements, qui s'explique par des temps moyens de déplacements relativement constants au cours du temps.

Le lien mis en évidence entre ces 3 variables sur une longue période telle que celle étudiée (1960-2017) semble inédit dans la littérature, pour les raisons suivantes : si les liens entre demande et émissions, puis entre vitesse et demande de mobilité, ont déjà été étudiés séparément dans la littérature, le lien simultané entre ces 3 variables apparaît comme nouveau parmi la littérature étudiée ; la série temporelle étudiée pour l'étude sur le passé est la plus longue recensée parmi la littérature du chapitre 1 sur les décompositions d'émissions des transports, qui par ailleurs utilisent rarement un pas de temps annuel, et où le facteur de demande n'est pas toujours exprimé en voy.km et t.km ; enfin, l'évaluation temporelle de la vitesse moyenne des déplacements, telle que réalisée avec une décomposition en 3 déterminants de son évolution, semble nouvelle dans la littérature. Aussi, le lien entre ces 3 variables permet d'éclairer d'une manière nouvelle les raisons du pic de la mobilité individuelle (*peak travel*) et le pic des émissions des transports au début des années 2000.

2. Plafonnement des variables au début des années 2000.

La décomposition des émissions des transports en chapitre 1 a mis clairement en évidence l'importance de la demande dans le pic des émissions du début des années 2000, suivi depuis par un plateau ondulant des émissions. Pour les marchandises, c'est la crise économique de 2008 qui entraîne une chute de la demande et donc des émissions, dans un contexte d'émissions unitaires (gCO_2/t.km) en légère baisse depuis le début des années 90. Pour la mobilité des voyageurs, une faible baisse des émissions unitaires (gCO_2/voy.km) était également observée depuis le début des années 90. Dans ce contexte, la stabilisation de la demande intérieure de mobilité, liée à un pic de la demande individuelle (compensée par la hausse de la population) au début des années 2000, a été le principal changement expliquant le pic des émissions sur cette même période. **Ce pic de la demande individuelle (*peak travel*) et donc des émissions est éclairé ici de manière nouvelle et complémentaire à la littérature existante, par l'évolution de la vitesse moyenne des mobilités.** Celle-ci a aussi atteint un maximum au début des années 2000, en particulier pour les seules mobilités intérieures à la France (hors aérien international), évolution qui est due à la fois à des effets structurels et des effets conjoncturels (cf chapitre 3 ; Figure 89) : les fortes hausses de la vitesse moyenne durant les décennies 60 et 70 ont progressivement ralenti jusqu'à une certaine saturation du développement de l'automobile au début des années 90 ; à cela s'ajoute au début des années 2000 la mise en place des radars, associée à la hausse des prix du pétrole, qui fait chuter la vitesse sur les routes et entraîne un ralentissement des mobilités. Cette évolution pourrait être une des causes majeures de la baisse de la demande et des émissions de la mobilité du début des années 2000. De plus, ce facteur vitesse permet également d'expliquer la légère hausse de la demande et des émissions au milieu des années 2010.

3. Pari du fort découplage entre émissions et demande d'ici 2050.

De manière plus prospective, le chapitre 2 permet d'identifier le potentiel identifié par les scénarios de prospectives français pour les 5 leviers de décarbonation, d'ici 2050. Aussi le

chapitre 3 interroge l'évolution future possible de la demande individuelle de mobilité, sous l'angle de la vitesse moyenne des mobilités.

Les apports sur ces éléments prospectifs concernent en particulier le besoin de rupture pour atteindre les budgets carbone, le potentiel des 5 leviers de décarbonation, et le possible ralentissement des mobilités en lien avec la transition énergétique. Sur le premier point, la comparaison entre les évolutions passées et la stratégie nationale bas-carbone (SNBC) identifie notamment le besoin d'une forte accélération des baisses d'émissions unitaires historiques: elles devraient passer de -0,5 %/an environ depuis le début des années 90 à -3,8 %/an pour 2015-2030 pour les voyageurs, et de -0,6 à -2,2 %/an pour les marchandises. Les premières années montrent déjà un retard sur ce scénario, expliquant le dépassement des premiers budgets carbone. Si la SNBC repose essentiellement sur un pari technologique pour atteindre les fortes baisses d'émissions, par l'amélioration de l'efficacité énergétique et de l'intensité carbone, le chapitre 2 identifie également le potentiel des autres leviers par rapport à la SNBC. Une contribution plus ambitieuse sur les leviers de demande, de report modal et de remplissage permettrait une baisse supplémentaire des consommations d'énergie de l'ordre de -40 % pour les voyageurs et -50 % pour les marchandises, facilitant en retour la décarbonation de l'énergie. Enfin, le chapitre 3 sur la vitesse permet de mettre en perspective les hypothèses de demande individuelle, en hausse dans la SNBC. L'analyse montre que les marges d'augmentation de la vitesse moyenne sont faibles, et qu'au contraire de nombreuses évolutions et mesures favorables à la transition énergétique pourraient aller vers un ralentissement des mobilités. Si cette vitesse moyenne venait à baisser, en particulier pour les déplacements intérieurs, la demande individuelle de mobilité pourrait également suivre, remettant en cause les hypothèses d'une hausse significative à l'avenir.

Ces éléments prospectifs permettent déjà d'**interroger le réalisme de l'objectif de neutralité carbone et l'alignement des politiques publiques actuelles avec l'ambition affichée**.

Cependant, pour tirer de ces analyses des **recommandations de politiques publiques** sur la décarbonation des transports, il est nécessaire de prendre du recul sur les décompositions d'émissions réalisées dans les chapitres 1 et 2, pour plusieurs raisons qui tiennent aux **limites de l'angle d'approche, de la méthode employée et des résultats obtenus**. Plusieurs limites ont déjà pu être pointées sans forcément être discutées, et méritent d'étudier les évolutions liées aux 5 facteurs dans un contexte plus global.

Premièrement, si les 5 facteurs de la décomposition ont été choisis pour correspondre aux 5 leviers de la SNBC, il est important de comprendre les **raisons qui sous-tendent les évolutions de ces facteurs**, comme cela a été discuté sur le chapitre 1 pour le passé. Par exemple, l'évolution de la demande est influencée par de nombreux autres facteurs tels que la population, le PIB, le prix du pétrole, l'aménagement du territoire ou encore la vitesse des mobilités (Figure 7). Aussi l'impact des politiques publiques sur ces leviers ne peut pas directement être déduit des résultats, car l'identité de Kaya ne permet pas de mettre en évidence de relations de causalité, mais seulement le résultat d'évolutions influencées par de multiples facteurs. De même, pour les décompositions appliquées aux scénarios, le **réalisme des évolutions prévues** et la manière dont les **politiques publiques** pourront agir sur ces leviers restent également à discuter, n'ayant été que rapidement évoqués dans le chapitre 2.

Deuxièmement, les **interactions entre les 5 facteurs** ont déjà été évoquées, et méritent d'être mises en évidence plus systématiquement pour évaluer les impacts potentiels des mesures de politiques publiques sur les 5 facteurs et sur les émissions. Dans le chapitre 1, elles ont notamment poussé à présenter des graphiques combinant plusieurs leviers, comme par exemple en montrant la demande par mode (qui permet de voir l'évolution des facteurs de demande et de report modal de manière simultanée ; Figure 20), de regarder le remplissage tous modes de transport terrestres confondus (regroupant ainsi les facteurs de report modal et de remplissage ; Figure 22), ou l'efficacité énergétique par voy.km (combinant les évolutions simultanées du remplissage et de l'efficacité énergétique ; Figure 24). Plus largement, des effets rebonds ont été abordés, par exemple sur la demande et/ou le report modal via le développement du covoiturage, le meilleur remplissage des poids-lourds ou l'amélioration de l'efficacité énergétique des voitures. Aussi le chapitre 3 a montré que la vitesse des mobilités avait une influence sur la demande, mais aussi sur le report modal et l'efficacité énergétique. Enfin, le développement du véhicule électrique se retrouve simultanément dans les facteurs d'efficacité énergétique et d'intensité carbone, ne facilitant pas la lecture de son potentiel.

Troisièmement, une autre problématique importante pour le développement du véhicule électrique concerne le besoin d'évaluer son potentiel en **analyse de cycle de vie** du véhicule, c'est-à-dire en incluant les émissions liées à la production de l'électricité consommée et des véhicules. En effet, le périmètre retenu pour les décompositions d'émissions ne correspond qu'aux émissions directes, en raison de la disponibilité des données. Cela a pour implication de surestimer le potentiel de l'intensité carbone, en plus d'autres raisons évoquées en partie 3.3.5 du chapitre 2. L'analyse de cycle de vie est également nécessaire pour le développement des autres technologies et énergies, comme cela a été développé en partie 3.2.5 du chapitre 1 pour les agrocarburants développés jusqu'alors en France. Enfin, elle concerne également les projets de nouvelles infrastructures de transport et de leur rénovation.

Enfin, l'analyse jusqu'alors s'est essentiellement focalisée sur l'externalité des émissions de CO_2 des transports. Cependant, les politiques publiques sont guidées par l'atteinte de nombreux objectifs, et les transformations sont soumises à de nombreux freins (économiques, organisationnels, d'inertie du système, d'acceptabilité, de changements de comportement, etc.) qu'il faut prendre en compte pour évaluer à la fois le réalisme mais aussi la souhaitabilité des évolutions prévues. Le passage en revue des 5 leviers de manière plus globale s'attardera donc également sur les **coûts et bénéfices pour la société** des mesures et évolutions, que ce soit sur les autres externalités des transports ou sur les éventuels freins existants.

L'objectif du chapitre est double. Il vise d'abord à mettre en perspectives les analyses des 3 chapitres afin de préciser le **potentiel des 5 leviers de décarbonation, les caractères réalistes et souhaitables** de leur évolution. Cette analyse aura pour but de mettre en évidence des **orientations de politiques publiques** sur la transition énergétique des transports.

La méthodologie d'évaluation sera d'abord précisée, avant de l'appliquer aux 5 leviers de décarbonation. Le chapitre s'appuiera sur les résultats des précédents chapitres, ainsi que sur la littérature grise et académique disponible. Il visera à apporter essentiellement des éléments qualitatifs, mais aussi quantitatifs lorsque cela est possible et pertinent.

1. Quelle méthode d'évaluation des évolutions souhaitables ?

Cette première partie a pour objectif de présenter la **méthodologie d'évaluation des évolutions** les plus favorables pour la transition énergétique des transports, et les différents critères qu'il semble important de prendre en compte. Cette méthodologie permettra de mieux juger les **actions et politiques publiques à mettre en œuvre**, les impacts qu'on peut en attendre sur les émissions, ainsi que leurs avantages et inconvénients.

L'évaluation plus globale des 5 leviers de décarbonation des transports a pour objectif de préciser pour chacun d'entre eux :

- ✓ Leur **potentiel** en termes d'impact climatique, y compris en tenant compte des interactions entre les 5 facteurs, et des émissions en analyse de cycle de vie (ACV) ;
- ✓ Le **réalisme** ou les conditions de réalisation des évolutions prévues dans les scénarios, interrogeant la facilité ou la difficulté des changements préconisés ;
- ✓ Le caractère **souhaitable** des évolutions au-delà des émissions de CO_2, en prenant en compte plus globalement les coûts et bénéfices pour la société.

Ces éléments seront repris pour chaque levier en partie 2 du chapitre, à l'aide des 3 étapes d'évaluation suivantes :

- ✓ L'**évaluation temporelle** des leviers, notamment à partir des décompositions des émissions des chapitres 1 et 2, et de l'évolution actuelle ;
- ✓ L'**évaluation plus large des émissions**, en tenant compte des interactions entre les 5 leviers et de l'ACV ;
- ✓ Les **coûts et bénéfices sociétaux**, ainsi que les difficultés de mise en œuvre.

Le potentiel des leviers sera renseigné par les 2 premières sous-parties ; le réalisme sera particulièrement questionné via l'évolution temporelle et les difficultés de mise en œuvre ; enfin, le caractère souhaitable sera questionné essentiellement dans la 3ème sous-partie.

Les **5 leviers** de décarbonation seront étudiés en reprenant les évolutions les plus évoquées dans les scénarios de prospectives pour agir sur chaque levier : par exemple, arrêt de l'étalement urbain, essor du télétravail, et consommations plus locales sont des évolutions régulièrement citées pour agir sur la modération de la demande de transport.
Derrière chacune de ces évolutions, de **nombreuses politiques publiques** sont possibles ou nécessaires, et pourront également être discutées dans la deuxième partie : par exemple, le développement du vélo peut être encouragé de multiples manières, par des aides fiscales, de nouvelles infrastructures, de nouveaux services de location ou réparation, ou encore par une communication positive sur ce mode.
Les **26 évolutions** régulièrement citées dans les scénarios de prospectives (et évoquées en chapitre 2, en sous-partie 3.3) seront mises en regard de **43 critères** qui concernent les interactions entre les 5 facteurs, l'ACV, les externalités, ainsi que des éléments sur la difficulté de mise en œuvre.
Des **tableaux récapitulatifs** viendront résumer ces croisements de manière qualitative. En raison de leur nombre (plus de 1000 croisements), seuls les éléments les plus significatifs seront ensuite détaillés pour chaque levier en partie 2, afin de garder une longueur raisonnable pour ce chapitre. La lecture des tableaux sera explicitée en début de partie 1.2.1.

1.1.L'évaluation temporelle

Points et messages clés :

- ✓ L'analyse des **tendances passées** reprend les principaux éléments développés dans le chapitre 1 pour chaque levier et les déterminants de leur évolution.
- ✓ L'analyse des **potentiels futurs** de réduction des émissions reprend les ordres de grandeur mis en évidence par les décompositions d'émissions des scénarios.
- ✓ Enfin, l'**état actuel** permet de faire le lien entre le passé et les évolutions espérées à l'avenir, d'identifier les évolutions les plus récentes (signaux faibles, crise du coronavirus, etc.), et leur alignement ou non avec les objectifs de court terme.

1.1.1. Les tendances passées

Les tendances passées sur les émissions des transports, telles qu'étudiées dans la chapitre 1 par la décomposition des émissions de 1960 à 2017, permettent d'apporter des éléments importants pour l'analyse des tendances futures et des politiques publiques à mettre en place, pour plusieurs raisons.

Tout d'abord, l'analyse a permis d'identifier les **facteurs les plus déterminants** de l'évolution des émissions. Ainsi la **demande** de transport apparaît comme un facteur particulièrement important, à la fois pour les tendances de long terme et de court terme.

L'analyse a également montré **la forte inertie des 4 autres leviers**, qui évoluent de manière plus lente, et permettent de manière conjointe de ne baisser les émissions par km parcouru ou t.km transportée que de -0,5 et -0,6 % respectivement ces dernières années.

En identifiant les multiples **facteurs d'influence des 5 leviers** de la décarbonation, l'analyse permettra également d'évaluer comment ces influences pourraient être orientées dans le sens de la transition énergétique à l'avenir.

Enfin, de manière contrastée avec ce qui est prévu dans les scénarios de prospectives, le facteur d'**intensité carbone** n'a eu que très peu d'impact par le passé. Cette tendance devrait se poursuivre au moins à court terme, bien qu'à plus long terme ce facteur pourrait avoir un rôle plus déterminant. Par ailleurs, l'analyse sur les agrocarburants invite à bien prendre en compte l'intensité carbone des technologies et des nouveaux carburants développés en analyse de cycle de vie (ACV) pour évaluer leur réel intérêt climatique.

1.1.2. Les potentiels futurs

La seconde partie de l'analyse temporelle s'appuiera sur l'analyse de décomposition des scénarios du chapitre 2. Malgré les limites qui seront traitées ultérieurement (en particulier les interactions entre les 5 facteurs et l'ACV), la prise en compte de nombreux scénarios contrastés met en avant les **évolutions** qu'il est possible d'imaginer pour **chaque levier de décarbonation**, et un premier ordre de grandeur de leur impact attendu sur les émissions.

Aussi, la **comparaison entre scénarios tendanciels et ambitieux** permet de mettre en évidence les marges de progrès possibles selon la direction prise, en particulier par les politiques publiques sur les transports et le climat.

Enfin, bien que le détail ne soit toujours important dans les scénarios, les leviers et politiques publiques pour atteindre les évolutions prévues sont souvent cités. Le **réalisme** des évolutions ou leurs **conditions de réalisation** pourront ainsi être discutés, à partir des éléments fournis dans les scénarios, éventuellement complétés par d'autres études de la littérature.

1.1.3. L'état actuel

La troisième partie de l'analyse temporelle s'intéresse à l'état actuel des évolutions relatives aux 5 leviers de décarbonation, à l'interface entre les analyses quantitatives sur le passé qui s'arrêtent à 2017, et les scénarios de prospectives dont l'année de référence est souvent située en 2010 ou 2015.

De nombreuses tendances récentes peuvent ainsi être comparées aux évolutions qui seraient souhaitables d'après les scénarios de prospectives, afin d'identifier les **tendances qu'il faut poursuivre, accélérer ou inverser** (voir 1ère ligne du Tableau 21).
Parmi les **tendances défavorables** pour la transition énergétique et qu'il faudrait donc inverser, se trouvent notamment l'étalement urbain, la forte croissance du trafic aérien, la tendance aux véhicules hauts et lourds du type SUV (*sport utility vehicle*), ou encore les difficultés du secteur du fret ferroviaire.
Au contraire, parmi les **tendances favorables**, il est possible de citer la dynamique du télétravail, du vélo, des trafics en transports en commun, de la modération de la circulation et de la vitesse en ville, le développement du véhicule électrique, et la croissance de la production du biogaz.
Quand il sera possible de comparer de manière quantitative ces tendances avec les objectifs nationaux ou les scénarios, la question sera de savoir si le **rythme de ces évolutions** est suffisant et aligné avec les objectifs climatiques de court terme.

Sur ce point des budgets carbone de court terme, les tendances récentes identifiées dans le chapitre 1 permettent de renseigner les **évolutions de court terme prévisibles**, au moins dans le cas d'une absence de ruptures importantes. Ainsi la demande est fluctuante d'une année sur l'autre, tout en ayant une évolution relativement stable à moyen terme, ou en légère hausse pour les voyageurs en raison de la croissance de la population, ou en tenant compte de l'aérien international. Les émissions unitaires baissant légèrement, en particulier par les gains d'efficacité énergétique, les émissions des transports sont plutôt sur une pente de légère baisse tendancielle, qui reste loin des objectifs qui étaient fixés à environ -3%/an par la 1ère SNBC. L'évolution des émissions d'une année sur l'autre dépend donc beaucoup de l'évolution de la demande de transport de voyageurs et de marchandises, fortement influencés par l'évolution du PIB et des prix du pétrole.
Ainsi l'année 2020 sera marquée par une chute des émissions en raison de la forte baisse de la demande liée à la **crise du coronavirus**, mais il est probable que cela ne change pas significativement les éléments ci-dessus. Cependant, le contexte a fortement évolué pour certaines évolutions citées par les scénarios, que ce soit pour la crise importante du secteur aérien, le développement du télétravail, l'essor du vélo sur la phase de déconfinement, ou encore par l'influence des plans de relance sur les dynamiques futures des secteurs économiques liés plus ou moins directement aux transports. Certains de ces effets ne seront pas immédiats, par exemple la volonté de relocalisation de certaines activités pourrait impacter le transport de marchandises sur les moyen et long termes.
Enfin, les tendances de court et moyen termes pourront parfois être complétées par des **prévisions** provenant d'analyses ou d'études diverses, par la mise en évidence de **signaux faibles** existants dans la société, ou d'**enquêtes d'opinion** qui pourraient souligner les évolutions possibles à l'avenir.

1.2.L'analyse des émissions de manière plus large

Points et messages clés :

- ✓ Les évolutions prévues sur chacun des 5 leviers de décarbonation comportent généralement des impacts et **interactions** sur plusieurs leviers simultanément. Il est nécessaire pour les politiques publiques de les prendre en compte pour limiter les possibles **effets rebonds** et profiter des **synergies** positives entre les leviers.
- ✓ Les émissions peuvent être analysées selon **différents périmètres** : combustion d'énergie seule, ou avec production d'énergie, production et fin de vie des véhicules, construction et entretien des infrastructures, impacts plus larges sur d'autres secteurs. Les **analyses en cycle de vie** (ACV) pointent notamment l'importance de la prise en compte des émissions de production et de combustion des carburants issus de la biomasse, et les émissions de production des batteries des véhicules électriques.

1.2.1. Les interactions entre les facteurs

Comme cela a été signalé dans les deux premiers chapitres et en introduction de ce quatrième chapitre, si les 5 leviers de décarbonation peuvent être isolés dans la décomposition des émissions de CO_2 des transports, les évolutions ou politiques publiques mises en place agissent souvent sur plusieurs leviers simultanément.
Quand cela se fait de manière défavorable pour un autre levier et pour la transition énergétique, il sera question d'**effet rebond** sur les émissions ou d'interaction négative (en orange dans le Tableau 17). Au contraire, lorsque l'interaction permet une amélioration pour un autre levier que celui directement visé, il sera question d'impact positif, d'interaction ou de **synergie positive** (en vert dans le tableau).

Le Tableau 17 tente de lister les principales interactions existantes pour les **26 évolutions** souvent citées parmi les scénarios de prospectives, et qui peuvent être classées comme agissant en priorité sur l'un des 5 leviers de décarbonation. Ces interactions, explicitées dans la deuxième partie de ce chapitre, sont renseignées soit par des observations passées, des études, des sondages ou plus souvent encore par des effets logiques ou prévisibles au vu des caractéristiques de l'évolution en question. Par exemple, la modification du coût ou de la vitesse des déplacements (par le développement du covoiturage, des contraintes sur l'aérien ou encore une baisse de vitesse sur les routes) entrainera des adaptations dans la portée des déplacements ou le mode utilisé.
Au-delà des 26 évolutions renseignées sur les 5 leviers de décarbonation, ces interactions peuvent être utilisées pour analyser l'impact d'**autres évolutions des transports** qui ne sont pas aussi directement reliées à la transition énergétique (tel que le développement des véhicules autonomes) ou pour analyser l'impact de **mesures** plus précises.
C'est ainsi que le tableau fait apparaître la **taxe carbone**, une mesure transversale souvent citée par les scénarios, qui permet de fournir une incitation positive simultanément sur les 5 leviers de décarbonation, bien que les difficultés actuelles compliquent sa mise en œuvre.

De très nombreuses autres **mesures de politiques publiques** pourraient être détaillées pour chacune des 26 évolutions du tableau, parfois avec des petites différences sur les interactions mises en avant. Ainsi **le tableau ne vise pas l'exhaustivité**, mais plutôt à mettre en avant des grandes tendances et des interactions majeures à prendre en compte dans les raisonnements et les politiques publiques.

Aussi les nombreux "**?**" permettent de mettre en avant selon les cas : soit un manque de données objectives, des incertitudes, des multiples effets qui jouent dans des sens opposés, ou des évolutions qui dépendent du contexte. Souvent, les évolutions renseignées sont qualitatives et doivent donc être prises avec précaution, leur ampleur étant ici simplement renseignée avec 6 couleurs différentes selon le sens et la force de l'interaction.

Enfin, les deux dernières colonnes reviennent sur la dichotomie entre sobriété et technologie.
La notion de **sobriété** regroupe ici les évolutions comportementales, organisationnelles, sociétales ou dans l'aménagement qui visent à réduire la demande en énergie et en matières premières pour les transports. Elle concerne essentiellement les facteurs de demande, de report modal, de remplissage, et certaines évolutions du facteur d'efficacité énergétique telles que la réduction de la vitesse ou du poids des véhicules (voir chapitre 2, partie 3.3.4). Le tableau indique aussi une forte interaction positive avec l'intensité carbone, dans le sens où les moindres consommations d'énergie permettent de plus facilement décarboner l'énergie consommée, ce qui est vrai de manière générale, et en particulier pour la décarbonation de l'aérien, du maritime ou des poids-lourds qui sera plus compliquée que pour les voitures.
Au contraire, la **technologie** se réfère ici aux évolutions des technologies et de l'énergie utilisées, qui permettent de réduire les émissions sans changer fondamentalement les structures et comportements actuels : progrès sur les moteurs, agrocarburants ou électrique notamment. Le risque de ces évolutions est parfois d'amener à des effets rebonds, en particulier sur la demande et le report modal, bien que ces effets rebonds dépendent fortement du coût des technologies développées.
Enfin, la mise en évidence de ces interactions permet aussi de souligner l'importance de **penser les évolutions de sobriété avec les évolutions technologiques, et inversement**, de mobiliser conjointement les 5 leviers de décarbonation, et de mettre en cohérence les 26 évolutions du tableau et les nombreuses mesures associées, afin de **limiter les effets rebonds et profiter des synergies**, sujets qui seront régulièrement repris ensuite.

Tableau 17 : Principales interactions entre les évolutions citées par les scénarios avec les 5 leviers de décarbonation
Lecture : la densification permet de réduire les distances quotidiennes de déplacements (mais potentiellement d'accroître celles à longue distance, d'où le "?"), tout en ayant une interaction positive avec le report modal, en favorisant l'utilisation de la marche à pied, du vélo ou le développement des transports en commun ; au contraire, le développement du covoiturage peut se faire au détriment du train et en encourageant une demande nouvelle de transport, telle qu'observée sur la longue distance, d'où les interactions négatives pour les émissions. Cellules grisées : spécifiques au transport de marchandises.

Impact	Demande de T.					Report Modal							TR			Efficacité Ener.					Intensité Carb.							
Positif / Neutre / Négatif / ? Incertain	Densification	- Etalement	Télétravail	Commerce proximité	Prod. et conso. locales	+ Bus et cars	+ Train	+ Vélo	- Avion	- Voiture	+ Fret fer. et fluvial	- Poids-lourds	Covoiturage	Autopartage	TR Poids-lourds	↓ poids véhicules	↓ vitesse axes rapides	↓ vitesse en ville	Ecoconduite	Progrès moteur	Electrique	Agrocarburants	GNV	BioGNV	Hydrogène	Taxe carbone	Sobriété	Technologie
DT	?	?	?	?				?					?	?					?		?							?
RM					?	?	?	?						?							?							?
TR												?									?							?
EE															?			?			?							?
IC																						?	?	?				

1.2.2. L'analyse en cycle de vie

Les analyses sur les émissions dans les chapitres 1 et 2 se sont généralement limitées à explorer uniquement les émissions directes des transports, appelées aussi **du réservoir à la roue** (ou *TTW* pour *tank-to-wheel* en anglais) ou dîtes en scope 1, qui correspondent aux émissions liées à la combustion de l'énergie lors de l'usage des véhicules. Ces émissions sont les plus facilement disponibles dans les inventaires d'émissions, et raisonner avec ces données sur le passé ne pose pas de problème trop important au regard des tendances identifiées, puisque ces émissions sont majoritaires dans les émissions totales du secteur, et que les autres émissions (au moins celles liées à la production de l'énergie et des véhicules) sont relativement proportionnelles à ces émissions directes. Il est donc probable que la même décomposition des émissions avec un périmètre plus large aurait amené à des conclusions relativement similaires. En revanche, les carburants alternatifs au pétrole nécessitent de regarder un périmètre plus large, puisque l'électrique et l'hydrogène ne présentent pas d'émissions de CO_2 à l'usage, et que les émissions de CO_2 des carburants issus de la biomasse (biocarburants et biogaz) ne sont généralement pas comptabilisées par convention. Cependant, la prise en compte de périmètres plus larges montre que les énergies et technologies utilisées sont souvent loin d'être zéro carbone, ce qui montre l'importance de leur prise en compte, dans le contexte d'objectif de neutralité carbone où les émissions pour l'ensemble des secteurs en France doivent être quasiment divisées par 6 d'ici 2050.

Avant de passer à des périmètres plus larges que ceux du réservoir à la roue, il existe d'**autres gaz à effet de serre** que le CO_2, bien que celui-ci représente la majorité des émissions des transports. Comme précisé en 2.3 du chapitre 1, le CO_2 représente 96,3 % des émissions de gaz à effet de serre des transports, le reste étant constitué des HFC (2,4 %), du N_2O (1,1 %) et du CH_4 (0,1 %), essentiellement dans le transport routier.

Une autre spécificité concerne les **forçages radiatifs**, particulièrement importants à prendre en compte pour le secteur aérien, dans la mesure où le forçage radiatif lié aux émissions de l'aérien est de l'ordre de deux fois plus élevé que l'effet du CO_2 seul (voir article aérien en annexe, p316 ; IPCC, 1999 ; multiplication par plus de 2,5 dans Kärcher, 2018). Les traînées de condensation, qui dominent les effets hors CO_2, entraînent un effet réchauffant à très court terme, qui est peu comparable aux longs temps de résidence du CO_2 et à son impact sur le climat à plus long terme. Au contraire, les effets hors CO_2 de la combustion du fioul lourd dans le transport maritime sont essentiellement refroidissants, et sont bien plus forts que l'effet réchauffant du CO_2 à court terme. L'effet refroidissant est dû en particulier aux émissions d'oxydes de soufre (SO_2), un polluant atmosphérique dont la régulation s'est renforcée début 2020 pour en faire baisser les émissions (Borken-Kleefeld et al, 2010).

Le deuxième périmètre est de tenir compte de la **production de l'énergie**, du puits au réservoir (ou *WTT* pour *well-to-tank*). Cela permet d'obtenir des **émissions du puits à la roue** (*WTW* pour *well-to-wheel*). Pour les carburants pétroliers, cela augmente de 15 à 30 % les émissions par rapport aux émissions en sortie de réservoir (chapitre 1, point 2.3). Pour l'électricité, la meilleure efficacité des moteurs électriques et la faible intensité carbone moyenne de l'électricité en France rend les émissions des modes et véhicules électriques généralement faibles du puits à la roue. Pour la production des carburants issus de la biomasse, les émissions peuvent être importantes pour les biocarburants de 1ère génération

(voir chapitre 1, point 3.2.5) et sont plus favorables pour le biogaz (voir 2.5.3 plus loin). Enfin, pour l'hydrogène, cela dépend beaucoup du mode de production de l'énergie (2.5.2).

Le troisième périmètre est de raisonner en **analyse de cycle de vie (ACV) du véhicule**, en ajoutant les émissions liées à la production et à la fin de vie du véhicule. Cette part représente environ 15 % de l'ensemble des émissions du cycle de vie d'une voiture thermique. Elle monte à quasiment trois quarts pour une voiture électrique, en raison des émissions plus élevées à la production liées à la production de la batterie, et aussi en raison des plus faibles émissions à l'usage (Figure 90 ; ADEME, 2013). Cette composante devient donc largement majoritaire pour la voiture électrique, et devra donc être de plus en plus intégrée dans les analyses sur les émissions. Pour les transports en commun, la production des véhicules pèse moins fortement dans les émissions en ACV par rapport à la voiture, en raison d'une utilisation plus intense des véhicules, et d'une durée de vie généralement plus longue.

Le quatrième périmètre, est de considérer également les émissions liées à la production et à l'entretien des **infrastructures de transport**. Ici les données sont encore plus rares que pour l'ACV des véhicules, mais les analyses se développent peu à peu. Aussi, leur prise en compte est plus ou moins pertinente selon les questions posées. Pour comparer différents modes entre eux, les émissions de construction des infrastructures sont en général des émissions passées sur lesquelles nous n'avons plus de prise aujourd'hui. En revanche, ce périmètre est très important à prendre en compte pour les nouveaux projets d'infrastructures de transport. Ces émissions peuvent être bien amorties pour des infrastructures utilisées intensément, en revanche il peut être important par exemples pour des lignes ferroviaires peu fréquentées, nécessitant la construction de nombreux ponts ou tunnels (IEA, 2019 ; Figure 90).

Le dernier périmètre concerne les **émissions hors transports**, qui ne seront généralement pas détaillées ici, mais qui sont importantes à prendre en compte pour étudier l'impact global des évolutions sur les émissions. Cela peut concerner les émissions dans le secteur du bâtiment pour l'aménagement du territoire ou du télétravail, ou encore les émissions du numérique (télétravail), de l'industrie (relocalisations) ou de l'agriculture (biogaz ; Tableau 18).

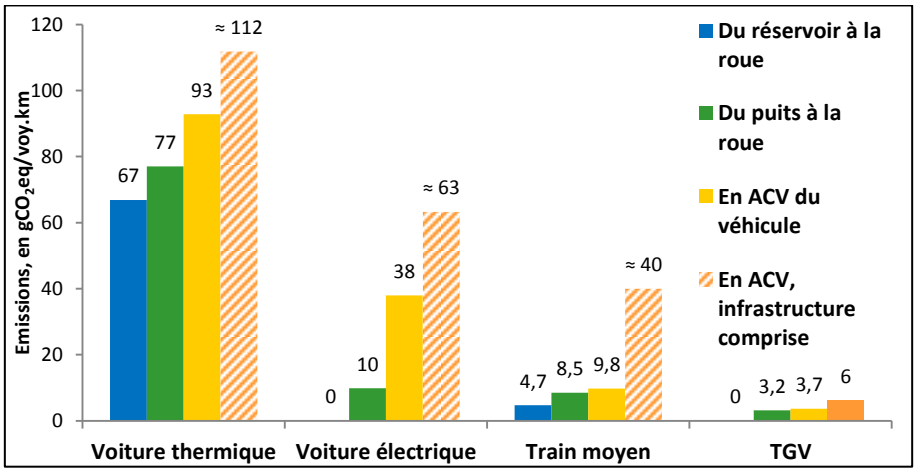


Figure 90 : Emissions d'une voiture thermique, électrique, d'un train moyen et d'un TGV en analyse de cycle de vie
Sources : pour la voiture, émissions sur 150 000 km, de 22 tCO_2eq en ACV pour le thermique (VT) et 9 t pour l'électrique (VE), soit 147 et 60 gCO_2eq/veh.km, et remplissage de 1,58 personne/véhicule (ADEME, 2013) ; chiffres de 30 et 40 g/veh.km pour les infrastructures des VT et VE (BCO2, 2013) ; chiffres ADEME et SNCF pour les émissions du puits à la roue du train ; 53 % du bilan carbone de la LGV Rhin-Rhône est dû à l'énergie de traction, 8 % au matériel, 39 % à l'infrastructure (ADEME, RFF, SNCF, 2009), extrapolation pour le train moyen ; incertitudes pour l'évaluation pour les infrastructures en hachuré ; voir compléments dans les parties sur le train (2.2.3) et la voiture électrique (2.5.1)

Tableau 18: Impact des évolutions des scénarios sur les émissions indirectes, selon différents périmètres d'analyse
Lecture : diminuer le trafic aérien a un impact positif sur le forçage radiatif, hors CO_2 ; le développement de la voiture électrique en France permet de se tourner vers une énergie bas-carbone comparée au pétrole, en revanche la production des véhicules est plus émettrice, et son développement nécessite la construction de nouvelles infrastructures (de recharge notamment) ; les batteries, si raccordées au réseau électrique, pourraient avoir un impact positif sur l'équilibre de court terme du réseau. GES : gaz à effet de serre ; GNV : gaz naturel véhicule ; TR : taux de remplissage

Impact	Demande de T.					Report modal							TR			Efficacité Ener.					Intensité Carb.							
Positif / Neutre / Négatif / ? Incertain	Densification	- Etalement	Télétravail	Commerce proximité	Prod. et conso. locales	+ Bus et cars	+ Train	+ Vélo	- Avion	- Voiture	+ Fret fer. et fluvial	- Poids-lourds	Covoiturage	Autopartage	TR Poids-lourds	↓ poids véhicules	↓ vit. axes rapides	↓ vitesse en ville	Ecoconduite	Progrès moteur	Electrique	Agrocarburants	GNV	BioGNV	Hydrogène	Taxe carbone	Sobriété	Technologie
GES INDIRECTS	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?		?	?		?		?	?	?	?			
Forçage, hors CO_2																												
Prod. d'énergie								?													?	?			?			?
Prod. véhicules														?		?	?			?								?
Infrastructures							?				?		?				?				?		?	?	?		?	?
Hors transports	?	?	?		?																?							?

Des **potentiels** de réduction d'émissions plus ou moins forts sont identifiés pour les 26 évolutions en Tableau 19, en combinant plusieurs critères : le potentiel (% ciblés) correspond à la part des émissions concernée par l'évolution ; le potentiel de report représente la part du gisement qui pourrait se reporter (vers le vélo, le covoiturage, etc.) ; l'impact correspond au pourcentage de réduction des émissions lorsque le report est effectif ; enfin, les interactions entre les facteurs (Tableau 17) et l'analyse en cycle de vie (Tableau 18) sont pris en compte.
Il en ressort un **impact majeur** des évolutions et politiques publiques liées à l'électrification des véhicules, à la modération du transport aérien, et à la taxe carbone. Un **potentiel très important** est ensuite identifié pour : le report modal vers le train, vers le vélo, et par les contraintes sur l'usage de la voiture et des poids-lourds ; le covoiturage ; les évolutions de baisse du poids des véhicules, de vitesse sur les axes rapides, ou d'efficacité sur les moteurs ; et enfin le développement du biogaz. Les autres potentiels sont plus faibles (vert clair) voire peu significatifs sur les émissions (jaune). Ces potentiels seront détaillés en partie 2.

Tableau 19 : Impact des 26 évolutions des scénarios sur les émissions, et potentiel d'action des politiques publiques
Lecture : parmi les évolutions étudiées, le potentiel du passage à l'électrique est considéré comme majeur : il cible des émissions très importantes (au moins véhicules légers), le potentiel de report pour ces véhicules est très important, l'impact du passage à l'électrique sur les émissions est important, enfin les interactions et l'ACV sont potentiellement négatifs.

Impact	Demande de T.					Report modal							TR			Efficacité Ener.					Intensité Carb.							
Positif / Important / Neutre / Négatif / ? Incertain	Densification	- Etalement	Télétravail	Commerce proximité	Prod. et conso. locales	+ Bus et cars	+ Train	+ Vélo	- Avion	- Voiture	+ Fret fer. et fluvial	- Poids-lourds	Covoiturage	Autopartage	TR Poids-lourds	↓ poids véhicules	↓ vit. axes rapides	↓ vitesse en ville	Ecoconduite	Progrès moteur	Electrique	Agrocarburants	GNV	BioGNV	Hydrogène	Taxe carbone	Sobriété	Technologie
EMISSIONS GES																												
Potentiel (% ciblés)																												
Potentiel de report																												
Impact (% réduc.)															?			?		?		?	?					
Interactions, ACV	?	?	?	?	?	?	?				?		?	?							?			?	?			?

1.3.Au-delà des émissions, quels coûts et bénéfices sociétaux ?

Points et messages clés :

- ✓ Parmi les évolutions étudiées, ce sont essentiellement les mesures de **sobriété** qui apportent les co-bénéfices les plus importants sur les **externalités** des transports.
- ✓ Concernant la **mise en œuvre**, les principales difficultés viennent du coût et du temps de mise en œuvre pour certaines **technologies** ; et des changements de comportement, d'acceptabilité et d'impacts sur l'emploi pour certaines mesures de **sobriété**.

1.3.1. L'impact sur les autres externalités

Pour juger de la **souhaitabilité** des différentes évolutions de la transition énergétique des transports, il est nécessaire de prendre en compte les coûts et bénéfices plus larges pour la société. Ainsi le Tableau 20 liste les impacts que peuvent avoir les évolutions régulièrement citées dans les scénarios sur les principales externalités prises en compte dans l'analyse socio-économique des transports (pollution, bruit, congestion, accidentologie notamment), et d'autres effets externes en lien avec les transports et l'énergie. Ces effets externes sont listés ici, puis détaillés dans la partie 2 du chapitre, pour les plus significatifs d'entre eux.

Tout d'abord, la consommation d'**énergies fossiles** est généralement directement ciblée par les mesures agissant sur les émissions, et celles-ci ont donc généralement un impact positif sur la réduction de la dépendance aux énergies fossiles et en particulier au pétrole. L'impact est moins significatif quand le potentiel vu ci-dessus de l'évolution est faible (TR poids-lourds), que le report se fait vers des modes aujourd'hui fortement dépendants au pétrole (bus et cars) ou vers d'autres énergies fossiles (GNV : gaz naturel véhicule).

De même, la **consommation d'énergie** totale est souvent en baisse, sauf pour les mesures d'intensité carbone qui visent davantage le type d'énergie utilisé que la quantité. Pour l'électrique, les moteurs consomment moins en énergie finale (ce qu'indiquent notamment les décompositions du chapitre 2), mais consomment environ autant en énergie primaire (ADEME, 2013). C'est une différence importante entre les carburants pétroliers et l'électrique. Dans le premier cas, la différence entre énergie primaire (le pétrole) et finale (le carburant) est faible, car les pertes d'énergie dans le raffinage sont limitées, en revanche les moteurs sont très inefficaces, avec des rendements de l'ordre de 30 %. Pour l'électrique, la production à partir de sources primaires vers l'énergie finale (l'électricité) comporte en général des pertes bien plus importantes (pertes de chaleur pour les centrales thermiques par exemple), en revanche les moteurs électriques sont bien plus efficaces, de l'ordre de 80 % de rendement. Pour l'hydrogène enfin, les nombreuses transformations réduisent encore l'efficacité énergétique totale de la chaîne (T&E, 2018a).

Pour les évolutions étudiées ici, la **pollution atmosphérique** est généralement corrélée aux consommations d'énergie fossile, bien que certaines technologies non évoquées ici permettent de réduire la pollution sans forcément réduire les consommations (ex : filtres à particules). Par ailleurs, la densification a tendance à augmenter l'exposition à la pollution, qui est plus forte dans les villes.

Pour les autres types d'impacts environnementaux ou de **pollution**, la consommation d'espace et les impacts sur la **biodiversité**, et la consommation de **métaux**, les impacts sont parfois liés entre eux. Ils concernent en particulier les risques relatifs à certaines technologies visant l'amélioration de l'intensité carbone.

La majorité des évolutions présente des avantages pour la diminution du **bruit**, notamment du moteur pour les évolutions sur l'intensité carbone, ou en diminuant les sources de bruit. La densification a tendance, comme pour la pollution, à renforcer l'exposition au bruit.
La **congestion routière** est en diminution pour les mesures de réduction de la demande, de report modal depuis la voiture, de covoiturage et les mesures de sobriété sur l'efficacité lui sont également plutôt favorables. La densification, tout en permettant d'utiliser plus facilement des modes alternatifs à la voiture, complique également la circulation des voitures en raison de la rareté de l'espace en milieux denses, augmentant ainsi la congestion.
Concernant l'**accidentologie**, une autre externalité fortement étudiée dans les transports, les bénéfices proviennent essentiellement du report modal ou de la sobriété sur le poids des voitures, la vitesse, ou l'écoconduite. Pour le vélo, les risques d'accidents sont plus élevés que pour la voiture ou la marche (mais moins que les 2RM), par heure de trajet (Blaizot et al, 2012), faisant des risques réels et perçus un frein majeur au développement du vélo. En revanche, si ces usagers sont vulnérables, ils ne créent que très peu de danger pour les autres usagers de la route, comme en témoignent le faible nombre d'autres usagers blessés ou tués lors d'un accident avec un cycliste (ONISR, 2020). Aussi plus la pratique du vélo est forte, et moins la dangerosité est forte (ADEME, 2020a). Ainsi l'impact du développement du vélo sur l'accidentologie dépend fortement du point de vue qui est pris pour l'analyse.
En revanche, le vélo présente des bénéfices santé très forts pour lutter contre la **sédentarité** et l'inactivité physique. Dans une moindre mesure, les transports en commun nécessitent plus souvent des temps de marche à pied pour les débuts et fins de trajet, ou pour les changements ou l'intermodalité. Le télétravail a au contraire un effet négatif, et la plupart des évolutions qui concernent la voiture n'impactent pas ce critère.
De même, la **dépendance automobile** n'est réduite que par les évolutions qui favorisent les autres modes de transport, ou celles qui peuvent permettre la démotorisation totale ou partielle, telles que le covoiturage ou l'autopartage. Les mesures purement technologiques n'ont pas d'effet sur cette dépendance à la voiture, et c'est d'ailleurs pour les ménages les plus dépendants que la technologie est la plus bienvenue et devrait être privilégiée à l'avenir. Au contraire, lorsque la dépendance est faible et les alternatives importantes, il sera plus intéressant d'un point de vue environnemental de se séparer de la voiture. Pour les usagers, cela permet également des économies substantielles en raison de son coût important.
Les **inégalités territoriales** sont généralement réduites par une meilleure offre de transport, et peuvent souffrir de contraintes sur certains modes de transport (voiture, avion, taxe carbone, etc.). Cependant, l'effet de réduction des inégalités par hausse de l'offre n'est pas forcément vrai sur le long terme selon l'offre proposée, si par exemple les modes et infrastructures de transports rapides (TGV, avion, autoroutes) se concentrent sur certaines grandes villes ou métropoles, au détriment des villes petites et moyennes, comme cela s'est fait par le passé.
De même, les **inégalités sociales** peuvent être renforcées par des contraintes sur la voiture, et par le renchérissement des transports dû à certaines technologies plus coûteuses. Au contraire, la réduction des distances, le report modal et le covoiturage permettent de réduire le coût des mobilités et ainsi la vulnérabilité des ménages aux revenus les plus faibles.
La crise des gilets jaunes a mis en évidence l'importance de ces trois derniers problématiques, avec une forte dépendance automobile dans les zones peu denses, illustrant dans le même temps les inégalités territoriales et sociales dans l'accès à la mobilité.

Enfin, la **résilience** est une notion large qui concerne ici la capacité du système de transport à se remettre d'un choc, qui peut être de nature très variée : crise économique, forte hausse du prix du pétrole ou rupture d'approvisionnement, grève, épidémie, ou événements climatiques extrêmes. La nature variée des perturbations rend la classification des évolutions compliquée. Cependant, quelques critères peuvent favoriser la résilience : faible consommation de ressources et faible dépendance à des ressources extérieures (énergie, métaux, etc.), organisation possible à un niveau local, lien social pour faciliter la coopération en cas de crise, complexité et interconnexions limitées du système en question, etc. Ainsi, le vélo se montre particulièrement résilient et a très souvent profité de crises pour se développer par le passé. Les approvisionnements, services et commerces de proximité améliorent aussi la résilience, tout comme le covoiturage et l'autopartage qui favorisent le lien social. Au contraire, des technologies plus intenses en ressources telles que le véhicule électrique, hydrogène ou les véhicules autonomes sont bien moins résilients aux chocs possibles sur les transports.

Il ressort de cette analyse des tendances relativement marquées entre mesures de sobriété et technologie (les 2 dernières colonnes du Tableau 20). Il apparaît que les mesures et évolutions vers plus de **sobriété** sont plus favorables pour les autres externalités des transports et présentent des co-bénéfices importants pour la société, que ce soit pour les impacts environnementaux (pollutions, consommations de ressources), mais aussi pour le bruit, la congestion, l'accidentologie, la sédentarité, les inégalités sociales dans une certaine mesure, ou encore la résilience. Au contraire, les co-bénéfices apparaissent moins importants pour la **technologie**, dont les évolutions ont davantage tendance à traiter spécifiquement le problème des émissions et de la consommation de pétrole, sans adresser de nombreuses autres problématiques plus larges en lien avec les transports.

Tableau 20 : Impact des évolutions citées dans les scénarios sur les externalités des transports, hors CO_2

Impact	Demande de T.					Report modal							TR			Efficacité Ener.					Intensité Carb.						
	Densification	- Etalement	Télétravail	Commerce proximité	Prod. et conso. locales	+ Bus et cars	+ Train	+ Vélo	- Avion	- Voiture	+ Fret fer. et fluvial	- Poids-lourds	Covoiturage	Autopartage	TR Poids-lourds	↓ poids véhicules	↓ vit. axes rapides	↓ vitesse en ville	Ecoconduite	Progrès moteur	Electrique	Agrocarburants	GNV	BioGNV	Hydrogène	Taxe carbone	Sobriété	Technologie
EXTERNALITES																												
Energies fossiles			?	?	?	?	?						?	?	?			?			?				?			
Conso. d'énergie			?	?	?								?	?	?			?			?	?						?
Pollution atmosphérique	?					?	?						?	?	?		?	?				?						?
Autres pollutions	?		?			?	?				?												?	?	?			?
Conso. d'espace / Biodiv.			?	?	?								?	?	?		?	?						?				?
Métaux			?												?	?				?					?			?
Bruit	?			?	?	?	?				?		?		?		?						?	?				?
Congestion routière		?		?	?		?		?	?	?		?		?			?										
Accidentologie	?	?						?							?	?												
Sédentarité		?		?																								
Dépendance automobile			?	?																								
Inégalités territoriales	?	?	?	?		?	?		?			?					?				?			?	?		?	?
Inégalités sociales	?	?	?	?			?			?				?				?			?			?	?		?	?
Résilience	?	?				?	?			?					?	?	?	?	?	?	?	?						

Positif / Neutre / Négatif / ? Incertain

1.3.2. Facilité et coûts de mise en œuvre

Une dernière composante très importante du potentiel de réduction des émissions, du réalisme des évolutions et de leur souhaitabilité, concerne la **facilité ou la difficulté de mise en œuvre** des évolutions, au regard de différents critères qui sont détaillés dans le Tableau 21. A nouveau, sans prétendre à l'exhaustivité, le tableau vise à mettre en avant les principaux points pour lesquels les évolutions pourraient être mises en œuvre, ou au contraire les principaux freins existants. Au-delà des débats sur les bénéfices climatiques et sur les externalités exposés plus haut, un grand nombre de ces critères revient régulièrement dans les débats publics, permettant d'identifier qui sont les gagnants et perdants potentiels des mesures de transition énergétique des transports.

Les deux premiers critères concernent l'analyse temporelle.
Le caractère **tendanciel** de l'évolution ou non a déjà été évoqué en point 1.1.3.
La **rapidité de mise en œuvre** des mesures, de leur impact sur les évolutions et donc sur les émissions est ensuite présentée. La plupart des évolutions ont un temps d'inertie relativement important, tel que détaillé précédemment, notamment en chapitre 1. L'aménagement du territoire, en particulier par la taille des villes, la localisation de l'habitat ou des emplois auront un effet seulement à long terme. C'est le cas également de certaines évolutions technologiques encore très peu développées aujourd'hui, telles que l'hydrogène ou dans une moindre mesure le biogaz. Parmi les mesures les plus rapides à mettre en œuvre se trouvent les baisses de vitesse sur les routes, certaines mesures fiscales favorisant le report modal, ou encore le développement du télétravail.

Les critères de **coûts pour les politiques publiques** et les **usagers** dépendent tout d'abord du coût des évolutions, et de la répartition possible du financement entre les politiques publiques, les usagers, et les autres acteurs économiques. Comme évoqué plus haut, les évolutions de sobriété sont en général moins coûteuses, et permettent de baisser le coût de la mobilité pour l'usager. En revanche, elles nécessitent parfois des financements publics importants, que ce soit en investissement et/ou en exploitation, pour favoriser le développement des transports en commun, du vélo ou du covoiturage. Ainsi, même un mode peu coûteux comme le vélo nécessite actuellement des financements conséquents pour développer les infrastructures, des services vélos, ou fournir des incitations financières à son usage, bien qu'à terme les aides publiques pourraient être bien plus faibles que pour les autres modes de déplacement. Il en est de même pour le développement de certaines technologies comme l'électrique, où le surcoût actuel nécessite des financements publics importants qui pourront être progressivement diminués, à mesure que la parité de coût avec les véhicules thermiques se rapproche. Au moins à court terme, il sera vu dans les parties suivantes que les motorisations électriques, alimentées au biogaz ou à l'hydrogène sont plus coûteuses et représentent souvent un frein majeur à leur développement rapide.
Enfin, le coût pour les différents agents économiques dépend fortement de la calibration des politiques publiques. Par exemple, pour une politique visant à réduire l'usage de la voiture, le coût dépendra du type d'évolution ou d'incitation visée (action sur les vitesses, le poids, le coût, etc.), le type de mesure (taxes, normes et interdictions, subventions, etc.), ou encore le type de véhicules, d'acteurs ou de trajets qui sont visés, et les éventuels dispositifs de compensation ou de redistribution prévus.

Cette calibration des politiques publiques rejoint les problématiques d'**acceptabilité**. Selon les acteurs touchés par les mesures et la manière dont sont traités les perdants des différentes mesures, l'acceptabilité ou au contraire les contestations peuvent toucher à des sujets variés : justice sociale, impacts économiques (pour les entreprises, les ménages, etc.), contraintes sur les modes de vie, perte de temps dans les transports, etc. Certains de ces sujets sont présents dans les lignes suivantes du tableau. Aussi, si les contestations pour certaines mesures des transports sont fortes et indéniables, elles sont aussi fortement connectées à un contexte notamment politique qui est plus large. C'est ce qu'a pu illustrer le mouvement des gilets jaunes à partir de l'automne 2018 en France, où la contestation a été déclenchée en grande partie en lien avec des contraintes sur la voiture (80 km/h, taxe carbone), mais était aussi nourrie par des aspirations bien plus larges : pouvoir d'achat, justice sociale et réduction des inégalités, besoin d'être davantage écoutés et participation citoyenne, défiance envers les politiques et les institutions, etc. Ainsi, l'acceptabilité de la transition dépend fortement de la manière dont sont traitées plus globalement les inégalités sociales, entre territoires, et la question de la transition des emplois. Elle peut être fortement renforcée par la formation et la sensibilisation au changement climatique, qui permet de mieux faire accepter les efforts à faire pour surmonter le défi. De même, la participation des citoyens aux décisions, telle qu'expérimentée par la Convention citoyenne pour le climat, peut faciliter l'appropriation des enjeux, les débats et l'acceptabilité des mesures décidées.

Un élément fort en lien avec l'acceptabilité concerne les **changements de comportements** de mobilité ou plus largement de modes de vie, qui sont en relation avec de nombreuses évolutions. Ces changements concernent toutes les mesures de sobriété. Les adaptations peuvent être plus ou moins facile à opérer selon les personnes, en fonction de leurs comportements existants, le territoire, les alternatives à disposition, les valeurs, le budget disponible, ou encore les contraintes professionnelles et/ou personnelles. Ainsi le passage au vélo, au covoiturage ou au train ne concernera pas l'ensemble de la population, ou surtout sera possible que pour une partie des trajets pour lesquels leur usage est le plus approprié. Les changements de comportement peuvent être encouragés de multiples manières par les politiques publiques, que ce soit par l'information ou le marketing individualisé, des *nudges*, ou encore par des programmes d'accompagnement au changement (voir notamment ADEME, 2016), des leviers peu utilisés jusqu'alors. Les évolutions technologiques demandent bien moins de changements de comportements, même si l'autonomie limitée de l'électrique peut demander des adaptations importantes dans l'organisation des déplacements.

De manière similaire aux comportements, de nombreuses mesures de sobriété peuvent avoir tendance à augmenter les **temps de déplacement**. Cela est à mettre en lien avec une des conclusions du chapitre 3 sur la vitesse, qui montre que de nombreuses mesures qui vont dans le sens de la transition énergétique vont également dans le sens d'un ralentissement des mobilités. Pour certaines évolutions telles que le covoiturage, l'autopartage ou le train, la vitesse n'est pas forcément réduite, en revanche cela demande des temps d'organisation du trajet et éventuellement d'intermodalité qui sont plus longs. Pour d'autres évolutions telles que la réduction des vitesses sur les routes, la moindre utilisation de l'avion ou le développement du vélo en zones rurales, la vitesse est plus faible, mais cela peut en retour modifier les comportements de mobilité en réduisant les distances parcourues (cf chapitre 3).

A ce moment-là, ce sont les **distances** et l'**accessibilité** aux destinations lointaines qui peuvent être compromises. L'aménagement du territoire et des modes de vie plus en proximité (services, emploi, mais aussi loisirs, vacances, etc.) sont des conditions majeures pour rendre acceptable ce ralentissement. En effet, les mesures réduisant la demande permettent soit de réduire les temps de transport, à vitesse équivalente ; soit de ralentir les déplacements tout en gardant un budget temps de transport constant.

Le **confort** des mobilités est également impacté essentiellement par les mesures de sobriété, visant le report modal, le covoiturage ou des véhicules légers. Cette notion est cependant assez subjective, et d'autres avantages peuvent compenser le confort de la voiture individuelle et faire apprécier le trajet en mobilité alternative : faire de l'exercice pour le vélo, utiliser son temps en transports en commun, faire des rencontres et discuter pour le covoiturage, etc.

La question de l'**emploi** dans les transports est majeure et structure fortement les politiques publiques des transports. Ainsi, l'augmentation de l'offre de transport, telle qu'encouragée par le passé, a un impact positif sur l'emploi dans le secteur, alors que la modération de la demande, que ce soit pour l'avion ou l'automobile, se heurte à des résistances au vu de l'importance des emplois en France dans ces secteurs (aéronautique, compagnies aériennes, équipementiers, industrie automobile, concessionnaires, réparateurs, etc.). La transition vers un moindre usage de ces modes nécessite donc d'anticiper les restructurations et les plans de transition professionnelle. Une partie des pertes d'emplois pourra être compensée dans les autres modes, tels que les transports en commun et le vélo (industrie, réparation, services vélo, infrastructures, etc.), bien que cela ne sera pas suffisant et nécessite de regarder la question de l'emploi au niveau de l'économie dans son ensemble. En effet, d'autres secteurs profiteront au contraire de la transition écologique, notamment dans la rénovation des bâtiments, l'agriculture, ou via la relocalisation de certaines activités. Le secteur de l'automobile pourrait en partie profiter de ces relocalisations selon les politiques industrielles mises en œuvre, mais le passage à l'électrique va également réduire le besoin d'emplois dans la filière automobile, notamment par un moindre besoin d'entretien des véhicules.

Enfin, le **lien social** est renforcé en particulier par le développement des filières courtes et des commerces de proximité, par le covoiturage, et dans une moindre mesure par l'autopartage entre particuliers ou les ateliers de réparation vélo. Au contraire, le télétravail a un effet négatif sur le lien social et doit idéalement être développé un nombre de jours limité dans la semaine pour éviter ses effets néfastes sur les échanges sociaux et la sédentarité.

L'analyse montre que les différentes évolutions de la transition des transports se heurtent à des difficultés variées dans leur mise en œuvre, que ce soit l'inertie des changements, les coûts, l'acceptabilité, les changements de comportements, ou les impacts économiques (Tableau 21). Les évolutions de sobriété et sur la technologie ont toutes deux des obstacles importants à lever. Pour les mesures de **sobriété**, il s'agit plus fortement des changements de comportement et d'organisation des mobilités (qui demandent parfois des investissements importants avec parfois une forte inertie), de problématiques d'acceptabilité, et des impacts indirects sur l'emploi qu'il faut anticiper. Pour les mesures sur la **technologie**, les obstacles à lever sont davantage en lien avec leur coût et avec la rapidité de mise en œuvre.

Tableau 21 : Critères de facilité ou de difficulté et de coûts de mise en œuvre des évolutions citées dans les scénarios

Impact	Demande de T.					Report modal							TR			Efficacité Ener.					Intensité Carb.							
Positif / Neutre / Négatif / ? Incertain	Densification	- Etalement	Télétravail	Commerce proximité	Prod. et conso. locales	+ Bus et cars	+ Train	+ Vélo	- Avion	- Voiture	+ Fret fer. et fluvial	- Poids-lourds	Covoiturage	Autopartage	TR Poids-lourds	↓ poids véhicules	↓ vit. axes rapides	↓ vitesse en ville	Ecoconduite	Progrès moteur	Electrique	Agrocarburants	GNV	BioGNV	Hydrogène	Taxe carbone	Sobriété	Technologie
FACILITE / COÛTS																												
Tendanciel	?			?	?				?	?							?		?	?			?			?	?	?
Rapidité mise en œuvre				?	?	?	?						?	?													?	?
Coût politiques publiques	?	?		?	?			?								?				?		?		?	?		?	?
Coût usagers	?			?	?				?	?				?							?	?	?	?	?		?	?
Acceptabilité	?	?						?	?	?						?	?	?			?	?	?	?	?			?
Comportements	?	?																										
Temps de transport			?			?	?	?		?							?	?									?	
Distance / Accessibilité								?					?			?	?	?								?	?	
Confort						?	?	?																			?	
Emploi															?					?	?	?	?	?	?		?	
Lien social	?	?																									?	

Le Tableau 22 résume pour les 26 évolutions régulièrement citées dans les scénarios :

- ✓ Leur **potentiel** en termes de baisse des émissions de gaz à effet de serre ;
- ✓ Le **réalisme**, ou la facilité ou la difficulté de mise en œuvre des évolutions ;
- ✓ La **souhaitabilité**, renseignée par les coûts et bénéfices pour la société.

Des potentiels importants de baisses d'émissions sont donnés pour de nombreuses évolutions, montrant la grande diversité de mesures de politiques publiques à mettre en œuvre pour décarboner les transports. Cela montre aussi le côté **systémique** de la transition à mener, et la nécessité d'**agir sur tous les facteurs** pour assurer la cohérence globale du projet.

Des **freins** indéniables existent cependant pour concrétiser ces évolutions, avec des conditions de réalisation nécessitant des changements parfois importants.

Enfin, la majorité des évolutions présente des **co-bénéfices importants** pour la société.

Si cette 1ère partie du chapitre a porté sur l'explication des lignes des tableaux, la 2ème partie détaillera davantage les colonnes, en reprenant les 5 leviers et les principales évolutions, pour détailler certains points critiques identifiés dans les tableaux pour ces évolutions.

Tableau 22 : Résumé des tableaux sur les 26 évolutions des scénarios, avec leur potentiel en termes d'impact climatique, leur impact sur les externalités, et leur facilité et coûts de mise en œuvre

Impact	Demande de T.					Report modal							TR			Efficacité Ener.					Intensité Carb.							
Positif / Neutre / Négatif / ? Incertain	Densification	- Etalement	Télétravail	Commerce proximité	Prod. et conso. locales	+ Bus et cars	+ Train	+ Vélo	- Avion	- Voiture	+ Fret fer. et fluvial	- Poids-lourds	Covoiturage	Autopartage	TR Poids-lourds	↓ poids véhicules	↓ vit. axes rapides	↓ vitesse en ville	Ecoconduite	Progrès moteur	Electrique	Agrocarburants	GNV	BioGNV	Hydrogène	Taxe carbone	Sobriété	Technologie
EMISSIONS GES																												
FACILITE / COÛTS																												
EXTERNALITES																												

2. Evaluation des 5 leviers à actionner

2.1. La demande de transport, un facteur structurant à réinterroger

Points et messages clés :

- ✓ Le premier changement sur la demande est de **changer de vision et d'objectif** : assumer de passer d'un soutien à l'ensemble des modes à un soutien pour les seuls modes bas-carbone, pour réduire les distances totales et favoriser le report modal.
- ✓ Pour la mobilité, les constantes de nombre de déplacements et de temps de mobilité invitent à agir en priorité sur les leviers de **distance par déplacement**, et de **vitesse** (modération de l'aérien, baisse de vitesse sur autoroutes, report vers le vélo, etc.).
- ✓ La baisse de la distance par déplacement dépend des comportements et modes de vie, et de l'**aménagement du territoire**. Les actions sur l'urbanisme, la localisation des logements et activités, la fiscalité, doivent s'orienter vers une réduction des distances.
- ✓ La modération de la demande pour les **marchandises** devra passer par une certaine relocalisation de certaines activités, encouragée par des politiques sectorielles et une tarification incitative, tout en veillant à limiter la démassification de la logistique.

Le premier levier étudié, la **demande de transport**, a été le **principal facteur expliquant l'évolution passée des émissions de CO_2** des transports en France, aussi bien pour les voyageurs que les marchandises. Depuis le début des années 2000, sa tendance est assez stable pour les voyageurs, pour la demande individuelle de mobilité hors international (la croissance de la demande totale est donc portée par la croissance démographique, et est encore plus forte en incluant l'aérien international). Elle est relativement stable également pour le transport de marchandises, avec des fluctuations selon la conjecture économique (essentiellement PIB, puis prix du pétrole). A court terme, ces évolutions de la demande auront encore un impact prédominant sur l'évolution des émissions, tant que le parc de véhicules ne sera pas largement décarboné.

Si la demande a très fortement augmenté par le passé (multipliée par 4,7 pour les voyageurs et 3,4 pour les marchandises sur 1960-2017), **un retour en arrière n'est pas envisageable** d'ici 2050, tant l'aménagement du territoire s'est adapté et a contribué à cette nouvelle donne, et tant les comportements de mobilités, les modes de vie, et l'économie se sont modifiés en tenant compte de ces évolutions de la demande. Aussi, les transformations les plus structurantes se sont faîtes sur un temps long, et 30 ans est un temps qui peut paraître relativement court concernant un aménagement du territoire qui a une forte inertie.

Cependant, cette mise en garde sur l'inertie et le potentiel de réduction limité de la demande ne signifie pas que ce facteur sera peu important à l'avenir. Les scénarios de prospectives montrent bien que les différences sont très significatives entre des scénarios tendanciels où la demande continuerait à croître, et d'autres scénarios plus ambitieux qui iraient jusqu'à une baisse de la demande de l'ordre de -20 %. Ainsi, dans la **comparaison entre tendanciel et ambitieux**, la demande pouvait ressortir comme le **second facteur le plus important** en termes de baisses d'émissions, derrière l'intensité carbone de l'énergie.

Aussi l'étude des **interactions** entre les facteurs a déjà montré l'interaction positive très forte avec le report modal, qui peut difficilement être significatif si la demande n'est pas modérée. Il en est de même pour le levier d'intensité carbone, la modération de la demande favorisant le passage à l'électrique et au biogaz, notamment pour les marchandises. Enfin, une moindre demande aura aussi tendance à limiter les émissions en **analyse de cycle de vie**.

Les éléments ci-dessus plaident donc pour une **meilleure prise en compte de ce facteur dans les politiques publiques**, alors qu'il est aujourd'hui peu adressé, et que la SNBC montre très peu d'ambition sur ce levier en comparaison des autres scénarios de prospectives étudiés.
Les politiques publiques ayant plutôt tendance jusqu'à maintenant à encourager cette demande (infrastructures, subventions à l'achat ou à l'offre des différents modes, soutien aux mesures avec effets rebonds potentiels sur la demande, etc.), le premier changement à opérer est un **changement de vision et d'objectif**. Ainsi, pour s'aligner sur l'objectif de neutralité carbone, et en raison des nombreux co-bénéfices sur les autres externalités, les politiques publiques devraient plus systématiquement être orientées vers un objectif de réduction de la demande, que de croissance de celle-ci. Cela est particulièrement valable pour les modes les plus consommateurs d'énergie, et donc les plus émetteurs aujourd'hui tant qu'ils dépendent du pétrole, que sont la voiture, l'avion et les poids-lourds.
Il faut donc passer d'un soutien à toutes les mobilités, à un **soutien plus ciblé sur les modes bas-carbone** et peu consommateurs d'énergie (marche, vélo, trains de voyageurs et marchandises, autres transports en commun, fluvial), **en défavorisant au contraire l'usage des modes fortement émetteurs**. Il est donc très important de réfléchir simultanément aux leviers de modération de la demande et de report modal. Ici les tendances globales sur la demande seront évoquées, en abordant quelques grandes différences entre les modes, puis les spécificités à chaque mode seront abordées en partie 2.2 sur le report modal.
L'objectif est de fournir des **axes possibles pour les politiques publiques pour modérer la demande**. Ce levier étant influencé par des éléments nombreux et variés (prix, vitesse, démographie, aménagement, comportements, etc.), **il n'existe pas de recette unique ou facile pour agir sur ce levier**. Parfois, il sera ainsi plus facile d'identifier dans un premier temps les tendances qui vont dans le mauvais sens, pour mieux identifier par effet miroir dans quelle direction il faudrait orienter les politiques publiques.

2.1.1. Temps et vitesse, nombre et distance des déplacements

La demande totale de transport pour les voyageurs, mesurée en kilomètres parcourus, va être influencée à la hausse par la **croissance de la population**, prévue autour de +12 % dans les scénarios entre l'année de référence (2010 à 2015) et 2050. Cette croissance sera accompagnée d'un vieillissement de la population, qui aura plutôt tendance à réduire la demande individuelle moyenne, étant donné que les personnes âgées se déplacent moins, en nombre de déplacements et distances parcourues (CGDD, 2010).
Pour la demande individuelle, il est éclairant de regarder les **constantes et variables** influençant le nombre de kilomètres parcourus par personne. Comme évoqué en chapitre 3, historiquement, le nombre de déplacements est resté relativement stable autour de 3 à 4 déplacements par jour et par personne ; de même, les temps de déplacements sont restés proches d'une heure par jour ; ainsi ces temps sont de l'ordre de 15 à 20 minutes par trajet, de manière similaire pour les différents modes de courte distance. Dans le même temps, les distances de déplacement parcourues par personne ont été multipliées environ par 10 à 12 depuis 1800 (de 4-5 km/jour à environ 50 km). Les temps de déplacements et le nombre de trajets étant restés relativement constants, cela signifie que la vitesse et les distances moyennes par déplacement ont été multipliées par 10 à 12 depuis 1800 (Figure 91).

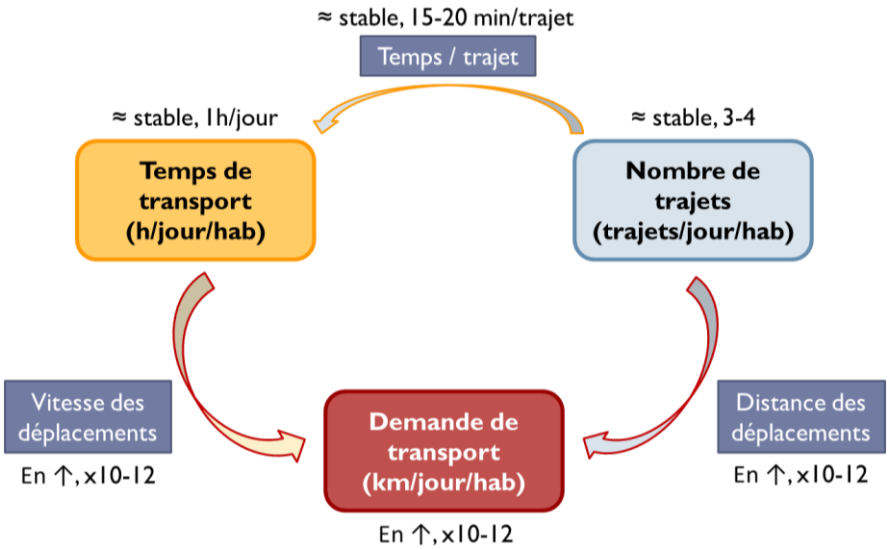


Figure 91 : Lien entre 3 variables des comportements de mobilité, et leur évolution historique depuis 1800

Ces constantes et variables indiquent que les **marges de manœuvre les plus importantes** pour modérer voire réduire la demande de transport viennent probablement d'une baisse de la **vitesse moyenne** des déplacements et des **distances par déplacements**. Au contraire, les marges sur le moindre nombre de déplacements ou la baisse des temps de trajet seraient moins fortes, ou risques d'être soumises aux effets rebonds.

Il en est ainsi du **télétravail**, qui permet de réduire le nombre et les temps de trajets. En France, 6,7 millions peuvent devenir facilement des télétravailleurs (soit 26 % des actifs), 2,1 M (9 %) peuvent le devenir sous condition d'aménagement, 1,1 M (5 %) pourront difficilement le faire, et il est estimé que 15,4 M (60 %) sont dans l'incapacité de le faire (Fondation Concorde, 2017). Durant le confinement lié au coronavirus début 2020, 41 % des actifs ont dû pratiquer le télétravail (ADEME, 2020b), le reste correspondait probablement aux environ 60 % d'actifs ne pouvant pas le pratiquer. Tous les actifs ne sont pas concernés, et cela ne concerne qu'une partie des déplacements, ainsi le potentiel est limité sans pour autant être négligeable : l'ADEME estime que les émissions des voitures pourraient être réduites de 1,3 %, en considérant 35 % de télétravailleurs ponctuels. Cependant, il est possible que les trajets économisés soient compensés par de possibles effets rebonds : d'autres trajets peuvent être réalisés dans la journée télétravaillée, potentiellement plus localement cependant ; surtout, les choix de localisation pourraient changer vers des distances domicile-travail plus longues, par exemple 45% des Français se disent prêts à choisir un lieu de résidence plus loin de leur emploi, et vice versa, avec le télétravail (ADEME, 2020b) ; enfin, il existe un effet rebond potentiel sur les déplacements à longue distance, un jour de télétravail le vendredi ou le lundi permettant plus facilement de partir en weekend plus loin. Il faudra donc veiller à ces effets rebonds pour s'assurer que le développement du télétravail va vraiment dans le sens d'une modération de la demande et d'une baisse des émissions.

Au-delà du télétravail, il existe un potentiel pour réduire les trajets à longue distance par la **téléconférence**, qui permet de réduire certains déplacements professionnels, avec notamment un bénéfice climatique important pour les trajets en avion. Si les bénéfices sont maximaux pour les trajets internationaux, la téléconférence pourrait aussi permettre de plus facilement supprimer certaines navettes aériennes régulières en Métropole, qui pourraient être en partie remplacées par de la téléconférence, et/ou transférées vers le train.

Concernant la variable de **vitesse des déplacements**, le chapitre 3 a montré que les marges d'augmentation à l'avenir étaient relativement faibles, et concernaient surtout le transport aérien et la hausse du trafic sur autoroutes. Ainsi, parmi les 26 évolutions listées notamment en Tableau 17 sur les interactions, certains leviers majeurs des politiques publiques sur la demande concernent des mesures qui ont une interaction forte avec la demande, mais pas forcément directement des mesures visant à agir sur la demande. Il en est ainsi des mesures visant la modération du trafic aérien (fiscalité, arrêt de certaines liaisons ou des nouveaux projets d'infrastructures, etc. ; voir partie 2.2.2), de la limitation de vitesse sur les routes les plus rapides (110 km/h sur autoroutes, éventuellement 100 km/h sur les nationales), ou encore les mesures visant à agir sur le report modal tel que le développement des modes actifs.
Pour que ces réductions de vitesse ne se répercutent pas sur les temps de transport, il est important de réduire simultanément les **distances par déplacement**. Cela concerne pour beaucoup l'aménagement du territoire pour la courte distance (voir ci-dessous, 2.1.2), et davantage les modes de vie et les comportements de mobilité pour la longue distance. Par ailleurs, sur la longue distance, le nombre de trajets peut davantage être réduit, éventuellement avec des durées de séjour plus longues pour compenser le moindre nombre de voyages.
Enfin, les travaux de Zahavi évoqués en chapitre 3 montraient également une constante en termes de proportion du budget accordée à la mobilité. A budget constant, le **coût des transports** est donc une autre incitation à réduire les distances de déplacements, en adaptant la fiscalité pour défavoriser les modes les plus émetteurs. La condition de réalisation est ici que la contrainte pour les ménages aux revenus les plus modestes ne pose pas de forts problèmes d'inégalités sociales et d'acceptabilité (voir pour la voiture en 2.2.1).

2.1.2. Quel aménagement du territoire pour une mobilité bas-carbone ?

Un aménagement du territoire visant la réduction des distances nécessite de nombreuses évolutions influencées par de nombreux facteurs en interaction entre eux. Voici quelques questions et pistes qui semblent importantes à explorer pour les politiques publiques.

Il s'agit d'abord d'**identifier et corriger les tendances** dans l'aménagement qui ont participé ou participent encore à l'augmentation de la demande (voir aussi 3.2.1 en chapitre 1) : l'étalement urbain, le manque de mixité fonctionnelle des nouveaux quartiers résidentiels et le zonage des activités, l'implantation des commerces en périphérie et le déclin des centres des villes petites et moyennes, la dépendance auto-entretenue à l'automobile en lien avec ces évolutions, la métropolisation concentrant notamment les emplois dans les plus grandes villes les plus dynamiques, les liens entre ces grandes villes facilités par des transports rapides, en particulier depuis Paris et la région parisienne (avion, TGV, autoroutes).

Concernant l'aménagement des villes, le GIEC pointe 4 éléments d'un aménagement permettant de réduire les émissions : une forte **densité** de population et d'emplois à proximité, la compacité et la mixité dans les **usages de l'espace**, un fort degré de **connectivité**, puis un fort degré d'**accessibilité** (Creutzig et al, 2016).
Depuis les travaux de Newman et Kenworthy (1989) notamment, la **densité** d'une ville est identifiée comme une caractéristique permettant de limiter les consommations d'énergie de la mobilité quotidienne. La densité permet en effet d'améliorer l'accessibilité et de favoriser la

proximité, et présente également les avantages de limiter la consommation d'espace et l'artificialisation des sols, bénéficiant à la biodiversité et la capture de CO_2 dans la végétation et les sols. Cependant, la densification est également critiquée, pour des raisons variées : si les déplacements quotidiens sont réduits, un effet rebond possible concerne les déplacements longue distance plus fréquents, un phénomène connu sous le nom d'effet barbecue (voir Munafò, 2015) ; la multiplication des canicules ainsi que l'épidémie de coronavirus ont tendance à remettre en cause également le modèle de ville dense ; les aspirations de la population à aller vivre ailleurs sont bien plus fortes dans les zones habitées les plus denses (L'ObSoCo-Chronos, 2017) ; en effet, la densité est également associée à des nuisances, telles que la congestion, la pollution, le bruit, ou encore le manque de végétation. L'acceptabilité de la densité et la qualité de vie des zones denses nécessitent donc un meilleur partage de l'espace public, réduisant la place laissée à la voiture, au profit des modes actifs et des transports en commun (plus économes en espace) ainsi qu'une plus forte végétalisation de l'espace public (espaces verts, parcs, jardins partagés, etc.).

Il est aussi important d'orienter cette densité dans certaines zones, notamment autour des gares, à proximité de services existants, ou en redensifiant le centre de **villes petites ou moyennes**. Ces dernières gagneraient à être redynamisées, à l'inverse de la tendance de ces dernières années. Leur taille limitée donne lieu à des distances et des temps de déplacements plus courts (villes de 10 000 à 50 000 habitants ; Forum Vies Mobiles, 2020), tout en ayant une population suffisante pour avoir un bassin d'emploi important.

Dans cette optique, la question du **commerce des centres-villes** est une question majeure pour leur dynamisme, pour favoriser leur attractivité et l'emploi, alors que le taux de vacance commerciale moyen des centres-villes est passé de 7,2% à 11,9% entre 2012 et 2018 (Chassignet, 2019). Les causes de cette perte de dynamisme des centres-villes sont multiples, ainsi l'inversion de la tendance nécessitera d'agir sur différents leviers : freiner les nouveaux projets d'implantation de centres commerciaux en périphérie, soutenir les commerces du centre-ville, ou encore sortir de la prédominance et de la dépendance à la voiture (voir 2.2.1). En effet, le type de commerce et sa localisation influencent les comportements de mobilité : dans les villes moyennes, 88 % de l'accès aux grandes surfaces en périphérie se fait en voiture, contre 50 % pour les commerces de centre-ville (Chanut, 2019 ; voir aussi Razemon, 2017). Le mode utilisé influence également les commerces fréquentés : réduire la place de la voiture et développer des zones piétonnes est ainsi favorable aux commerces de centre-ville.

Par ailleurs, à **urbanisme constant**, il serait aussi possible d'agir pour une meilleure utilisation du parc existant, le taux de logements vacants étant en hausse ces dernières années jusqu'à atteindre 8,5 % en 2019, tandis qu'un autre 10 % des logements correspond à des résidences secondaires (Insee, 2019). Une évolution vers plus de sobriété dans les surfaces de logements par ménage ou vers certaines formes d'habitat plus collectif ou partagé permettrait aussi de diminuer la pression sur les nouvelles constructions, réduire les impacts sur l'artificialisation, tout en concentrant les efforts du bâtiment sur la rénovation thermique. Aussi, en profitant de la mobilité résidentielle et professionnelle, des actions pourraient être entreprises dans le sens d'un rapprochement des ménages de leur emploi, par exemple par des aides fiscales au déménagement s'il va dans ce sens, par des incitations aux employeurs à embaucher localement, ou par des mutations entre différents sites d'une même entreprise, à partir de diagnostics des plans de déplacement des entreprises.

Toutes ces évolutions sont fortement influencées par les prix des terrains, des logements, et dépendent donc de la **fiscalité** en vigueur, qui ne fournit pas les bonnes incitations. Par exemple, le faible prix des terres agricoles en périphérie et leur forte valorisation en devenant constructibles fournissent une incitation à l'étalement urbain. **La mobilité devient alors une variable d'ajustement** à un aménagement et des modes de vie fortement influencés par les prix du logement, le coût de la mobilité étant secondaire dans les choix de localisation.

Enfin, pour les déplacements à plus **longue distance**, les collectivités notamment pourront encourager le développement d'un tourisme plus local (promenades, découverte du terroir, des musées ou sites touristiques à proximité, etc.) favorisant l'utilisation des modes bas-carbone : transports en train jusqu'aux lieux de vacances (problématiques de prise en charge des bagages, d'intermodalité, d'autopartage en gare, etc.), accès en transports en commun et en modes actifs aux sites touristiques, ou par le soutien au développement cyclotourisme.

2.1.3. Modérer la demande de fret

Pour le transport de marchandises, la demande a également été le facteur majeur d'évolution des émissions par le passé. A l'avenir, **les scénarios sont très contrastés** sur son évolution, y compris au sein des scénarios tendanciels, dont certains prévoient une très forte hausse de la demande portée par la croissance du PIB, tandis que d'autres voient une tendance à la baisse.
Ces fortes incertitudes en font un facteur de risque important sur la hausse des émissions, d'autant que **la décarbonation du secteur semble bien moins engagée** que pour les voyageurs (avec l'électrique pour les voitures), et sera **plus difficile à conduire**. En effet, l'électrique n'est pas adaptée pour les véhicules les plus lourds sur longue distance (sauf en cas d'autoroutes électriques), en raison du poids des batteries. De plus, le biogaz, souvent mis en avant pour décarboner les poids-lourds (y compris dans la SNBC), a un potentiel de production limité, qui pourrait s'avérer largement insuffisant si la demande en poids-lourds reste forte (cf partie 2.5.3). La réduction de la demande apparaît donc ici comme un levier majeur pour espérer pouvoir atteindre l'objectif de la SNBC de sortir complètement du pétrole pour les transports de marchandises d'ici 2050. Il en est ainsi tout particulièrement pour les poids-lourds, mais également pour le transport maritime international, dont la décarbonation est très peu engagée jusqu'alors et reposera probablement sur des ressources limitées également (biogaz, biocarburant, ammoniac ou hydrogène produits par électrolyse, nécessitant de grandes quantités d'électricité). Enfin, l'augmentation de la part modale du ferroviaire et du fluvial ne sera possible que par une modération de la demande globale, sans quoi les hausses de trafics de ces modes devraient être bien trop importantes pour atteindre des reports modaux significatifs pour faire baisser les émissions.

Parmi les leviers politiques pour réduire la demande, figurent le soutien aux relocalisations de certaines filières, un aménagement en faveur des modes bas-carbone, ou encore la fiscalité.
Les **relocalisations** peuvent se faire à différentes échelles, depuis le niveau mondial pour limiter le trafic maritime, jusqu'à un niveau bien plus local pour limiter le transport par poids-lourds. Des objectifs de relocalisation font déjà partie de certaines politiques publiques, renforcées par la crise du coronavirus montrant la vulnérabilité à des chaînes d'approvisionnement peu diversifiées et à flux tendu. C'est le cas pour l'agriculture et

l'alimentation, pour la filière automobile ou encore pharmaceutique. Pour d'autres secteurs tels que l'électronique, le textile ou certaines matières premières, les relocalisations seront bien plus difficiles voire impossibles, bien que des initiatives de production Made in France ou d'économie circulaire (réparation, réemploi, Fab lab, etc.) pourraient permettre de relocaliser en partie certains secteurs, minimiser les quantités de biens transportés ou les distances parcourues. Ainsi les politiques publiques économiques et notamment celles s'inscrivant dans le plan de relance post-crise du coronavirus pourraient soutenir en priorité et/ou conditionner les aides aux filières ou entreprises s'inscrivant dans ces démarches de relocalisation d'une partie de leurs activités. A un niveau plus local, les collectivités peuvent également soutenir les initiatives dans ce sens, auprès des entreprises, pour les circuits-courts alimentaires (pour les cantines, en soutenant les paniers locaux, supermarchés coopératifs, jardins partagés, etc.), ou encore en soutenant les monnaies locales qui essayent de mettre en lien plusieurs entreprises locales pour leurs approvisionnements.

En lien avec une possible réduction des distances, les politiques publiques doivent veiller à ce que cette évolution se fasse de manière favorable en termes de report modal. Avec la hausse des volumes transportés, les longues distances facilitent aussi la **massification du transport**, avantageant ainsi le fret ferroviaire par rapport aux poids-lourds (PL), les poids-lourds aux véhicules utilitaires légers (VUL ; moins efficaces par tonne transportée), ou un meilleur remplissage de ces véhicules (CGDD, 2013). Pour les derniers kilomètres ou de faibles distances, de faibles volumes peuvent au contraire favoriser un report modal plus vertueux, en permettant plus facilement d'utiliser les vélos-cargos (qui peuvent transporter jusqu'à 200 kg de charge ; voir Koning et Conway, 2016) plutôt que les VUL. Les politiques publiques peuvent donc agir sur l'aménagement du territoire, les infrastructures de transport, les centres logistiques, la régulation des espaces de livraison disponibles, la fiscalité, ou encore le soutien aux modes bas-carbone, pour que le partage modal soit de plus en plus orienté vers le ferroviaire et le fluvial pour la moyenne et longue distance, et vers les vélos-cargos et les véhicules électriques pour la courte distance.

Une tendance à surveiller concerne la fragmentation des achats et de la **livraison** telle que pratiquée par des plateformes de e-commerce telles qu'Amazon, susceptibles de démultiplier le nombre de véhicules en circulation, en raison de la promesse d'une livraison gratuite et rapide, qui réduit la possibilité d'optimiser les tournées de livraisons. Ce sujet est également à l'interface entre mobilité des voyageurs et des marchandises, les livraisons pouvant réduire certains trajets pour motif achat des voyageurs. Une étude sur 4 modes d'approvisionnement radicalement différents montrait ainsi que les scénarios uniquement en livraisons à domicile ou en hypermarché étaient bien moins efficaces que l'approvisionnement dans le petit commerce ou en livraison dans des points-relais, qu'il faudrait davantage développer pour réduire la demande de transport et les émissions (Gonzalez-Feliu et al, 2009).

Enfin, la **fiscalité** et la **tarification** du transport de marchandises sera un levier majeur, notamment pour encourager le report modal, mais plus globalement pour faciliter la réduction des distances pour le transport de marchandises. En effet, le transport représente souvent une faible part du prix final des produits, incitant très peu à la relocalisation. Des mesures possibles concernent la fin progressive de l'exonération partielle de taxe sur le gazole pour les poids-lourds, la taxe carbone, une contribution kilométrique ou une vignette pour les poids-lourds, ou encore la fin d'exemption de taxe sur l'énergie pour le transport maritime.

2.2.Le report modal, un potentiel en forte interaction avec la demande

Points et messages clés :

- ✓ Les scénarios ambitieux indiquent un **potentiel de -20 %** sur les émissions par ce levier, par un report d'environ 20 % de modes carbonés vers des modes bas-carbone.
- ✓ De tels reports modaux ne seront possibles qu'avec une **forte modération de la demande**, contraignant en particulier le trafic aérien, les poids-lourds et la voiture ; la saturation (temps, coûts) de cette dernière est par ailleurs étudiée plus en détails.
- ✓ Les **principaux potentiels de report** se trouvent vers le vélo pour la courte distance, le train pour la longue distance, et le fret ferroviaire pour les marchandises.
- ✓ Les **leviers d'action** concernent l'aménagement du territoire et le partage de l'espace public, les infrastructures et services développés, les changements de comportements, une évolution différenciée des vitesses des modes, et le levier majeur de la fiscalité.

Le chapitre 1 a montré qu'historiquement **la contribution du report modal a été négative** sur la période 1960-2017, avec une forte contribution à la hausse des émissions pour le transport de marchandises (+91 %, par le report vers le routier ; Figure 14) et une contribution moins importante pour les voyageurs (+22 % ; Figure 12). Aussi, pour le transport intérieur de voyageurs, la contribution est positive depuis le milieu des années 90, avec un report d'environ 3 % des kilomètres parcourus depuis la voiture vers le ferroviaire (soit environ -3 % d'émissions voyageurs ou -2,7 $MtCO_2$). Cette contribution positive disparaît cependant lorsque le transport aérien international est également inclus (Figure 32).

Le chapitre 2 a montré qu'un **potentiel de l'ordre de -20 % d'émissions** était identifié d'ici 2050 pour les scénarios les plus ambitieux sur ce levier (Tableau 11). Cela est rendu possible par un report de l'ordre de 20 % de parts modales (en km ou t.km) depuis les modes carbonés (essentiellement voiture et poids-lourd ; l'avion international n'est pas dans la comparaison) vers les modes bas-carbone (essentiellement train et vélo pour les voyageurs, et fret ferroviaire pour les marchandises). L'interaction avec la demande totale est très forte, car pour une croissance de trafic donnée d'un mode bas-carbone, le report modal est d'autant plus fort que la croissance de la demande totale est faible (cf Tableau 12 pour les trains de voyageurs).

Le chapitre 3 sur la vitesse a également montré une autre facette de cette interaction avec la demande, et **invite à regarder le report modal par heure de trajet** et non par kilomètre parcouru. En effet, les temps de trajet étant relativement constants autour de 15-20 minutes pour les trajets du quotidien et de 3 à 4 heures pour les trajets à longue distance, le report modal vers un mode plus rapide aura tendance à augmenter la distance du déplacement. Ainsi, le report modal peut se faire à nombre de trajet et à temps de transport à peu près constants, mais non à kilométrage constant. Par exemple, un report de la voiture vers le transport aérien pour les trajets à longue distance s'accompagne ainsi de distances parcourues et d'émissions bien plus fortes, car les émissions de l'aérien sont 13 fois plus importantes que pour la voiture par heure de trajet, alors que les émissions de CO_2 (en dehors de autres effets réchauffants) des deux modes sont relativement similaires par kilomètre parcouru (voir chapitre 3, Figure 87 ; et article p316). Au contraire, pour un report modal vers un mode plus lent tel que le vélo, la vitesse plus faible invitera l'usager à parcourir des distances de déplacements plus courtes et à une vie davantage en proximité, indiquant ici une interaction positive avec la demande.

Les principaux éléments généraux sur la demande ont été évoqués en 2.1. Cette partie vise à approfondir des éléments propres à la voiture, l'avion, le ferroviaire, et le vélo.

2.2.1. La voiture, un développement arrivé à saturation ?

La voiture domine très fortement les émissions du transport de voyageurs, surtout pour les transports quotidiens, ou en ne regardant que le transport intérieur (hors aérien international), ainsi il est légitime de se demander s'il y a encore un risque que son développement continue, ou s'il est déjà arrivé à saturation ? Ensuite, quelles en sont les raison ? Et enfin, comment agir pour réduire la place de la voiture dans les mobilités, au profit de modes bas-carbone et plus sobres en énergie ?

Dans les chapitres 1 et 3, de premiers éléments ont montré une **saturation de l'usage de la voiture** (plus généralement des transports routiers individuels, avec 60% des véhicules utilitaires légers et les deux-roues motorisés pris en compte ; VUL et 2RM ensuite) parfois depuis plusieurs décennies. Ainsi, la part modale des transports routiers individuels est relativement constante autour de 80 % des kilomètres parcourus (± 2 %) en France depuis le 1er choc pétrolier de 1973 (Figure 18). La part modale a même eu tendance à diminuer de 2 à 3 % depuis le milieu des années 90 au profit du ferroviaire, et à baisser de 77 % à 69 % des kilomètres parcourus si le transport aérien international est inclus. Les kilomètres parcourus en voiture par personne ont cependant continué à augmenter suite au 1er choc pétrolier, de manière relativement proportionnelle à la demande totale, expliquant la part modale relativement constante. Mais à nouveau, une tendance à la saturation apparaît cette fois depuis le début des années 90 en termes de kilomètres par personne, autour de 30 km/jour (± 1,5 km, pour la voiture particulière, VP ; autour de 34 km avec 60 % des VUL et les 2RM). Mesuré en temps de transport, la part de la voiture parmi les modes est constante depuis le début des années 90, avec un temps légèrement croissant de l'ordre de +5 % ou +2 minutes, de manière proportionnelle à l'ensemble des temps de transport. Enfin, si l'usage croissant de la voiture a été porté par la hausse du taux de (multi-)motorisation, le nombre de voitures pour 1000 habitants semble avoir plafonné à 500 depuis le milieu des années 2000.
Pourtant, malgré cette apparente saturation de l'usage de l'automobile depuis de nombreuses années, **les trafics automobiles sont toujours en augmentation**, et s'explique par la contribution à la hausse de deux facteurs. Tout d'abord, par la croissance de la population, de l'ordre de 0,5 %/an sur la dernière décennie, portant la croissance au niveau agrégé, quand les chiffres ci-dessus correspondaient à des usages individuels. Et ensuite, par la baisse du taux de remplissage, qui joue à la hausse sur les trafics (mesurés en véhicules.km) de l'ordre de +0,5 %/an également sur la dernière décennie. Si l'usage individuel reste stable, les trafics pourraient donc continuer à croître en tendanciel au rythme de la croissance de population, soit 0,4 % environ pour les prochaines années, jusqu'à 1 % maximum si le remplissage continuait à décroître, ce qui devrait ralentir au vu des tendances plus récentes à la saturation de la (multi-)motorisation des ménages. Cette tendance restera soumise aux fluctuations annuelles liées à la conjoncture économique, et en particulier du prix du pétrole et du PIB.

Il convient ensuite de **comprendre le phénomène de saturation** de l'usage individuel de la voiture qui a été constaté, afin de mieux anticiper son évolution possible. Les éléments de saturation de la demande intérieure ou de *peak car* ont été rappelés au chapitre 3 (voir 4.3.1), pointant notamment le rôle de saturation de la vitesse physique pour l'ensemble des modes, en parallèle de l'importance des variables économiques et de phénomènes plus spécifiques à

l'automobile tels que la saturation du taux de motorisation. Ainsi l'usage de la voiture serait arrivé à un point de développement maximal au sein de la population, ayant rempli quasiment tous les domaines de pertinence les plus évidents à son usage.

Si la limite en termes de temps de déplacement par personne est tout à fait pertinente pour expliquer la saturation de l'usage de l'automobile, la question de la **vitesse physique** est insuffisante pour expliquer l'ensemble des évolutions de l'usage des dernières décennies. Comme cela a été signalé, c'est la diffusion de l'automobile qui a permis la forte hausse de la vitesse physique moyenne pour l'ensemble des modes, et cette diffusion s'explique par un accès facilité à la voiture par le plus grand nombre, via une baisse du coût de la voiture.

Cette baisse du coût relatif peut être renseignée par la **vitesse économique**, c'est-à-dire le pouvoir d'achat d'une heure de travail en termes de nombre de kilomètres parcourus (ou son inverse, le nombre de minutes de travail pour payer 100 km en voiture). La Figure 92 montre l'évolution de la vitesse économique d'un salarié au Smic de 1970 à 2017, en indiquant ici le pouvoir d'achat en nombre de kilomètres d'une heure de travail, et en prenant uniquement le coût du carburant, qui représente 80 % du coût marginal. L'évolution dépend ainsi de : la croissance réelle du revenu (Smic ici, ou tendances similaires mais plus élevées pour le salaire net moyen ; Insee, 2013), qui est régulière et particulièrement forte avant le 2nd choc pétrolier de 1979 ; la consommation moyenne de carburant pour 100 km, en baisse régulière sur la période ; enfin, le prix moyen des carburants utilisés, influencé à la baisse par le passage au diesel, et influencé par l'évolution des prix du baril dont la volatilité est la principale cause des fortes fluctuations de la vitesse économique.

Il apparaît au total une **multiplication par 3** de la vitesse économique sur la période 1970-2017, alors que la vitesse physique évoluait bien plus faiblement. Aussi la hausse de cette vitesse serait encore plus forte depuis 1960, expliquant ici la forte diffusion de la voiture (qu'il faudrait idéalement renseigner avec la baisse du coût complet, dont l'achat représente une part importante) et des tendances que l'étude de la vitesse physique seule ne permettait pas d'expliquer. Ainsi le ralentissement des kilomètres parcourus au début des années 80 s'explique par une faible hausse de la vitesse économique, tandis que la plus forte hausse des kilomètres et des temps de déplacements en voiture entre 1985 et 1992 s'explique par une forte hausse de la vitesse économique à la suite du contre-choc pétrolier de 1985. Cela explique la tendance encore non expliquée à ce stade d'une apparente hausse des temps de déplacement sur 1985-1992, que laissait apparaître l'estimation des temps de déplacement sur la période 1960-2017 (+7 minutes en 7 ans, peut-être compensés en partie par une baisse de la marche, que les données ne permettent pas de suivre précisément ; voir Figure 83).

A partir de 1992, la plus faible hausse de cette vitesse économique expliquerait aussi le ralentissement de la croissance de l'usage de la voiture : en effet, la hausse de la vitesse économique a été de +150 % sur 1970-1992 malgré deux chocs pétroliers sur la période, puis seulement de +33 % sur 1992-2017. Enfin, sur le début des années 2000, la baisse de la vitesse économique de 2003 à 2008 explique le fait que les kilomètres parcourus en voiture aient diminué plus fortement encore que la vitesse physique (en lien avec la mise en place des radars), avec une légère baisse des temps de déplacement en voiture sur la période (voir figure de droite ci-dessous, et l'évolution entre les courbes de distance et vitesse de la voiture sur 1992-2017, en Figure 84).

Les notions de vitesses physique et économique peuvent être rassemblées dans la **vitesse généralisée**, qui compte la distance parcourue, divisée par la somme du temps de transport et du temps de travail nécessaire au paiement du trajet. Elle permet de prendre en compte avec une mesure unique de nombreuses variables influençant les choix de mobilité[5]. L'évolution de la vitesse généralisée a surtout été influencée par la vitesse économique, en raison de ses variations importantes, bien que la baisse de la vitesse physique au tournant du millénaire ait participé à la relative stagnation de cette vitesse généralisée.

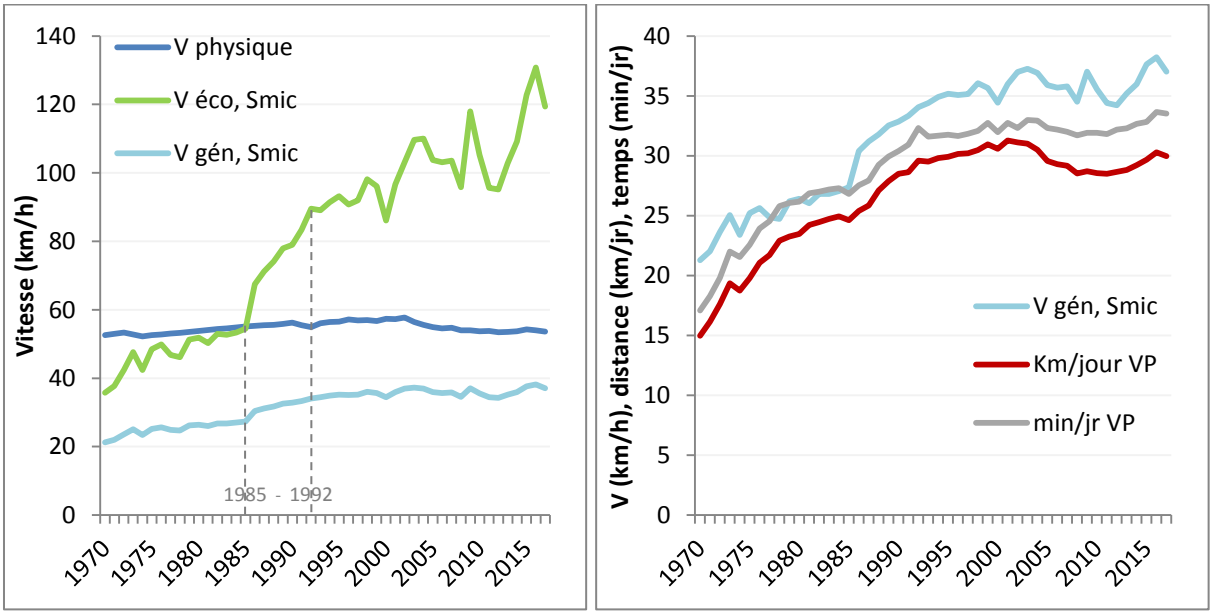


Figure 92 : Vitesse physique, économique et généralisée de la voiture pour une personne au Smic de 1970 à 2017 (à gauche), et vitesse généralisée comparée à la distance et aux temps de transport par personne (à droite)
La vitesse physique, la distance et les temps journaliers reprennent les données du chapitre 3 pour les voitures particulières (VP) seules ; la vitesse économique réprend les données compilées par Beauvais (2020), à partir du salaire horaire brut du Smic, des consommations (L/100 km) et des prix moyens des carburants utilisés. Données non disponibles avant 1970.

La question suivante est de savoir si le **facteur limitant** ou entraînant la saturation de l'usage de la voiture correspond davantage au temps de déplacement consacré à la voiture et à la vitesse physique, ou aux limites de budget et de vitesse économique ? L'hypothèse ici est que les 2 variables influencent fortement l'usage, mais que leur rôle respectif est différent : si la hausse de la vitesse économique a été le principal facteur permettant la hausse de l'usage de la voiture (en minutes ou kilomètres par jour), le principal facteur limitant aujourd'hui semble davantage être celui des temps de transport alloués à la voiture, et aux mobilités en général. Il semblerait pour le moins que ce soit le cas pour la majorité de la population, bien que le facteur économique puisse toujours être la principale limite pour la population aux revenus les plus modestes, et qu'une forte hausse du coût de la voiture pourrait toucher une partie néanmoins importante de la population. Pour soutenir cette hypothèse, il est possible de remarquer que la vitesse économique est plus de deux fois supérieure à la vitesse physique en 2017, même pour une personne au Smic (et de l'ordre de 4 fois plus avec le revenu moyen), alors qu'en 1970 le temps de transport était inférieur au temps passé pour payer le carburant du trajet, pour une personne au revenu minimum. De même, depuis le début des années 90, la

[5] La vitesse généralisée (V_g) est calculée comme la moyenne harmonique des vitesses physique (V_p) et économique (V_e), ainsi : $V_g = 1 / (1/V_p + 1/V_e)$, avec la vitesse économique qui est égale au salaire horaire (w) divisé par le coût kilométrique (k). Voir notamment Crozet, 2017.

réaction des kilomètres parcourus à une variation de la vitesse physique semble plus importante et davantage proportionnelle à la variation constatée, que pour une variation de la vitesse économique. Ainsi en 2009, la forte baisse des prix du pétrole (sorte de contre-choc pétrolier après 2008) ne s'est pas manifestée par une hausse des kilomètres parcourus. De même, il est estimé que la majorité de la baisse du nombre de kilomètres en voiture au début des années 2000 est liée à la baisse de la vitesse physique (de l'ordre de 2/3 aux 3/4 selon les années prises en compte) et le reste à la baisse des temps de déplacement en voiture. Néanmoins, la baisse de la vitesse peut également être mise en lien avec la hausse du prix des carburants, les deux n'étant pas totalement indépendants (voir chapitre 3).
L'enquête de 2008 montre aussi que les kilomètres parcourus et le nombre de trajets en voiture pour la mobilité quotidienne ne croît plus beaucoup au-dessus de 1000 €/mois de revenu par unité de consommation. En revanche, en-dessous de cette limite qui correspond à environ 10 à 15 % des ménages (Insee, 2018a), les trajets en voiture sont nettement moins nombreux, indiquant qu'une augmentation de la vitesse économique pour ces ménages augmenterait très probablement significativement leur mobilité en voiture. Cependant, pour une grande majorité de la population, c'est très sûrement davantage les temps de déplacement qui limitent leur mobilité en voiture, en particulier pour les déplacements du quotidien. La contrainte économique est cependant potentiellement plus forte pour les déplacements à longue distance. Enfin, la saturation peut être également en partie liée à l'attrait pour les autres modes, qui occupent une part significative de la mobilité des Français et des temps de parcours (38 % hors routier individuel d'après le Tableau 14, dont 22 % pour la marche).

En résumé, la **vitesse économique** a historiquement surtout joué sur la croissance de l'usage de la voiture jusqu'au début des années 90, tels que mesuré ici par la hausse des temps de déplacements en voiture, et elle a plus rarement participé à la baisse de l'usage lors des chocs pétroliers. Au contraire, la **vitesse physique** a joué plus faiblement sur la hausse de l'usage et des kilomètres parcourus (bien que le report vers les autoroutes ait permis de jouer à la hausse sur les kilomètres, à temps constant), mais constitue depuis le début des années 90 un facteur majeur limitant la croissance de l'usage de la voiture pour une grande partie de la population.

Cet éclairage historique peut également renseigner les évolutions récentes ou futures, et il est proposé ici d'en évoquer deux : la taxe carbone et le véhicule électrique.
Pour la **taxe carbone**, la baisse de la vitesse économique qu'elle impliquait impactait essentiellement la mobilité de la partie de la population aux revenus les plus faibles. Elle impactait également les ménages aux revenus moyens, qui peut être en difficulté en cas de hausse du coût des carburants, en particulier pour les trajets les plus contraints et dans les zones peu denses où la longueur des trajets et la dépendance à la voiture et au pétrole sont plus importantes. Aussi la taxe s'ajoutait à une remontée des prix du baril qui faisait déjà diminuer la vitesse économique, et pouvait mettre en difficulté certains ménages qui ne disposent pas d'alternatives. Au contraire, les ménages les plus favorisés n'étaient que peu impactés dans leur mobilité, tant leur vitesse économique restait importante. Si la contribution moyenne des ménages aux plus forts revenus à la taxe carbone est plus forte en montant absolu, elle est plus faible en part du niveau de vie (Ofce, 2020). L'effort, la baisse des consommations et de la mobilité reposaient donc essentiellement sur les populations aux

revenus modestes et/ou fortement dépendantes aux longs trajets en voiture, d'où l'injustice perçue qui a été un déclencheur majeur de la crise des gilets jaunes.
Pour le **véhicule électrique**, la question du facteur limitant entre les variables économiques et les temps de déplacement prend toute son importance, étant donné que le coût marginal d'usage de l'énergie est divisé par environ 4 à 5 en passant du pétrole à l'électrique (voir article p313). Se pose alors la question du potentiel effet rebond sur la demande de mobilité en voiture. Si le principal facteur limitant est celui des temps de parcours tel que supposé ici, l'effet rebond pourrait être limité. Au contraire, il pourrait être plus important pour les ménages aux revenus plus faibles, qui pour l'instant n'en sont pas les premiers utilisateurs en raison du coût d'achat plus élevé. Aussi, l'effet rebond d'un coût économique très fortement diminué pourrait être plus fort pour la longue distance, mais l'autonomie limitée des véhicules 100 % électriques réduira cependant cet effet rebond. Pour les plus longs trajets, si le coût monétaire pourrait être largement diminué (selon le modèle économique des bornes de recharge rapide), les temps de parcours pourraient être largement rallongés si l'autonomie ne permet pas de faire l'ensemble du trajet sans recharge.

Enfin, pour évaluer le potentiel de report modal depuis la voiture, il faut avoir en tête que le phénomène de saturation de son usage n'a pas eu lieu ou n'aura pas lieu au même moment selon les **catégories de population** : comme évoqué ci-dessus, elle n'est pas forcément atteinte pour les revenus les plus bas ; mais également pour les retraités et autres inactifs pour lesquels les taux de motorisation sont plus faibles, ou selon les types de territoires.
Cette dernière question des **territoires** est très certainement la plus importante pour l'évolution à venir de la place de la voiture. La place de la voiture est plus faible et a déjà pu largement baisser dans les plus grandes villes, en particulier dans les centres villes et là où la densité est la plus forte. Ainsi, pour le cas le plus extrême avec la ville de Paris, le trafic a déjà été divisé par deux depuis le début des années 90 (Paris, 2019 ; -48 % depuis le début de la série en 1992) et la vitesse de la voiture sur le réseau instrument a diminué d'un tiers, de 20,9 à 13,9 km/h. Au contraire, l'ENTD de 2008 indiquait un usage toujours croissant de la voiture dans les zones les moins denses et les villes les moins peuplées, tandis que le taux de motorisation y est toujours en hausse depuis (CGDD, 2010). La dépendance à l'automobile dans les communes rurales ou isolées est ainsi très forte : le taux de motorisation y est de 94 %, la voiture est le mode principal de 89 % des habitants (contre 9 % à Paris et 47 % dans les villes centres des grandes métropoles), et seulement 15 % estiment avoir le choix entre différents modes de déplacements (contre 85 % à Paris et 75 % dans le centre des métropoles ; URF, 2019 ; FNH et Wimoov, 2019).

La **dépendance à la voiture** et les **politiques publiques** pour en réduire l'usage devront donc s'adapter à ces contextes différents, et la temporalité de réduction de la voiture devrait probablement continuer à s'étendre depuis les centres des plus grandes villes vers les villes plus petites et les zones moins denses. Pour le centre des grandes villes, des politiques visant à limiter l'usage de la voiture sont appliquées depuis de nombreuses années pour certaines, motivées par la réduction de certaines nuisances particulièrement fortes en ville : congestion et place importante occupée dans l'espace public, pollution atmosphérique, bruit, ou encore insécurité routière. Cela a pu les motiver à utiliser différents **leviers** que sont la limitation et la

tarification du stationnement, la modération de la circulation et de la vitesse (zones 30 notamment, de plus en plus étendues en ville), un meilleur partage de la voirie entre les modes, et le développement de l'offre pour les modes alternatifs. Ces leviers ont pour le moment été moins utilisé ailleurs, y compris dans les villes moyennes où ils auraient pourtant leur pertinence, et où la réduction de la place de la voiture devrait faire partie d'une stratégie plus globale de redynamisation des centres villes (cf partie 2.1.2 ; voir aussi ADETEC, 2019 pour l'étude des parts modales des villes moyennes). Il est probable que certaines de ces politiques puissent s'étendre jusqu'à atteindre les zones rurales, à condition d'y développer également les alternatives qui permettent de réduire la dépendance à la voiture et au pétrole dans ces territoires (voir l'article p313, les parties 2.2.4 sur le vélo et 2.3.1 sur le covoiturage).
Le développement des alternatives est par ailleurs une condition majeure de l'**acceptabilité** de la transition vers une réduction de la place de la voiture, question épineuse comme cela a été illustré en 2018 par le passage aux 80 km/h et la taxe carbone annulée. Ce dernier sujet étant bloqué à court terme, il est nécessaire d'agir sur d'autres sujets plus acceptables pour la population, tels que ceux proposés par la Convention Citoyenne pour le Climat (CCC, 2020).
Sur le sujet de la **fiscalité**, les carburants étant déjà fortement taxés pour les automobilistes, il faudrait d'abord pouvoir rééquilibrer la fiscalité entre les différents modes pour éviter l'injustice d'une forte taxation des trajets du quotidien en voiture, alors que les trajets de loisirs en avion qui profitent davantage aux plus aisés, le transport maritime ou les poids-lourds bénéficient d'exemptions (exonération partielle pour les PL). Des incitations à la voiture, tels que le système des indemnités kilométriques, devraient également être revus. Aussi, si l'usage de la voiture est fortement taxé, c'est moins le cas de l'achat, dont les montants de malus sont très faibles pour la grande majorité des ventes, et qui pourrait être revu pour être davantage incitatif, et éventuellement introduire d'autres composantes telles que le poids des véhicules (voir 2.4.1) et faire profiter le bonus également aux autres modes.
Sur la longue distance enfin, la baisse de **vitesse** sur les routes les plus rapides sera un levier à utiliser aussi vite que possible, tant il a des interactions positives fortes et sera une mesure facilitant le passage à l'électrique, pénalisé en termes d'autonomie par des vitesses élevées.

2.2.2. L'avion, des perspectives de croissance insoutenables ?

Le sujet du transport aérien est évoqué dans deux articles en annexe publiés dans The Conversation, et traitant de son impact climatique (p316) et des aspects d'inégalité et de fiscalité (p319). Les principaux éléments de contexte, pour certains déjà développés ci-dessus, sont les suivants.
L'avion est le **mode le plus émetteur** par heure de trajet. Ainsi le report modal d'une heure de trajet en voiture pour les vacances vers une heure d'avion émet 13 fois plus d'émissions de CO_2 (un impact 26 fois plus important en tenant compte des effets hors CO_2 ; voir 1.2.2) et 80 fois plus important qu'en train (160 fois avec effets hors CO_2). Par ailleurs, le transport aérien représente une **part significative** des émissions de la responsabilité de la France, si l'on tient compte du transport international (en tenant compte de la moitié ou de l'ensemble des trajets impliquant la France) et des effets hors CO_2 : ainsi au sens le plus large, son impact climatique est équivalent à 88 $MtCO_2eq$, soit l'équivalent des émissions du transport de voyageurs en France hors aérien, ou 16,5 % des émissions de l'inventaire national total des

émissions de gaz à effet de serre (BL évolution, 2020). Aussi les trafics sont **en forte croissance**, et sans phénomènes de saturation proches au moins sur les temps de déplacement. Cependant, les projections sont soumises aux hypothèses de croissance de sa vitesse économique (poursuite de la croissance économique, absence de nouvelles taxations, prix du pétroler, etc.), à la gestion de la saturation des aéroports (agrandissements, constructions ou autres adaptations), et à une reprise post-crise du coronavirus qui pourrait prendre plusieurs années. Enfin, les **perspectives technologiques sont insuffisantes** pour compenser ces croissances de trafics et s'aligner sur les trajectoires d'émissions compatibles avec l'Accord de Paris. Des gains d'efficacité énergétique pourraient se poursuivre, cependant les technologies de décarbonation (biocarburants, hydrogène, kérosène de synthèse ou électrique) sont loin d'un développement suffisant, à un horizon trop tardif, avec des défis difficiles à surmonter, et/ou des impacts environnementaux, un besoin de ressources ou d'énergie durables trop importants pour être à l'échelle des consommations prévues sans forte réduction de trafic. Enfin, ce mode profite essentiellement pour les loisirs des populations les plus aisées, et son impact croissant ainsi que les subventions ou exemptions de taxes dont il bénéficie posent des questions importantes de **justice climatique**.

Au vu des éléments ci-dessus, une **décroissance du trafic** devrait être envisagée par les **politiques publiques** pour limiter l'impact du secteur, dans des proportions cohérentes avec les objectifs climatiques internationaux. Hors le changement de paradigme n'a majoritairement pas eu lieu sur ce sujet, puisque : de nombreuses extensions d'aéroports sont encore prévues en France ; le carburant n'est pas taxé ; la taxe introduite sur les billets d'avion début 2019 semble trop faible (de 1,5 à 18 €) pour être réellement dissuasive ; enfin, de nombreux aéroports ou liaisons intérieures sont subventionnés de l'ordre de plusieurs dizaines d'euros voire plus de 200 € par vol (Pavaux, 2019), sans que ces subventions ne soient fortement remises en cause.

Pour aligner les politiques publiques avec cette baisse de la demande, les éléments ci-dessus devraient être questionnés et les politiques suivantes pourraient ainsi être envisagées. Premièrement, acter la fin d'un objectif de croissance du trafic demanderait de **stopper les projets d'extensions** d'aéroports tels qu'il peut y en avoir en France, en particulier avec le terminal 4 de Roissy, ou ailleurs à Nice, Lille, Nantes ou Caen.

Aussi, le **report vers le train** des liaisons intérieures les plus facilement transférables devrait être planifié, avec un gain estimé à 0,9 $MtCO_2$ (sur 2,1 $MtCO_2$ pour la Métropole seule et plus de 20 au total) pour les liaisons ferroviaires de moins de 4h30 (TSP, 2020), contre 0,14 $MtCO_2$ pour la limite de 2h30 actuellement fixée et en excluant les vols en lien avec le hub de Roissy (RAC, 2020). En lien avec le report vers le train, la baisse progressive des subventions aux liaisons intérieures et aux aéroports devrait être planifiée, tout comme la fin des petits aéroports dont le faible nombre de passagers entraîne des dépenses publiques très importantes pour compenser les déficits d'exploitation (par exemple, 194 € en moyenne par passager pour les 37 plus petits aéroports, pour 33 M€ au total ; Pavaux, 2019).

Cependant, si ce report vers le train est logique d'un point de vue climatique et semble la partie la plus simple pour limiter les transports aériens sans contraindre fortement les comportements de mobilité, le report sur ces liaisons ou avec des pays européens proches (par des liaisons TGV ou plus encore par un redéveloppement de lignes de trains de nuit) ne

permettrait de résoudre qu'une faible partie de l'impact climatique de l'aérien. C'est sur le **transport aérien de longue distance** que se situent donc les principales marges de sobriété en termes de réduction du trafic. De plus, sur ces trajets, la décarbonation de l'énergie ne dépendra pas que de la France, et il est fort probable que la dépendance au pétrole reste très forte dans les années et même décennies à venir pour la majorité des liaisons opérées.

En plus de la fiscalité, le **comportement des voyageurs** sera un levier important, et des premières tendances apparaissent telles que la honte de prendre l'avion (*flygskam*, en suédois). Les enquêtes sur le sujet sont souvent difficiles à interpréter car de nombreuses personnes ne prennent déjà pas l'avion pour des raisons économiques ou d'autres raisons indépendantes de l'impact climatique (peur de l'avion, pas d'envie, etc.) : dans un récent sondage, une majorité de Français répondaient ne plus prendre l'avion pour leurs loisirs (40 %) ou pouvoir le faire assez facilement (23 %) pour des raisons climatiques, tandis que 18 % pourraient le faire difficilement et 15 % ne pourraient pas le faire (ADEME, 2019a). Pour les plus accros, les adaptations pourraient progressivement se tourner vers des séjours moins loin, moins fréquents, et éventuellement plus longs sur place en compensation, questionnant plus globalement le rapport au voyage.

Par ailleurs, le rapport du Shift Project évalue des **potentiels de réduction des émissions** de 0,7 $MtCO_2$ par la décarbonation des opérations au sol, de 0,4 $MtCO_2$ en interdisant les vols d'affaires (les jets privés émettent de l'ordre de 4,4 tCO_2/h de trajet, soit 40 fois plus que pour l'aviation commerciale classique ; Gössling, 2019), et de 0,4 $MtCO_2$ par la suppression des avantages liés aux programmes de fidélité, qui représentent 5 % du trafic, dont 50% des voyages sont réalisés par opportunisme. Dans une logique de justice sociale, la **fiscalité** pourrait également être progressive sur le nombre de trajets ou particulièrement forte sur les voyages en jet. La question de la taxation du kérosène et de la taxe carbone sera également un sujet important pour encourager à la décarbonation du secteur dont les carburants alternatifs coûteront bien plus cher que le kérosène, à moins que des obligations d'incorporation soient privilégiées pour les biocarburants ou les carburants de synthèse.

Un défi majeur pour les politiques publiques si cette stratégie était adoptée, sera de prévoir des mesures pour les **emplois** menacés par une baisse de trafic, et d'anticiper les éventuelles reconversions professionnelles dans d'autres secteurs en croissance en lien avec la transition écologique, que ce soit dans le secteur des transports ou ailleurs.

2.2.3. Quels potentiels de report vers le ferroviaire ?

Le transport ferroviaire constitue un mode particulièrement important dans le report modal, essentiellement pour les déplacements à **moyenne et longue distance des voyageurs**, et pour le **transport de marchandises** le plus massifié. Les scénarios de prospectives prévoient souvent une croissance du trafic voyageurs entre 50 et 90 % d'ici 2050 (de +18 à +168 %), avec un impact variable sur la part modale selon l'évolution de la demande totale (Tableau 12 et Figure 48). Les scénarios marchandises sont encore plus contrastés, avec des reports non significatifs pour certains, jusqu'à un gain de 25 % de parts modales pour deux scénarios (Figure 49). Alors que le train représente environ 10 % de parts modales aujourd'hui pour les voyageurs et les marchandises, un gain d'1 % de part modale se traduit par une réduction des émissions d'environ 1 %, toutes choses égales par ailleurs pour les autres facteurs.

Dans le cadre de la thèse, un travail d'entretiens a été réalisé auprès d'acteurs du ferroviaire, pour questionner le réalisme de forts reports modaux (de l'ordre de 10-15 % de report) vers le ferroviaire d'ici 2050, aussi bien pour les voyageurs que les marchandises. Il en ressort trois principaux enseignements, présentés ici.

Le premier enseignement est qu'il existe bien des **marges de progrès pour augmenter les trafics ferroviaires** de voyageurs et marchandises. Ces marges pourraient être facilitées par les politiques publiques ou évolutions suivantes. Tout d'abord, par une **offre** étoffée, grâce à des gains de capacité (sur le réseau, par du matériel plus capacitaire, ou encore une hausse des taux de remplissage), au développement de l'offre actuelle, et par de nouvelles offres envisageables (sur le transport combiné, en développant l'intermodalité, les RER dans les grandes villes, ou par le renouveau des trains de nuit). Ensuite, par des **incitations** notamment financières au report modal vers le ferroviaire, en agissant sur la fiscalité énergétique, sur la tarification des infrastructures, ou par les soutiens aux investissements et à l'exploitation ferroviaires. Enfin, la hausse du trafic pourrait être facilitée par des **évolutions exogènes** aux transports, tels que la hausse du niveau d'activité économique et la hausse du prix du pétrole, par une sensibilité environnementale accrue des voyageurs, des politiques publiques volontaristes de transition énergétique encourageant à davantage favoriser le train, ou encore par un aménagement du territoire davantage autour des gares, pour en faire des lieux de dynamisme économique et d'intermodalité importants.

Le second enseignement est que de fortes croissances des trafics risquent d'être **contraintes par les limites de capacité et la saturation du réseau**. Cela s'explique notamment par les projets d'extension du réseau ferroviaire désormais relativement limités, ce qui aura pour implication que les hausses de trafics devront se réaliser à infrastructure quasiment constante, nécessitant ainsi d'améliorer son intensité d'utilisation. Selon les types de trafics considérés, ces marges sont faibles, et le réseau est parfois déjà saturé ou proche de la saturation : il en est ainsi par exemple pour de nombreuses lignes du réseau d'Île-de-France aux heures de pointe, mais aussi pour certains nœuds ferroviaires, des lignes TGV ou des gares, pour les périodes de l'année, de la semaine ou de la journée les plus chargées. Cela pointe le défi de l'organisation des circulations, dans un contexte d'ouverture à la concurrence pour les voyageurs, avec des trafics en hausse, et des exigences fortes d'amélioration de la qualité de service aussi bien pour les voyageurs (prix, ponctualité, information voyageurs, fréquence notamment) que les transporteurs (augmentation de la fréquence, de la flexibilité et de la fiabilité des sillons accordées). Ce défi est d'autant plus important que le retard des investissements sur le réseau implique de nombreux travaux compliquant les circulations ferroviaires.

Puisque les hausses de trafic seront limitées par la saturation du réseau, le troisième enseignement est que l'évolution de **la part modale dépendra très fortement de l'évolution de la demande totale**, aussi bien en valeur absolue qu'en termes de répartition sur le territoire (selon les régions, les lignes ou les gares concernées) et au cours du temps (pour la gestion des pointes du matin et du soir, des weekends, ou des départs en vacances). Cela rejoint un point déjà évoqué plusieurs fois précédemment, notamment dans les chapitres 1 (en 3.2.2 et Figure 20) et 2 (en 3.3.2 et Tableau 12), sur le lien important entre la modération de la demande totale et la possibilité d'avoir des reports modaux significatifs. Pour maximiser l'intérêt du développement du train, il faudrait donc que les trafics supplémentaires correspondent au maximum à du report modal et non à du trafic induit par une meilleure offre.

2.2.4. Le renouveau du vélo, jusqu'où ?

Historiquement, la pratique du vélo a beaucoup décliné après la seconde guerre mondiale, après un fort développement au début du XXème siècle (Figure 74). Les dernières enquêtes montrent une pratique faible, de l'ordre de 2,7 % des déplacements quotidiens dans les ENTD de 2008 et 2019, une part estimée à 2,1 % des temps de déplacements et 0,5 % des distances parcourues en 2017 (Tableau 14), et de l'ordre de 2 % des actifs vont au travail à vélo (Insee, 2017). Les comparaisons avec les pays les plus avancés montrent le **retard important de la France**, avec une pratique qui pourrait quasiment être multipliée par 10 si elle rejoignait la pratique observée aux Pays-Bas : dans le baromètre Eurostat du mode le plus utilisé, le vélo est à 4 % en France contre plus de 35 % aux Pays-Bas (ADEME, 2020a) ; le nombre de kilomètres était indiqué à 1000 par personne et par an contre 90 km en France dans ORS-IDF (2012), un chiffre probablement supérieur désormais pour la seule pratique utilitaire d'après l'ADEME (2020a). Cette dernière étude indique également que la proportion des déplacements de distances cibles du vélo est importante pour tous les territoires, de 27 à 48 % pour les déplacements de 1 à 5 km, et même de 42 à 67 % pour les déplacements de 1 à 10 km, une distance largement faisable en vélo à assistance électrique (VAE).

Le volontarisme des différents **scénarios de prospectives** est relativement difficile à comparer, étant donné des prises en compte variées des modes actifs, des données de référence parfois différentes, et des parts modales influencées par la croissance de la pratique mais aussi par la demande totale (voir les gains de parts modales en Figure 48). Parmi les scénarios les plus ambitieux, celui de la SNBC prévoit une multiplication quasiment par 7 des kilomètres parcourus d'ici 2050, avec une croissance surtout sur le début de la période, en cohérence avec l'objectif affiché du Plan Vélo de multiplier par 3 la pratique d'ici 2024 pour atteindre 9 % de part modale (MTES, 2019a). Etant donné que les trajets en vélo sont essentiellement des trajets courts, l'impact sur la part modale en nombre de kilomètres parcourus, et donc l'impact sur les émissions est plus faible : ainsi, dans la SNBC, la part modale du vélo passe de 0,5 à 2,6 % (elle n'est pas multipliée par 7 en raison de la croissance de la demande totale ; aussi les chiffres de trafics pour l'année de référence correspondent à la fourchette basse, limitant la part modale), soit un impact sur les émissions d'environ -2 %.

Si d'autres scénarios vont plus loin avec une part modale augmentant jusqu'à +7 % d'ici 2050 (en combinant forte croissance du vélo, baisse de la demande totale, et des chiffres plus élevés pour l'année de référence), il faut ajouter à ces effets directs sur le report modal, deux autres **interactions positives** au développement du vélo.

La première est en lien avec la **réduction de la demande** que le vélo permettrait de faciliter, en encourageant une vie davantage en proximité, en essayant d'habiter proche de son travail ou en réalisant davantage les achats proches de chez soi. Si le report modal est considéré en pourcentage du temps de parcours, il devient alors bien plus important : pour le scénario SNBC, la part du vélo passerait d'environ 2 % à 10 % des temps de déplacement, en considérant une vitesse moyenne de 12 km/h (qui pourrait cependant augmenter avec les VAE). Mesuré ainsi, le report modal et son impact climatique sont bien plus importants.

La seconde interaction concerne le **report modal**, par une recomposition plus globale des déplacements vers une moindre dépendance à la voiture, par une diminution de la motorisation des ménages et/ou une baisse de l'habitude ou du réflexe de prendre la voiture

pour ses déplacements. Il en est ainsi pour la courte distance, avec le développement de l'intermodalité train-vélo, pour laquelle 12 % des nouveaux usagers des consignes sécurisées en gare sont de nouveaux usagers du train (ADEME, 2017). Sur la longue distance, les cyclistes du quotidien privilégient également davantage le train, et sont notamment 30 % à préférer le train (en 1er choix) pour les départs en vacances, contre 19 % pour l'ensemble de la population (analyse de l'enquête IFOP des scénarios SNCF, 2015). Le développement du cyclotourisme peut également se faire au détriment de vacances plus lointaines avec des modes plus émetteurs.
Enfin, via la **démotorisation** partielle ou totale, le vélo peut permettre d'éviter des émissions liées à la fabrication de voitures, qui représenteront progressivement la majorité des émissions liées aux voitures avec le passage à l'électrique. Le VAE, par son assistance et sa vitesse plus importante, permet une augmentation des distances moyennes parcourues, une ouverture à des publics plus larges que le vélo classique, et permet ainsi plus facilement de se substituer à la voiture : 71 % des kilomètres parcourus par des usagers de systèmes de location longue durée de VAE auraient été réalisés en voiture, une proportion de 49 % pour les bénéficiaires des aides à l'acquisition de VAE. Ce report modal important a aussi un impact sur la motorisation, les services de location permettant à 15 % des usagers de se séparer d'une voiture et à 13 % de renoncer à un achat (ADEME, 2017). Les impacts du report modal sont donc largement favorables également en analyse de cycle de vie, la capacité d'une batterie de véhicule électrique étant par ailleurs de l'ordre de 100 fois plus faible que pour une voiture électrique (de l'ordre de 400 Wh pour un VAE contre 41 kWh pour la Renault Zoé).

Enfin, au-delà des émissions, le vélo présente des bénéfices très importants sur les autres **externalités** des transports et sur l'environnement (faible consommation d'énergie et de ressources, d'espace, absence de bruit, de pollution, etc. ; Tableau 20), et en particulier sur la santé des usagers. Ces avantages justifient, peut-être plus encore que les bénéfices climatiques, l'intérêt de son développement et de son soutien par les politiques publiques.
En termes de **mise en œuvre** (Tableau 21), le vélo bénéficie d'une image très favorable, avec notamment 82 % des Français favorables aux mesures pour son développement. Néanmoins, la période de transition et le besoin de prendre de la place à la voiture pour les infrastructures cyclables peuvent rencontrer des résistances de la part des autres usagers.
Aussi l'objectif de **9 % d'ici 2024**, s'il n'est pas impossible à atteindre, demandera néanmoins une accélération rapide et très substantielle des investissements. L'ADEME (2020) estime qu'il faudrait multiplier quasiment par 4 les montants annuels alloués au vélo par rapport aux montants actuels (en passant de 570 M€ à 2 Md€/an), pour atteindre 30 €/habitant/an comme dans les pays les plus cyclables. Si le vélo est un mode peu cher pour l'usager et la collectivité (il faut comparer les 30 € aux 168 € de contributions publiques sur la route et 260 €/hab/an pour les transports en commun ; ADEME, 2020a), l'effort nécessaire à court terme nécessite néanmoins une très forte accélération des budgets. Ce changement de braquet est néanmoins favorisé par le contexte des derniers mois, avec la grève de fin 2019 - début 2020 dans les transports en commun à Paris (voir l'article écrit sur le sujet en annexe, p321), et l'effet des aménagements temporaires lors du déconfinement, qui permettent une certaine accélération dans le développement des infrastructures. Aussi les tendances récentes de baisse de la pratique dans les zones les moins denses doivent être inversées, alors que la

reprise du vélo des dernières années s'est essentiellement concentré dans le centre des plus grandes villes. De manière similaire au phénomène qui pourrait advenir pour la baisse progressive de la voiture décrit en 2.2.1, la pratique qui augmente dans les zones denses devrait progressivement s'étendre aux zones de moyenne densité (où un potentiel important existe également ; voir TSP, 2017) puis de faible densité.

Le défi pour les politiques publiques est de créer un véritable **système vélo efficace**, et en mesure notamment de concurrencer le système automobile pour les trajets qui ont une pertinence pour le vélo. Cela demande en premier lieu le développement des **infrastructures**, en particulier des aménagements cyclables sécurisés et continus avec un meilleur partage de la voirie avec les autres modes, une adaptation des règles de circulation (ville à 30 km/h, tourne à droite, contre-sens cyclables, carrefours sécurisés, etc.), et le développement du stationnement à domicile, sur les lieux d'emploi, les commerces ou les lieux d'intermodalité. Ensuite, cela demande de favoriser l'accès aux **services vélo**, dont : les systèmes de location à longue durée, qui s'avèrent efficaces pour créer de nouvelles pratiques durables ; l'accompagnement aux changements de comportements ; le développement des vélo-écoles, des ateliers de réparation et autres commerces de cycles. Les politiques publiques peuvent aussi mettre en place des **incitations fiscales**, notamment via le forfait mobilité pour les déplacements domicile-travail, les aides à l'achat (VAE, mais aussi vélos-cargos, et speed-pedelecs allant jusqu'à 45 km/h et particulièrement pertinents pour les zones peu denses), ou en incitant les entreprises à développer une flotte de vélos et VAE pour les déplacements professionnels les plus courts. Enfin, ce développement doit être accompagné d'une **communication** positive, notamment sur les forts bénéfices de la pratique sur la santé.

Enfin, les **enjeux économiques** et d'emplois liés au développement du vélo doivent être anticipés, pour les besoins de formation des professionnels (aménageurs, travaux publics, réparateurs, etc.), pour développer l'industrie française du cycle et les nombreux services qui y sont associés dans la vente, la réparation, la location ou encore pour le cyclotourisme.

2.2.5. Autres modes : poids-lourds, maritime et fluvial, bus et cars, marche

En plus des modes évoqués ci-dessus, d'autres éléments peuvent être rapidement cités pour les autres modes de transport.

Pour le **transport routier de marchandises**, il a déjà été évoqué le point fondamental de limiter la demande de transport totale de fret pour permettre un report modal significatif. Ainsi l'échec des politiques publiques passées visant un fort report modal a été de se focaliser sur l'amélioration de l'offre des modes bas-carbone (en particulier le fret ferroviaire), non seulement sans que cela ne soit suffisant pour concurrencer efficacement le routier, mais surtout sans assumer vouloir faire baisser la part modale du routier et mettre des contraintes sur ce mode. Il en est également ainsi du nouvel objectif affiché d'augmenter la part modale du fret ferroviaire de 9 à 18 % d'ici 2030 (franceinfo, 24/07/2020), qui est accompagné de quelques mesures de soutien au ferroviaire, sans mesures visant à décourager l'usage des poids-lourds dans le même temps. Pourtant, la flexibilité, la compétitivité actuelle, et l'organisation du territoire et des activités économiques autour du transport routier rendront les mesures de soutien au ferroviaire insuffisantes pour atteindre les reports modaux visés. Cet

objectif de doubler la part du ferroviaire ne fait d'ailleurs pas partie du scénario de la SNBC, bien que cela serait nécessaire pour faciliter la décarbonation du fret routier.

Pour le **transport maritime**, les reports modaux ne sont pas vraiment envisageables sauf pour quelques rares axes tels que ceux en développement sur les nouvelles routes de la soie qui pourraient passer en partie par le ferroviaire. Ainsi les baisses envisageables de la demande seront essentiellement dues à des relocalisations d'activités ou des changements dans la structure de l'économie. Par ailleurs, le report modal depuis le routier vers le transport maritime s'avère bénéfique d'un point de vue climatique mais n'a pas de potentiel très significatif au vu des possibilités limitées de trajets.

Pour le **transport fluvial**, les potentiels de réduction des émissions via le report modal apparaissent relativement limités dans les scénarios de prospectives, en raison d'une faible part modale de ce mode actuellement (2 % des t.km), de son domaine de pertinence essentiellement pour du transport de matériaux pondéreux et à faible valeur ajoutée, qui est par ailleurs contraint par la géographie et les infrastructures existantes. Certaines applications de livraison en centre-ville en intermodalité avec des vélos-cargos ou des VUL électriques pourraient cependant être développées, pour répondre simultanément à des enjeux climatiques, des enjeux de pollution locale, de congestion ou encore de bruit. Cependant, ces systèmes devront se tourner rapidement vers des solutions décarbonées pour justifier leur avantage comparatif d'un point de vue environnemental aux transports routiers.

Les décompositions des émissions identifient également un potentiel de baisse d'émissions relativement limité pour le report modal vers les **bus et cars**, limité à une baisse de l'ordre de -0,4 $MtCO_2$ dans la moyenne des scénarios les plus ambitieux (Tableau 11). Cela peut s'expliquer par une offre déjà relativement importante dans ses domaines de pertinence, bien que les services librement organisés puissent encore croître sur la longue distance. Aussi, les gains d'émissions pour un transfert modal vers les transports en commun routiers est moins fort que pour le ferroviaire, en raison de ses émissions plus fortes, d'où le potentiel global largement moins élevé.

La **marche à pied** a fortement diminué historiquement, essentiellement par le remplacement de courts trajets à pied par de plus longs trajets en voiture. Cependant, la marche représente toujours une place importante dans les déplacements, avec 23,5 % des déplacements quotidiens en 2019, et une part similaire des temps de déplacements en comptant également les temps en intermodalité, notamment avec les transports en commun (Tableau 14). Ce mode est pourtant largement oublié dans les politiques de mobilité, malgré un potentiel important de parts modales en nombre de déplacements, notamment dans les villes moyennes où la part modale de la marche varie entre 15 % (Angoulême) et plus de 30 % sur l'aire urbaine (Sète, Lorient, ou Arles ; ADETEC, 2019). Aussi, selon les territoires, les déplacements les plus facilement faisables à pied, entre 0 et 1 km, représentent entre 20 % des déplacements dans les zones peu denses, jusqu'à 50 % à Paris (ADEME, 2020a). Les politiques publiques peuvent faciliter la marche en misant sur la proximité, un centre-ville dynamique et favorable aux commerces, des espaces publics agréables où il est possible de s'arrêter, ou encore un aménagement de la voirie qui laisse une place importante aux piétons et une signalisation qui leur donne la priorité.

2.3.Le taux de remplissage, un levier soumis aux effets rebonds

Points et messages clés :

- ✓ La baisse du taux de remplissage des **voitures** va devoir être inversée. Le covoiturage devrait être développé en priorité pour les trajets du quotidien dans les zones peu denses, là où les effets rebonds sur la demande et le report modal seront faibles.
- ✓ Le potentiel de baisses d'émissions lié à une hausse du remplissage des **poids-lourds** à l'avenir semble faible voire inexistant, en raison des effets rebonds possibles.

2.3.1. Le covoiturage, à développer de manière ciblée

Le taux de **remplissage**, mesuré en nombre de personnes ou de tonnes transportées par véhicule, s'est amélioré pour quasiment tous les modes historiquement, par une hausse de l'emport dans des véhicules plus capacitaires (Figure 21). L'exception à cette tendance est la voiture, dont le remplissage moyen a baissé de 2,3 à 1,58 personnes par véhicule, entraînant un impact à la hausse du facteur de remplissage estimé à +28 % sur la période 1960-2017 pour les voyageurs (Figure 12). Cette baisse s'explique par l'effet de facteurs structurants que sont la hausse du taux de (multi-)motorisation, la baisse du nombre moyen de personnes par ménage, et la baisse du coût de la voiture (dit autrement, la hausse de sa vitesse économique). Ces différents facteurs semblent proches de la saturation, comme cela a été évoqué précédemment pour la motorisation et la vitesse économique de la voiture (2.2.1), tandis qu'une légère baisse du nombre de personnes par ménage de 2,2 à 2,1 personnes est prévue d'ici 2050 en France (Insee, 2018b). Ainsi **la tendance à la baisse du remplissage devrait ralentir voire s'arrêter**, cependant une forte hausse à l'avenir du taux de remplissage moyen reste un **défi important**. En effet, le covoiturage s'est essentiellement développé à ce jour sur la longue distance, représentant encore moins d'1 % du total des kilomètres en voiture (voir chapitre 1, 2.3.1) avec des effets rebonds sur la demande et le report modal annulant son bénéfice en termes d'émissions.

Le scénario de la SNBC table sur une hausse de 15 % du remplissage, les autres scénarios étant contrastés et les plus ambitieux allant jusqu'à 30 % (Figure 50). L'impact direct sur les émissions des 4 scénarios les plus ambitieux est de -16 % et -10 $MtCO_2$ (Tableau 11). Pour s'assurer que ce développement se fasse sans **effet rebond** fort, il faudra qu'il se fasse en priorité là où les effets rebonds potentiels sont faibles. C'est le cas en particulier pour les trajets **domicile-travail dans les zones peu denses** : les distances peuvent être suffisamment importantes pour que les économies et le temps d'organisation soient intéressants ; l'effet rebond sur la demande serait faible étant donné que ce sont des trajets contraints ; enfin, l'effet rebond sur le report modal serait quasiment inexistant pour les territoires où la dépendance à la voiture est très forte.

Les **politiques publiques** pourraient donc prioriser les aides et le soutien aux plateformes de covoiturage dans ces zones. Les freins à lever pour en faire une pratique aisée et massifiée sont encore importants : trouver un modèle économique pour les plateformes (éventuellement en prestation de service public subventionné), un intérêt financier pour les covoitureurs (notamment par la mise en place du forfait mobilité durable), partager l'information auprès des usagers sur les services existants (par exemple via un site regroupant les trajets proposés sur les différentes plateformes), donner confiance dans les services proposés, ou encore mettre en œuvre des incitations sur les infrastructures (voies dédiées au covoiturage, stations de covoiturage dynamique, ou aides diverses sur les péages ou le prix du stationnement).

2.3.2. Des marges faibles pour les poids-lourds et les autres modes

De manière similaire aux voitures, les scénarios prévoient des hausses variées pour le remplissage moyen des **poids-lourds**, les scénarios les plus ambitieux prévoyant une baisse des émissions de l'ordre de -15 % par ce levier (Figure 50 ; Tableau 11). Cependant, comme cela a été évoqué pour le passé, les hausses du remplissage qui ont permis une réduction forte des émissions du transport de marchandises (-34 % en impact direct ; Figure 14) sont soumises à des effets rebonds importants. Tout d'abord sur l'efficacité énergétique des véhicules, les consommations par véhicule.kilomètre des poids-lourds ayant augmenté de +21 % sur 1960-2017 malgré les progrès d'efficacité des moteurs (Figure 23). Aussi la baisse de coût du routier encourage une plus forte demande totale et un report vers ce mode, ce qui a conduit au niveau de l'ensemble des transports de marchandises intérieurs à une démassification et une baisse du remplissage total des véhicules terrestres en circulation (Figure 22). Ainsi les marges possiblement existantes à l'avenir, qui dépendent fortement de l'évolution de la structure de la demande de marchandises à l'avenir, n'auraient pas forcément d'impact mesurable sur les émissions au niveau global.

Il en est de même pour les **autres modes**. La hausse des capacités pour faciliter un plus fort emport arrive possiblement à ses limites pour certains modes. Aussi elle dépend fortement de la structure de la demande (par exemple, les vols long-courriers ont un remplissage bien plus important qu'en Métropole), ou n'aura que peu d'impact sur les émissions pour les modes peu émetteurs (pour le ferroviaire par exemple). En revanche, l'incitation économique à l'augmentation du taux de remplissage restera forte, et continuera à être un objectif d'optimisation important des entreprises de transport à l'avenir, sans que l'effet sur les émissions ne soit forcément important.

2.4. L'efficacité énergétique, des potentiels technologiques et de sobriété

Points et messages clés :

- ✓ L'efficacité énergétique s'est **fortement améliorée** par le passé, mais les gains marginaux d'efficacité sont de plus en plus difficiles et coûteux à obtenir.
- ✓ Les **évolutions** récentes (notamment sur les ventes de voitures) sont **inquiétantes**, et compromettent les objectifs de baisses d'émissions de court terme de la SNBC.
- ✓ Les **scénarios** de prospectives montrent généralement un **fort optimisme** sur les évolutions d'efficacité, avec un potentiel qui pourrait être surestimé.
- ✓ Au-delà des **évolutions technologiques** encore possibles, de nombreux facteurs de **sobriété** devraient désormais être activés : baisses de poids, vitesse, puissance, etc.

2.4.1. Voitures, le manque de sobriété a annulé les gains récents

Par le passé, l'efficacité énergétique a été le **principal facteur avec un impact à la baisse sur les émissions de CO_2 du transport de voyageurs** (impact de -37 %, voir Figure 12 ; et -39 % de consommations pour les voitures, Figure 23). Les progrès sur les moteurs qui ont permis ces gains d'efficacité ont été d'autant plus importants qu'ils ont été réalisés malgré la hausse de caractéristiques jouant à la hausse sur les consommations, telles que le poids, les équipements à bord, les dimensions ou la puissance des véhicules.

Ce facteur d'efficacité est également **très important dans les scénarios de prospectives**, essentiellement par les baisses de consommation des véhicules thermiques pour les premières

années, puis ensuite par le passage aux voitures électriques qui sont plus efficaces en énergie finale. Même pour les scénarios tendanciels, les gains d'efficacité apparaissent étonnamment importants avec -40 % de consommations en moyenne d'ici 2050, des progrès visiblement bien plus forts que l'évolution tendancielle récente. En effet, sur la dernière décennie, les progrès d'efficacité énergétique des consommations réelles sont un peu moins forts qu'1 %/an (CITEPA, 2020 ; ICCT, 2019), à la fois pour les voitures neuves et pour la moyenne des véhicules en circulation (qui tient compte du renouvellement du parc). Les gains prévus entre 2015 et 2030 par les 3 scénarios de prospectives tendanciels qui ont un point de passage à 2030, sont de -1,8 %/an.

Pour la SNBC, l'efficacité énergétique est prévue avec un gain annuel de -2,4 %, pour partie en raison de l'électrification et pour la majorité par une amélioration de l'efficacité des véhicules thermiques, de -2,3 %/an en moyenne pour les véhicules neufs et -1,7 % pour la moyenne du parc entre 2015 et 2030, soit **une accélération substantielle et un optimisme qui contraste avec l'évolution de ces dernières années**. Car depuis 2015, les émissions et les consommations moyennes des véhicules neufs en France stagnent, sous l'effet en partie de la baisse des ventes de diesel au profit de l'essence, et surtout de la croissance des SUVs (*sport utility vehicles*), plus lourds et moins aérodynamiques, qui ont atteint 38 % des ventes de voitures en France en 2019 (CCFA, 2020).

Cette stagnation est d'autant plus inquiétante que l'évolution de l'efficacité énergétique constitue pour tous les scénarios (tendanciels et volontaristes ; voir le Tableau 24 en annexe) le **principal levier de réduction des émissions à l'horizon 2030**, ce qui est particulièrement vrai dans le scénario de la SNBC. Les évolutions récentes montrent ainsi que les progrès technologiques naturels sur l'efficacité des moteurs sont insuffisants et qu'il est nécessaire de mobiliser également les leviers de sobriété pour s'aligner avec les objectifs de court terme de la SNBC. Car au-delà des facteurs conjoncturels liés à la sortie relative du diesel et aux SUVs, les gains marginaux sont de plus en plus compliqués à obtenir, au fur et à mesure que les principales marges de progrès ont été utilisées. Aussi le déclin du diesel continuera à l'avenir de peser sur les émissions de la moyenne des véhicules thermiques. Si la stagnation sur les véhicules neufs persistait, le parc continuerait cependant à s'améliorer lentement, les émissions moyennes des véhicules neufs étant inférieures d'environ -9 % à la moyenne du parc en 2018 (111 gCO_2/km environ pour les véhicules neufs depuis 2015, +35 % pour avoir des émissions réelles, soit 150 g ; et 164 gCO_2 pour le parc ; CITEPA, 2020 et ICCT, 2019).

Seul le **début d'année 2020** et l'entrée en vigueur de la règlementation européenne sur les émissions des véhicules neufs montrent des signaux plus encourageants, en grande partie liés à une forte augmentation de la part des véhicules hybrides et électriques. Cette tendance et les déterminants de cette évolution seront importants et intéressants à suivre dans les mois à venir, pour en tirer tous les enseignements pour les politiques publiques. Aussi l'orientation des plans de relance automobiles en France et à l'international seront structurants dans ces transformations. Si des signaux encourageants apparaissent du côté de l'électrification, en revanche les leviers de sobriété semblent de nouveau très peu intégrés aux plans de relance.

De nombreux **leviers technologiques et de sobriété** pourront être actionnés pour améliorer l'efficacité des véhicules thermiques. Certains leviers peuvent s'appliquer aussi à l'électrique, permettant une plus forte autonomie pour une même capacité de batterie (cf 2.5.1).

Parmi les évolutions technologiques, les progrès sur le **rendement des moteurs** peuvent théoriquement encore se poursuivre, en cela qu'ils n'ont pas atteints leur rendement maximal : l'IFPEN évoque une limite théorique d'environ 60 %, alors que les moteurs diesel sont aujourd'hui à 42-43 % et les moteurs essence à 37-38 % maximum (dans OPECST, 2019) ; d'autres chiffres donnent des rendements actuels autour de 20 %, pour un rendement maximal autour de 37 %, mettant en évidence quasiment un facteur 2 possible dans l'amélioration des rendements (CGEDD, 2017). Ces gains seraient possibles par de multiples leviers, bien que certains de ces potentiels aient déjà été largement mis à contribution : downsizing, performance des systèmes d'injection, réduction des frottements divers, hausse du nombre de vitesses et leur pilotage, système *stop & go*, etc.

A court terme, l'évolution la plus simple et la plus significative semble l'**hybridation des moteurs**. Celle-ci s'applique plus facilement pour les moteurs essence qui regagnent de l'intérêt, et permet des gains de l'ordre d'1 L/100 km, et davantage encore en milieu urbain et pour les phases d'embouteillages où c'est le moteur électrique qui est utilisé (CGEDD, 2017 ; ADEME, IFPEN, 2018). Cette hybridation doit donc se faire en priorité pour les véhicules dont l'utilisation en milieu urbain est majoritaire, sans quoi le surcoût de l'hybridation et le risque d'augmentation du poids du véhicule ne sont pas intéressants.

La question du **poids des véhicules** est en effet d'importance, et sa hausse ces dernières décennies ou plus récemment avec la tendance des SUVs a eu un effet à la hausse sur les consommations et les émissions de CO_2. Pour une baisse de 100 kg du poids d'une voiture : les consommations et émissions étaient inférieures de 0,5 L/100 km d'après le CAS (2011), soit environ 12,5 gCO_2/km ; inférieures de 5 gCO_2/km d'après le CGEDD (2017) ; également inférieures de 4-5 gCO_2/km en 2017 au niveau européen, alors que le chiffre était de l'ordre de 10 gCO_2 au début des années 2000 (ICCT, 2018a). Ainsi ces dernières années, les gains d'efficacité se sont faits surtout sur les véhicules les plus lourds. Cependant, au sein des pays les plus avancés et ayant un prix élevé des carburants, les baisses de poids gardent un impact plus important sur les consommations pour les véhicules les plus lourds, que pour une baisse de poids équivalente pour des véhicules plus légers (IEA, ICCT, 2019). Les hausses de poids ont historiquement été portées par la hausse des équipements de sécurité, l'électronique embarquée, par des moteurs plus puissants et donc plus lourds, mais aussi par la hausse de la taille et du confort des véhicules. Sans évolution technologique, il est donc possible de faire en sorte d'orienter les ventes vers les véhicules les plus légers et les plus efficaces (Weiss et al, 2020). Ils permettent en général de rendre les mêmes services, de nombreux véhicules lourds étant utilisés pour des trajets urbains pour lesquels ils sont même moins efficaces.

Il serait également possible de développer des **véhicules très légers**, des quadricycles de moins de 500 kg qui ont 2 places (tels qu'en électrique, la Renault Twizy ou la Citroën Ami). Les cibles pour ces véhicules pourraient être notamment les ménages seuls ou l'une des voitures des ménages multi-motorisés, 17 millions de véhicules rentrant dans ces catégories, soit plus de la moitié du parc (voir aussi article p313). De tels véhicules montrent qu'il est possible d'imaginer des intermédiaires entre le vélo, les deux-roues motorisés et la voiture, afin de créer des véhicules très légers et efficaces énergétiquement, mais qui offrent des services supérieurs au vélo classique. En partant d'une voiture classique pour optimiser ses consommations, il est possible d'arriver sur des quadricycles légers qui consomment de l'ordre de 40 % de moins d'électricité pour la Twizy par rapport à la Zoé, avec un poids à

vide 3 fois plus faible, une puissance plus de 4 fois inférieure, une batterie quasiment 7 fois plus petite, et un prix d'achat environ 3 fois plus faible (voir tableau dans l'article p313 en annexe). Il est aussi possible de partir du vélo pour augmenter ses caractéristiques : le vélo à assistance électrique, les speed-pedelecs, les vélos cargos ou encore les vélomobiles permettent ainsi d'étendre son domaine de pertinence tout en gardant une très bonne efficacité énergétique. D'autres véhicules intermédiaires pourraient faire leur apparition, pour combler des besoins pour lesquels le vélo est insuffisant, et la voiture surdimensionnée.
Pour maximiser les gains d'efficacité, la réduction des **dimensions** des véhicules devrait également se faire dans le sens d'une amélioration de leur **aérodynamisme** en adaptant aussi la forme des véhicules. La réduction des frottements au sol pourrait être un autre axe d'efficacité, en favorisant la diffusion de **pneus** avec une faible résistance au roulement, ou en s'assurant du bon niveau de pression des pneus du parc roulant.
La **puissance** des moteurs a également fortement augmenté historiquement et a quasiment triplé pour les véhicules neufs entre 1960 et 2017 (voir chapitre 1, 3.3.1), afin de s'adapter à la hausse de poids, mais aussi par des hausses de l'**accélération** et de la **vitesse maximale** inutilement élevées, voire dangereuses (186 km/h pour la voiture neuve moyenne en 2017). Le CAS estime qu'un gain d'une seconde sur l'accélération de 0 à 100 km/h entraîne une surconsommation du véhicule de 0,3 à 0,6 L/100 km pour les moteurs diesel, et de 0,3 à 1 L en essence. De même, une hausse de la vitesse maximale de 10 km/h se répercute sur les consommations par une hausse de 0,2 à 0,4 L, puis de 0,2 à 0,6 L respectivement pour les moteurs diesel et essence (CAS, 2011). Ces caractéristiques pourraient être réduites, éventuellement par voie réglementaire, en réduisant la vitesse maximale sur les routes les plus rapides, ou en bridant l'accélération ou la vitesse maximale des véhicules.
Ces évolutions favoriseraient également l'**écoconduite**, qui peut aussi se développer via des changements de comportement de conduite de la part des usagers. Enfin, la consommation des **équipements** présents dans la voiture pourrait être minimisée, notamment la climatisation qui consomme beaucoup, ou le chauffage qui peut aussi être une forte source de consommations pour les véhicules électriques, qui ne peuvent pas profiter de la chaleur du moteur.

Tous les leviers et les gains potentiels qui leur sont associés ne peuvent pas forcément s'additionner, car il existe de **fortes interactions entre ces évolutions**, dont il faut engager un cercle vertueux à la baisse pour réduire les consommations. Si les **gains technologiques** permettent de réduire les consommations sans changements de comportements, ils ont aussi un coût, et devront être encore encouragés à l'avenir par les normes ou les incitations fiscales pour pouvoir se réaliser. Pour les évolutions de **sobriété**, l'acceptabilité est parfois plus difficile (Tableau 21), car elle implique souvent des changements de comportements.
Enfin, il faut noter que le renouvellement du parc repose essentiellement sur une faible fraction de la population, puisqu'environ 2 millions de voitures neuves sont achetées chaque année, dont la moitié par des personnes morales et l'autre moitié par des particuliers parmi les plus aisés, tandis que 5,6 millions de voitures sont vendues sur le marché de l'occasion. Pour s'aligner sur la trajectoire de la SNBC, il est indispensable d'utiliser des incitations financières bien plus fortes, notamment en augmentant le montant des malus, avec un ajout éventuel des critères de poids ou de puissance (France Stratégie, 2019), ou des normes plus restrictives, les acheteurs étant pour certains peu sensibles au prix.

2.4.2. Les autres modes, des potentiels plus difficiles ou plus faibles

Les leviers cités pour la voiture s'appliquent pour une grande partie pour les **VUL** (véhicules utilitaires légers), pour lesquels les gains d'émissions peuvent être également importants en raison de leur part d'environ 20 % dans les émissions du transport routier.

Pour les **poids-lourds**, les progrès seront en revanche plus compliqués, car un certain nombre de leviers de sobriété qui ont été cités pour la voiture ne sont plus possibles. C'est le cas pour la baisse de poids du véhicule à vide, qui n'est pas pertinente ou peu significative pour un véhicule transportant des marchandises, dont l'objectif est plutôt de maximiser le remplissage. Comme cela a été fait par le passé, son emport moyen pourrait encore augmenter à l'avenir, limitant ainsi les gains d'efficacité par kilomètre parcouru. Aussi le levier de la vitesse est moins pertinent, les véhicules étant déjà limités à 90 km/h sur les autoroutes.
Pour autant, la SNBC prévoit une forte accélération des baisses de consommation d'ici 2030 : en effet, il est prévu un gain moyen de -1,6 %/an pour les immatriculations de poids-lourds diesel sur la période 2015-2030, alors que celles-ci ont progressé d'environ -0,5 %/an sur la dernière décennie (CITEPA, 2020), soit un triplement des progrès techniques. Cette accélération n'est pas visible sur ces dernières années, et il ne semble pas y avoir de politiques publiques nationales additionnelles susceptibles d'opérer ces changements. Les normes européennes pourraient en revanche accélérer les réductions d'émissions, avec des objectifs de -15 % en 2025 et -30 % en 2030, par rapport à 2019 (Consilium, 2019). Ces objectifs devraient encourager simultanément les gains d'efficacité énergétique, mais aussi d'intensité carbone par la pénétration de nouvelles motorisations. Une étude de l'ICCT estime que l'efficacité seule serait en mesure d'atteindre ces objectifs, avec des potentiels maximums de réduction des consommations de l'ordre de -43,6 % pour les véhicules de livraison, de -31,5 % pour les poids-lourds de 12 tonnes, et -33 % pour les tracteurs routiers entre 2015 et 2030. Des gains d'environ 10 % viennent de l'amélioration du rendement des moteurs. Ils sont complétés essentiellement par l'hybridation pour les véhicules de livraison (gains de quasiment 20 %), tandis que les autres potentiels pour les tracteurs routiers viennent davantage de l'aérodynamisme (quasiment 10 %) et de la réduction de la résistance des pneus (5 % ; Ricardo, 2017). Si ces technologies impliquent souvent un prix d'achat plus important, les temps de retour sur investissement sont meilleurs pour les tracteurs routiers (baisses de -24 % pour un temps de retour de 2 ans sur le potentiel de -33 % identifié) que pour les véhicules de livraison (potentiel de -11 % sur 2 ans, contre -43,6 % sur la durée de vie du véhicule).

Pour les **autres modes** de transport, les baisses d'émissions liées à l'efficacité énergétique ne peuvent être importantes que pour les modes représentant une part significative des émissions. L'efficacité énergétique sera ainsi un des principaux leviers de réduction de l'empreinte du transport **aérien**, étant donné que les technologies de décarbonation ne sont pas prêtes, au moins à court et moyen terme. Cependant, ces gains resteront largement insuffisants pour s'aligner avec une trajectoire compatible avec l'Accord de Paris, sans modération du trafic.
Pour le transport **maritime**, l'efficacité énergétique pourrait s'améliorer par la réduction des vitesses, avec des baisses de consommations plus que proportionnelles : par exemple, une baisse de vitesse de -17 % (de 12 à 10 nœuds) entraîne une baisse de consommation de -30 % (MTES, 2019b). Le transport à la voile, soit par des voiliers-cargos ou comme complément aux moteurs, pourrait également faire gagner en efficacité le secteur.

2.5.Intensité carbone, un levier majeur… avec des limites importantes

Points et messages clés :

- ✓ L'intensité carbone a eu une contribution très faible par le passé, mais a une **importance majeure** dans les scénarios vers la neutralité carbone.
- ✓ Les **limites** sont cependant parfois importantes : émissions indirectes, ressources limitées, impacts environnementaux, co-bénéfices faibles, et/ou coûts importants.
- ✓ **Electrique** : adapté surtout pour les véhicules légers, avec un intérêt climatique et environnemental maximal s'il est couplé aux mesures de sobriété (réduction des distances, report modal, baisse des vitesses, du poids et de la taille des voitures, etc.).
- ✓ **Hydrogène** : développement très faible à ce jour, faible efficacité de la chaîne énergétique nécessitant de grandes quantités d'électricité et des coûts élevés pour l'hydrogène vert ; pourrait cependant être adapté à l'avenir pour des véhicules lourds.
- ✓ **Biogaz** : également adapté pour les véhicules lourds (poids-lourds notamment), mais repose sur des ressources en quantité limitées, et possède des coûts élevés.
- ✓ **Agrocarburants** : à éviter pour les cultures dédiées, et à développer pour les biocarburants de 2ème génération, qui souffriront de gisements mobilisables limités.

Le contraste est particulièrement fort entre la contribution de l'intensité carbone par le passé et sa contribution prévue à l'avenir dans les scénarios de prospectives.

Par le passé, sa contribution a été positive d'après les décompositions, mais particulièrement faible : elle concerne la sortie du charbon dans le ferroviaire, et le passage aux agrocarburants pour le transport routier notamment. Aussi les biocarburants développés ont en réalité une intensité carbone similaire au pétrole, en tenant compte des effets indirects sur les émissions (voir 3.2.5 et Figure 26 en chapitre 1). Ainsi, les transports sont toujours dominés par le pétrole, et en plus faible proportion par des agrocarburants à l'impact similaire, tandis que l'électricité est essentiellement utilisée par le transport ferroviaire actuellement.

A l'avenir, tous les scénarios indiquent une contribution majeure de l'intensité carbone à la décarbonation des transports, aussi bien par rapport à l'année de référence (dans les décompositions temporelles), que par rapport aux scénarios tendanciels dans lesquels l'intensité carbone évolue peu. Bien que majeure, cette contribution est forte surtout après les années 2030. Elle est indispensable pour atteindre des émissions directes nulles en 2050, comme le prévoit la SNBC pour les transports terrestres.

Aussi il est important d'**évaluer les nouvelles technologies** en analyse de cycle de vie (ACV), en tenant compte des interactions avec les autres facteurs, en intégrant les autres bénéfices et impacts sur l'environnement et les autres externalités, et enfin en tenant compte du coût des technologies développées. Parmi ces éléments, les plus importants seront cités pour les différentes technologies que sont l'électrique, l'hydrogène, le biogaz et les biocarburants. Celles-ci ont par ailleurs des domaines de pertinence différents selon les modes de transport et les véhicules considérés, qui seront également évoqués.

Le détail des technologies de décarbonation montrera que l'intensité carbone présente des **limites importantes**, en particulier les besoins de ressources limitées (biomasse, métaux, besoins en électricité, etc.), et l'impact environnemental de la production des véhicules ou de l'énergie. Aussi, comparé aux mesures de sobriété, les co-bénéfices sur les autres externalités sont généralement faibles (voir Tableau 20). Le développement de ce levier devra donc se faire en interaction avec les 4 autres leviers de décarbonation.

2.5.1. La mobilité électrique : enjeux et limites d'une révolution en cours

Les premières voitures électriques datent de la fin du XIXème siècle, avant que les véhicules thermiques s'imposent au début du siècle suivant. **Le retour de l'électrique est récent et a longtemps été poussif**. Ainsi, dès 2009, la France lançait un plan pour soutenir les véhicules électriques et hybrides rechargeables afin d'atteindre 2 millions de véhicules en circulation en 2020 et 16 % des ventes (Actu-environnement, 2009). Seulement, son développement n'a pour l'instant eu que peu d'impact sur les émissions, au moins pour la période étudiée qui s'étend jusqu'à 2017, au moment où les véhicules électriques représentaient 0,15 % des kilomètres parcourus en voiture (0,20 % en 2018 ; CITEPA, 2020).

Fin 2019, les voitures et VUL électriques et hybrides rechargeables représentaient un peu plus de 275 000 véhicules (le total est dominé par les électriques à 79 %, et par les voitures, à 77 % ; s'y ajoutent environ 50 000 deux-roues motorisés électriques), encore très loin de la cible des 2 millions pour 2020. L'objectif fixé en 2009 ne sera donc pas atteint, bien que la forte dynamique du marché depuis le début de l'année 2020 devrait permettre d'approcher un parc total proche du demi-million de véhicules légers en fin d'année (électriques et rechargeables, VP+VUL ; AVERE, 2020a ; CCFA, 2020).

En effet, l'entrée en vigueur des normes européennes a permis de faire baisser les émissions des voitures particulières d'environ 110 gCO_2/km sur la période 2015-2019, à 99 gCO_2 sur les 8 premiers mois de l'**année 2020**, soit -10 %. Cette forte baisse est largement attribuable à l'électrification du parc, puisque la part des voitures électriques a été multipliée par 3,4 par rapport aux 8 premiers mois de 2019 (de 1,8 à 6,1 % des voitures vendues), la part des hybrides rechargeables par 4,7 (de 0,7 à 3,2 %), tandis que la part des hybrides non rechargeables était multipliée par 2 (de 4,6 à 9,2 % ; CCFA, 2020). Si cette dynamique se poursuivait, cela permettrait d'atteindre l'objectif fixé en 2018 dans le contrat stratégique de la filière automobile de multiplier les ventes par 5 pour atteindre un parc d'1 million de voitures électriques et rechargeables en 2022 (dont 60 % d'électriques).

A plus long terme, le plan climat présenté en 2017 prévoit l'arrêt des ventes de voitures et d'utilitaires légers émettant des gaz à effet de serre (MTES, 2017 ; ou consommant des énergies fossiles, dans MTES, 2020a) à l'**horizon 2040**, un horizon qui peut même paraître tardif pour s'assurer que plus aucun véhicule thermique ne circule en 2050.

L'électrification apparaît ainsi dans la stratégie nationale (**SNBC**) comme un **levier majeur** de baisse d'émissions. Dans la décomposition, en cumulant les contributions pour les voyageurs et les marchandises, ainsi que celles qui se retrouvent dans les facteurs d'efficacité énergétique et d'intensité carbone, la contribution de l'électrification correspond à une baisse d'environ 71 $MtCO_2$ entre 2015 et 2050 (26 d'efficacité et 45 d'intensité carbone), soit l'équivalent de 58 % des émissions intérieures en 2015 ou la moitié des réductions provenant des facteurs ayant un impact à la baisse (hors demande qui participe à la hausse ; voir Figure 46, Figure 47, et Tableau 11). Ces proportions montent à 70 % et 63 % pour les seules émissions du transport de voyageurs, respectivement par rapport aux émissions de 2015, et parmi les facteurs à la baisse sur les émissions.

Cependant, cet **impact direct** de l'électrification mesuré par les décompositions a **tendance à être surestimé** pour la partie liée à l'intensité carbone, en raison de la méthodologie utilisée et l'impact sur les dernières périodes (voir chapitre 2, 2.3.1 et 3.3.5), et par l'absence de prise

en compte des émissions indirectes. Comme exposé plus tôt dans ce chapitre, il faut prendre en compte les émissions liées à la production de l'électricité consommée, à la production des véhicules et éventuellement aux infrastructures nécessaires.

Les **émissions liées à la production de l'électricité** sont relativement faibles en France en raison de la faible intensité carbone de sa production. Comme illustré en Figure 90, les émissions sont de l'ordre de 10 gCO_2/voy.km pour la production de l'électricité (comme pour le véhicule thermique), soit environ 16 gCO_2/veh.km en tenant compte du remplissage de 1,58 personne/véhicule (étude ADEME, 2013). En prenant une consommation moyenne d'une voiture électrique de 17,8 kWh/100 km en 2015 tel que donné dans la SNBC, et une intensité carbone moyenne de 48 gCO_2/kWh (MTES, 2018a), les émissions sont de 8,5 gCO_2/km, un chiffre sûrement plus fidèle des émissions moyennes. Ces émissions sont environ 20 fois inférieures aux émissions directes du parc moyen en 2018, qui sont de 164 gCO_2/km (CITEPA, 2020), auxquels s'ajoutent de l'ordre de +15 à +30 % d'émissions liées à la production de l'énergie (chap. 1, 2.3), soit des émissions du puits à la roue de l'ordre de 200 gCO_2/km. Sur ce périmètre, le véhicule électrique est donc largement plus favorable que le parc moyen actuel et que les nouveaux véhicules thermiques en vente.

Cependant, pour projeter l'impact de consommations supplémentaires d'électricité sur les émissions, l'indicateur de **contenu carbone marginal** du kWh est plus approprié que le contenu moyen. Et cette intensité carbone marginale est bien plus importante, de l'ordre de 500 gCO_2/kWh (RTE, ADEME, 2007 ; négaWatt, 2010 ; BCO2, 2013). En effet, un véhicule électrique qui se charge sur le réseau sollicitera le plus souvent un surplus de production d'une centrale thermique au contenu carbone élevé, sauf dans environ 25 % des cas où c'est le nucléaire qui est sollicité, en particulier la nuit et/ou en été. Les émissions induites par l'électricité dépendent donc des horaires, de la période et du type de charge. Ainsi des bénéfices climatiques intéressants pourraient être obtenus par un **pilotage généralisé** de la recharge. Une interconnexion efficace avec le réseau permettrait aussi de s'articuler avec l'intermittence des énergies renouvelables, éventuellement en développant le vehicle-to-grid (V2G), pour utiliser les véhicules électriques pour du stockage de courte durée. RTE estime que les émissions en 2035 pourraient être 4 fois plus faibles en moyenne par véhicule dans le cas d'un fort développement du pilotage de la recharge (80% piloté dont 20% V2G) comparé à un faible pilotage (40 % sans V2G). Ainsi des bénéfices de près de 5 $MtCO_2$ seraient possibles en 2035, essentiellement par une moindre sollicitation du parc thermique des pays voisins (RTE, 2019). Aussi le pilotage permettrait de plus facilement gérer les pointes du réseau électrique, notamment en hiver, et de limiter l'impact des phases de recharge pour les trajets du quotidien ou les trajets à longue distance, tels que les départs pour les vacances de Noël qui cumulent les difficultés d'approvisionnement pour un parc fortement électrifié.

Dans la SNBC, il est prévu des consommations d'électricité de l'ordre de 80 TWh supplémentaires pour les véhicules électriques routiers en 2050, soit de l'ordre de **15 % de la production annuelle actuelle**. Ce chiffre reste limité malgré l'ampleur de l'électrification et son importance dans le scénario. Cependant, les facteurs limitant ces consommations (les 4 facteurs DT, RM, TR et EE) permettront plus facilement de s'assurer que cette demande supplémentaire ne soit pas assurée par des centrales thermiques françaises ou de pays voisins, et de faciliter la progression de la part des énergies renouvelables.

Pour les **impacts climatiques liés à la production des véhicules électriques** et à leur fin de vie, les émissions sont cette fois plus importantes que pour le véhicule thermique, essentiellement en raison de l'impact de la production de la batterie. Ainsi, il apparaît dans les analyses de cycle de vie des émissions de l'ordre de 4 tCO_2eq pour la production de la batterie, avec des disparités relativement importantes selon les analyses (3 tCO_2eq dans ADEME, 2013 ; 3,7 et 6,6 tCO_2eq pour les citadines et berlines, dans FNH, ECF, 2017 ; 5 tCO_2eq dans RTE, 2019 ; 2,6 et 5,2 tCO_2eq en 2018 pour des batteries de 40 et 80 kWh, dans IEA, 2020). Ramené à un kilométrage de 150 000 km, cela correspond à environ 27 gCO_2/km pour la batterie seule, et environ le même ordre de grandeur pour la production des autres composants de la voiture et l'assemblage. Pour les voitures électriques les plus grosses, les émissions de la production du véhicule peuvent ainsi dépasser 10 tCO_2eq (voir par modèle sur Climobil, 2020), soit un niveau comparable à l'empreinte carbone d'un Français sur une année, de 11,2 tCO_2eq en 2018 (MTES, 2020a).
Sur l'ensemble du cycle de vie d'une voiture électrique, l'impact de cette production du véhicule représente la majorité des émissions (environ 2/3 à 3/4 de l'impact) pour un véhicule utilisant l'électricité moyenne française. Cependant, son **impact total** reste de l'ordre de **2 à 3 fois moins élevé** que pour un véhicule thermique équivalent, d'après les bilans cités ci-dessus, et jusqu'à -77 % pour T&E (2020).

Si ces impacts à la production ne sont pas de nature à remettre en cause la pertinence climatique du véhicule électrique, les émissions sont suffisamment importantes pour nécessiter des stratégies adaptées pour les minimiser. Surtout, la concentration de la majorité des émissions sur la production du véhicule devrait amener à l'avenir à un **changement de paradigme quant aux stratégies permettant de réduire les émissions des véhicules**.
En effet, avec les véhicules thermiques, la **phase d'usage** concentre une partie très importante des émissions (environ 80 %), des externalités (pollution, congestion, accidentologie, etc.), et une partie importante des coûts pour l'usager. De même, les recettes fiscales, via les taxes sur les carburants, sont fortement concentrées sur la phase d'usage, permettant d'inciter à une moindre consommation et d'avoir une tarification relativement proportionnelle à d'autres externalités de la voiture. Un certain nombre de ces éléments ne sont plus valables dans le cas du véhicule électrique. Les émissions à l'usage (à condition de faire la recharge en sollicitant des moyens peu carbonés) sont plus faibles, tout comme le coût d'usage, les rentrées fiscales et donc l'internalisation des autres externalités. Pourtant, des externalités telles que la congestion, l'accidentologie ou la sédentarité restent équivalentes à la voiture thermique, et sont seulement en partie réduites pour le bruit ou la pollution atmosphérique (liées aux pneus, en partie au freinage). Ces externalités seront plus difficiles à internaliser dans le prix des trajets avec la mobilité électrique, à moins de fortement augmenter la taxation de l'électricité.
D'autres externalités davantage en lien avec la **production des véhicules** qu'avec leur usage sont plus fortes pour le véhicule électrique, telles que la consommation de métaux, l'écotoxicité humaine et pour l'eau, ou d'après certaines analyses les émissions de particules fines, l'acidification ou l'eutrophisation de l'eau (ADEME, 2013 ; Hawkins et al, 2012 ; Del Pero et al, 2017 ; UNEP, 2017 ; Van Mierlo et al, 2017). Les résultats sont parfois contrastés entre les analyses et dépendent de très nombreux paramètres, tels que le mix électrique considéré pour la recharge ou pour la production des batteries, la taille et la durée de vie des

batteries et du véhicule, l'année de l'analyse ou encore le kilométrage réalisé. La production du véhicule et en particulier de la batterie apparaît cependant toujours majeure, en termes d'émissions de gaz à effet de serre et d'autres impacts environnementaux. Limiter ces impacts passera notamment par des évolutions technologiques, mais aussi pour une part importante par des mesures de sobriété, en lien avec les 4 autres leviers de décarbonation étudiés.

Côté technologie, la réduction des impacts environnementaux des batteries sera structurante, par des batteries : avec une durée de vie longue ; plus sobres en ressources rares et polluantes à exploiter ; en facilitant une éventuelle seconde vie (pour du stockage) ainsi que leur recyclage ; et en décarbonant l'électricité pour leur fabrication (idéalement en relocalisant une partie de la filière de production des batteries). Le développement du rétrofit (la conversion) de véhicules thermiques en véhicules électriques pourrait également permettre de limiter la construction de nouveaux véhicules et les émissions hors batteries. En plus de ces impacts sur la production des véhicules, il faudra s'assurer de la décarbonation du mix électrique utilisé pour la recharge, en lien avec les pays européens voisins (le réseau étant interconnecté).

Côté sobriété, les impacts environnementaux de l'électrification du parc seront modérés si le nombre de véhicules vendus et la taille de leurs batteries sont faibles. Contrairement aux véhicules thermiques, l'enjeu est donc moins de réduire le nombre de kilomètres que de réduire les volumes de véhicules et de batteries vendues, un changement de vision qu'il faudra progressivement adopter avec l'électrification du parc. Ainsi l'intérêt environnemental du véhicule électrique est optimal avec une utilisation intensive de celui-ci, c'est-à-dire s'il réalise et remplace beaucoup de kilomètres réalisés en véhicules thermiques, lui permettant d'amortir l'impact initial plus fort de sa fabrication. Cette intensification n'est visiblement pas assurée pour le moment : les Renault Zoé revendues d'occasion au bout de 3 ans ont parcouru en moyenne 7 000 km/an, bien moins que le véhicule thermique moyen (AVERE, 2020b). La difficulté à cette utilisation intensive vient de l'autonomie limitée des voitures : augmenter cette autonomie permet d'élargir la gamme de trajets possibles et de diminuer la fréquence des recharges ; mais la hausse de la taille des batteries augmente l'impact environnemental. L'équilibre à trouver est subtil, et devra probablement se faire par des autonomies et des capacités d'emport adaptées selon les besoins. **Les bénéfices seront donc maximaux en réorientant le système de mobilité et les comportements vers plus de sobriété**.
Pour diminuer les émissions de combustion des véhicules thermiques tout en limitant celles de production des véhicules électriques, **il faut simultanément que la proportion de véhicules électriques dans le parc soit la plus forte possible, et que le nombre de ventes soit limité.** Le cas idéal est donc un parc de véhicules électriques peu nombreux, utilisés de façon intense et sur une longue durée. Pour les trajets du quotidien, cela pourrait être facilité par le report modal vers le vélo, la marche et les transports en commun, ainsi que par le covoiturage, qui encourageraient à la démotorisation. Les ménages dépendants à la voiture pour les trajets du quotidien pourraient opter pour des petits véhicules électriques de 1 à 2 places (voir 2.4.1 sur le levier de poids de l'efficacité, et l'article p313), et à l'autonomie limitée, qui pourraient convenir à la grande majorité des trajets. Ce système serait complété par l'autopartage (entre particuliers, gérés par les collectivités, ou les agences de location) de véhicules électriques plus performants, qui permettraient de faciliter les trajets du quotidien plus exceptionnels, avec un nombre de passagers plus nombreux et/ou des distances moyennes qu'une faible

autonomie ne permet pas de couvrir. Pour les plus longs trajets enfin, l'électrique n'est plus adapté à moins d'avoir de très fortes autonomies et/ou des bornes de recharge rapides, ce qui serait dommageable à généraliser largement, d'un point de vue environnemental et pour l'équilibre du réseau électrique. Le report modal vers le ferroviaire serait alors le plus adapté. Les autocars et le covoiturage pourraient compléter, probablement avec des véhicules hybrides dont le carburant serait à définir : le risque entrevu est que ces trajets restent carbonés (pétrole) sans un fort volontarisme sur les leviers de demande et de report modal, étant donné que les ressources des autres carburants possibles (hydrogène, biogaz, agrocarburants) seront disponibles en quantités limitées. Pour accompagner cette réduction du nombre de ventes de voitures, qui est souhaitable d'un point de vue environnemental, une plus forte taxation à l'achat pourrait être décidée, pour pallier aux baisses de recettes fiscales sur les carburants, et pour faire davantage payer les nuisances environnementales qui sont concentrées sur la production des véhicules. Alors que les politiques destinées à faire baisser les émissions du parc ont souvent incité au renouvellement de véhicule, cette stratégie ne fonctionne plus dans le cas de l'électrique et les aides à l'achat devront progressivement être supprimées une fois que la parité de coût avec le véhicule thermique sera atteinte.
Aussi une fiscalité plus forte à l'achat pourrait permettre d'inciter aux **batteries plus légères**, dont l'impact est moins fort. Une taxation spécifique sur le poids des véhicules, le poids des batteries ou la puissance pourraient aller dans ce sens, afin de favoriser les modèles les plus sobres et les plus petits. Le système actuel pourrait notamment être beaucoup plus incitatif pour la catégorie des quadricycles, subventionnés à 900 € contre 6000 € pour la voiture électrique (ADEME, 2020c), ou pour les vélos à assistance électrique, encore plus vertueux d'un point de vue environnemental. Des normes sur la vitesse maximale, l'accélération, le poids ou le contenu carbone de la production de la batterie pourraient également permettre de limiter la taille ou l'impact des batteries. Le levier de modération de la demande de transport, par la réduction des distances parcourues, facilitera aussi l'électrification, tout en gardant des autonomies limitées. Enfin, la réduction des vitesses permettra, à batterie constante, de disposer d'une autonomie plus importante.

Ainsi les mesures de sobriété sur la demande, le report modal, l'autopartage ou la baisse du poids et des vitesses des véhicules favoriseront également une diffusion vertueuse du véhicule électrique. Celle-ci ne peut donc pas se concevoir uniquement comme une évolution technologique qui permettra de remplacer tous les usages du véhicule thermique actuel, sans adaptations ni impacts environnementaux importants. **Technologie et sobriété devront se combiner** pour une transition qui limite les coûts économiques et environnementaux.

A un niveau global, la sobriété permettra aussi de limiter la **demande en matériaux** pour les batteries. En effet, la limitation en métaux pourrait contraindre la diffusion du véhicule électrique. Il est donc indispensable d'en avoir l'usage le plus sobre possible, pour qu'au niveau mondial une part importante du parc puisse y être convertie : un usage trop intense en France et en Europe pourrait compromettre la conversion du parc et la décarbonation de la mobilité ailleurs. Au-delà des contraintes des ressources disponibles, des contraintes géopolitiques ou environnementales pourraient encourager les pays producteurs à limiter leurs exportations, situation à laquelle la France serait très vulnérable, notamment pour le cobalt, le lithium et le nickel, critiques dans les technologies actuelles de batteries.

Les politiques publiques devront également poursuivre les incitations actuelles agissant sur le coût relatif entre électrique et thermique (qui devrait s'équilibrer dans le courant de la décennie pour les voitures, en lien avec la baisse de coût des batteries), sur le développement de l'**infrastructure de recharge**, tout en ajoutant des incitations à la sobriété qui font aujourd'hui défaut dans les politiques d'électrification des transports.

En plus de la transition du parc des véhicules légers et en particulier des voitures dont il a été largement question, l'électrique pourrait également jouer un rôle pour la décarbonation des **poids-lourds**, mais cette perspective est beaucoup plus incertaine actuellement. Le domaine de pertinence sera plus évident sur les trajets de courte distance, car le volume de batteries est trop important pour être intéressant d'un point de vue financier et environnemental pour la moyenne et la longue distance. Les autoroutes électriques pourraient se développer, mais cette perspective ne semble pas d'actualité à court terme, et nécessiterait de construire des infrastructures qui feraient doublons avec le réseau ferroviaire, de manière plus flexible, mais avec une moindre efficacité énergétique. La pertinence serait donc peu importante en cas de forte modération de la demande, de report modal et de disponibilité du biogaz pour le transport routier de marchandises. Dans les cas contraires, cette option pourrait gagner en intérêt et être développée dans les décennies à venir, probablement trop tard pour participer significativement au respect des budgets carbone des prochaines années.
Pour le **ferroviaire**, l'électrification du réseau pourrait se poursuivre, notamment sur les liaisons de fret ferroviaire les plus circulées, telles que les rocades évite-Nord et évite-Sud de l'Île-de-France, ou pour des lignes voyageurs telles que Nantes-Bordeaux ou Lyon-Nantes (Mobilités Magazine, 2018). Pour des trains légers de voyageurs et sur des sections de courte et moyenne distance, les trains à batteries pourraient également permettre de décarboner le trafic ferroviaire sur des lignes ou des sections de lignes non électrifiées.
Pour l'**aérien**, le **maritime**, ou le **fluvial**, des applications pourront être trouvées, notamment pour des opérations au sol pour les avions ou dans les ports pour les bateaux. Cependant, les puissances et les distances généralement parcourues nécessiteraient des volumes et des poids de batteries trop importants pour imaginer un développement massifié de l'électrification pour ces modes de transport, sans des ruptures extrêmement fortes.

2.5.2. L'hydrogène, sa faible efficacité restreint son potentiel

L'hydrogène est aujourd'hui développé dans des applications industrielles telles que la production d'ammoniac pour les engrais, le raffinage des carburants pétroliers ou la chimie, mais encore très peu pour le secteur des transports. Aussi bien dans le monde, en Europe, qu'en France, de l'ordre de 94 % de la **production de l'hydrogène** repose actuellement sur les énergies fossiles (MTES, 2018b ; Deloitte, Ballard, 2020), par le vaporeformage de gaz naturel, l'oxydation d'hydrocarbures liquides ou la gazéification de charbon. Il est également possible de produire de l'hydrogène par gazéification ou thermolyse de biomasse, ou par électrolyse de l'eau (décomposition de molécules d'H_2O à partir d'électricité), le procédé le plus prometteur d'un point de vue environnemental. Il est possible d'utiliser hydrogène dans un véhicule, soit comme combustible dans un moteur à hydrogène à combustion interne, ou de manière plus efficace en le retransformant en électricité via une **pile à combustible**, pour

utiliser cette électricité dans un moteur électrique, technologie généralement préférée. Ainsi la mobilité hydrogène peut se rapprocher de la mobilité électrique, aussi bien pour l'utilisation d'électricité pour l'électrolyse que par l'utilisation dans le moteur électrique.

Seulement, les transformations successives engendrent des pertes d'énergie, lui assurant un moindre **rendement énergétique** : rendement généralement autour de 70-85 % pour l'électrolyse, puis 70-90 % pour la compression, le stockage, le transport et la distribution de l'hydrogène produit, puis une fourchette de rendement de 30-70 % dans la pile à combustible, avant que l'électricité soit utilisée dans le moteur électrique (multiples valeurs de la littérature, en particulier les références citées plus loin dans cette partie). Selon la valeur retenue pour chacune de ces trois étapes, le rendement total depuis l'électricité jusqu'au moteur se situe entre 15 et 54 %. Si des progrès pourraient être faits à l'avenir pour optimiser ce rendement, l'étude de T&E (2018a) considère qu'au total **il faut de l'ordre de 2,5 à 3 fois plus d'électricité pour un véhicule hydrogène que pour un véhicule électrique**. L'étude considère ainsi que décarboner les transports terrestres en Europe via les véhicules électriques nécessiterait de l'ordre de 43 % de l'électricité produite en 2015 en Europe, et 108 % dans le cas de véhicules à hydrogène. Des chiffres qui pourraient encore augmenter en considérant la navigation et l'aérien. Lorsque cela est possible et notamment pour les véhicules les plus légers, il est donc préférable d'utiliser des véhicules électriques. Mais l'hydrogène possède les avantages de ne pas nécessiter de batteries, ainsi d'éviter les longs temps de recharge et l'autonomie limitée, tout en permettant un stockage de l'énergie que ne permet pas facilement la production d'électricité, d'où son intérêt dans certains cas.

En termes d'**émissions de gaz à effet de serre**, les bénéfices sont peu importants si l'hydrogène est produit à partir d'énergies fossiles. Dans le cas le plus favorable du vaporeformage de gaz fossile, les baisses d'émissions apparaissent de l'ordre de -40 % du puits à la roue, et de l'ordre de -20 à -35 % en analyse de cycle de vie du véhicule (respectivement pour IEA, 2020, et Hydrogen Council, 2017). A partir de l'électrolyse de l'eau, il n'y a pas ou que peu d'intérêt avec le mix électrique européen moyen (European Commission, 2015 ; IRENA, 2017). En revanche, les bénéfices sont bien plus importants dans le cas d'une électrolyse à partir d'électricité décarbonée. Le bilan en analyse de cycle de vie se rapproche alors de celui de la voiture électrique en France, atteignant des émissions environ 3 fois moindres que l'équivalent thermique (BCO2, 2013 ; IEA, 2020).

Ces chiffres montrent l'importance de **décarboner la production de l'hydrogène avant d'en développer fortement l'usage**, l'objectif français étant d'atteindre 10 % d'hydrogène décarboné dans l'hydrogène industriel d'ici 2023, et 20 à 40 % d'ici 2028. Sans cette décarbonation de la production, le développement de la mobilité hydrogène pourrait ne pas présenter d'intérêt environnemental important, et créer une filière qui restera dépendante aux énergies fossiles si les développements de l'électrolyse sont insuffisants au regard des enjeux.

Aussi l'intérêt de l'hydrogène dans la transition énergétique pourrait être de produire de l'hydrogène au moment de surplus de production d'électricité, et ainsi faciliter une forte pénétration des énergies renouvelables intermittentes et l'équilibre du réseau dans ce cas (voir scénarios ADEME et négaWatt, notamment). La pénétration de l'éolien et du solaire reste à ce jour trop faible pour nécessiter ce type d'usage, mais ce besoin sera croissant à l'avenir. Cependant, si l'utilisation des électrolyseurs est limité à ces cas, le facteur de charge pourrait rester trop faible pour atteindre une rentabilité économique et des volumes de production

suffisants, posant la question d'utiliser également la production nucléaire de base pour produire de l'hydrogène (Cordiez, 2020). Cette production pourrait cependant être arrêtée dès que des moyens de production thermiques fossiles sont sollicités sur le réseau, à la fois pour des raisons environnementales et économiques.

Le **coût de la filière hydrogène** est aujourd'hui plus élevé que pour le thermique et l'électrique. Cela est vrai pour l'achat des véhicules, notamment en raison de la faiblesse de l'offre et des volumes vendus, le parc mondial étant 250 fois moins important fin 2019 que celui des véhicules électriques (IEA, 2020). C'est également valable pour la production de l'énergie, l'hydrogène étant de l'ordre de deux fois plus cher lorsqu'il est produit à partir de l'électrolyse de l'eau qu'à partir de vaporeformage de gaz. Au total, le ministère estime que le coût total de possession est de l'ordre de 20 à 50 % plus élevé que l'équivalent thermique (MTES, 2018b), tandis que Deloitte et Ballard (2020) estime le surcoût entre 40 et 90 % au niveau mondial en 2019. Cependant, cette dernière étude estime que le coût devrait être quasiment divisé par deux pour l'hydrogène et atteindre la parité avec les véhicules thermiques autour de 2027. Le ministère prévoit aussi une division par deux d'ici 2028 pour le coût de la production d'hydrogène décarboné, pour atteindre un coût de l'énergie similaire à celui du diesel (cible de 7 à 9 €/kg d'hydrogène, qui permet de parcourir environ 100 km ; dont 2 à 3 € pour la production en 2028, MTES ; compter aussi environ 4 € de coûts de transport et distribution, BDO-BIPE, 2020 ; les taxes peuvent ensuite modifier le prix total).

En raison de la consommation d'électricité que cela entraîne, l'hydrogène devra être **priorisé sur les modes et les véhicules les plus difficiles à décarboner** autrement. Cela pourra concerner notamment les véhicules terrestres lourds, tels que les poids-lourds qui seront difficiles à électrifier, ou également pour remplacer les trains diesel. Les politiques publiques devront accompagner cette transformation dans un premier temps sur la décarbonation de la production de l'hydrogène et les expérimentations, puis en encourageant ensuite l'achat des véhicules et les stations d'avitaillement si elles sont fournies par de l'hydrogène décarboné.

Enfin, l'hydrogène peut également servir pour produire des **carburants de synthèse** par combinaison avec du CO_2, qu'il faut pouvoir capter en sortie de centrales thermiques ou directement dans l'atmosphère. Cette combinaison peut permettre de produire du gaz de synthèse (par méthanation, ou *power-to-gas*), ou du carburant liquide (*power-to-liquid*). Ce dernier carburant présente l'avantage de convenir aux véhicules actuels et de remplacer le pétrole, notamment pour des modes très difficiles à décarboner tels que l'aérien ou le maritime. Mais cette nouvelle étape de transformation entraîne des pertes supplémentaires d'énergie et représente des coûts importants.

Ainsi il est estimé que le **coût des electrofuels est de l'ordre de 3 à 6 fois plus élevé** que leur équivalent fossile (T&E, 2018a ; Cerulogy, 2017, 2018). Leur utilisation pour l'aérien augmenterait de 59 % le prix des billets en 2050, une évolution qui ne serait possible que par des obligations d'incorporation ou de très forts niveaux de taxe carbone.

Leur faible efficacité sur la chaîne de production entraîne également de **très fortes consommations d'électricité** : décarboner la navigation européenne par l'hydrogène nécessiterait l'équivalent de 32 à 37 % de l'électricité actuelle, et 53 % avec des carburants de synthèse ; ce dernier chiffre serait de 28 % pour décarboner l'aviation, soit aussi l'équivalent de 95 % de l'électricité renouvelable produite en 2015 (T&E, 2018a).

2.5.3. Le biogaz, possible carburant d'avenir des véhicules lourds

Le biogaz est constitué pour 50 à 70 % de méthane (CH_4), et pour le reste essentiellement de dioxyde de carbone (CO_2) de 20 à 50 % et d'autres éléments en plus faible quantité (eau, azote, sulfure d'hydrogène, etc.). La majorité du biogaz actuellement produit sert à de la production d'électricité et de chaleur. Mais après épuration, il est aussi possible d'obtenir du **biométhane**, un gaz quasiment identique au gaz fossile qui peut alors être injecté dans les réseaux de gaz ou utilisé comme carburant, le gaz naturel véhicule (GNV ou bioGNV selon son origine). Plusieurs procédés de fabrication de biométhane sont possibles : le plus développé est la **méthanisation**, qui utilise la digestion anaérobie (en absence d'oxygène) de matières organiques fermentescibles ; ensuite, la **pyrogazéification**, un traitement thermique adapté pour de la biomasse plus sèche telle que le bois, qui permet d'obtenir un syngas puis d'utiliser la méthanation pour aboutir à du méthane ; enfin, tel qu'évoqué en 2.5.2, il est possible d'obtenir du biométhane par méthanation d'hydrogène, appelé ***power-to-gas***, un processus coûteux et encore peu développé (ADEME, 2018a ; IFPEN, 2020). C'est surtout la méthanisation qui se développe actuellement. Elle est la plus prometteuse à l'horizon 2030, et potentiellement aussi à l'horizon 2050, étant donné que la biomasse solide et l'hydrogène pourraient être prioritaires pour d'autres usages plus directs que pour la transformation en gaz.

L'impact carbone de la méthanisation est généralement très positif, bien que les chiffres dépendent des ressources mobilisées et des hypothèses retenues. Du puits à la roue et selon les analyses, les baisses d'émissions sont considérées à : -97 % pour le biométhane comparé à un véhicule essence (ATEE, 2014) ; -70 % à partir de déchets organiques et -80 % pour le lisier, par rapport à un véhicule essence (IRENA, 2017) ; -75 % pour les bus par rapport au GNV (ADEME, 2018b) ; -86 % pour des biodéchets et -206 % pour le lisier, lorsque le stockage du digestat se fait en milieu fermé, que le méthane restant est brûlé et qu'il n'y a pas de fuite sur le reste de la chaîne (T&E, 2018b ; voir aussi ICCT, 2018b avec des bénéfices très importants aussi pour la gazéification). Carbone 4 indique pour sa part -90 % d'émissions par rapport au GNV fossile, dont -40 % liés aux baisses d'émissions pour la production et la combustion du gaz (secteur énergie), et -50 % liés aux moindres émissions de méthane des intrants généralement stockés en plein air (secteur agricole ; Carbone 4, 2019). En analyse de cycle de vie du véhicule, cela reste très intéressant étant donné des émissions de production du véhicule similaires aux modèles essence et diesel. Ainsi les résultats sont même légèrement meilleurs que l'électrique pour les voitures de segment C et D, les VUL, les poids-lourds de livraison, et sont similaires pour les bus électriques et au bioGNV (IFPEN, 2019).
Au contraire, **les bénéfices climatiques sont faibles ou inexistants pour le GNV fossile** : ils sont souvent légèrement meilleurs en ACV comparés aux véhicules essence et diesel, d'après l'IFPEN ; -24 % par rapport à un véhicule essence, selon ATEE (2014) ; entre -7 % et -23 % comparés aux véhicules légers diesel et essence, et -15 % environ comparés aux poids-lourds diesel, selon NGVA (2017) ; et de -12 à +9 % selon les modes, d'après T&E (2018b).

Bien que les bénéfices climatiques soient forts, **le développement du biogaz sera cependant limité par le potentiel de production** et les ressources durables disponibles. La Figure 93 donne des éléments de comparaison sur ce potentiel. A gauche, la consommation de pétrole des poids-lourds et des VUL, deux segments qui pourraient faire une transition vers le biogaz, et représentent 15 Mtep en 2015. Ensuite, la trajectoire de la SNBC est présentée, avec des

consommations de gaz divisées par plus de deux, pour représenter quasiment 17 Mtep en 2050, dont 3,5 pour les transports parmi les 13,3 Mtep de biogaz. Enfin, ce dernier montant peut être comparé au potentiel de production identifié pour la France par différentes études (ADEME, 2018a ; le scénario Afterres utilisé dans le scénario négaWatt, Solagro, 2016 ; ICCT, 2018b ; European Commission, 2017 ; JRC, 2015). Toutes les études ne prennent pas en compte le même périmètre, selon : l'usage considéré pour le bois ou les résidus de cultures ; le développement de cultures intermédiaires ; ce qui est considéré comme durable ; et/ou les limites technico-économiques. Elles laissent cependant apparaître des potentiels pour la méthanisation inférieurs aux consommations prévues dans la SNBC, parfois de manière importante, tandis que les potentiels de pyrogazéification et de *power-to-gas* sont pour le moment incertains. Au-delà des potentiels liés aux déjections animales et aux stations d'épuration, qui sont déjà en développement, d'autres filières qui nécessitent la récupération des biodéchets, des résidus de cultures ou de cultures intermédiaires, nécessiteront des développements substantiels pour atteindre les potentiels identifiés par ces études.

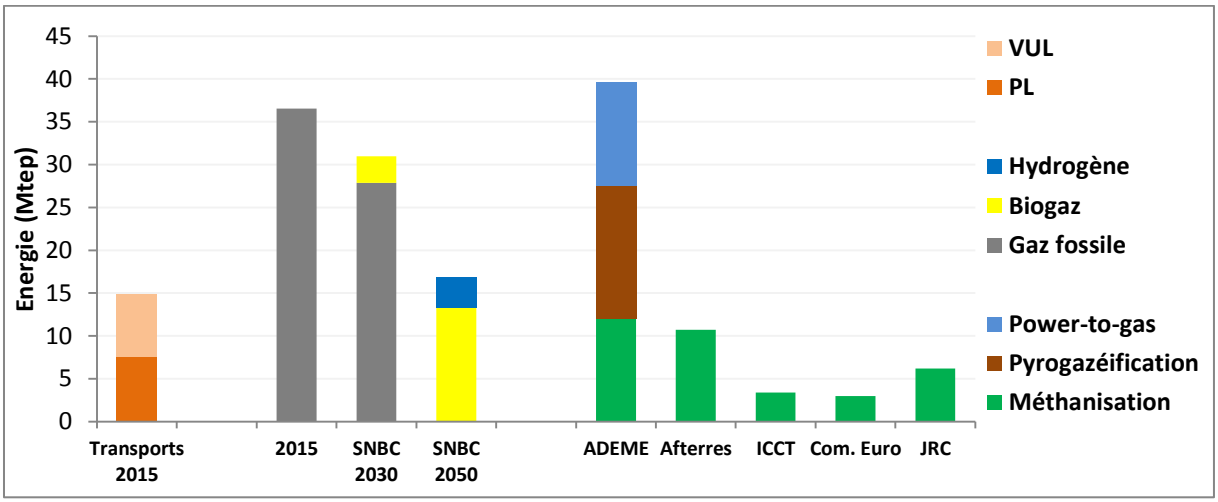


Figure 93 : Consommation des VUL et PL en 2015 ; consommation de gaz par type de production dans la SNBC, de 2015 à 2050 ; et estimations du potentiel de production de biométhane en France en 2050 selon plusieurs études

Les comparaisons montrent que le biogaz ne pourra représenter une **part significative du gaz consommé qu'à condition d'une très forte baisse des consommations**. La possibilité de l'utiliser pour les transports lourds dépendra donc également de la réussite de la transition du secteur résidentiel-tertiaire (et notamment de la rénovation énergétique qui prend du retard), de l'industrie, des interactions intéressantes qui sont possibles avec le secteur agricole, et des choix dans les pays européens voisins, une partie importante du trafic étant internationale.

En termes de déploiement, le biogaz présente aussi l'avantage de pouvoir se stocker, avec une technologie GNV mature, un réseau de gaz existant, et des développements actuels qui semblent en phase avec les objectifs de la PPE. Un dernier obstacle possible sera **le coût de production du biogaz, 4 fois plus élevé que le gaz fossile**, environ 100 €/MWh et 25 € respectivement (MTES, 2020b ; CRE, 2019). Si le ministère et la CRE estiment des baisses de 30 % des coûts de production possibles d'ici 2030, la filière estime ces objectifs comme trop ambitieux. Cela a conduit à revoir légèrement à la baisse l'ambition initiale de la PPE d'avoir 10 % d'incorporation de biogaz dans les réseaux en 2030. Pourtant, sans une forte hausse de ce pourcentage et avec un potentiel de production limité, le risque est grand, comme pour l'hydrogène, de créer des usages carbonés qu'il sera difficile de décarboner.

2.5.4. Les agrocarburants : quels potentiels, quelle durabilité ?

L'analyse réalisée sur les biocarburants consommés en France en 2017 a montré que **leur intérêt climatique est nul en moyenne** (voir 3.2.5 du chapitre 1). L'impact est plus important pour le biodiesel, et particulièrement fort pour l'huile de palme, le soja et le colza (Figure 26). Par ailleurs, seulement la moitié de ces biocarburants sont issus de ressources françaises, et 34 % proviennent de pays hors Union Européenne. Aussi les agrocarburants de 1ère génération ont l'inconvénient de rentrer en concurrence avec les cultures à usage alimentaire. A l'avenir, il est important de pouvoir préserver ces terres pour d'autres usages que celui de cultures destinées à la production d'énergie, notamment : pour faire face à la hausse de la population et à la demande alimentaire croissance ; parce que la conversion à une agriculture moins intense en intrants chimiques devrait impliquer de moindres rendements et donc des surfaces de terres plus importantes pour les cultures ; pour favoriser le captage de CO_2 par la végétation et les sols, en redonnant idéalement de la place pour les forêts ; enfin, pour préserver la biodiversité, dont le changement d'usage des terres a été le principal motif d'érosion ces 50 dernières années (IPBES, 2019). Il est donc important de réduire progressivement cette part des biocarburants de 1ère génération, en commençant par supprimer ceux qui ne sont pas produits en France et qui ont un fort bilan carbone. La valorisation des co-produits pour l'alimentation animale (tourteaux de colza, les drêches de blé et de maïs, pulpes de betteraves, etc.) devra faire l'objet d'un point de vigilance, afin d'évaluer s'ils peuvent justifier ou non le maintien de ces cultures à vocation énergétique.

A l'avenir, **la filière la plus prometteuse pour les biocarburants concerne ceux de 2ème génération**, qui sont produits à partir de résidus ou de déchets, issus des filières agricoles, forestières ou des déchets. Des caractéristiques communes avec le biogaz se retrouvent ici, car leurs ressources sont partiellement substituables pour les deux types de production. Leur impact climatique est aussi largement favorable, avec des réductions généralement fortes des émissions, qui apparaissent cependant variées selon les matières premières mobilisées (ICCT et al, 2014 ; ECOFYS, 2015 ; JRC, 2015 ; ADEME, 2019b).

De nouveau, **leur potentiel sera limité par les ressources disponibles**. L'étude de JRC (2015) donne pour la France, dans le scénario avec disponibilités moyennes, des potentiels de l'ordre de 13 Mtep en 2050 (4,6 pour les résidus agricoles, 5,9 forestiers, 2,7 déchets municipaux ; aussi 6,2 pour le fumier/lisier déjà considéré pour le biogaz en Figure 93). D'autres analyses sur l'Europe sont moins optimistes : 225 Mt de matières sèches en 2030, soit 36,7 Mtep (ICCT et al, 2014) ; le chiffre de 225 Mt a été réévalué par les mêmes auteurs à 157 Mt de matières sèches, dont 32 Mt pour la France (Searle et Malins, 2016) ; avec la même équivalence pour la conversion en énergie, cela ferait de l'ordre de 5,2 Mtep de biocarburants avancés disponibles pour la France (à comparer aux 50 Mtep des transports en 2015, SNBC).

La question de la répartition des ressources entre agrocarburants et biogaz d'une part, puis entre les secteurs économiques et les modes de transport d'autre part, reste entière. En 2050, la SNBC prévoit 7,7 Mtep de biocarburants pour les transports, dont 4,4 pour le transport aérien (Figure 53), des chiffres qui pourraient être difficiles à atteindre de manière durable. Ainsi le scénario européen de décarbonation de T&E (2018a) estimait que seuls 11 % des consommations d'énergie de l'aérien en 2050 pourraient être fournies par les biocarburants, dont le développement sera aussi freiné par un coût plus élevé que le kérosène.

3. Freins et leviers de la transition : éléments de discussion

Points et messages clés :

- ✓ Sobriété et technologie devront se **combiner** pour atteindre les objectifs climatiques. La **sobriété** peut permettre de faire environ la moitié du chemin vers la neutralité, elle présente de forts co-bénéfices sociétaux, mais pose des questions de changements de comportements et d'emploi. La **technologie** aura un rôle majeur, mais se confronte à des ressources limitées, des impacts environnementaux et des coûts parfois forts.
- ✓ La transition des transports doit se faire en interaction avec celle les autres **secteurs**, en veillant à traiter les nombreux enjeux de **faisabilité** et d'**acceptabilité**.
- ✓ L'implication de tous les **acteurs** sera nécessaire, des politiques publiques aux entreprises en passant par les citoyens et usagers. Le besoin de **formation** sur les enjeux et les pistes de solutions sera crucial pour réussir la transition.

3.1. Technologie et sobriété, des interactions à repenser

Le chapitre 1 a montré que les **politiques publiques** ont jusqu'alors essentiellement misé sur le développement des modes bas-carbone et sur les évolutions technologiques pour réduire les émissions, une stratégie qui s'est révélée largement insuffisante pour le moment. La focalisation sur les leviers technologiques est manifeste avec la stratégie nationale bas-carbone (SNBC), qui mise essentiellement sur l'amélioration de l'efficacité énergétique et de l'intensité carbone.

Les tendances actuelles montrent que ces deux **leviers technologiques** devraient s'avérer largement insuffisants pour atteindre les objectifs climatiques de court terme de la France, et très probablement ceux de long terme également.
Ainsi l'efficacité des véhicules neufs ne s'améliore pas significativement, et de nouvelles politiques incitatives manquent pour atteindre la forte accélération des baisses de consommations qui est prévue. Concernant la décarbonation de l'énergie, seul le début d'année 2020 montre des signaux encourageants pour l'électrification des véhicules routiers légers. Seulement, la décarbonation des autres modes semble bien plus compliquée et très peu engagée jusqu'alors : c'est le cas notamment pour les poids-lourds, le transport fluvial et maritime, et le transport aérien, qui risquent tous d'être encore fortement carbonés dans les années voire les décennies à venir. Leur niveau de trafic sera donc déterminant dans l'évolution des émissions totales.

Cela fournit un des arguments pour une plus forte ambition sur les **leviers de sobriété**. Le chapitre 2 a montré que des potentiels de sobriété supplémentaires de l'ordre de -40 % pour les voyageurs et -50 % pour les marchandises seraient possibles, via les leviers de modération de la demande, de report modal et de remplissage. Des leviers de sobriété importants existent également sur l'efficacité énergétique, par la réduction de la vitesse, du poids et de la taille des véhicules. Enfin, sur l'intensité carbone de l'énergie, des adaptations seront nécessaires dans les comportements de mobilité et le transport de marchandises pour profiter pleinement des avantages de l'électrification ; aussi les besoins de ressources importants requièrent une forte modération de la demande en énergie pour faciliter sa décarbonation.
Au total c'est donc de l'ordre de **la moitié du chemin vers la neutralité carbone** qui peut être obtenue par les évolutions vers plus de sobriété, en termes de baisse d'émissions par rapport à un scénario tendanciel.

L'analyse des mesures de sobriété a également montré des **bénéfices** généralement importants sur les autres externalités, réduit le coût de la transition, implique de moindres consommations de ressources et permet de gagner potentiellement en résilience du système de transport. C'est moins le cas pour les évolutions technologiques, qui traitent plus spécifiquement le problème des émissions, avec des coûts souvent plus importants que les technologies actuelles au pétrole. Les fortes consommations de ressources parfois induites risquent aussi de nous rendre davantage dépendants à d'autres pays. Au niveau mondial la pression sur des ressources limitées risque de compliquer la transition d'autres pays, tout en ayant des impacts environnementaux et sociaux parfois importants pour les pays producteurs de ressources.

L'impératif de faciliter les évolutions vers plus de sobriété dans le transport de voyageurs et de marchandises ne doit pas masquer pour autant le **caractère indispensable de fortes évolutions technologiques** pour atteindre la neutralité carbone. Celles-ci devraient être orientées davantage dans le sens de la transition écologique. Par ailleurs, **la sobriété fait face à certains blocages** qui devront être levés. Leur résolution dépasse le seul sujet de la transition énergétique des transports évoqué dans cette thèse.
Les évolutions technologiques et de sobriété dépendent ainsi de **transformations plus larges** qui seront autant de freins à lever pour réussir la transition des transports.

3.2.Les freins et leviers qui dépassent les transports

De nombreux freins et leviers de la transition énergétique des transports dépassent largement le secteur des transports. Si les évolutions des 5 facteurs de décarbonation ont de fortes interactions entre elles, **de fortes interactions avec les autres secteurs existent** également, et certaines ont déjà été citées. Il s'agit notamment : de l'urbanisme, de l'aménagement du territoire, du partage de la voirie, vis-à-vis de leur impact sur la demande de transport et le report modal ; du secteur du bâtiment, pour ses interactions avec l'urbanisme, l'accès au stationnement ou la disponibilité en biogaz pour les transports (selon la transition du secteur résidentiel-tertiaire) ; du secteur agricole et de la gestion des terres, pour les ressources en biomasse disponibles (biogaz, biocarburants) ; du secteur de l'énergie, et notamment de la production et de la distribution de l'électricité, du déploiement de l'hydrogène décarboné ; de l'économie et de l'industrie, pour la production des véhicules notamment, l'impact de la production et de la consommation de biens et services sur le transport de marchandises et les déplacements, ou la réorientation des flux financiers ; ou encore les nombreuses interactions avec les modes de vie, concernant l'organisation des emplois du temps, du travail, des vacances, la nature et la localisation des activités réalisées, ou encore l'influence des préoccupations environnementales dans les comportements. Ainsi la réussite de la transition des transports dépendra également de la transition de ces autres secteurs, nécessitant d'intégrer la SNBC dans l'ensemble des politiques publiques (HCC, 2019, 2020).

Aussi parmi les freins les plus structurants de la transition, figure un élément global qu'est **l'inertie du système et la rapidité des transformations à mener** pour respecter les objectifs fixés. Cette question de la temporalité et de l'inertie dans les changements s'illustre de manières très variées, et pose des défis de différentes natures : ainsi l'urgence de l'action questionne le temps du politique et de la mise en œuvre des politiques publiques ; l'inertie se

retrouve sur l'aménagement, les infrastructures de transport et d'énergie (à l'échelle de plusieurs décennies voire du siècle), et les véhicules utilisés (plusieurs années à décennies), et contraignent de nombreux comportements de mobilité ; ou encore, l'inertie des valeurs et des modes de vie rend difficilement acceptables des changements trop rapides et peu anticipés.

Un frein plus spécifique aux évolutions technologiques concerne les **ressources disponibles**, en raison de leurs coûts, ou des impacts environnementaux ou géopolitiques de la pression sur les ressources. Ces éléments pourraient contraindre le développement de certaines technologies, et éventuellement rendre impossible l'atteinte de l'objectif de long terme si les déploiements ne peuvent se faire suffisamment rapidement et à l'échelle requise. Il est donc important, au-delà des évolutions de sobriété, de penser et d'orienter également les évolutions technologiques vers une moindre consommation d'énergie et de ressources : en questionnant les besoins, en facilitant l'écoconception et une longue durée de vie des produits, la réparation plutôt que le renouvellement, le recyclage, tels que mis en avant notamment par les principes du *low tech* (Bihouix, 2014). Cela est valable pour les transports et plus globalement pour l'ensemble des secteurs et des pays, les ressources limitées au niveau mondial étant par définition à répartir au sein de l'ensemble de la population et des activités.

Un frein plus spécifique à la sobriété concerne l'**acceptabilité** de la transition, notamment des mesures politiques et des changements de comportements. Ces questions ont pu freiner la mise en œuvre des mesures de sobriété, en plus de la question des **emplois**, qui pour certains sous-secteurs des transports pourraient se réduire à l'avenir, quand d'autres modes (vélo, ferroviaire notamment) et d'autres secteurs (rénovation des bâtiments, agroécologie, etc.) devraient au contraire nécessiter davantage de main d'œuvre. Cette question de l'emploi est majeure dans la transition et doit donc être anticipée par les politiques publiques pour organiser les reconversions nécessaires et fournir des aides à la transition des secteurs, des entreprises et des salariés particulièrement touchés. Ce point concerne plus globalement le traitement des possibles perdants de la transition, ressorti de manière particulièrement forte lors de la crise des gilets jaunes, sur les questions d'inégalités sociales et entre les territoires. La **juste répartition des efforts** ressort par ailleurs pour les Français comme la principale condition pour accepter des changements importants dans les modes de vie (66 %), devant le besoin que ces changements soient décidés collectivement (37 % ; ADEME, 2019a), faisant ainsi le lien entre transition écologique et transitions sociale et démocratique. Aussi la sobriété ou le ralentissement des mobilités posent la question des normes sociales, des représentations et des imaginaires souhaitables. Ceux-ci sont véhiculés par l'environnement, l'entourage, la publicité, la communication, les films et récits, qui devront s'aligner avec les comportements les plus souhaitables pour un avenir bas-carbone.

Enfin, **l'éducation au changement climatique** et à l'environnement au sens large est indispensable pour impliquer l'ensemble des acteurs et accepter des changements à la hauteur des enjeux. Cette éducation ne peut se contenter de former uniquement les plus jeunes, mais devra s'adresser aussi aux décideurs publics, aux entreprises, et aux citoyens. Cela pointe l'enjeu de partage de la connaissance qui intéresse particulièrement la **recherche**. Celle-ci devra continuer à trouver des éléments de réponse aux freins identifiés, en particulier par des travaux interdisciplinaires, et veiller à communiquer ces résultats de manière compréhensible et appropriable par les acteurs concernés et le grand public.

Bibliographie

Actu-environnement, 2009. *2 millions de véhicules "décarbonés" en 2020* [en ligne]. 02/10/2009. https://www.actu-environnement.com/ae/news/plan_national_developpement_vehicules_8476.php4

ADEME, 2013. *Élaboration selon les principes des ACV des bilans énergétiques, des émissions de gaz à effet de serre et des autres impacts environnementaux*. Étude réalisée pour le compte de l'ADEME par Gingko21 et PE INTERNATIONAL. Disponible sur : http://www.ademe.fr/elaboration-selon-principes-acv-bilans-energetiques-emissions-gaz-a-effet-serre-autres-impacts-environnementaux

ADEME, 2016. *Changer les comportements, faire évoluer les pratiques sociales vers plus de durabilité. L'apport des sciences humaines et sociales pour comprendre et agir*. Septembre 2016. 183 p. https://www.ademe.fr/changer-comportements-faire-evoluer-pratiques-sociales-vers-plus-durabilite

ADEME, 2017. *Etude d'évaluation sur les services vélos*. ADEME, INDDIGO. Septembre 2017. https://www.ademe.fr/etude-devaluation-services-velos

ADEME, 2018a. *Un mix de gaz 100 % renouvelable en 2050 ?* Synthèse de l'étude. 22 p. https://www.ademe.fr/mix-gaz-100-renouvelable-2050

ADEME, 2018b. 2018. *Panorama et évaluation des différentes filières d'autobus urbains*. ADEME, Denis Bénita, AJBD, David Fayolle. 100 p. https://www.ademe.fr/panorama-evaluation-differentes-filieres-dautobus-urbains

ADEME, 2019a. *Représentations sociales du changement climatique, 20ème vague*. 184 p. https://www.ademe.fr/representations-sociales-changement-climatique-20-eme-vague

ADEME, 2019b. *Evaluation des impacts de 3 scénarios de développement des biocarburants pour la LTECV*. Rapport ADEME-FranceAgriMer, I Care & Consult, IFPEN. 73 p. https://www.ademe.fr/evaluation-impacts-3-scenarios-developpement-biocarburants-ltecv

ADEME, 2020a. *Impact économique et potentiel de développement des usages du vélo en France en 2020*. Inddigo, Vertigo Lab, DGE, DGITM, FFC. https://www.ademe.fr/impact-economique-potentiel-developpement-usages-velo-france-2020

ADEME, 2020b. *Télétravail, (Im)mobilité et modes de vie. Étude du télétravail et des modes de vie à l'occasion de la crise sanitaire de 2020*. https://www.ademe.fr/teletravail-immobilite-modes-vie

ADEME, 2020c. *Bonus et malus écologiques en 2020* [en ligne]. 2 juin 2020. https://particuliers.ademe.fr/finances/aides-aux-deplacements/bonus-et-malus-ecologiques-en-2020

ADEME, IFPEN, 2018. *Bilan transversal de l'impact de l'électrification par segment*. Projet E4T. 22 p. https://www.ademe.fr/bilan-transversal-limpact-lelectrification-segment

ADEME, RFF, SNCF, 2009. *1er bilan carbone ferroviaire global. La Ligne à Grande Vitesse Rhin-Rhône au service d'une Europe durable*. http://www.side.developpement-durable.gouv.fr/PDLO/doc/SYRACUSE/165590/1er-bilan-carbone-ferroviaire-global-la-ligne-a-grande-vitesse-rhin-rhone-au-service-d-une-europe-du

ADETEC, 2019. *Les déplacements dans les villes moyennes : résultats et facteurs de réussite*. Rapport d'expertise. Association Qualité Mobilité. 325 p. https://www.fnaut.fr/actualite/etudes-et-debats/795-les-deplacements-dans-les-villes-moyennes-resultats-et-facteurs-de-reussite-bruno-cordier-adetec

ATEE, 2014. *Le bioGNV : une solution française de mobilité durable*. Livre blanc du GNV. 40 p. https://france-biomethane.fr/2014/03/10/livre-blanc-biognv-2014/

AVERE, 2020a. *Baromètre annuel de la mobilité électrique. Près de 70 000 véhicules légers rechargeables immatriculés en 2019 !* 9 janvier 2020. 4 p. http://www.avere-france.org/Site/Article/?article_id=7764

AVERE, 2020b. *Baromètre annuel : les ventes de véhicules électriques d'occasion ont bondi de + 55 % en 2019 !* [en ligne]. 27 janvier 2020. http://www.avere-france.org/Site/Article/?article_id=7779

BCO2 Ingénierie, 2013. *Bilan carbone de l'électricité* [en ligne]. Dernière mise à jour 07/2013. Consulté le 02/09/2020. http://www.bco2.fr/en._electrique_132.htm

BDO-BIPE, 2020. *Evolution du mix powertrain des véhicules légers en Europe de 2018 à 2035*. Note technique du WAPO 2019. Mars 2020. PFA. https://pfa-auto.fr/wp-content/uploads/2020/04/DT_CRA_Evolution_du_mix_energetique_VF_PFA-WAPO-2019-v070420201.pdf

Beauvais, J.M., 2020. *Prix réel du carburant, séries 1970-2018*. Fichier Excel.

Bihouix, P., 2014. *L'Âge des low tech. Vers une civilisation techniquement soutenable*. Seuil, Anthropocène. 336 p.

BL évolution 2020. *Climat - pouvons-nous (encore) prendre l'avion ?* 104 p. https://www.bl-evolution.com/publication/climat-pouvons-nous-encore-prendre-lavion/

Blaizot, S., Amoros, E., Papon, F., Haddak, M. M., 2012. *Accidentalité à Vélo et Exposition au Risque (AVER) - Risque de traumatismes routiers selon quatre types d'usagers*. https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00768484

Borken-Kleefel, J., Berntsen, T., Fuglestvedt, J., 2010. *Specific Climate Impact of Passenger and Freight Transport*. Environ. Sci. Technol. 2010, 44, 15, 5700–5706. https://doi.org/10.1021/es9039693

Carbone 4, 2019. *Biométhane et climat font-ils bon ménage ?* 17 juin 2019. 12 p. http://www.carbone4.com/publication-biomethane-climat/

CAS, 2011. *La voiture de demain : carburants et électricité*. Rapport de la mission présidée par Jean Syrota. 332 p. http://archives.strategie.gouv.fr/cas/content/rapport-la-voiture-de-demain-carburants-et-electricite-0.html

CCC, 2020. *Les propositions de la Convention Citoyenne pour le Climat*. Rapport final, Version corrigée du 26 juin 2020. https://propositions.conventioncitoyennepourleclimat.fr/

CCFA, 2020. *Le marché automobile français*. Août 2020. Publié le 01/09/2020. https://ccfa.fr/dossiers-de-presse/

CGDD, 2010. La mobilité des Français. Panorama issu de l'enquête nationale transports et déplacements 2008. 228 p. https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/la-mobilite-des-francais-panorama-issu-de-lenquete-nationale-transports-et-deplacements-2008

CGDD, 2013. *Consommer local, les avantages ne sont pas toujours ceux que l'on croit*. Le point sur, n° 158, Mars 2013. http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/document.html?id=Temis-0078107

CGEDD, 2017. *Actualisation des analyses sectorielles du rapport du CGEDD. Annexe thématique sur les transports*. 246 p. https://cgedd.documentation.developpement-durable.gouv.fr/notice?id=Affaires-0009469

Chanut, S., 2019. *Les déplacements dans les villes moyennes*. Présentation. Colloque FNAUT, 10 octobre 2019.

Chassignet, M., 2019. *Commerces de proximité : en finir avec le dogme du « no parking, no business »*. Alternatives Economiques, 11/12/2019. https://blogs.alternatives-economiques.fr/chassignet/2019/12/12/commerces-de-proximite-en-finir-avec-le-dogme-du-no-parking-no-business

CITEPA, 2020. *Secten – le rapport de référence sur les émissions de gaz à effet de serre et de polluants atmosphériques en France*. https://www.citepa.org/fr/secten/

Climobil, 2020. *Voiture thermique ou électrique ?* [en ligne]. https://climobil.connecting-project.lu/

Consilium, 2019. *Réduction des émissions: le Conseil adopte des normes d'émissions de CO_2 pour les poids lourds* [en ligne]. Conseil de l'UE, Communiqué de presse, 13 juin 2019. https://www.consilium.europa.eu/fr/press/press-releases/2019/06/13/cutting-emissions-council-adopts-co2-standards-for-trucks/

Cordiez, M., 2020. *Décarbonons l'hydrogène avant d'en promouvoir les usages* [en ligne]. l'EnerGEEK, 29 juillet 2020. https://lenergeek.com/2020/07/29/decarbonons-lhydrogene/

CRE, 2019. *Le verdissement du gaz*. Comité de prospective de la CRE. 52 p. https://www.eclairerlavenir.fr/rapports/rapport-2019-gt1/

Creutzig, F., Fernandez, B., Haberl, H., Khosla, R., Mulugetta, Y., Seto, K. C., 2016. *Beyond Technology: Demand-Side Solutions for Climate Change Mitigation*. Annual Review of Environment and Resources, Volume 41, Pages 173–198. https://doi.org/10.1146/annurev-environ-110615-085428

Crozet, Y., 2017. *Économie de la vitesse : Ivan Illich revisité*. L'Économie politique, Scop-Alternatives économiques, 2017, Les révolutions de la mobilité, pp.24-37. https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01685277

Del Pero, F., Delogu, M., Pierini, M., 2017. *Life Cycle Assessment in the automotive sector: a comparative case study of Internal Combustion Engine (ICE) and electric car*. Procedia Structural Integrity, Volume 12, pp. 521-537. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2018.11.066

Deloitte, Ballard, 2020. *Fueling the Future of Mobility Hydrogen and fuel cell solutions for Transportation*. Volume 1. 104 p. https://info.ballard.com/deloitte-vol-1-fueling-the-future-of-mobility

ECOFYS, 2015. *ILUC Quantification Study of EU Biofuels*. Project Transparency Platform – by Ecofys, IIASA and E4tech. 261 p. http://www.globiom-iluc.eu/

European Commission, 2015. *State of the art on alternative fuels transport systems in the EU*. Final report. July 2015. 126 p. https://ec.europa.eu/transport/themes/urban/studies_en

European Commission, 2017. *Optimal use of biogas from waste streams An assessment of the potential of biogas from digestion in the EU beyond 2020*. March 2017. 158 p. https://ec.europa.eu/energy/studies/optimal-use-biogas-waste-streams-assessment-potential-biogas-digestion-eu-beyond-2020_en

FNH, ECF, 2017. *Le véhicule électrique dans la transition écologique en France*. 22 p. http://www.fondation-nature-homme.org/sites/default/files/vehicule_electrique_synthese.pdf

FNH, Wimoov, 2019. *Baromètre des mobilités du quotidien - Une enquête nationale et trois zooms territoriaux pour évaluer l'évolution vers une mobilité écologique, sociale et solidaire*. Synthèse des résultats. 40 p. http://barometremobilites-quotidien.org/

Fondation Concorde, 2017. *Accompagner la mise en place du télétravail*. 12 p. http://fondationconcorde.com/wp-content/uploads/2017/06/Etude-complète-télétravail.pdf

Forum Vies Mobiles, 2020. *Enquête Nationale Mobilité et Modes de vie*. 48 p. https://fr.forumviesmobiles.org/projet/2019/01/07/enquete-nationale-mobilite-et-modes-vie-12796

France Stratégie, 2019. Comment faire enfin baisser les émissions de CO_2 des voitures. Note d'analyse n°78, juin 2019. Nicolas Meilhan. 12 p. https://www.strategie.gouv.fr/publications/faire-enfin-baisser-emissions-de-co2-voitures

Franceinfo, 2020. *La part des marchandises transportées par le train est-elle vraiment inférieure de moitié en France à ce qu'elle est en Europe?* [en ligne] 24/07/2020. https://www.francetvinfo.fr/replay-radio/le-vrai-du-faux/la-part-des-marchandises-transportees-par-le-train-est-elle-vraiment-inferieure-de-moitie-en-france-a-ce-qu-elle-est-en-europe_4035599.html

Gonzalez-Feliu, J., Henriot, F., Toilier, F., 2009. *Urbanisme commercial et approvisionnement des ménages : Impacts sur la mobilité de quatre scénarios extrêmes*.

Atelier de Recherche: ”Transport et Logistique: Histoire(s) de durabilité, Sep 2009, France. https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-01056133
Gössling, S., 2019. *Celebrities, air travel, and social norms*. Annals of Tourism Research, Volume 79, 102775. https://doi.org/10.1016/j.annals.2019.102775
Hawkins, T., Singh, B., Majeau-Bettez, G., Strømman, A.H., 2012. *Comparative Environmental Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Vehicles*. Journal of Industrial Ecology, Volume 17, Issue 1, pp. 53-64. https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00532.x
HCC, 2019. *Agir en cohérence avec les ambitions*. Rapport annuel neutralité carbone. Juin 2019. 66 p. https://www.hautconseilclimat.fr/publications/rapport-2019/
HCC, 2020. *Redresser le cap, relancer la transition*. Rapport annuel du Haut Conseil pour le Climat, Juillet 2020. 160 p. https://www.hautconseilclimat.fr/publications/rapport-annuel-2020/
Hydrogen Council, 2017. *Hydrogen, scaling up. A sustainable pathway for the globale energy transition*. 80 p. https://hydrogencouncil.com/en/study-hydrogen-scaling-up/
ICCT, IEEP, NNFCC, 2014. *Wasted: Europe's untapped resource. An Assessment of Advanced Biofuels from Wastes & Residues*. 30 p. https://theicct.org/publications/wasted-europes-untapped-resource
ICCT, 2018a. *European vehicle market statistics. Pocketbook 2018/19*. 64 p. https://theicct.org/publications/european-vehicle-market-statistics-20182019
ICCT, 2018b. *The potential for low-carbon renewable methane as a transport fuel in France, Italy, and Spain*. Working paper 2018-28. https://theicct.org/publications/potential-renewable-methane-france-italy-spain
ICCT, 2019. *From laboratory to road: A 2018 update*. https://theicct.org/series/laboratory-road
IEA, 2019. *The Future of Rail. Opportunities for energy and the environment*. 175 p. https://www.iea.org/reports/the-future-of-rail
IEA, 2020. *Global EV Outlook 2020. Entering the decade of electric drive?* Technology report, Paris, June 2020. 276 p. https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020
IEA, ICCT, 2019. *Fuel Economy in Major Car Markets. Technology and policy drivers 2005-2017*. Technology report. 100 p. https://www.iea.org/reports/fuel-economy-in-major-car-markets
IFPEN, 2019. *Etude ACV de véhicules roulant au GNV et bioGNV*. 19 septembre 2019. 24 p. https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/analyse-du-cycle-vie-acv-des-vehicules-fonctionnant-au-gnv-et-biognv
IFPEN, 2020. *Biogaz et biométhane : transformer nos déchets en énergie* [en ligne]. https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/biogaz-et-biomethane-transformer-nos-dechets-en-energie
Insee, 2017. *Partir de bon matin, à bicyclette...* Insee Première, n° 1629, Paru le 17/01/2017. https://www.insee.fr/fr/statistiques/2557426
Insee, 2018a. *Les revenus et le patrimoine des ménages*. 208 p. https://www.insee.fr/fr/statistiques/3549502
Insee, 2018b. *377 000 ménages supplémentaires à l'horizon 2050*. Insee Analyses Hauts-de-France n° 87, Paru le 06/12/2018. https://www.insee.fr/fr/statistiques/3670558#titre-bloc-9
Insee, 2019. *36,6 millions de logements en France au 1er janvier 2019*. Insee Focus n° 173, 11/12/2019. https://www.insee.fr/fr/statistiques/4263935
Insee, 2013. *Les salaires nets annuels moyens - Séries longues*. Insee Résultats. Paru le : 13/06/2013 https://www.insee.fr/fr/statistiques/2122789

IPBES, 2019. *Le rapport de l'évaluation mondiale de la biodiversité et des services écosystémiques. Résumé à l'intention des décideurs*. 60 p. https://ipbes.net/global-assessment

IPCC, 1999 - Penner, J.E., Lister, D.H., Griggs, D.J., Dokken, D.J., McFarland. M. *Special Report on Aviation and the Global Atmosphere*. https://www.ipcc.ch/report/aviation-and-the-global-atmosphere-2/

IRENA, 2017. *Biogas for road vehicles*. Technology brief. International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. 62 p. https://www.irena.org/publications/2017/Mar/Biogas-for-road-vehicles-Technology-brief

JRC, 2015. *The JRC-EU-TIMES model. Bioenergy potentials for EU and neighbouring countries*. European Commission, JRC Science for Policy Report. 176 p. https://ec.europa.eu/jrc/en/publication/eur-scientific-and-technical-research-reports/jrc-eu-times-model-bioenergy-potentials-eu-and-neighbouring-countries

Kärcher, B., 2018. *Formation and radiative forcing of contrail cirrus*. Nat Commun 9, 1824 (2018). https://doi.org/10.1038/s41467-018-04068-0

Koning, M., Conway, A., 2016. *The good impacts of biking for goods: Lessons from Paris city*. Case Studies on Transport Policy, Volume 4, Issue 4, 2016, pp. 259-268. https://doi.org/10.1016/j.cstp.2016.08.007

L'ObSoCo, Chronos, 2017. *L'observatoire des usages émergents de la ville*. Dossier de presse, 16/11/2017. http://lobsoco.com/dossier-de-presse-lobservatoire-des-usages-emergents-de-la-ville/

Cerulogy, 2017. *What role is there for electrofuel technologies in European transport's low carbon future?* Chris Malins. November 2017. https://www.cerulogy.com/electrofuels/

Cerulogy, 2018. *What role for electromethane and electroammonia technologies in European transport's low carbon future?* Addendum to *What role for electrofuel technologies in European transport's low carbon future?* Chris Malins. June 2018. https://www.cerulogy.com/electrofuels/

Mobilités Magazine, 2018. *Le transport ferroviaire français pourra-t-il se passer du diesel ?* dans Mobilités Magazine n°11, février 2018.

MTES, 2017. *Plan climat. 1 planète, 1 plan*. Jeudi 6 juillet 2017. 20 p. https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2017.07.06%20-%20Plan%20Climat.pdf

MTES, 2018a. *Information GES des prestations de transport*. Application de l'article L. 1431-3 du code des transports. Guide méthodologique. 238 p. https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/information-ges-des-prestations-transport

MTES, 2018b. *Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique*. https://www.ecologie.gouv.fr/plan-hydrogene-outil-davenir-transition-energetique

MTES, 2019a. *Le plan vélo et mobilités actives* [en ligne]. https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/plan-velo-et-mobilites-actives

MTES, 2019b. *Réduction des émissions de CO_2 du transport maritime : la France souhaite réguler la vitesse des navires* [en ligne]. 4 avril 2019. https://www.ecologie.gouv.fr/reduction-des-emissions-co2-du-transport-maritime-france-souhaite-reguler-vitesse-des-navires

MTES, 2020. *Stratégie nationale bas-carbone. La transition écologique et solidaire vers la neutralité carbone*. Mars 2020. 192 p. https://www.ecologie.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc

MTES, 2020. *Programmation pluriannuelle de l'énergie*. 22/04/2020. https://www.ecologie.gouv.fr/programmations-pluriannuelles-lenergie-ppe

Munafò, S., 2015. *Cadres de vies, modes de vie et mobilités de loisirs : Les vertus de la ville compacte remises en cause ?* Thèse de doctorat. EPFL – LaSUR. 590 p.

https://fr.forumviesmobiles.org/projet/2016/10/17/cadres-vie-modes-vie-et-mobilites-loisir-2694
négaWatt, 2010. *Contenu CO_2 de l'électricité : une question d'objectifs !* Association négaWatt. Les cahiers de Global Chance, n° 27, janvier 2010. http://www.global-chance.org/IMG/pdf/GC27p39-45.pdf
Newman, P., Kenworthy, J., 1989. *Cities and Automobile Dependence*. 388 p.
NGVA Europe, 2017. *Greenhouse Gas Intensity from Natural Gas study published*. https://www.ngva.eu/medias/greenhouse-gas-intensity-from-natural-gas-study-published/
Ofce, 2020. *L'empreinte carbone des ménages et les effets redistributifs de la fiscalité carbone*. Présentation, Paul Malliet. CEDD, Paris, 31 janvier 2020. 27 p.
ONISR, 2020. *Bilan 2019 de la sécurité routière*. https://www.onisr.securite-routiere.gouv.fr/etat-de-l-insecurite-routiere/bilans-annuels-de-la-securite-routiere/bilan-2019-de-la-securite-routiere
OPECST, 2019. *Fin des véhicules thermiques en 2040, quels scénarios réalistes*. 709 p. http://www.assemblee-nationale.fr/dyn/15/rapports/ots/l15b1766_rapport-information
ORS IDF, 2012. *Les bénéfices et les risques de la pratique du vélo*. Évaluation en Île-de-France. 163 p. https://www.ors-idf.org/nos-travaux/publications/les-benefices-et-les-risques-de-la-pratique-du-velo.html
Paris, 2019. *Le bilan des déplacements à Paris en 2018*. Ville de Paris. 52 p. https://www.paris.fr/pages/les-deplacements-a-paris-en-2018-7426
Pavaux, J., 2019. *Les aides publiques au transport aérien. Aéroports et compagnies aériennes*. Étude réalisée par Jacques Pavaux, pour l'association « Qualité Mobilité ». 30 juin 2019. 96 p. https://www.fnaut.fr/actualite/etudes-et-debats/768-les-aides-publiques-au-transport-aerien-jacques-pavaux
Prudhomme, R., 2019. *Quantitative assessment of the sustainability of greenhouse gas mitigation strategies in the AFOLU sector at the global scale*. Global Changes. Université Paris-Saclay, 2019. English. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-02368885
RAC, 2020. *Climat, que vaut le plan du gouvernement sur l'aérien ?* 8 p. https://reseauactionclimat.org/climat-que-vaut-le-plan-du-gouvernement-pour-laerien/
Razemon, O., 2017. *Comment la France a tué ses villes*. Rue de l'échiquier. 224 p.
Ricardo, 2017. *Heavy-duty vehicles technology potential and cost study*. Final Report for the ICCT. 134 p. https://theicct.org/publications/heavy-duty-vehicles-technology-potential-and-cost-study
RTE, ADEME, 2007. *Le contenu en CO_2 du kWh électrique : Avantages comparés du contenu marginal et du contenu par usages sur la base de l'historique*. Note détaillée.
RTE, 2019. *Enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique*. Résultats détaillés. Mai 2019. 80 p. https://www.rte-france.com/actualites/developpement-du-vehicule-electrique-et-systeme-electrique-une-faisabilite-sereine-et
Searle, S., Malins, C., 2016. *Waste and residue availability for advanced biofuel production in EU Member States*. Biomass and Bioenergy, Volume 89, June 2016, Pages 2-10. https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2016.01.008
SNCF, 2015. *Vers une mobilité sobre en CO_2 : Une opportunité pour vivre mieux ? Regards croisés pour éclairer les choix de société en matière de mobilité des voyageurs*. 42 p. https://www.sncf.com/fr/groupe/newsroom/etude-facteur4
Solagro, 2016. *Le scénario Afterres 2050, version 2016*. 96 p. https://afterres2050.solagro.org/a-propos/le-projet-afterres-2050/
T&E, 2018a. *How to decarbonize the European transport by 2050*. November 27, 2018. 26 p. https://www.transportenvironment.org/publications/how-decarbonise-european-transport-2050

T&E, 2018b. *CNG and LNG for vehicles and ships the facts*. October 2018. 72 p. https://www.transportenvironment.org/publications/natural-gas-powered-vehicles-and-ships-%E2%80%93-facts

T&E, 2020. *How clean are electric cars. T&E's analysis of electric car lifecycle CO_2 emissions*. April 2020. 33 p. https://www.transportenvironment.org/news/how-clean-are-electric-cars

TSP, 2017. *Décarboner la mobilité dans les zones de moyenne densité. Moins de carbone, plus de lien*. Rapport du Groupe de Travail dirigé par Francisco Luciano. 118 p. https://theshiftproject.org/article/publication-du-rapport-decarboner-la-mobilite-dans-les-zones-de-moyenne-densite-cest-possible/

TSP, 2020. *Crise(s), climat : préparer l'avenir de l'aviation. Propositions de contreparties à l'aide publique au secteur aéronautique et à l'aviation*. 27 mai 2020. Rapport, 58 p. https://theshiftproject.org/article/climat-preparer-avenir-aviation-propositions-shift-contreparties/

UNEP, 2017. *Green Technology Choices. The Environmental and Resource Implications of Low-Carbon Technologies*. International Resource Panel Report. 76 p. https://www.resourcepanel.org/reports/green-technology-choices

URF, 2019. *Faits et chiffres. Statistiques de mobilités en France et en Europe*. 142 p. https://www.unionroutiere.fr/ publications/faits-et-chiffres/

Van Mierlo, J., Messagie, M., Rangaraju, S., 2017, *Comparative environmental assessment of alternative fueled vehicles using a life cycle assessment*. Transportation Research Procedia, Volume 25, pp. 3435-3445. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.244

Weiss, M., Irrgang, L., Kiefer, A., Roth, J., Helmers, E., 2020. *Mass- and power-related efficiency trade-offs and CO2 emissions of compact passenger cars*. Journal of Cleaner Production, Volume 243, 118326. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118326

Conclusion générale

A l'issue des explorations sur les défis que représente la transition énergétique pour le secteur des transports en France, il est important d'en reprendre la problématique, les principaux éléments étudiés, et les conclusions auxquelles cela mène.

La thèse s'inscrit dans un contexte d'objectifs climatiques de limitation du réchauffement à **+2 °C** maximum d'ici 2100 au niveau mondial, et de **neutralité carbone** en 2050 en France. Pour atteindre ce dernier objectif, la stratégie nationale bas-carbone (**SNBC**) vise pour le secteur des transports une sortie quasiment complète du pétrole d'ici 2050. Aussi elle identifie **5 leviers** sur lesquels il est possible d'agir pour réduire les émissions des transports de voyageurs et de marchandises : la demande de transport, le report modal, le taux de remplissage des véhicules, l'efficacité énergétique, et l'intensité carbone de l'énergie.

Dans ce contexte, la thèse formule le questionnement suivant : **comment aligner le secteur des transports sur l'objectif de neutralité carbone en France à l'horizon 2050 ?**

Pour y répondre, la thèse développe **quatre chapitres ou explorations**, entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement.
Dans le premier chapitre, une décomposition des émissions **passées** des transports est utilisée, pour suivre la contribution relative des 5 facteurs d'évolution de la SNBC entre 1960 et 2017.
Dans le second chapitre, cette même décomposition est appliquée à 13 scénarios voyageurs et 10 scénarios marchandises français, pour identifier les potentiels de ces 5 leviers **d'ici 2050**.
Le troisième chapitre s'intéresse à la **vitesse** des mobilités, son impact sur les comportements de mobilité (dont les km parcourus), et aux déterminants de son évolution au cours du temps.
Le quatrième chapitre a pour but de mettre en évidence les implications pour les **politiques publiques**, avec une vision plus large du potentiel de baisse d'émissions, des conditions de réalisation, et des coûts et bénéfices sociétaux des 5 leviers de décarbonation.

Le premier enseignement de la thèse est la corrélation entre vitesse moyenne des déplacements, nombre de kilomètres parcourus et émissions par personne sur 1960-2017. Sur cette période, le principal facteur d'évolution des émissions a été la demande, aussi bien pour les transports de voyageurs que de marchandises. Les autres facteurs étudiés se sont principalement compensés entre eux. Ainsi les émissions unitaires, par kilomètre ou tonne.km transportée, sont restées relativement stables, les gains technologiques permettant seulement de compenser les reports vers la voiture individuelle et les poids-lourds. Dans ce contexte, la forte hausse de la demande sur la seconde moitié du XXème siècle a entrainé les émissions des transports à la hausse. Pour la mobilité des voyageurs, la hausse des kilomètres parcourus a été portée par la hausse de la population, et surtout par le nombre de kilomètres par personne. C'est l'accélération de la vitesse des déplacements qui a rendu possible cette multiplication par plus de 3 des kilomètres parcourus par personne, puisque les temps de déplacement n'ont que peu évolué sur la période, toujours proches d'une heure par jour, en moyenne.

Le second enseignement est le passage de ces 3 variables par un maximum au début des années 2000 pour la mobilité intérieure. La hausse de la vitesse et de la demande s'est en

effet arrêtée au début du XXIème siècle, par la conjonction de facteurs structurels, tels que la tendance à la saturation des taux de motorisation des ménages, et des facteurs conjoncturels, en particulier la hausse des prix du pétrole et la mise en place des radars. Ces facteurs expliquent en grande partie la baisse des émissions du transport intérieur de voyageurs depuis le début des années 2000, tandis que les émissions du transport de marchandises ont essentiellement baissé suite à la crise économique de 2008, qui a fait chuter la demande.

Le troisième enseignement concerne le découplage très fort entre demande et émissions de CO_2 prévu dans les années à venir et d'ici 2050 par la stratégie nationale bas-carbone. Alors que les baisses d'émissions unitaires (soit le découplage entre émissions et demande) sont de -0,5 %/an pour les voyageurs et -0,6 %/an pour les marchandises depuis le début des années 90, la SNBC prévoit une baisse de ces émissions unitaires de respectivement -3,8 % et -2,2 %/an entre 2015 et 2030, soit une très nette accélération qui n'est pas encore visible pour le moment. Pour fortement réduire les émissions, tous les scénarios de prospectives montrent de fortes baisses d'émissions par les facteurs technologiques d'efficacité énergétique et d'intensité carbone de l'énergie, tandis qu'ils sont plus contrastés sur les évolutions vers plus de sobriété. La stratégie nationale bas-carbone apparaît parmi les scénarios fortement tournés vers la technologie, tandis que les leviers de sobriété sont bien moins mobilisés.

Le quatrième enseignement est pourtant qu'il faudra combiner une ambition forte sur la technologie ET la sobriété pour avoir une chance de respecter les objectifs de court terme et la contribution des transports à la neutralité carbone, sans compromettre la décarbonation des autres secteurs. La technologie s'avère indispensable à court terme pour le levier d'efficacité énergétique, et à plus long terme pour sortir du pétrole, en développant les motorisations et énergies alternatives. La sobriété, qui intéresse les facteurs de demande, de report modal, de remplissage, et en partie d'efficacité (poids, vitesse), permettrait d'effectuer environ la moitié du chemin comparé à un scénario tendanciel, facilitant en retour la décarbonation de l'énergie. Surtout, technologie et sobriété, ainsi que les 5 leviers de décarbonation, sont à mobiliser simultanément et en interaction, afin de profiter des avantages de chacun, tout en minimisant leurs inconvénients respectifs, parfois opposés. Si la technologie présente des risques d'effets rebonds, de ressources limitées, d'impacts environnementaux indirects et de coûts importants, la sobriété permet de limiter ces risques. Les freins à lever pour la sobriété sont cependant les changements de comportement, l'acceptabilité ou encore les impacts possibles sur l'emploi.
L'analyse plus en détails des leviers montre qu'il n'existe pas de solutions miracles ou faciles, mais qu'une multitude d'évolutions est nécessaire, dont on peut citer les plus significatives : une électrification du parc à orienter vers une mobilité plus sobre, la modération du trafic aérien, la question de la tarification carbone et du financement de la transition, la modération des trafics de marchandises en poids-lourds et maritime (dont la décarbonation sera difficile et n'est que très peu engagée, comme pour l'aérien), le développement du vélo, du ferroviaire, du covoiturage, du biogaz, ou encore les baisses de poids et de vitesse des véhicules.

Par le **passé**, la **technologie** a ainsi été insuffisante pour réduire les émissions, dans un contexte d'**accélération** des transports.
A l'**avenir**, technologie et **sobriété** devront être combinées pour décarboner les transports, un défi qui pourrait aller de pair avec un certain **ralentissement** des mobilités.

Annexes

1. Annexes du chapitre 2 sur les scénarios

1.1.Résultats des décompositions des scénarios à 2050 et 2030

Contrairement aux figures des décompositions additives dans le texte, le niveau des émissions de départ n'a pas été ramené aux émissions de la SNBC. Les résultats bruts sont donc donnés.

Scénarios voyageurs

Tableau 23 : Détails des résultats des décompositions des 13 scénarios voyageurs à l'horizon 2050

Institut	MTES		EpE	négaWatt		ADEME	IEA		IDDRI		SNCF		
Scénario	**AME**	**SNBC**	**ZEN**	**Tend**	**nW**	**Vision**	**NPS**	**EV30**	**MOB**	**TECH**	**Ultra**	**Alter**	**Proxi**
Période	2015	2015	2015	2015	2015	2010	2015	2015	2010	2010	2013	2013	2013
	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050
CO_2 réf	90	90	107	88	88	86	117	117	75	75	95	95	95
CO_2 2050	67	1	5	54	0	7	43	5	13	10	51	34	29
Voyageurs - Décomposition multiplicative													
CO_2	**0,74**	**0,01**	**0,04**	**0,62**	**0,00**	**0,09**	**0,37**	**0,04**	**0,17**	**0,13**	**0,53**	**0,36**	**0,30**
DT	1,30	1,26	1,27	1,21	1,09	0,79	1,06	0,90	0,95	1,16	1,30	1,11	1,01
RM	0,98	0,92	0,92	0,99	0,85	0,82	0,96	0,79	0,79	0,99	1,00	0,87	0,82
TR	1,00	0,89	0,82	0,85	0,81	1,05	1,01	1,00	0,87	1,02	1,06	1,03	1,02
EE	0,64	0,32	0,27	0,63	0,42	0,43	0,50	0,33	0,52	0,50	0,62	0,57	0,57
IC	0,91	0,03	0,17	0,97	0,00	0,29	0,72	0,19	0,51	0,23	0,63	0,63	0,63
Voyageurs - Décomposition additive													
ΔCO_2	**-23,5**	**-89,5**	**-102,7**	**-33,3**	**-87,5**	**-78,4**	**-73,4**	**-111,7**	**-62,0**	**-64,9**	**-44,6**	**-61,3**	**-66,5**
ΔDT	19,2	10,7	12,0	14,5	4,5	-8,5	4,2	-1,8	-0,2	6,8	18,5	6,2	0,5
ΔRM	-1,8	-4,5	-3,5	-1,1	-6,2	-7,2	-3,0	-9,4	-8,7	-0,4	-0,1	-8,2	-11,4
ΔTR	-0,2	-5,0	-11,6	-11,3	-9,9	-1,3	0,7	0,7	-7,4	1,2	4,4	2,0	1,1
ΔEE	-33,6	-47,2	-68,9	-33,1	-37,2	-31,3	-54,8	-59,5	-25,9	-31,0	-34,2	-33,8	-31,3
ΔIC	-7,1	-43,5	-30,8	-2,3	-38,8	-30,0	-20,5	-41,7	-19,8	-41,5	-33,1	-27,6	-25,4

Tableau 24 : Détails des résultats des décompositions de 10 des 13 scénarios voyageurs à l'horizon 2030

Institut	MTES		EpE	négaWatt		ADEME	IEA		IDDRI		SNCF		
Scénario	**AME**	**SNBC**	**ZEN**	**Tend**	**nW**	**Vision**	**NPS**	**EV30**	**MOB**	**TECH**	**Ultra**	**Alter**	**Proxi**
Période	2015	2015	2015	2015	2015	2010	2015	2015	2010	2010			
	2030	2030	2030	2030	2030	2030	2030	2030	2030	2030			
CO_2 réf	90	90	107	88	88	86	117	117	75	75			
CO_2 2030	73	55	59	75	45	40	73	57	36	42			
Voyageurs - Décomposition multiplicative													
CO_2	**0,81**	**0,61**	**0,55**	**0,85**	**0,51**	**0,46**	**0,62**	**0,49**	**0,48**	**0,56**			
DT	1,09	1,09	1,10	1,12	1,06	0,90	1,02	1,01	1,02	1,09			
RM	0,99	0,96	0,98	0,99	0,94	0,93	0,98	0,94	0,89	0,99			
TR	1,00	0,96	0,90	0,93	0,88	0,94	1,01	1,01	0,89	1,02			
EE	0,77	0,69	0,58	0,84	0,65	0,71	0,66	0,60	0,71	0,67			
IC	0,97	0,88	0,97	0,99	0,89	0,82	0,93	0,85	0,84	0,75			
Voyageurs - Décomposition additive													
ΔCO_2	**-17,4**	**-35,2**	**-48,8**	**-12,9**	**-42,7**	**-46,2**	**-44,3**	**-59,6**	**-39,3**	**-33,4**			
ΔDT	7,0	6,5	7,7	9,1	4,2	-5,1	2,1	0,6	1,3	5,3			
ΔRM	-0,9	-3,3	-2,0	-0,7	-3,7	-4,6	-2,2	-5,2	-6,1	-0,3			
ΔTR	0,0	-2,7	-8,4	-5,7	-8,7	-3,8	0,5	0,7	-7,1	1,1			
ΔEE	-20,9	-26,7	-44,5	-14,6	-28,3	-21,0	-38,1	-43,0	-18,6	-23,4			
ΔIC	-2,6	-9,0	-1,6	-1,0	-6,1	-11,7	-6,5	-12,7	-8,9	-16,1			

Scénarios marchandises

Tableau 25 : Détails des résultats des décompositions des 10 scénarios marchandises à l'horizon 2050

Institut	MTES		EpE	négaWatt		ADEME	IEA		IDDRI	
Scénario	**AME**	**SNBC**	**ZEN**	**Tend**	**nW**	**Vision**	**NPS**	**EV30**	**S1**	**S2**
Période	2015	2015	2015	2015	2015	2010	2015	2015	2010	2010
	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050	2050
CO_2 réf	33	33	30	30	30	39	45	45	30	30
CO_2 2050	42	0	2	24	0	5	21	8	0	0
Marchandises - Décomposition multiplicative										
CO_2	**1,29**	**0,00**	**0,08**	**0,81**	**0,00**	**0,12**	**0,47**	**0,19**	**0,00**	**0,00**
DT	1,79	1,39	1,30	0,89	0,83	1,33	0,90	0,94	1,54	0,74
RM	0,93	0,96	1,02	1,02	0,83	0,78	0,90	0,89	0,99	0,74
TR	0,95	0,86	0,92	0,97	0,88	0,97	0,92	0,85	0,96	0,81
EE	0,82	0,48	0,37	0,95	0,70	0,40	0,68	0,47	0,47	0,47
IC	0,99	0,00	0,17	0,98	0,00	0,30	0,94	0,56	0,00	0,00
Marchandises - Décomposition additive										
ΔCO_2	**9,5**	**-32,6**	**-27,2**	**-5,6**	**-29,7**	**-34,7**	**-23,7**	**-36,3**	**-29,6**	**-29,6**
ΔDT	21,3	7,2	4,6	-3,2	-3,2	7,3	-3,5	-2,0	7,1	-2,5
ΔRM	-2,5	-0,8	0,4	0,5	-2,7	-4,5	-3,6	-3,4	-0,6	-3,0
ΔTR	-1,9	-3,0	-1,6	-0,9	-2,7	-0,9	-2,9	-4,2	-0,2	-2,7
ΔEE	-7,1	-11,5	-17,2	-1,3	-5,3	-18,2	-11,7	-16,0	-9,0	-5,5
ΔIC	-0,2	-24,4	-13,3	-0,6	-15,9	-18,4	-2,0	-10,5	-26,9	-15,9

Tableau 26 : Détails des résultats des décompositions des 10 scénarios marchandises à l'horizon 2030

Institut	MTES		EpE	négaWatt		ADEME	IEA		IDDRI	
Scénario	**AME**	**SNBC**	**ZEN**	**Tend**	**nW**	**Vision**	**NPS**	**EV30**	**S1**	**S2**
Période	2015	2015	2015	2015	2015	2010	2015	2015	2010	2010
	2030	2030	2030	2030	2030	2030	2030	2030	2030	2030
CO_2 réf	33	33	30	30	30	39	45	45	30	30
CO_2 2030	35	27	20	27	19	27	32	26	18	12
Marchandises - Décomposition multiplicative										
CO_2	**1,08**	**0,84**	**0,68**	**0,92**	**0,63**	**0,69**	**0,70**	**0,57**	**0,60**	**0,41**
DT	1,29	1,16	1,12	0,94	0,91	1,16	0,94	0,96	1,27	0,91
RM	0,97	0,99	1,01	1,01	0,95	0,97	0,94	0,93	0,98	0,89
TR	0,95	0,95	0,96	0,99	0,91	0,97	0,95	0,92	1,00	0,88
EE	0,91	0,85	0,65	0,98	0,88	0,75	0,86	0,78	0,77	0,81
IC	1,00	0,91	0,95	0,99	0,91	0,84	0,98	0,89	0,63	0,71
Marchandises - Décomposition additive										
ΔCO_2	**2,5**	**-5,2**	**-9,5**	**-2,5**	**-11,0**	**-12,2**	**-13,2**	**-19,2**	**-11,8**	**-17,4**
ΔDT	8,7	4,8	2,8	-1,7	-2,3	5,0	-2,4	-1,7	5,9	-1,8
ΔRM	-1,2	-0,5	0,3	0,4	-1,0	-0,9	-2,5	-2,7	-0,6	-2,5
ΔTR	-1,8	-1,7	-1,0	-0,4	-2,4	-0,9	-2,1	-3,0	0,0	-2,4
ΔEE	-3,1	-4,9	-10,5	-0,6	-3,2	-9,8	-5,5	-8,2	-6,3	-3,9
ΔIC	-0,1	-3,0	-1,1	-0,2	-2,1	-5,7	-0,7	-3,6	-10,8	-6,8

1.2.Décompositions additives de la SNBC, comparée au passé

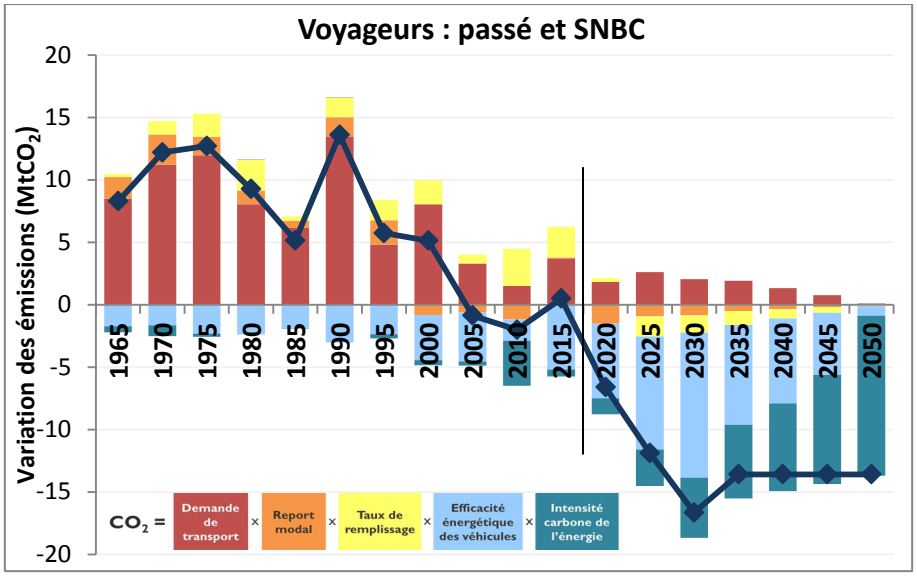


Figure 94 : Décomposition des émissions passées (1960-2015) du transport de voyageurs et de la SNBC d'ici 2050
(forme additive, pas de 5 ans)

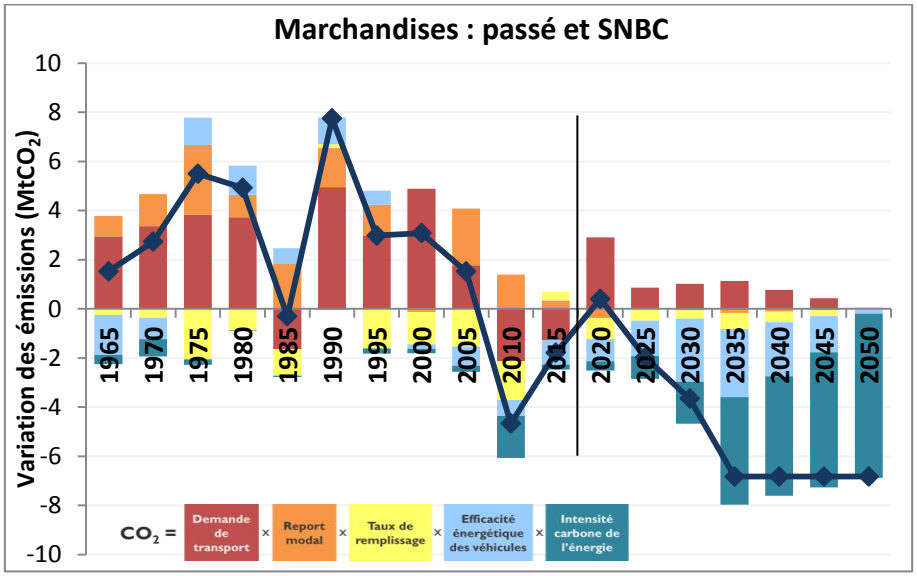


Figure 95 : Décomposition des émissions passées (1960-2015) du transport de marchandises et de la SNBC d'ici 2050
(forme additive, pas de 5 ans)

2. Annexes du chapitre 3 sur la vitesse

2.1. Estimations des temps et kilomètres professionnels

Les **kilomètres et temps de déplacements professionnels** sont pour partie inclus dans la décomposition, en raison des données de trafics utilisées pour l'analyse. Ainsi sont comptés l'ensemble des déplacements en voitures particulières et l'ensemble des déplacements qui sont réalisés avec ces véhicules, y compris dans le cadre professionnel : chauffeurs de taxis et VTC (correspondant à environ 0,2 min/jour/pers au niveau agrégé), déplacements pour rendez-vous professionnels, déplacements des commerciaux, etc. Sont également inclus 60 % des trafics en véhicules utilitaires légers (VUL), proportion estimée représenter du transport de voyageurs (et transport de marchandises pour les 40 % restants).

Les principales estimations qui sont réalisées ici concernent les déplacements réalisés en tant que conducteurs ou chauffeurs : de poids-lourds, des 40 % de VUL, des trains, avions, bus et cars, bateaux. Est également inclus le personnel à bord, en appliquant un taux de remplissage plus important pour les trains et avions, par type d'activités ou de vols (le conducteur seul pour le métro, jusqu'à 3,5 personnes en moyenne pour le TGV ; 5 à 10 personnes des vols métropolitains à l'Outre-mer).

Enfin, les chiffres du CITEPA (2020 ; base OMINEA) donnent des estimations pour le nombre d'heure pour les engins agricoles et sylvicoles (auxquels sont accordés des vitesses moyennes de 8 et 5 km/h), et des kilomètres parcourus en engins industriels (plus de 5 Md veh.km ; chiffre qui semble surestimé, demande d'informations en cours au CITEPA).

Le tableau ci-dessous donne la répartition des hypothèses et résultats, depuis les données de trafics (en veh.km) à la conversion en kilomètres parcourus (voy.km), la vitesse, et les temps et distances de déplacements que cela représente, une fois ramenés à la population entière.

Tableau 27 : Estimation des temps et kilomètres parcourus dans le cadre professionnel, hors analyse
Le données grisées sont les données brutes récupérées, données de trafic généralement ; TR : taux de remplissage

	Md veh.km	TR	Md voy.km	Vitesse	Md h	min/jr	km/jr
40% VUL	46,8	1,1	51,5	47	1,1	2,8	2,2
Poids-lourds	28,7	1	28,7	43	0,7	1,7	1,2
Bus et cars	3,8	1	3,8	31	0,13	0,32	0,2
Ferroviaire	0,5	1,9	1,0	73	0,014	0,03	0,04
Fret fer	0,07	1,2	0,08	60	0,001	0,003	0,003
Fret fluvial	0,01	2	0,01	10	0,001	0,004	0,001
Avion	1,1	7,6	8,5	728	0,012	0,03	0,4
Agri + Sylviculture	3,9	1	3,9	8	0,49	1,2	0,2
Industrie	5,3	1	5,3	20	0,3	0,6	0,2
TOTAL	90		103		2,6	**6,7**	**4,3**

Le tableau permet d'estimer des temps de déplacements et distances supplémentaires de **6,7 minutes** et de **4,3 km** journaliers ramené à l'ensemble de la population, ce qui correspond respectivement à environ 11 % et 8 % des temps et distances de déplacements de la décomposition. Ces ordres de grandeur sont relativement robustes car ils reposent sur des données officielles de trafics pour les modes de transport. Les incertitudes sont plus fortes pour les veh.km d'engins agricoles et de sylviculture, et pour l'industrie.

Les chiffres les plus significatifs sont pour les **VUL et poids-lourds**, qui représentent 2/3 des temps estimés et plus de 3/4 des distances. Les bus et cars, et les engins agricoles et de sylvicultures suivent pour les temps de transport, et l'avion en termes de distances.

2.2.Estimations des temps de marche au quotidien

Les **estimations pour la marche** visent à donner des ordres de grandeur sur ce qu'elle pourrait représenter pour différents usages, en termes de temps de déplacements et de distances. Si les kilométrages que représentent ces usages complémentaires par rapport au total des mobilités sont relativement faibles, en revanche les temps de déplacements sont bien plus importants. Ils ne sont généralement pas comptés dans les déplacements, mais pourraient en réalité être considérés comme tels. Ainsi pourrait-on compter les distances : dans les couloirs d'un supermarché, dans le foyer, dans le jardin, au travail, lors d'activités physiques et de loisirs ? **Est-ce que ces distances seraient significatives ?**

C'est à cette dernière question que souhaite répondre cette évaluation. Comme pour les données d'enquêtes de mobilité, où les temps en marche sont généralement relativement imprécis et possiblement sous-estimés, l'analyse ici effectuer ne peut pas être précise non plus, en raison du manque de données disponibles. Il s'agit donc de fournir des ordres de grandeur les plus crédibles possibles.

L'option choisie a été d'estimer des vitesses ou des pourcentages de marche, affectés à différentes activités des enquêtes emploi du temps (Eurostat, 2004 ; Brousse, 2015). Elles ont le mérite de permettre de voir quels pourraient être les postes les plus significatifs, au-delà de la marche utilisée dans le cadre des déplacements (Tableau 28).

Tableau 28 : Estimation des temps et distances de marche à pied, hors déplacements

Les enquêtes emploi du temps donnent des temps par activité ; des temps puis des distances de marche en sont déduits

Domaine	Activité	Min/jour		% marche	Marche (min)		Vitesse	Km/jour
Loisirs	Marche, randonnée	18,5		75%	13,9		3,6	0,83
	Sports actifs	8		50%	4,0		5	0,33
	Exercice productif	3		10%	0,3		3,6	0,02
	Promenade chien	4		60%	2,4		3,6	0,14
	TOTAL	29,5			**20,6**			**1,3**
Domestique	Jardinage	13,5		10%	1,4		3	0,07
	Courses et services	32		15%	4,8		2,5	0,20
	Autres, aller-retours	400		1%	4,0		2,5	0,17
	TOTAL				**10,2**			**0,43**
Professionnel	Travail, études	170		4%	**6,8**		3,6	**0,41**
		170		10%	17,0		3,6	1,02
		170		2%	3,4		3,6	0,20
TOTAL					**37,5**			**2,2**

Concernant les **activités de loisirs**, l'activité la plus significative concerne la marche et la randonnée, une prépondérance qui ressort également sur les pratiques d'activités physiques et sportives de la population (renseignées par différentes enquêtes, dont MVJS et INSEP, 2012). Elles représentent 18,5 min/jour en moyenne entre les hommes et les femmes. Il est supposé que 75 % de ce temps est réellement passé à marcher (25 % restants pour les diverses pauses). Les sports actifs représentent en moyenne 8 min/jour, avec des sports à la fois actifs et relativement rapides (course à pied, ski, roller, football, tennis, équitation, etc.) et des sports lents voire statiques (salle de sport, musculation, tennis de table, etc.). Au vu des niveaux de pratiques de ces activités, et sachant que même des sports très actifs tels que le football ont des vitesses moyennes faibles (par exemple, 5,6 km/h en moyenne pour les joueurs de l'équipe de France lors de France-Argentine, coupe du monde 2018), il est pris des hypothèses de 50 % du temps en mouvement, à 4 km/h de moyenne.

Au vu des faibles distances que représenteraient des activités comme l'équitation ou le ski, ils sont ici comptés comme de la marche loisirs. Le vélo est en revanche séparé, avec les données de la récente étude de l'ADEME (2020).
Parmi les autres activités de loisirs se trouvent : les exercices dits productifs, tels que la pêche, la chasse, ou la cueillette ; la promenade du chien, chiffre non détaillé pour la France, pris en estimation moyenne en Europe de la publication d'Eurostat.
Concernant les **activités domestiques**, sont considérées séparément les activités de jardinage d'un côté, et les courses, shopping et services d'un autre, en raison des importantes proportions de marche qu'ils ont. Les autres activités domestiques regroupent des activités peu mobiles, telles que : environ 4h d'activités de loisir et temps libre (hors promenade, sport et transport), telles que regarder la télévision, lire, etc. ; 2h40 d'activités domestiques (hors jardinage et courses), telles que faire la cuisine, la vaisselle, le ménage, s'occuper des enfants. Il est supposé un qu'1 % du temps de ces activités est passé à marcher (et non pas piétiner). Cela correspond également, sur ces 6h40 à domicile, à 170 mètres parcourus, soit quasiment 10 aller-retours sur une distance de 10 mètres.
Enfin, les enquêtes donnent des **temps de travail et d'études** de 2h50 en moyenne sur l'année, dont l'estimation centrale estime le pourcentage du temps à marcher à 4 %, en considérant que certaines activités sont très statiques tandis que d'autres sont bien plus mobiles (temps de marche dans une usine, agriculteur, dans les couloirs d'une entreprise ou administration, etc.).
Malgré les imprécisions évidentes liées à l'exercice, quelques **ordres de grandeur** ressortent dans la Figure 96 ci-dessous : en particulier la part minoritaire des déplacements dans les estimations, malgré des hypothèses parfois conservatrices pour les autres activités ; la part importante des activités de sport et loisirs, dominées par la marche et la randonnée ; des incertitudes plus importantes sur les activités domestiques et professionnelles, qui cumulées représentent possiblement davantage de temps de marche que les temps de déplacements.

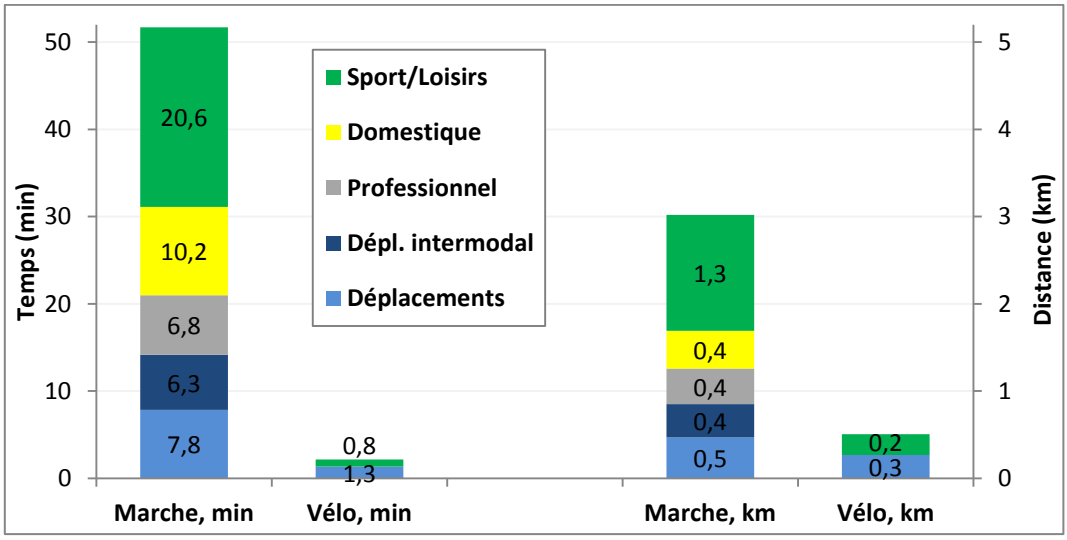


Figure 96 : Estimation des temps et distances totales des déplacements à pied et à vélo

2.3. La congestion routière, frein ou opportunité pour la transition énergétique ?

Résumé

Deux modes de transport, la voiture et le train, sont utilisés pour rejoindre une zone résidentielle à une zone d'emploi le matin à l'heure de pointe. A partir de ce cas simple, l'étude utilise le modèle développé par Wang et al (2017) afin d'étudier la répartition modale, les coûts de congestion et la répartition temporelle des trajets domicile-travail. Une fonction de demande élastique et un calcul des émissions de CO_2 sont ajoutés au modèle. L'étude consiste à identifier les impacts de la variation de la capacité de la route sur les émissions de CO_2 des transports, par une application numérique. En plus des effets négatifs de la congestion sur les émissions individuelles des véhicules, le modèle permet de prendre en compte les effets positifs du report modal et de la baisse de la demande de transport sur les émissions. L'application numérique montre que ces baisses d'émissions peuvent surpasser le surplus liés aux ralentissements des embouteillages, mettant en évidence un nouveau paradoxe des émissions : la baisse de la congestion pourrait entraîner une augmentation des émissions, et inversement. L'étude de ce paradoxe ouvre ainsi des perspectives d'études intéressantes sur la justification de l'extension ou la suppression de voies de circulations et leur impact sur les émissions de CO_2 ou la pollution atmosphérique.

Introduction

La congestion est un sujet étudié depuis de nombreuses décennies dans l'économie des transports et l'économie urbaine. Dès 1776 dans son livre sur la richesse des Nations, Adam Smith suggère que les routes devraient être payées directement par les usagers plutôt que par des taxes prélevées par l'Etat, essentiellement pour des raisons d'équité et de répartition des coûts. Au milieu du XIXème siècle, l'ingénieur Jules Dupuit a été précurseur sur l'économie des transports, et préfigure les travaux de Pigou en 1920 qui suggère la tarification d'une route pour des raisons d'efficacité du système de transport et d'augmentation de l'utilité sociale.

Les modèles de congestion ont été plus largement développés par la suite, en particulier suite aux travaux fondateurs du modèle de Vickrey en 1969, qui a été développé ensuite par Arnott, de Palma et Lindsey (1990). Les bases de ce modèle sont utilisées afin d'étudier la congestion routière dans cet article. L'analyse consiste à étudier la congestion liée aux trajets domicile-travail entre un point A (localisation des habitants) et B (lieu de travail), sujette à un goulot d'étranglement *(bottleneck congestion)* d'une capacité limitée. Le modèle développé tient compte du temps de transport et du temps de retard ou d'avance des usagers, étant supposé que tous les usagers souhaitent arriver à la même heure au bureau. Il sert de base pour le calcul de la tarification optimale de l'infrastructure.

De nombreux articles ont ensuite étudié la congestion routière, lorsqu'il existe une ligne de transport en commun en parallèle de la route, en introduisant différentes fonctions de coût et de demande pour le transport en commun, souvent une ligne de chemin de fer (voir par exemple Tabuchi, 1993 ; Arnott et Yan, 2000 ; Kraus, 2003 ; Basso et Jara-Diaz, 2012). L'analyse porte ainsi sur les tarifications optimales simultanément sur la route et le rail. Des modèles plus complets ont également été construits pour appliquer ces interactions pour l'évaluation de politiques publiques, comme les effets rebonds de la pratique du covoiturage en Île-de-France, notamment dans le cas d'une baisse de la capacité de l'infrastructure routière (Coulombel et al, 2019).

Une littérature s'est développée sur une interaction particulière entre ces modes de transport, connue comme le paradoxe de Downs-Thomson. Ce paradoxe existe lorsque l'augmentation de la capacité d'une route entraine la hausse du coût de transport, aussi bien pour les usagers du rail que de la voiture. Cela s'explique généralement par une réaction en chaîne d'un report modal vers la route, qui peut faire plus que compenser les gains en termes de congestion de l'élargissement, couplée à une moindre utilisation des transports en commun dont la régularité et le prix payé par les usagers se dégradent, dus à leur moindre fréquentation (Mogridge et al, 1987). Le papier reprend ici la formalisation d'un modèle développé pour l'étude de ce paradoxe par Wang et al (2017), qui utilise les analyses de Vickrey (1969), Arnott et al (1990) et Tabuchi (1993) précédemment cités pour l'analyse de la congestion routière, ainsi que les travaux de Wu et Huang (2014) pour les transports en commun.

Le travail ici ne concerne pas directement l'étude du paradoxe de Downs-Thomson, mais la mise en évidence d'un autre paradoxe lié à l'extension de la capacité d'une infrastructure routière, pour l'analyse des trajets domicile-travail à l'heure de pointe, en présence de deux modes de transport. L'analyse se concentre sur les émissions de CO_2, comme l'a fait Nagurney (2000) qui identifiait différents cas d'*emission paradox* illustrés par des applications numériques pour l'ajout d'une route, la baisse de la demande de transport et l'amélioration de l'infrastructure de transport.

L'ambition est ici du même type, en illustrant les possibilités d'*emission paradox* par un exemple numérique basé sur le modèle développé par Wang et al (2017). En particulier, l'impact de la congestion sur les émissions est généralement supposé négatif, prenant en compte à juste titre l'augmentation des consommations liée aux ralentissements et aux phases répétitives d'accélérations et de freinages des embouteillages. Le modèle avec deux modes de transport permet de mettre en évidence le report modal possible qui est induit par la congestion routière, ayant un effet à la baisse des émissions. De plus, l'ajout d'une demande de transport élastique au modèle utilisé met en évidence un second effet positif, lié à la réduction de la demande de transport lorsque les coûts de la congestion augmentent.

L'objectif du papier est donc d'identifier l'occurrence d'un paradoxe d'émission impliquant une augmentation des émissions de CO_2 totales des transports routier et ferroviaire lorsque la capacité de la route augmente et que la congestion routière diminue. La première partie consiste à présenter le modèle analytique utilisé, la seconde partie est consacrée à l'application numérique, et la dernière partie concerne la discussion sur les résultats et les perspectives d'étude.

Description du modèle utilisé

Le modèle de transport

Le modèle considère le trajet domicile-travail le matin entre une localisation résidentielle A et une zone d'emploi B. Deux modes de transport permettent de réaliser le trajet, soit en voiture (mode 1) ou en transport en commun, par exemple le train (mode 2). Le nombre d'usagers qui se rendent de A à B est noté par V, soit la somme des usagers des deux modes : $V = V_1 + V_2$. Tous les usagers souhaitent arriver à la même heure t* au travail. Ils sont sujets à un coût du temps de transport α, tandis que le coût horaire d'une arrivée en avance par rapport à t* est β et le coût d'une arrivée après t* est de γ. Ainsi α, β et γ sont des prix fictifs, avec la relation $\gamma > \alpha > \beta$ (Small, 1982).

Le modèle sur la route

La route est sujette à la congestion, qui est croissante avec le nombre d'usagers V_1. La congestion dépend fortement de la capacité de la route, qui est notée s, et qui est mesurée en nombre de véhicules par heure. Le trajet lorsque la route est libre de voitures dure un temps T_1, tandis que la durée totale du trajet est notée T(t) et elle est variable au cours du temps selon l'heure de départ des usagers. Le coût individuel de tous les usagers de la voiture $C_1(t)$ est équivalent, ceux qui ont un temps de congestion plus court subiront des temps d'avance et de retard au travail plus importants :

$$C_1(t) = \begin{cases} \alpha T(t) + \beta(t^* - t - T(t)) + \tau_1, & t \in [t_{1s}, \dot{t}_1] \\ \alpha T(t) + \gamma(t + T(t) - t^*) + \tau_1, & t \in [\dot{t}_1, t_{1e}] \end{cases}$$

Avec τ_1 le coût monétaire d'un trajet en voiture, t_{1s} l'heure de départ du premier usager, t_{1e} l'heure de départ du dernier usager de la voiture, et $\dot{t}_1$ l'heure de départ pour arriver à t* au bureau.

On suppose que les usagers choisissent leur heure de départ de façon à minimiser leur coût généralisé de transport. En reprenant les analyses d'Arnott et al. (1990) et la formulation de Tabuchi (1993) à laquelle on ajoute ici un temps de transport sans congestion T_1, on trouve les temps de départ suivants :

$$t_{1s} = t^* - \frac{\delta V1}{\beta s} - T_1 \qquad t_{1e} = t^* + \frac{\delta V1}{\gamma s} - T_1 \qquad \dot{t}_1 = t^* - \frac{\delta V1}{\alpha s} - T_1$$

Avec $\delta = \beta\gamma/(\beta+\gamma)$.

Le coût de transport individuel prend une forme simplifiée, avec :

$$C_1 = \alpha T_1 + \tau_1 + \frac{\delta V1}{s}$$

Le premier terme correspond au coût lié au temps de transport en situation sans congestion, le second terme au coût monétaire du trajet, et le dernier terme correspond au coût de la congestion, qui augmente avec le nombre d'usagers et diminue avec la capacité de la route.

Le modèle pour le ferroviaire

La particularité du modèle utilisé pour le transport en train est d'utiliser un coût analogue à la congestion pour la voiture, qui correspond au coût d'inconfort, qui est croissant avec le nombre d'usagers V_2. On retrouve donc une forme du coût de transport comparable dans ses termes :

$$C_2(t) = \begin{cases} \alpha T_2 + \tau_2 + \beta(\dot{t}_2 - t) + \phi\lambda T_2 r_2(t), & t \in [t_{2s}, \dot{t}_2] \\ \alpha T_2 + \tau_2 + \gamma(t - \dot{t}_2) + \phi\lambda T_2 r_2(t), & t \in [\dot{t}_2, t_{2e}] \end{cases}$$

L'équation est ensuite simplifiée, et seuls les résultats définitifs et utiles pour l'application numérique sont ici indiqués. Se référer à Wu et Huang (2014) et à Wang et al. (2017) pour le détail des calculs :

$$C_2 = \alpha T_2 + \tau_2 + \frac{2.\phi.\lambda.T2.V2}{m}$$

Nous avons également le début et la fin des départs des trains qui sont donnés par l'expression :

$$t_{2s} = \dot{t}_2 - \frac{2.\phi.T2.V2}{m\beta} \qquad t_{2e} = \dot{t}_2 + \frac{2.\phi.T2.V2}{m\gamma}$$

L'ajout d'une demande élastique

Dans une extension du modèle, qui nous est utile pour l'objet étudié, il est ajouté une demande élastique, afin de prendre en compte l'effet d'une variation des coûts de transport sur le nombre de personnes qui font le trajet de A à B. Cette variation peut par exemple s'interpréter dans le cas de trajets domicile-travail comme le développement du télétravail, qui sera d'autant plus facilité que les coûts de transport sont élevés.

A l'équilibre, les usagers des deux modes ont des coûts de transport équivalents, ce qui signifie que $C_1 = C_2$. Ainsi on peut noter C comme le coût à l'équilibre avec $C = C_1 = C_2$. On a donc la demande élastique donnée par l'expression suivante :

$$V = b - a.C$$

Nous gardons toujours l'expression $V = V_1 + V_2$.

Il s'agit donc de résoudre un système de 5 équations, avec 5 inconnues que sont V, V_1, V_2, C_1 et C_2 :

$$\begin{cases} V = V_1 + V_2 \\ V = b - a.C \\ C_1 = C_2 \ (= C) \\ C_1 = \alpha T_1 + \tau_1 + \frac{\delta V1}{s} \\ C_2 = \alpha T_2 + \tau_2 + \frac{2.\phi.\lambda.T2.V2}{m} \end{cases}$$

Les calculs sont relativement simples, mais la formulation finale compliquée, ainsi pour ces formules seuls les résultats de l'application numérique seront donnés dans la partie suivante.

Le calcul des embouteillages

Les temps d'embouteillages sont calculés à partir de la différence entre le temps de départ et le temps d'arrivée moyen des usagers de la route, et de même pour les trains. Pour effectuer ces calculs pour la congestion routière, les taux de départ suivants sont utilisés :

$$r_1(t) = \begin{cases} \frac{\alpha s}{\alpha - \beta} & t \in [t_{1s}, \dot{t}_1] \\ \frac{\alpha s}{\alpha + \gamma} & t \in [\dot{t}_1, t_{1e}] \end{cases}$$

Pour le temps moyen de départ, une moyenne pondérée des temps de départ est utilisée, à partir des taux $r_1(t)$, qui sont notés $r_{1s}(t)$ et $r_{1e}(t)$ pour les 2 périodes ci-dessus :

$$t_{1s,moy} = (r_{1s}(t).(\dot{t}_1 - t_{1s}).((t_{1s} + \dot{t}_1)/2) + r_{1s}(t).\ (t_{1e} - \dot{t}_1).((\dot{t}_1 + t_{1e})/2)) / V_1$$

Pour l'heure d'arrivée, étant donné le débit constant au sein du goulot d'étranglement, l'heure moyenne d'arrivée est plus intuitive à calculer :

$$t_{1e,moy} = (t_{1e} + t_{1s})/2 + T_1$$

Ainsi le temps de trajet moyen est donné par :

$$T_{1,moy} = t_{1e,moy} - t_{1s,moy}$$

Et le temps d'embouteillage est donné par :

$$T_{1,moy}^{embout} = T_{1,moy} - T_1$$

Une application numérique

L'application numérique qui permet d'illustrer le paradoxe des émissions lié à la baisse de la congestion, est réalisée de manière progressive : d'abord un exemple avec des valeurs simples est présenté, avec l'ajout de la fonction de demande endogène ; ensuite la capacité de la route varie, afin d'en évaluer l'impact sur les coûts et les temps de transport ; enfin, un calcul des émissions de CO_2 de la route et du train est réalisé. Des figures viennent illustrer graphiquement le propos.

La base de l'application

Le premier exemple repose sur une illustration du modèle, avec 1000 passagers qui réalisent le trajet domicile-travail, dont 600 en voiture et 400 en train. On reprend la relation $\gamma > \alpha > \beta$, avec $\alpha = 2$, $\beta = 1$ et $\gamma = 4$. Les usagers souhaitent tous arriver au travail à 9h, soit $t^* = 9{,}00$ (les horaires sont indiqués en chiffres réels, avec 0,1 h = 6 min, ainsi par exemple 8,3 h = 8h18). Ils sont soumis sur la route à la congestion liée à un goulot d'une capacité de 800 veh/heure.
Les ordres de grandeur sont pensés pour un trajet de 5 km. Le temps de trajet sans congestion est de 6 minutes (T_1 =0,1 heure, soit 50 km/h de moyenne) pour la voiture et de 0,25 heure (15 minutes) en train en raison du temps pour rejoindre la gare et en repartir. Au contraire, le coût monétaire de la voiture (0,4) est légèrement supérieur à celui du train (0,3). Les principaux paramètres sont rappelés dans le tableau ci-dessous, dans lequel apparaissent les éventuels changements avec les extensions proposées ensuite.

Paramètre	**Description**	**1ère application**	**Extensions**
V	Nombre de passagers transportés	1000	**V = b - a.C**
V_1	Nombre de passagers en voiture	600	**Endogène**
V_2	Nombre de passagers en train	400	**Endogène**
α	Coût unitaire du temps de transport	2	**2**
β	Coût du temps pour une arrivée avant t*	1	**1**
γ	Coût du temps pour une arrivée après t*	4	**4**
δ	$\delta = \beta\gamma/(\beta+\gamma)$	0,8	**0,8**
s	Capacité du goulot sur la route (veh/h)	800	**Variable**
t*	Heure de début du travail	9,00	**9,00**
T_1	Temps de trajet en voiture sans congestion	0,1	**0,1**
τ_1	Coût monétaire de la voiture	0,4	**0,4**
T_2	Temps de trajet en train	0,25	**0,25**
τ_2	Coût monétaire du train	0,3	**0,3**
m	Nombre de trains programmés	5	**5**
ϕ	Coût unitaire d'inconfort en train	0,01	**0,01**
λ	Temps d'intervalle entre 2 trains	0,1	**Variable**

Pour cet exemple, on retrouve bien des coûts égaux entre C_1 et C_2 :

$$C_1 = \alpha T_1 + \tau_1 + \frac{\delta V1}{s} = 2 \text{ x } 0{,}1 + 0{,}4 + (0{,}8 \text{ x } 600)/800 = 1{,}2$$

$$C_2 = \alpha T_2 + \tau_2 + \frac{2.\phi.\lambda.T2.V2}{m} = 2 \text{ x } 0{,}25 + 0{,}3 + (2 \text{ x } 0{,}01 \text{ x } 0{,}25 \text{ x } 400)/5 = 1{,}2$$

Par ailleurs, les temps de trajet et les horaires de départ et d'arrivée suivants sont calculés pour la route (voir Figure 96Figure 97). Les départs depuis le lieu de résidence ont lieu entre 8h18 (t_{1s} = 8,3) et 9h03 (t_{1e} = 9,05), tandis que l'heure de départ pour arriver à 9h00 est de 8h36 ($\dot{t}_1$ = 8,6). Les arrivées au travail se font entre 8h24 et 9h09. Le temps moyen du trajet est de 15 minutes ($T_{1,moy} = t_{1e,moy} - t_{1s,moy}$ = 8,775 – 8,525 = 0,25), dont 9 minutes ($T_{1,moy}^{embout}$ = 0,15) sont dues aux embouteillages sur la route. Pour rappel, ce temps d'embouteillage supporté par les usagers de la route est variable selon les usagers, entre 0 minute pour le premier et le dernier usager (qui ne subissent pas de congestion), et jusqu'à 18 minutes pour les voitures qui partent en $\dot{t}_1$ = 8,6. En cumulé, les 600 usagers de la route subissent 90 heures d'embouteillages.

Pour le ferroviaire, les trains partent entre 8h21 (t_{1s} = 8,35) et 8h51 (t_{1e} = 8,85), auxquels il faut ajouter un temps de transport de 15 minutes (T_2 = 0,25).

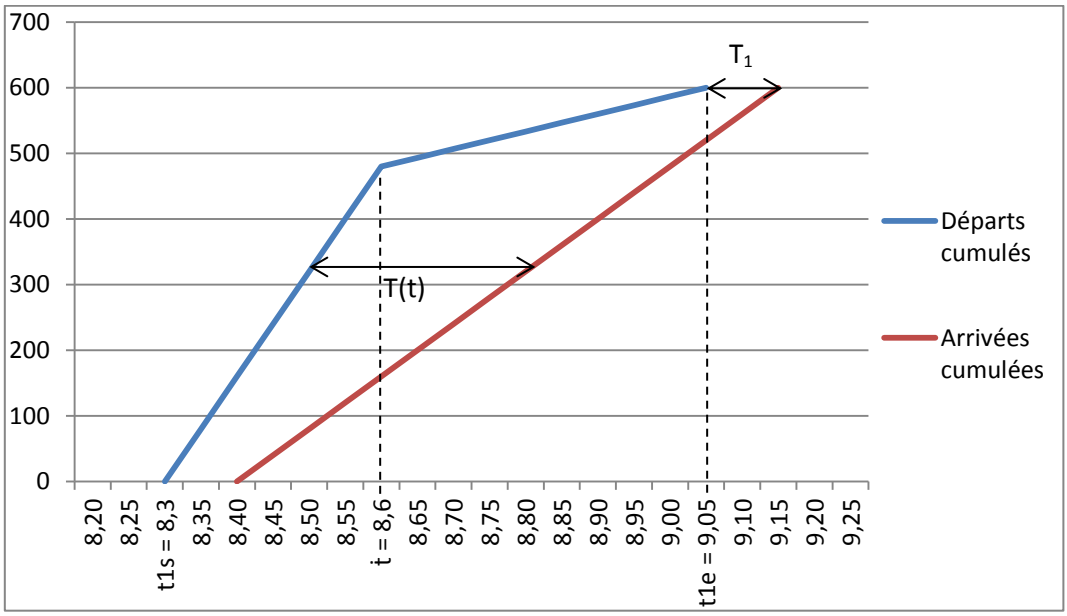


Figure 97 : Représentation graphique des heures de départ et d'arrivée pour les usagers de la voiture

La fonction de demande élastique est ajoutée, avec des valeurs des paramètres qui ne modifient pas ce premier exemple, avec b = 1240 et a = 200, ce qui donne :

$$V = b - a.C = 1240 - 200 \text{ x } 1{,}2 = 1000$$

<u>La variation de la capacité de la route</u>

Lorsque la capacité de la route augmente, par exemple de s = 800 à s = 1000, cela change les équilibres. On observe une augmentation du nombre d'usagers qui se déplacent de A à B, de 1000 à 1012 usagers, dont 673 pour la voiture (la part modale passe de 60 à 67 %) et 339 pour le train. Le coût de transport individuel baisse de 1,2 à 1,14, le temps moyen dans les embouteillages passe de 0,15h à 0,135h (9 minutes à environ 8 minutes) et le temps global

dans les embouteillages augmente légèrement à 90,7 h, en raison des usagers de la route plus nombreux.

Au-delà de cet exemple, les effets d'une variation de la capacité s de la route sont illustrés graphiquement sur les figures ci-dessous (y compris les émissions de CO_2, dont le calcul est détaillé ci-dessous).

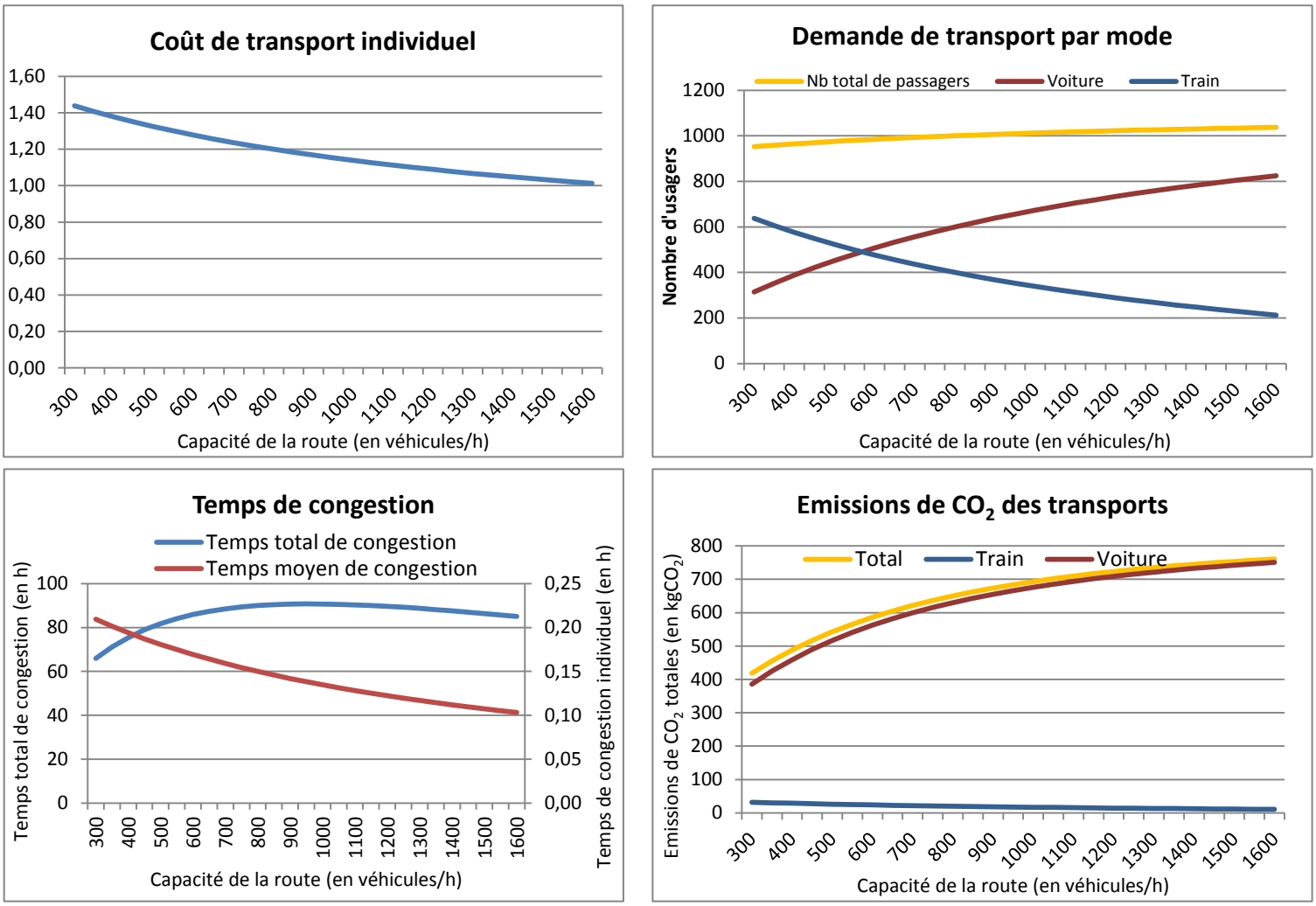


Figure 98 : Répartition modale, coûts de transport, temps de congestion et émissions de CO_2 selon la capacité de la route

<u>Le calcul des émissions de CO_2</u>

Il est connu que les consommations de carburant par kilomètre des voitures sont minimales pour des vitesses autour de 60 à 80 km/h. Ainsi, l'impact direct de la congestion et de la baisse de la vitesse est une augmentation des émissions, qui est prise en compte de la manière suivante dans les calculs : à 50 km/h et pour un trajet de 5 km, des émissions de 120 gCO_2/km sont retenues, soit 600 gCO_2 pour l'ensemble du trajet. Etant donné que le trajet sans congestion est de 6 minutes, cela correspond à 100 gCO_2/minute de trajet. Pour chaque minute de transport supplémentaire liée aux embouteillages, un surplus de 50 gCO_2/minute est ajouté. Ainsi, pour une vitesse de 25 km/h, le trajet dure 12 minutes, et les émissions sont de 900 gCO_2 (6x100 + 6x50), et donc les émissions par kilomètre de 180 gCO_2/km.

Pour différentes vitesses de circulation, on retrouve la forme de courbe d'émissions sur la Figure 99. Le surplus d'émissions pour des vitesses basses est surestimé par rapport aux données de l'INSEE (2007), qui indiquent une multiplication des consommations par deux entre des vitesses de 50 et de 10 km/h, alors qu'elles sont multipliées par 3 dans notre cas (de 120 à 360 g). Cependant, le calcul des émissions de la route est ici réalisé comme la multiplication du nombre d'usagers par les émissions moyennes des usagers, ce qui a une tendance à minimiser les émissions totales. Il est donc probable que les deux effets se compensent en partie pour donner des résultats cohérents.
Pour le train, les émissions sont données par la multiplication du nombre d'usagers par un facteur d'émissions de 50 gCO_2 par trajet (donc 10 gCO_2/km), ce qui est légèrement plus fort que les émissions moyennes d'un voyageur en train électrique (ADEME, 2016).

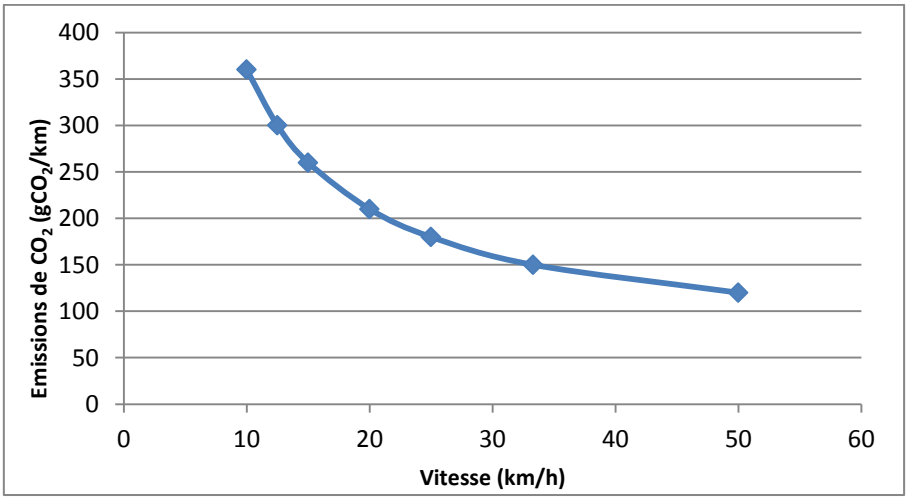


Figure 99 : Emissions de CO_2/km en voiture pour différentes vitesses de déplacement

Discussion

<u>Analyse de l'application numérique et "emission paradox"</u>
L'application numérique fait apparaître différentes conséquences liées à l'extension de la capacité d'une route, en parallèle d'une ligne de transport en commun et d'une demande élastique. Tout d'abord, bien que le modèle utilisé (Wang et al., 2017) était dédié à l'étude du paradoxe de Downs-Thomson, l'application numérique indique que les paramètres choisis n'amènent pas à ce paradoxe, puisque les coûts de transports individuels diminuent. Cela s'explique par un temps de congestion individuel sur la route qui diminue lorsque la capacité augmente (Figure 98 en bas à gauche). Cependant, le temps total de congestion a une courbe légèrement en cloche, en raison du nombre croissant d'usagers de la route. Ainsi pour les capacités très importantes la variation à la baisse des temps de congestion fait plus que compenser le nombre croissant d'usagers.
Ensuite, le nombre d'usagers est croissant avec la capacité de la route, en relation avec le coût de transport qui diminue et encourage plus de personnes à se rendre au travail. De même, la répartition modale est d'autant plus favorable à la route que sa capacité est importante. Les usagers du train deviennent plus nombreux que les usagers de la voiture pour une capacité de la route inférieure à 570 véhicules par heure.

Ces deux effets de demande élastique et de report modal expliquent ce qui est cité ici comme un *emission paradox*. L'effet de la congestion sur les émissions de CO_2 est généralement supposé négatif, en raison de l'effet direct à la hausse des embouteillages sur les consommations des véhicules. Le paradoxe relevé ici montre que de fortes élasticités de la demande de transport en véhicule individuel par rapport au temps de transport, liées à une adaptation de la demande de transport ou du report modal, peut donner à la congestion un rôle positif pour l'impact environnemental des transports.
A ce jour, il n'a pas été trouvé dans la littérature académique de publications qui mettent spécialement en évidence ce paradoxe de la congestion sur les émissions. Bien que cette première application présente de nombreuses limites, elle ouvre de nombreuses perspectives d'approfondissement.

Limites et perspectives de l'étude

Concernant le sous-modèle utilisé sur les transports en commun, de nombreux paramètres n'ont pas été utilisés autant que le modèle ne le permet. Ainsi, le nombre de trains reste identique lorsque le coût du transport ferroviaire varie, et l'adaptation se fait sur l'écart entre deux trains successifs, ce qui n'est pas représentatif de la réalité. Le modèle pourrait être aussi enrichi avec un troisième mode comme le vélo ou les bus, avec l'ajout du covoiturage, ou de véhicules électriques qui réduisent les émissions mais entrainent la même congestion que les véhicules thermiques. Aussi l'application numérique est fortement dépendante des valeurs des paramètres utilisés, et il serait possible de préciser dans quelles conditions le paradoxe des émissions apparaît.
Par ailleurs, des perspectives importantes existent pour étudier la tarification dans le cas de cet *emission paradox*, sujet qui n'a pas été traité ici. Les publications académiques sur l'économie des transports sont encore majoritairement tournées vers le problème de congestion, et encore relativement peu sur les problèmes environnementaux. Cela s'illustre notamment par la faible place qu'il occupait en 2007 (il n'y a donc pas si longtemps, à un moment où les problèmes environnementaux étaient déjà bien connus) dans une revue de littérature de 293 pages (Small et Verhoef, 2007), où il faut regarder en conclusion dans les thèmes émergents, puis la rubrique des autres thèmes pour voir un paragraphe sur l'environnement, qui n'apparaît pas forcément utile à approfondir d'après les auteurs : « we think solving them will become somewhat routine, using well-known tools ».
Pourtant, les politiques publiques des transports sont de plus en plus motivées par des considérations environnementales, et l'*emission paradox* identifié ici pourrait notamment s'appliquer aux fermetures de voies sur berge à Paris, où la mairie risque d'augmenter les coûts individuels de congestion pour encourager les automobilistes à réduire leur usage de la voiture (une fois le temps d'adaptation passé). Cette décision a été motivée en grande partie par des considérations environnementales, et laisse apparaître que des changements d'objectifs ou de priorités dans la politique de transport (pollution plutôt que congestion) amène à des mesures différentes. La congestion pourrait même être vue ici non pas comme un problème, mais comme un levier d'action pour encourager les changements de comportement. Les interactions entre ces objectifs seraient intéressantes à approfondir, et en particulier les liens possibles entre le paradoxe de Downs-Thomson et le paradoxe sur les émissions.

Conclusions

L'analyse porte sur un modèle de transport avec deux modes pour les trajets domicile-travail, avec la présence de congestion sur la route et d'un coût d'inconfort pour les transports en commun. Le modèle de Wang et al. (2017) est utilisé, il lui est ajouté une demande élastique, afin d'étudier l'impact de la variation de la capacité de la route sur les émissions de CO_2 totales des transports. L'augmentation de la capacité de la route permet de diminuer les coûts de transport individuels de tous les usagers, en réduisant le coût du temps lié aux embouteillages, et donc les émissions de CO_2 individuelles des voitures. Cependant, il apparaît que l'augmentation du trafic routier fait plus que compenser ces baisses d'émissions unitaires des voitures, sous le double effet du report modal depuis les transports en commun et plus marginalement de la hausse de la demande de transport. L'étude identifie donc un paradoxe des émissions, différent de ceux identifiés par Nagurney (2000) sur un modèle uniquement routier. Cet effet potentiellement positif de la congestion ouvre de nouvelles perspectives d'études, dans un contexte où les politiques publiques de transport sont de plus en plus orientées vers des objectifs environnementaux.

Références

ADEME, 2016. Chiffres clés climat air et énergie, Edition 2015.

Arnott, R., de Palma, A., Lindsey, R., 1990. Economics of a bottleneck. J. Urban Econ. 27 (1), 111–130.

Arnott, R., Yan, A., 2000. The two-mode problem: second-best pricing and capacity. Rev. Urban Reg. Dev. Stud. 12, 170–199.

Basso, L.J., Jara-Díaz, S.R., 2012. Integrating congestion pricing, transit subsidies and mode choice. Transport. Res. Part A 46, 890–900.

Coulombel, N., Boutueil, V., Liu, L., Viguié, V., Yin, B., 2019. Substantial rebound effects in urban ridesharing: Simulating travel decisions in Paris, France. Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 71, Pages 110-126.

INSEE, 2016. Émissions de CO_2 liées aux déplacements : les longs trajets, en voiture, pénalisent l'Aquitaine.

Kraus, M., 2003. A new look at the two-mode problem. J. Urban Econ. 54, 511–530.

Mogridge, M.J.H., Holden, D.J., Bird, J., Terzis, G.C., 1987. The Downs/Thomson paradox and the transportation planning process. Int. J. Transp. Econ. 14 (3), 283–311.

Nagurney, A., 2000. Congested urban transportation networks and emission paradoxes. Transport. Res. Part D 5 (2), 145–151.

Pigou, A. C., 1920. The Economics of Welfare. London: Macmillan.

Small K.A., 1982. The scheduling of consumer activities: work trips. Am. Econ. Rev., 72 (1982), pp. 467-479.

Small, K.A.S , Verhoef, E.T., 2007. The Economics of Urban Transportation. Routledge.

Smith, A., 1937. An Inquiry into the Nature and Causes of the Wealth of Nations, Modern Library edition. Edwin Cannan ed. New York: The Modern Library.

Tabuchi, T., 1993. Bottleneck congestion and modal split. J. Urban Econ. 34 (3), 414–431.

Vickrey, W., 1969. Congestion theory and transport investment. Am. Econ. 59 (2), 251–260.

Wang W.W., Wang D.Z., Zhang F., Sun H., Zhang W., Wu J., 2017. Overcoming the Downs-Thomson Paradox by transit subsidy policies. Trans. Res. Part A: Policy Pract., 95, 126-147.

Wu, W.X., Huang, H.J., 2014. Equilibrium and modal split in a competitive highway/transit system under different road-use pricing strategies. J. Transp. Econ. Policy 48 (1), 153–169.

3. Articles dans The Conversation

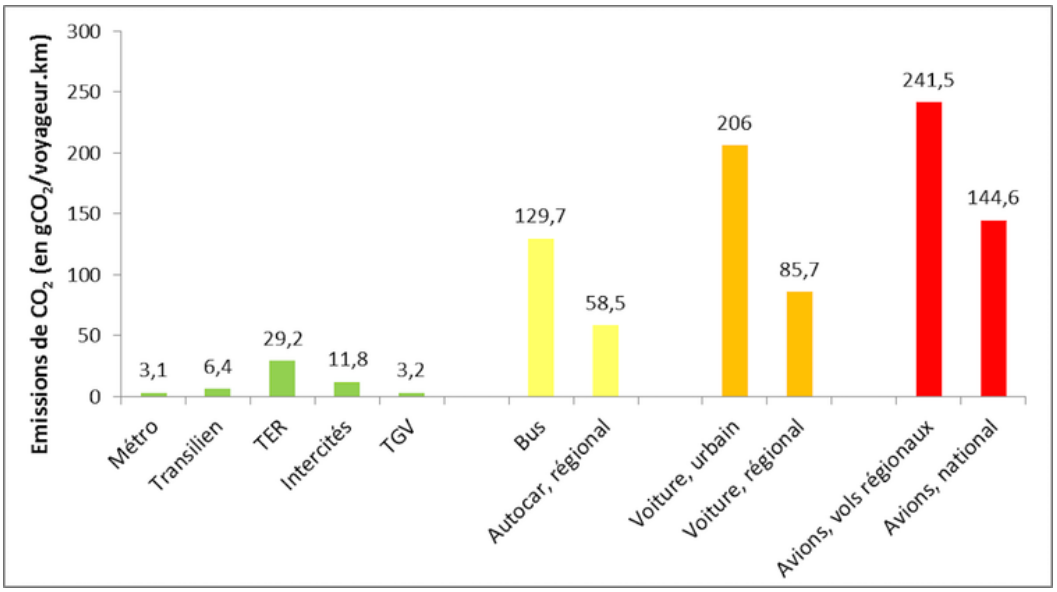
Le train, grand oublié de la transition énergétique ?

20 juin 2018, 20:44 CEST

Depuis septembre dernier, l'actualité de la politique des transports et du ferroviaire est chargée : Assises de la mobilité, rapport du Conseil d'orientation des infrastructures, préparation de la loi d'orientation des mobilités, rapport Spinetta, réforme ferroviaire… sans oublier le long conflit opposant les cheminots de la SNCF au gouvernement.
L'ensemble des évolutions qui en découleront auront un impact à long terme sur les infrastructures de transport et l'aménagement du territoire.
Mais ni les lois en discussion, ni le rapport Spinetta sur « L'avenir du transport ferroviaire » ne s'interrogent vraiment sur la place que devrait occuper le train dans un monde décarboné et aux ressources énergétiques de plus en plus contraintes.

8 à 20 fois moins d'émissions de CO_2 que la voiture

Et pourtant, le train apparaît comme un bon élève concernant les émissions de CO_2. En effet, alors que le transport ferroviaire représente environ 10 % du trafic de voyageurs et de marchandises, il n'est responsable que de 1,6 % des consommations d'énergie et de 0,4 % des émissions de CO_2 des transports.
À quoi cela est-il dû ? À une meilleure efficacité énergétique du mode ferroviaire par unité de marchandise ou par passager transporté, et à un mix énergétique peu émetteur de CO_2.
Le transport par rail est en effet plus efficace et les trajets sont mutualisés : les trains de passagers en France transportent en moyenne 230 passagers ; contre 1,5 pour les voitures et une vingtaine de personnes pour les transports collectifs routiers.
De plus, bien que seule la moitié du réseau ferré soit électrifiée, il s'agit de la partie du réseau la plus utilisée : plus de 80 % des trains y circulent, représentant plus de 90 % des kilomètres parcourus par les voyageurs.



Émissions de CO_2 par kilomètre parcouru de différents modes de transport. ADEME

En moyenne, les émissions des trains opérés par la SNCF sont de l'ordre de 10 grammes de CO_2 par kilomètre parcouru par voyageur, variant de 3,2g pour les TGV à quasiment 30g pour le TER moyen. Ceci est dû notamment aux différences en termes de taux de remplissage et d'énergie utilisée.
Ces valeurs sont à comparer avec des émissions de 85 à 205g de CO_2 pour la voiture particulière, selon le nombre de passagers et les types de parcours.
Le train émet donc de 8 à 20 fois moins de CO_2 que la voiture. Cet ordre de grandeur est également valable sur la comparaison entre transport de marchandises par train ou par poids lourds.

La neutralité carbone d'ici 2050

Le ferroviaire est donc aujourd'hui peu émetteur comparé aux autres modes de transport. Et la place qu'il pourra jouer à l'avenir dans la transition énergétique doit être jugée au regard des objectifs très ambitieux que la France s'est fixée sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre.
Le « plan climat » présenté en juillet 2017 vise désormais à atteindre la neutralité carbone en 2050. Une baisse des émissions au-delà des -75 % prévus par l'objectif de Facteur 4 est donc nécessaire afin que les émissions restantes soient compensées par du captage de CO_2, via la séquestration du carbone par les sols et les forêts.
En 2016, la comparaison de 29 scénarios faisait apparaître un rôle fortement croissant du transport ferroviaire.
Pour illustrer cette tendance plus en détails, quatre études récentes permettent de mettre en évidence certains éléments structurants : l'étude réalisée à la demande du Commissariat général au développement durable (CGDD) et publiée en 2016, l'actualisation des visions de l'Ademe de 2017, le scénario négaWatt de 2017 ; et les scénarios de l'Institut du développement durable et des relations internationales (IDDRI) sur la mobilité des voyageurs en 2017.

Une place grandissante dans le futur ?

Le développement du transport ferroviaire dans ces scénarios peut se juger au moins sur deux critères, aussi bien pour les voyageurs que pour les marchandises : la croissance des trafics (mesurés en voyageurs.km pour les voyageurs et en tonnes.km pour les marchandises) et l'évolution de la part modale du train dans l'ensemble des modes de transport (chiffres en gras dans le tableau ci-dessous).

Scénario tiré de		CGDD 2016			ADEME 2017		NégaWatt 2017		IDDRI 2017		
Nom du scénario		Initial 2012	Tendanciel 2050	SNBC 2050	Initial 2010	Vision 2050	Initial 2010/15	négaWatt 2050	Initial 2010	MOB-first 2050	TECH-first 2050
Voyageurs	Md voy.km	854	1183	1113	1042	792	1175	1087	840	772	989
Trafic ferroviaire	Md voy.km	66	126	112	99	187	101	204	74	120	91
Croissance du ferroviaire	%		**92%**	**71%**		**89%**		**102%**		**61%**	**23%**
Part modale du ferroviaire	%	7,7%	**10,6%**	**10,1%**	10%	**24%**	9%	**19%**	8,8%	**15,5%**	**9,2%**
Marchandises	Md t.km	304	576	576	382	500	379	364			
Trafic ferroviaire	Md t.km	33	71	55	37	127	40	145			
Croissance du ferroviaire	%		**117%**	**68%**		**243%**		**263%**			
Part modale du ferroviaire	%	10,7%	**12,2%**	**9,5%**	10%	**25%**	11%	**40%**			
Emissions de CO_2 transports	$MtCO_2$	124,0	86,3	47,2	126,0	11,7	142,2	0,3	88,1	20,0	18,7
Evolution des émissions	%		-30%	-62%		-91%		-100%		-77%	-79%

Comparaison des trafics et des parts modales du ferroviaire dans les 4 publications citées.

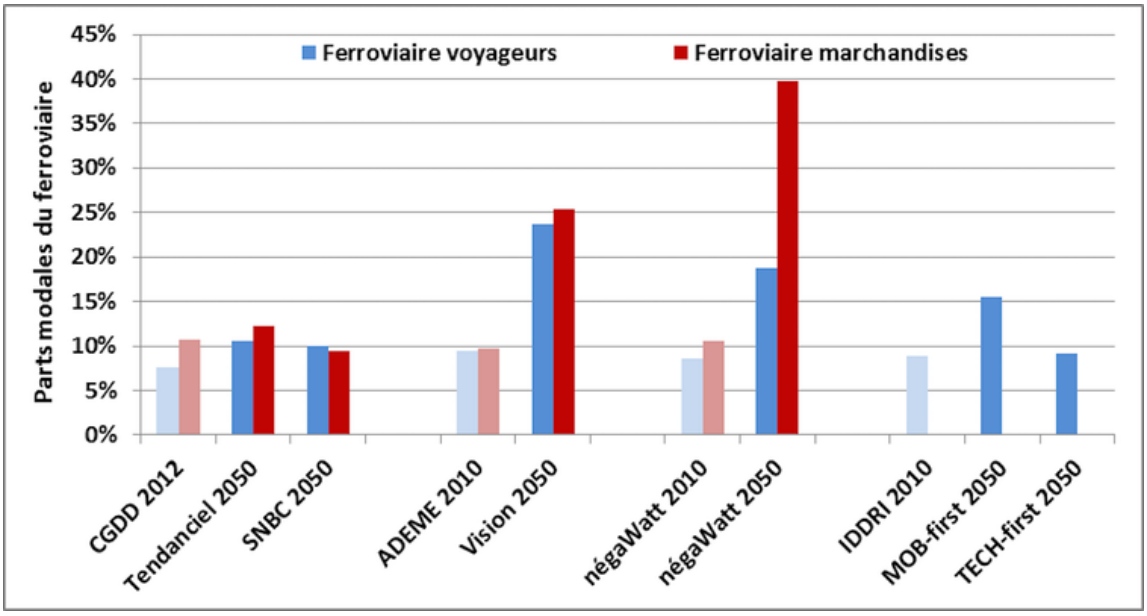
Concernant l'évolution des trafics, tous les scénarios voient une croissance du ferroviaire, de 23 à 102 % pour les voyageurs et de 68 à 263 % pour les marchandises. En fonction des scénarios, cette augmentation peut provenir simplement d'une augmentation de la demande de transport ; dans d'autres, elle s'explique également par une forte progression des parts modales.

C'est le cas pour les scénarios négaWatt et Ademe qui prévoient une progression des parts modales d'environ 10 % à 25 %, tant pour les voyageurs que pour les marchandises. Ces fortes hausses des parts modales du ferroviaire impliquent nécessairement un maillage important du réseau ferré sur le territoire pour capter des parts modales aux modes routiers.

De tels scénarios invitent ainsi à envisager sous un jour nouveau l'avenir des « petites lignes » régionales, qui devraient être développées et rendues plus attractives, notamment via l'amélioration de leur qualité de service et de leur fréquence, en organisant leur sortie progressive du diesel (électrification et train hybride, hydrogène ou gaz) ; ou encore par le développement de l'intermodalité train-vélo.

Cependant, tous les scénarios ne montrent pas une progression importante des parts modales : comme l'illustre le scénario TECH-first, les prévisions misant beaucoup sur la technologie ont tendance à se reposer essentiellement sur l'efficacité énergétique et les changements d'énergie pour baisser les émissions.

C'est aussi le parti pris des scénarios du CGDD qui semblent illustrer une politique des transports actuellement fortement focalisée sur la technologie, et qui manque d'ambition sur les leviers importants que sont la modération de la demande ou le report modal.



Comparaison des parts modales du ferroviaire pour les voyageurs et les marchandises.

Cinq leviers à activer

Le développement du ferroviaire apparaît comme une des évolutions nécessaires pour tendre vers une France neutre en carbone. Non suffisant à lui seul, il s'inscrit parmi les cinq leviers de la transition énergétique dans les transports.

Il doit également s'accompagner d'une modération de la demande (urbanisme durable, réduction des distances, consommations locales), d'un report modal global (vers le vélo, la

marche, les transports en commun), d'une hausse du taux de remplissage des véhicules (covoiturage, optimisation de la logistique), d'une amélioration de l'efficacité des véhicules (baisse de leur poids, des vitesses sur les routes, progrès technique) et baisse de l'intensité carbone de l'énergie (via le biogaz, l'électricité, les agrocarburants ou encore l'hydrogène).
Le manque d'ambition des scénarios du CGDD, et donc de la politique actuelle des transports, sur les premiers leviers s'illustre dans les résultats finaux des réductions d'émissions de CO_2. En effet, la décarbonation du secteur est quasi-complète pour négaWatt et la réduction est de 92 % pour l'Ademe, dépassant largement l'objectif de -70 %. Au contraire, le scénario SNBC n'atteint que 63 % de réduction et n'est pas compatible avec l'objectif de Facteur 4, et encore moins avec la neutralité carbone.
Les scénarios atteignant des réductions compatibles avec la neutralité montrent que nous ne pourrons nous passer d'aucun des cinq leviers ; c'est bien leur combinaison et leur complémentarité qui permettront au secteur des transports de faire sa part.
Alors que les ambitions du « plan climat » tardent à se matérialiser à la hauteur des enjeux dans les politiques sectorielles, et au moment de débats intenses sur l'avenir du ferroviaire, il serait utile de s'interroger davantage sur la place du ferroviaire dans l'atteinte des objectifs climatiques et plus globalement dans les enjeux énergétiques de long terme.

https://theconversation.com/le-train-grand-oublie-de-la-transition-energetique-98213

Dépendance à la voiture en zone rurale, quelles solutions ?

8 janvier 2019, 20:12 CET

À la fin de l'année 1973, une crise pétrolière, suivie d'un deuxième choc pétrolier en 1979, sonne la fin des Trente glorieuses. Trente ans plus tard, la hausse du prix du pétrole joue à nouveau un rôle dans le déclenchement de la crise économique de 2008, parfois interprétée comme le 3e choc pétrolier.

Si ces crises ont entraîné quelques ajustements de court terme, il semble que nous ayons la mémoire courte. Chaque fois que le prix du baril baisse, nous nous imaginons entrer dans une nouvelle ère d'abondance pétrolière : les ventes de voitures – toujours plus lourdes et plus puissantes – repartent à la hausse, les kilomètres parcourus augmentent, et les politiques d'aménagement accompagnent et renforcent cette dépendance à l'automobile… jusqu'à la prochaine crise.

À force d'attendre, les problèmes de long terme deviennent urgents, et les enjeux environnementaux se transforment en crises économiques et sociales, comme l'illustre le mouvement des « gilets jaunes ».

Quelles pistes imaginer pour une mobilité moins chère et plus sobre en carbone dans des zones rurales où l'offre de transports en commun fait souvent défaut ?

Les zones peu denses exposées

L'Agence internationale de l'énergie a alerté en 2018 dans son rapport annuel : compte tenu de l'écart entre la croissance de la demande en pétrole (jusqu'à 102 millions de barils par jour) et la décroissance de la production (86 millions de barils par jour) prévue d'ici 2025, il faudrait tabler sur une croissance des pétroles de schistes américains d'environ 16 millions de barils par jour.

Dans les prévisions américaines les plus optimistes, ces pétroles pourraient croître au mieux d'environ 5 ou 6 millions de barils par jour d'ici 2025. Ce qui augure un marché du pétrole perturbé dans les années à venir.

Les habitants des zones peu denses, fortement dépendants à la voiture, sont ainsi particulièrement vulnérables aux variations du cours du pétrole. Pour déjouer cette situation, construite depuis des décennies, un coup de baguette magique ne suffira pas.

Il est toutefois possible d'en sortir, à condition de profiter de l'occasion offerte par la crise des « gilets jaunes » pour débattre et mettre l'ambition et les moyens à la hauteur des enjeux sociaux, économiques et environnementaux associés.

Covoiturage quotidien, le nouveau transport en commun ?

Premier constat : là où les transports en commun sont pertinents, ils doivent être développés en priorité, que ce soit pour les « petites » lignes ferroviaires ou les lignes d'autocars. Mais souvent, la densité des flux s'avère trop faible en zones rurales pour développer une telle offre. Le covoiturage apparaît dès lors particulièrement adapté.

Si BlaBlaCar a réussi à démocratiser le covoiturage sur la longue distance, son impact sur les émissions de gaz à effet de serre est faible : le service détourne les usagers du train et crée de nouveaux déplacements routiers plus émetteurs. L'enjeu est désormais de développer la pratique sur de courtes distances ou pour les trajets entre le domicile et le travail, où le covoiturage pourrait être une solution pertinente pour les zones peu denses où se trouve le vrai potentiel de réduction d'émissions.

Une ribambelle de plates-formes ont investi le secteur, comme iDvroom, Karos, Klaxit ou BlaBlaLines ; de même, Ecov propose du covoiturage spontané pour les territoires ruraux et périurbains : des panneaux lumineux connectés signalent sur le bord de la route la destination des passagers ; Ecosyst'm propose un covoiturage citoyen et solidaire en lien avec une

monnaie locale en Corrèze ; la coopérative Mobicoop met en lien des covoitureurs sans prendre de commission.
Les collectivités locales ont un rôle à jouer pour accompagner ces plates-formes et développer la pratique, en plus de la mise en œuvre systématique du forfait mobilité durable auprès des salariés – censé les encourager à utiliser le vélo ou le covoiturage en les indemnisant pour les frais engagés.

Si l'on roule seul, rouler léger

Second constat, si le covoiturage n'est pas toujours adapté, une attention particulière doit être portée au véhicule. Quel intérêt en effet de rouler seul dans un véhicule cinq places pesant plus d'une tonne, pouvant atteindre 186 km/h et coûtant plus de 25 000 euros à l'achat en moyenne ?
Sans être parfaite, la Renault Twizy constitue un bon exemple de voiture sobre, qui plus est électrique. À 11 500 euros, elle coûte deux fois moins cher que la voiture neuve moyenne, et quasiment trois fois moins que la Renault Zoé, qui représente 55 % des ventes de voitures électriques en France. En raison du faible poids du véhicule et de sa batterie, son impact environnemental est également bien plus faible. Pourtant, les aides à l'achat encouragent surtout les véhicules les plus lourds, des voitures électriques comme la Twizy ou les vélos à assistance électrique (VAE) étant bien moins subventionnés en montant et en proportion.
Reste à définir à quels usages dédier ces véhicules. En France, 35,7 % des ménages possédaient deux voitures ou plus en 2015. L'une d'entre elles pourrait ne compter que deux places et la plus grosse servir pour les vacances ou les trajets familiaux.
De même, les ménages d'une seule personne – dont 66 % ont une voiture –, n'ont a priori pas besoin d'un véhicule de cinq places. En remplaçant une voiture, des ménages multi-motorisés et les voitures des ménages seuls par des véhicules légers, 17 millions de voitures pourraient être remplacées. Cela représente la moitié du parc automobile français.

Type de véhicule	Vélo	VAE	Twizy 80	Renault Zoé	Voiture neuve moyenne en 2016
Prix	339 € prix moyen	1 564 € prix moyen	11 439 € avec batterie, portes	32 600 € avec batterie	25 828 €
Aide à l'achat	0 € 0 %	200 € / 13 % ménages non imposables	900 € 8 %	6 000 € 18 %	Malus selon les modèles
Poids à vide (kg)	15-20 kg	20-25 kg	474 kg*	1480 - 1500 kg	1261 kg
Propulsion / Moteur	Humaine	Humaine et électrique	Electrique	Electrique	Thermique principalement
Vitesse maximale	Env. 20 km/h sur du plat	Assistance jusque 25 km/h	80 km/h	135 km/h	186 km/h
Puissance (W)	Cycliste 0,1 kW	0,25 kW électrique	13 kW	57-80 kW	85 kW
Batterie		0,4 kWh environ	6,1 kWh	41 kWh	
Autonomie		50 km très variables	75 km (100 km annoncés)	300 km (400 km annoncés)	
Coût de l'énergie pour 100 km		0,12 €	1,18 €	1,98 €	8,91 €

Figure de comparaison des véhicules en fonction de leurs caractéristiques.

Le vélo, pas seulement en ville

Outre la voiture, certains modes de transport alternatifs qui se développent en ville méritent aussi l'attention des zones rurales. C'est le cas du vélo : son déploiement à grande échelle n'en est encore qu'à ses débuts, notamment à la campagne où sa pratique reculait encore il y a quelques années.
Le vélo a pourtant un véritable potentiel dans les zones peu denses. Fin 2017, le Shift Project publiait un rapport pour évaluer le potentiel de différentes solutions pour décarboner les zones

de moyenne densité, parmi lesquelles se trouvait le « système vélo » : ses principales caractéristiques s'appliquent également aux zones rurales.
Il s'agit de combiner le développement d'infrastructures sécurisantes, de services vélo et de véhicules efficaces, en profitant de la diversification de l'offre au cours des dernières années : vélos classiques, mais aussi vélos à assistance électrique, certains étant débridés à 45 km/h, ou vélos-cargos (pour le transport de charges). Il s'est vendu 255 000 exemplaires de VAE en 2017 – soit 10 fois plus que de voitures électriques.
Ces modèles permettent d'étendre la zone de pertinence du vélo à des trajets de 10-15 km (soit 30-45 minutes en VAE), tout en facilitant la pratique pour d'anciens automobilistes. Avec la forte ambition prévue sur le système vélo modélisé, il est ainsi apparu comme la solution au plus fort potentiel devant le covoiturage, avec une réduction des émissions de CO_2 de 15 % en 10 ans.

Encourager une démotorisation partielle
Le coût des carburants ne représente « que » 30 % des coûts de la voiture. De vrais gains sur les dépenses de transport ne seront donc possibles que si les solutions mises en place permettent de posséder une voiture en moins : les dépenses de possession (achat, entretien, assurance…) représentent 65 % des dépenses liées à la voiture, et en moyenne 3 150 euros par an et par ménage.
Une politique favorisant la résilience des territoires devrait donc encourager une démotorisation partielle, en privilégiant : un aménagement du territoire et des choix de localisation qui réduisent les distances ; le vélo, le covoiturage, les véhicules légers et électriques pour les trajets quotidiens ; le train et les transports en commun routiers, au moins pour les plus longs trajets ; l'autopartage en complément pour les trajets plus exceptionnels.
La transition écologique ne sera largement partagée que si elle se montre solidaire et démocratique, avec des décisions et des moyens plus locaux. La loi d'orientation des mobilités (LOM) en préparation vise justement à confier davantage de responsabilités aux régions et aux intercommunalités sur ces sujets. Les moyens financiers devront cependant suivre pour accompagner les ménages qui en ont le plus besoin, et mettre en œuvre ces solutions vers une mobilité bas-carbone. La taxe carbone en deviendra peut-être plus acceptable.

https://theconversation.com/dependance-a-la-voiture-en-zone-rurale-quelles-solutions-109016

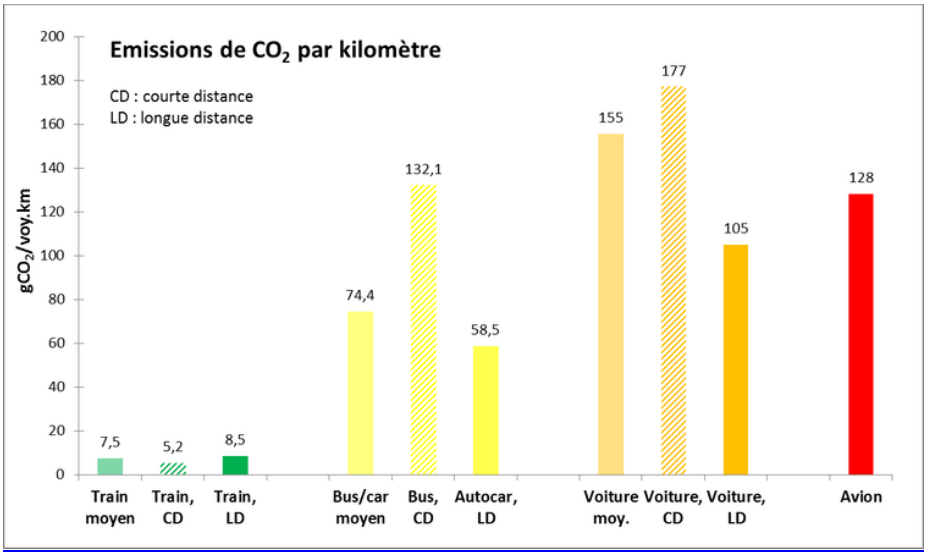
Impact du transport aérien sur le climat : pourquoi il faut refaire les calculs

8 mai 2019, 21:34 CEST

L'impact du transport aérien sur le changement climatique a fait ces derniers mois l'objet d'une polémique croissante. Au-delà du débat sur la fiscalité se pose la question de la durabilité de ce mode de déplacement.
On questionne la pertinence de maintenir les lignes aériennes en Europe, voire la responsabilité des voyageurs, dans le sillage des Suédois qui se détournent de plus en plus de l'avion sous l'effet de la taxation des billets et de l'émergence de la « honte de voler ».
Cette situation mérite qu'on regarde les chiffres de plus près : quel est l'impact d'un trajet en avion, et plus généralement du transport aérien au niveau mondial ? Quelles perspectives d'évolution du trafic ? La technologie permettra-t-elle de limiter les émissions de manière suffisante ?

Un trajet 1 500 fois plus émetteur qu'en train

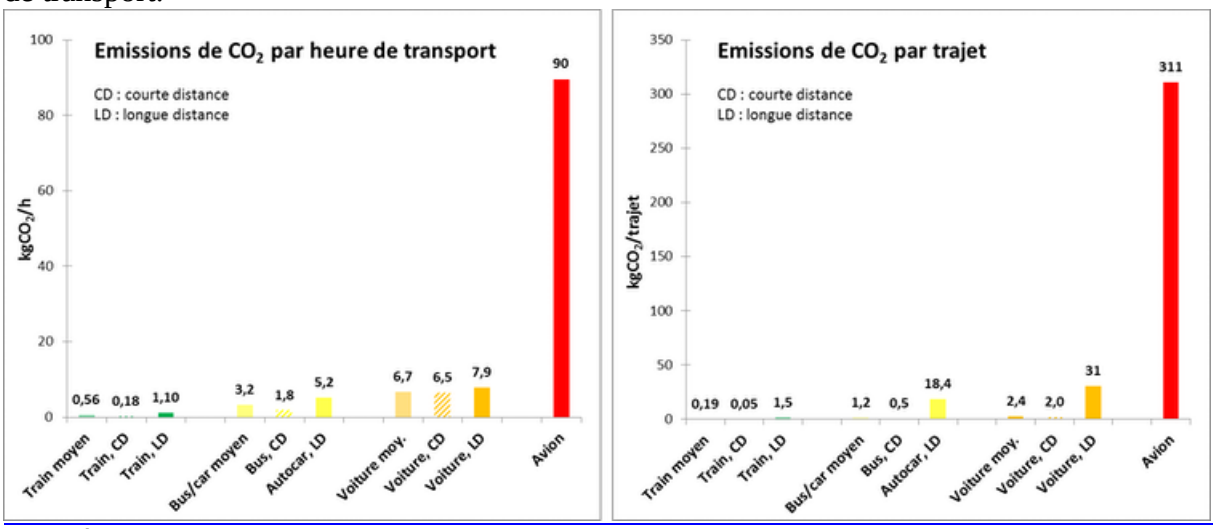
Pour comparer l'impact climatique des différents modes de transport, les chiffres les plus utilisés sont ceux des émissions de CO_2 par voyageur au kilomètre, c'est-à-dire les émissions pour un voyageur parcourant un kilomètre grâce à ce mode de déplacement.
Sur ce critère, l'avion ressort en tête du classement des modes les plus polluants, dans des proportions similaires à la voiture individuelle et avec des émissions de l'ordre de 45 fois supérieures au TGV (ou 15 fois pour la moyenne des trains longue distance). Cela permet d'illustrer, par exemple, qu'un voyage Paris-Marseille aura le même impact en avion que pour une personne seule en voiture, mais un impact 45 fois plus important que s'il était réalisé en TGV.



La barre de gauche représente la moyenne pour le mode, celle du milieu en hachuré seulement pour les déplacements à courte distance, et à droite les déplacements longue distance qui sont plus directement comparables à l'aérien en termes de motifs. Aurélien Bigo/Données Ademe et ENTD, CC BY-NC-ND

On pourrait ainsi penser que l'avion et la voiture ont des impacts similaires. Sauf que la rapidité de l'avion lui permet d'atteindre des distances lointaines en très peu de temps. Alors que personne n'imaginerait faire un aller-retour Paris-Marseille en voiture dans la journée ou partir en Chine pour cinq jours, c'est justement ce que permet l'avion !
Un second critère à examiner concerne donc les émissions par heure de trajet. Une personne prête à faire 10 heures de trajet pour partir en vacances traversera la France ou atteindra un pays voisin si elle part en voiture, en train ou en car. Opter pour l'avion lui permettra de partir sur un autre continent.

Cette vitesse implique que le trajet moyen en avion est de 2 400 km, loin devant les autres transports dont les trajets à longue distance sont généralement de l'ordre de 300 km et de quelques kilomètres à quelques dizaines de kilomètres tous trajets confondus. Monter dans un avion est ainsi loin d'être anodin en matière d'impact climatique comparé aux autres modes de transport.



Émissions de CO_2 par heure de transport puis par trajet, en fonction du mode de transport. Aurélien Bigo/Données ADEME, ENTD, CGDD, Arafer, Omnil., CC BY-NC-ND

Alors que les émissions d'un kilomètre en avion équivalent à peu près à un kilomètre effectué seul en voiture, une heure en avion est 13 fois plus émettrice qu'une heure en voiture. Monter à bord d'un avion rendra votre trajet 125 fois plus émetteur en moyenne que de monter dans une voiture ; et plus de 1 500 fois plus émetteur que de monter dans un train…

Un impact sous-évalué

Calculer son bilan carbone personnel sur une année permet de se rendre compte de ce très fort impact, à l'échelle individuelle, d'un trajet en avion à longue distance. Par contraste, si l'on se place au niveau français ou mondial, l'impact climatique du transport aérien peut paraître relativement faible.

Si l'on regarde les statistiques françaises, les émissions de CO_2 de l'aérien représentent ainsi seulement 2,8 % des émissions des transports et 0,8 % des émissions totales de gaz à effet de serre en 2016. Ces faibles chiffres s'expliquent par le fait que seuls les trajets internes à la France sont comptés (outre-mer compris). Les transports aériens et maritimes internationaux ne sont en effet pas pris en compte dans les chiffres des conférences des Nations Unies sur le climat.

Par conséquent, le secteur se fixe ses propres objectifs climatiques (forcément peu contraignants) via l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI), et les inventaires nationaux des émissions reflètent donc un périmètre purement national.

Pourtant, compter les trajets internationaux multiplie par six l'impact de l'aérien pour la France, pour le faire passer à 13,7 % des émissions des transports et 4,4 % des émissions totales du pays.

Au niveau mondial, l'aérien représente en 2015 environ 11 % des émissions de CO_2 des transports, soit 1,5 % des émissions totales de gaz à effet de serre.

Outre le CO_2, d'autres effets réchauffants

Un deuxième biais d'analyse réside dans le fait que les émissions de CO_2 ne représentent qu'une partie de l'impact climatique de l'aviation. Parmi les autres effets les plus significatifs, les oxydes d'azote (NO_x) émis dans la haute atmosphère entraînent une réduction de la

quantité de méthane (CH_4) et une production d'ozone (O_3), deux gaz à effet de serre, ainsi que les traînées de condensation et les cirrus (nuages de la haute atmosphère) qui ont tous deux un effet réchauffant.
Sans même compter la contribution des cirrus, dont l'estimation reste très incertaine, l'effet réchauffant des émissions de l'aérien, appelé forçage radiatif, est ainsi deux fois plus fort qu'en prenant en compte seulement le CO_2. Il conviendrait donc de multiplier par deux l'ensemble des chiffres indiqués dans cet article pour mieux refléter l'impact climatique de l'aérien comparé aux autres modes.
Une estimation du pouvoir de réchauffement (mesuré en forçage radiatif) de l'aérien en 2005 amenait ainsi à une estimation moyenne de 3,5 % du forçage radiatif des activités humaines, et même 4,9 % en intégrant l'impact estimé des cirrus.

Perspectives insoutenables et pas d'alternatives technologiques
Au-delà de la part que représente le secteur aujourd'hui, c'est aussi sa croissance qui inquiète d'un point de vue climatique. L'association du transport aérien international (IATA) prévoit une croissance du trafic passager de +3,5 %/an et une multiplication par 2 du trafic d'ici 2037. À ce rythme, on serait tenté de se tourner vers la technologie pour voler au secours de l'impact climatique de l'aérien.
Pour ce secteur, toutefois, aucune option technologique n'est disponible à suffisamment court terme et à l'échelle nécessaire : l'avion électrique n'est pas pour demain, et serait forcément limité aux courtes distances en raison du poids des batteries ; l'hydrogène nécessiterait une rupture technologique ; même dans les scénarios les plus optimistes, les agrocarburants ne représenteraient que 20 % des carburants aériens en 2040, non sans concurrence avec les autres usages des terres et de la biomasse. Enfin, le secteur s'est fixé pour objectif d'améliorer l'efficacité énergétique des avions de 1,5 % par an entre 2009 et 2020, rythme très insuffisant pour compenser des hausses de trafic de +3,5 %/an.
Même en additionnant les contributions possibles de l'efficacité énergétique (ici supposée se maintenir à -1,5 %/an) et des agrocarburants (en négligeant leur impact à la production), un doublement du trafic impliquerait une hausse des émissions d'au moins 18 % d'ici 2037.
Pour rappel, les scénarios du GIEC nous indiquent qu'il faut diminuer les émissions globales de CO_2 de 20 % d'ici 2030 par rapport à 2010 (davantage encore par rapport à aujourd'hui, les émissions ayant augmenté depuis) pour rester sous les +2 °C de réchauffement, et les diminuer de 45 % d'ici 2030 pour rester sous les +1,5 °C.

Freiner la croissance du trafic
Aligner le transport aérien sur l'objectif de l'Accord de Paris devrait donc passer par une remise en cause des hausses du trafic. Ce changement peut passer en partie par des changements de comportement individuels (voyager moins loin, moins souvent, privilégier d'autres modes), mais devra aussi passer par une régulation plus forte au niveau international pour donner les bonnes incitations et faire payer au secteur le prix de sa pollution.
Au contraire, une forte hausse des émissions de l'aérien consisterait à reporter l'effort sur d'autres secteurs, ou pire encore, à nous éloigner un peu plus de l'objectif de maintenir un climat vivable pour les prochaines décennies.
De manière conscientisée ou non, la place que l'on donnera à l'aérien à l'avenir reflétera donc un choix sociétal et éthique : parmi les changements à opérer pour atteindre un monde neutre en carbone, est-on prêts à sacrifier quelques trajets en avion pour préserver des conditions de vie acceptables dans les décennies à venir ?

https://theconversation.com/impact-du-transport-aerien-sur-le-climat-pourquoi-il-faut-refaire-les-calculs-116534

Avion et climat, le tabou des aides publiques

14 mai 2019, 23:21 CEST

La protestation des « gilets jaunes » sur la taxation des carburants a mis au grand jour les exonérations dont bénéficient certains secteurs en matière de taxes énergétiques – à l'image des transporteurs routiers, du trafic maritime ou du kérosène des avions.

Cette moindre taxation d'un mode parmi les plus polluants n'a pas manqué de faire réagir, tout particulièrement pour le secteur aérien : la taxation du kérosène en France et en Europe commence à être évoquée ; l'intérêt d'avoir 9 aéroports en Bretagne est questionné ; plus largement, ce sont les multiples aides publiques dont bénéficient les déplacements en avion qui se trouvent aujourd'hui dénoncées.

Le besoin d'un rééquilibrage fiscal apparaît d'autant plus nécessaire que l'avion est essentiellement utilisé par les populations les plus aisées.

Un transport de riches et de loisirs

Si l'on observe un contraste considérable entre l'impact climatique très fort de l'avion d'un point de vue individuel et sa part relativement faible dans les émissions mondiales, c'est qu'il demeure très peu répandu à l'échelle planétaire. Et pour cause : c'est un mode de déplacement réservé aux classes les plus aisées… des pays les plus riches de la planète.

Au niveau mondial, les chiffres sont variés mais estiment que seuls 10 % à 18 % de la population mondiale ont déjà pris l'avion.

En France, selon la dernière enquête détaillée des déplacements en 2008, plus de la moitié des voyages en avion étaient réalisés par les 20 % des personnes aux revenus les plus élevés. 10 % des personnes les plus aisées prenaient ainsi en moyenne 7 fois plus l'avion que les 50 % de la population aux revenus les plus faibles. Le développement du low cost a réduit ces contrastes, sans toutefois gommer les fortes inégalités.

L'enquête montre aussi – tout comme la dernière enquête nationale des passagers aériens 2015-2016 – que les déplacements en avion répondent pour environ la moitié à des motifs de loisirs et vacances. Un autre quart s'explique par d'autres motifs privés (dont visite aux amis et famille), et un dernier quart par des raisons professionnelles.

Une question de justice climatique

La concentration des voyages et des émissions sur une quantité restreinte d'usagers érige le transport aérien comme un marqueur important de l'injustice que constitue le changement climatique : les principaux émetteurs sont les populations les plus aisées, tandis que les premières victimes des conséquences du changement climatique sont et resteront des personnes qui ne seront pour la plupart jamais montées dans un avion.

Puisque l'extension de ce mode de déplacement à l'ensemble de la planète ne semble ni possible ni souhaitable, la seule option raisonnable pour atténuer cette injustice climatique serait de réduire les émissions de l'aérien.

Pour cela, les perspectives sur les croissances de trafics et les évolutions technologiques mettent en évidence le fait qu'une trajectoire des émissions de l'aérien compatible avec l'Accord de Paris devra forcément passer par une limitation du trafic.

Une croissance inarrêtable ?

Une première étape serait de limiter les trajets intérieurs à la métropole. Bien qu'insuffisante, car ils représentent une faible part des émissions de l'aérien depuis la France, une telle politique serait envisageable : les leviers pour mettre fin aux aides publiques sont relativement faciles à mobiliser, et des alternatives existent bien souvent en train, autocar ou covoiturage.

Cela reste pourtant un tabou dans la politique des transports. En témoignent les Assises nationales du transport aérien, où les principales préoccupations portent au contraire sur la dynamique fragile des trafics français, et la faible compétitivité des compagnies aériennes françaises. La ministre Élisabeth Borne a ainsi annoncé vouloir accompagner la croissance du trafic, augmenter le budget des liaisons dites d'aménagement du territoire, tout en promettant un total d'allègement de charges de 220 millions d'euros pour les compagnies aériennes entre 2018 et 2019. Ces aides semblent en contradiction totale avec l'objectif affiché de la loi d'orientation des mobilités (LOM) en préparation, qui vise comme priorité l'amélioration de la mobilité du quotidien. Ainsi, comment justifier que les trajets du quotidien soient soumis aux taxes sur les carburants, quand les vacances en avion des plus aisés en sont exonérées ? Que de nombreux petits aéroports soient subventionnés par le contribuable à hauteur de plusieurs centaines d'euros par passager ? Ou qu'une ligne comme Paris-Brive soit maintenue et même aidée à hauteur de 60 €/billet, quand une ligne directe de train permet de faire le trajet pour des émissions 13 fois moindres ?

Un coût estimé à 505 millions d'euros

Ces aides ont un coût pour la collectivité. La fédération nationale des associations d'usagers des transports (FNAUT) les a chiffrées à 505 millions d'euros pour l'année 2016-2017, dont 310 millions d'euros correspondent à l'exonération de taxe énergétique pour les vols intérieurs (d'autres estimations allant à 500 millions), 170 millions de subventions aux aéroports, et 25 autres pour les lignes aériennes exploitées sous obligation de service public. Des aides auxquelles pourrait être ajoutée la TVA réduite à 10 % sur les billets d'avion intérieurs, tandis que les billets internationaux n'y sont pas soumis.

Par ailleurs, mises à part la taxe de solidarité et la TVA, les nombreuses taxes déjà présentes sur les billets d'avion financent majoritairement des services permettant le bon fonctionnement du transport aérien (aéroports, sûreté et sécurité ou encore administration de l'aviation civile) et ne constituent donc pas des prélèvements nets sur le secteur.

D'après le Sénat, 500 millions d'euros, c'est aussi le montant supplémentaire qu'il faudrait d'ici 2020 pour financer la loi d'orientation des mobilités : celle-ci se veut une réponse aux inquiétudes exprimées par la crise des « gilets jaunes », déclenchée par la forte dépendance à la voiture et au pétrole de nos transports, en particulier dans les zones peu denses.

On peut alors s'interroger : est-il vraiment utile que ce montant soit alloué à un mode de transport très polluant, qui profite essentiellement aux loisirs des plus riches ? Ne serait-il pas plus pertinent de donner aux collectivités locales les moyens de financer la transition vers des véhicules plus sobres, la rénovation des réseaux de transport, le covoiturage, ou encore le plan vélo ? Après tout, l'intervention de l'État dans le secteur des transports ne devrait-elle pas favoriser les mobilités les moins polluantes, en particulier pour les plus démunis ?

https://theconversation.com/avion-et-climat-le-tabou-des-aides-publiques-116101

Pourquoi la grève aura des effets durables sur la pratique du vélo

13 janvier 2020, 22:52 CET

Depuis le début de la grève contre la réforme des retraites, les perturbations dans les transports en commun et la très forte congestion routière qu'ils ont entraînées en région parisienne ont encouragé une partie des usagers à enfourcher un vélo. Le trafic cycliste a ainsi été multiplié par deux à trois à Paris, et les trajets en Vélib et autres véhicules en free-floating ont doublé. Le nombre de kilomètres parcourus avec l'application d'itinéraires Géovélo a quant à lui été multiplié par quatre.

Le phénomène ne passe pas inaperçu dans les rues et donne lieu à des scènes peu communes en France : des files quasiment continues de vélos et de trottinettes électriques sur certaines pistes cyclables aux heures de pointe, deux fois plus de vélos que de voitures défilant sur le boulevard Voltaire, parfois une vingtaine de cyclistes qui attendent aux feux de circulation…

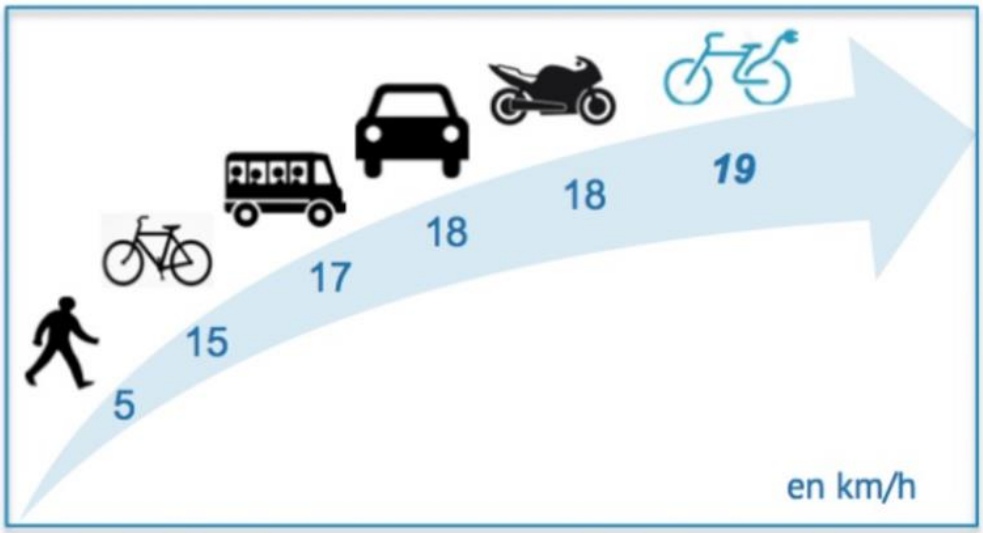
Au-delà des effets de court terme de cette grève sur la pratique du vélo, l'accélération actuelle aura des effets durables à Paris et en Île-de-France, mais aussi ailleurs en France.

Des changements d'habitude durables

Si une partie des nouveaux usagers du vélo reprennent leurs anciennes habitudes une fois la grève terminée, l'impact durable le plus évident sera lié aux usagers qui continueront le vélo après la grève.

Car nombre d'entre eux ont investi dans de nouveaux équipements, qu'ils souhaiteront rentabiliser. Depuis un mois, les ventes de vélos ont en effet explosé, comme en témoignent les ruptures de stocks de nombreux modèles de vélos de villes ou à assistance électrique dans les Décathlon ou enseignes spécialisées. Les demandes de location longue durée du système Véligo bénéficient elles aussi de la grève. Certains usagers remettent quant à eux en état du vieux matériel, avec une hausse des demandes de réparations (jusqu'à une multiplication par dix dans certains ateliers vélos).

Les nouveaux usagers découvriront pour certains les nombreux avantages individuels que présente le vélo : une vitesse qui permet de traverser Paris en 40 minutes, des trajets porte-à-porte, un temps de transport largement prévisible, et un très faible coût d'usage… sans parler des énormes bénéfices sur la santé de cette activité physique régulière, qualifiée de « remède miracle » par un ancien médecin-chef d'Angleterre, et encore trop sous-estimée par nos politiques de santé.



Vitesse moyenne des modes de placements dans quelques grandes villes européennes. Le vélo à assistance électrique, un nouveau mode métropolitain ? Enquête européenne, 2015, Ghislain Delabie, CC BY-NC-ND

L'analyse des pratiques modales révèle enfin le poids des habitudes dans les comportements de mobilité. Notre routine nous encourage à utiliser un ou deux modes sans re-questionner à chaque déplacement quel est le plus pertinent. Les pratiques évoluent ainsi en testant d'autres modes, en bousculant certaines habitudes ou lors de changements dans nos vies, comme un déménagement. D'un jour à l'autre, la grève aura contraint de nombreux usagers à tester le vélo, et son installation dans la durée permet d'ancrer dans le temps ces nouvelles habitudes.

L'expérience inédite d'une ville plus cyclable

La grève donne à voir une ville organisée pour le vélo, ce qui a également un impact sur les autres usagers. Le nombre important de vélos force les piétons à faire attention en traversant une piste cyclable, et les automobilistes à vérifier leurs angles morts. Le fort trafic rend d'autant plus difficile et inacceptable le stationnement des voitures sur les pistes réservées aux vélos ou leur utilisation par les deux-roues motorisés. Ces comportements dangereux déclinent à mesure qu'augmente le nombre de cyclistes, participant au phénomène de « sécurité par le nombre ».

L'expérience actuelle illustre aussi toute la pertinence d'aménagements efficaces, en particulier de larges pistes cyclables sécurisées et séparées du trafic motorisé, sans lesquelles l'engouement actuel n'aurait sûrement pas été si fort. Elle met aussi en lumière les limites des infrastructures actuelles pour absorber un fort surplus de trafic – que ce soit le manque ou la mauvaise qualité des pistes cyclables dans certaines rues ou quartiers, leur manque de continuité dans les villes et entre les villes de la région, ou encore les stationnements vélos trop peu nombreux.

L'expérience révèle ainsi un élément peu connu du grand public. Si 30 % des Français pratiquent déjà le vélo régulièrement ou occasionnellement, 53 % se disent prêts à s'y mettre à condition que des infrastructures sécurisées soient aménagées. De très nombreux usagers se mettent donc au vélo chaque fois qu'une ville ou un pays développe un système vélo efficace, qui associe les infrastructures, les services cyclistes, des mesures fiscales et de communication.

On remarquera d'ailleurs que les conditions météorologiques difficiles durant la grève n'ont pas suffi à freiner un grande nombre de nouveaux usagers.

La pratique encore balbutiante de certains d'entre eux met en évidence la nécessité d'accompagner le développement du vélo d'une meilleure information voire de formations via les vélo-écoles, afin d'apprendre les règles de sécurité basiques, à s'insérer dans la circulation, se doter d'un matériel fiable, s'équiper d'antivols solides ou encore s'assurer d'être visibles la nuit.

Un moment opportun pour le vélo

On pourrait croire que le phénomène observé en région parisienne n'aura que des implications locales. Mais l'histoire des transports a révélé que Paris est souvent le point de départ d'une diffusion plus large : le rayonnement de la capitale, la concentration du pouvoir et de l'attention des médias sur Paris, dans des proportions parfois regrettables, aura probablement un effet d'entraînement du succès actuel du vélo dans le reste de la France. Ainsi le renouveau de cette pratique en France, qui a d'abord repris dans le centre des grandes villes, va s'étendre progressivement au reste du territoire.

Un an après la présentation du Plan Vélo national et avec une mobilisation croissante en faveur du vélo, la grève agit comme un accélérateur de la visibilité du vélo trois mois avant l'échéance des élections municipales. Alors que les listes s'apprêtent à présenter leurs programmes, le sujet des transports sera scruté avec attention, tant il occupe une place grandissante dans l'actualité et les modes de vie, et fait partie des domaines dans lesquels les mairies disposent de marges de manœuvre importantes.

Si par le passé les politiques municipales des transports se sont trop souvent limitées au seul développement des transports en commun, la hiérarchie des priorités devrait être reconsidérée : développer d'abord un urbanisme et un aménagement du territoire favorisant la proximité et la réduction des distances, privilégier autant que possible les déplacements à pied et à vélo, développer les transports en commun, et enfin reconsidérer la place accordée à la voiture.
Si celle-ci doit diminuer en ville, il est indispensable que des alternatives efficaces soient développées. Tandis que 83 % des Français souhaitent que l'on accorde une place plus importante au vélo en ville, un plan ambitieux en la matière devient incontournable pour une politique de mobilités durables.

Des mobilités plus résilientes
Outre les avantages individuels liés à la pratique du vélo, celui-ci bénéficie de nombreux atouts pour les villes et pour la société. Peu coûteux pour la collectivité, il lui fait économiser des dépenses de santé, occupe peu d'espace en ville, et n'émet aucun polluant. Il est sobre en matériaux, silencieux, et son utilisation encourage à favoriser les commerces de proximité et nous offre un autre regard sur la ville.
Sa forte diffusion rendra nos mobilités bien plus résilientes aux éventuelles crises ou chocs futurs : après la grève, d'autres événements exigeront de nous une capacité d'adaptation… une éventuelle nouvelle hausse des prix du pétrole, une crise économique, ou encore des événements climatiques affectant des infrastructures.
Ces avantages donnent au vélo une image largement favorable au sein de la société, et en font un symbole de sobriété dans la transition écologique et solidaire à venir. En témoignent les plaquettes de communication sur le développement durable, souvent illustrées par le vélo.
La grève pourrait bien être le déclencheur d'une forte progression dans l'usage du vélo en France, une tendance dont on ne peut que se réjouir. Dans les prochaines semaines, l'évolution du trafic à vélo viendra peut-être confirmer cette hypothèse. Et il y a fort à parier que le déploiement de politiques cyclables ambitieuses sur l'ensemble du territoire fasse partie des enjeux importants des élections municipales.

https://theconversation.com/pourquoi-la-greve-aura-des-effets-durables-sur-la-pratique-du-velo-129373

4. Article de synthèse, site du Forum Vies Mobiles

Stratégie nationale bas-carbone : peut-on faire l'économie d'un ralentissement des mobilités ?

Article en ligne : https://fr.forumviesmobiles.org/mobilithese/2020/06/18/strategie-nationale-bas-carbone-peut-faire-leconomie-dun-ralentissement-des-mobilites-13345

18 Juin 2020

Pour atteindre l'objectif de neutralité carbone en 2050, la France s'est dotée d'une feuille de route ambitieuse qui concerne tous les secteurs de l'économie. Les transports de voyageurs y occupent une bonne place, puisque la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC) vise leur décarbonation quasi complète. Aurélien Bigo s'appuie sur l'historique de l'évolution des émissions carbone pour évaluer la SNBC à l'aune des différents scénarios de prospectives et interroge : le scénario gouvernemental peut-il se passer d'un ralentissement des déplacements pour répondre à l'urgence de la transition énergétique ?

En 2017, la France décidait de viser la neutralité carbone en 2050 afin de s'aligner avec un scénario permettant de contenir le réchauffement climatique sous la barre des +2°C. Cette neutralité, plus ambitieuse que l'objectif précédent, doit être atteinte avec la réalisation de la Stratégie nationale bas-carbone (SNBC), qui prévoit de diviser par 5,7 les émissions de CO_2 entre 2015 et 2050 – soit un passage de 458 à 80 millions de tonnes par an [1] . Dans ce contexte, le secteur des transports doit viser la décarbonation quasi complète, et notamment pour les transports terrestres qui doivent sortir totalement du pétrole, alors que ce dernier représente plus de 90 % des consommations du secteur actuellement. Une telle transformation en 30 ans est un défi énorme.

Pour parvenir à cet objectif, la SNBC a envisagé cinq leviers [2] :

- **La modération de la demande de transport**, qui correspond au nombre de kilomètres parcourus par les Français ;
- **Le report modal**, soit la baisse de la part des kilomètres parcourus par les modes routiers individuels (voiture, deux-roues motorisés, une partie des véhicules utilitaires légers) et en avion (pour les trajets intérieurs à la France), au profit de la part des kilomètres parcourus en transports en commun routiers (bus et cars), en train et par les modes actifs (marche et vélo) ;
- **L'augmentation du taux de remplissage des véhicules**, défini comme le nombre de personnes par véhicule ;
- **L'amélioration de l'efficacité énergétique des véhicules**, c'est-à-dire la baisse de la consommation d'énergie pour chaque kilomètre parcouru (par exemple en améliorant les moteurs ou en réduisant la taille des véhicules) ;
- **La baisse de l'intensité carbone de l'énergie**, c'est-à-dire des émissions de CO_2 par unité d'énergie utilisée, cette intensité étant élevée pour le pétrole et plus faible pour l'électricité ou les énergies renouvelables.

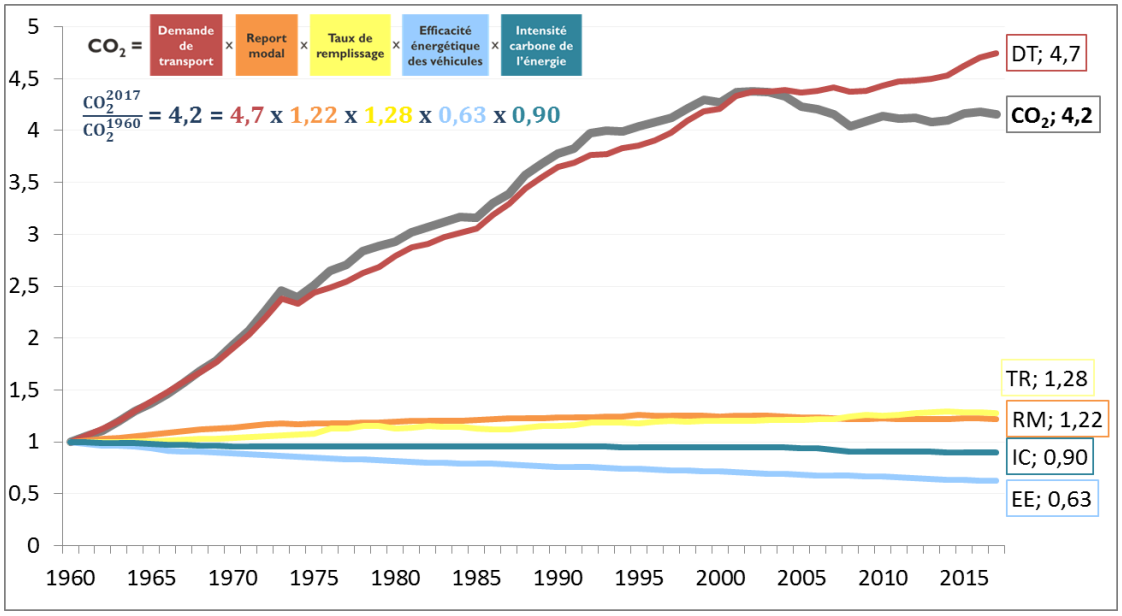
Les 5 leviers de la Stratégie nationale bas-carbone pour décarboner les transports

Quels sont les leviers privilégiés par la SNBC pour répondre aux objectifs de décarbonation et quelle est la probabilité de voir se réaliser le scénario qu'elle envisage ?
Trois approches permettent de donner des éléments de réponse à ces questions : tout d'abord, quelle a été l'évolution des émissions de CO_2 depuis les années 1960 et quel a été le rôle des politiques publiques dans cette évolution ? Ensuite, comment se situe le scénario de la SNBC parmi les autres scénarios prospectifs de décarbonation ? Enfin, quel est l'impact de l'évolution de la vitesse moyenne de déplacement et quelle place pourrait-elle prendre dans un objectif global de neutralité carbone ?

L'évolution des émissions des transports depuis 1960

Depuis 1960, la demande est le principal facteur d'évolution

Par le passé, les émissions de CO_2 ont été multipliées par 4,2 entre 1960 et 2017, avec un pic au début des années 2000, suivi d'une légère diminution [3]. La demande de transport a été le principal facteur d'évolution des émissions : les courbes d'évolution du CO_2 et de la demande sont restées proches sur l'ensemble de la période, avec un nombre de kilomètres parcourus multiplié par 4,7 depuis 1960. La croissance de ce dernier a ralenti dans les années 2000, au moment où les émissions de CO_2 ont légèrement baissé.



Décomposition de l'évolution des émissions de CO_2 du transport de voyageurs de 1960 à 2017

Ce très faible découplage entre la demande et les émissions sur la période révèle un impact faible des quatre autres leviers, qui s'explique par le fait qu'ils se sont principalement compensés entre eux : si des progrès d'efficacité énergétique ont été réalisés sur la période (-

37 % d'impact sur les émissions de CO_2), complétés par une faible amélioration de l'intensité carbone de l'énergie (-10 % d'émissions par unité d'énergie consommée), ils ont été largement compensés par un report modal qui s'est fait majoritairement vers les modes routiers sur le début de la période (+22 % d'impact sur les émissions de CO_2) et par la baisse du taux de remplissage des voitures (+28 % d'impact sur les émissions de CO_2).

Des politiques publiques à faible impact environnemental

Si les émissions annuelles du transport de voyageurs ont marqué le pas à partir des années 2000, il faut s'interroger sur l'impact environnemental des politiques publiques sur ce résultat. Ces politiques se sont principalement focalisées sur le report modal vers les transports en commun, l'efficacité énergétique des véhicules et le développement des biocarburants.

Le report modal, après un épisode marqué de généralisation de la voiture individuelle, se fait depuis 1995 vers les transports en commun ferroviaires, et son impact sur les émissions peut être estimé à -2,7 $MtCO_2$ par an. Une baisse relativement faible car équivalente à 3 % des émissions du secteur des transports de voyageurs.

Côté efficacité énergétique, aucune rupture de tendance durable liée aux politiques publiques n'est observée sur la période [4].

Quant à la baisse des émissions due au développement des agrocarburants (donc de l'intensité en carbone de l'énergie), elle est estimée à 5,2 $MtCO_2$ dans la décomposition. Ce chiffre est néanmoins contestable : la convention de neutralité climatique de la biomasse énergie considère que le CO_2 émis par les agrocarburants durant leur combustion a été capté par la plante durant sa croissance. Elle fait implicitement l'hypothèse (fausse) qu'aucun CO_2 n'aurait été capté sur la surface utilisée s'il n'y avait pas eu de culture d'agrocarburants. En réalité, quand on prend en compte l'analyse de cycle de vie [5] et les possibles changements d'affectation des sols (dont une possible déforestation) liés à la production des agrocarburants consommés en France, leur impact climatique apparaît comme similaire au pétrole. Il serait donc plus juste de compter les émissions liées à leur combustion [6].

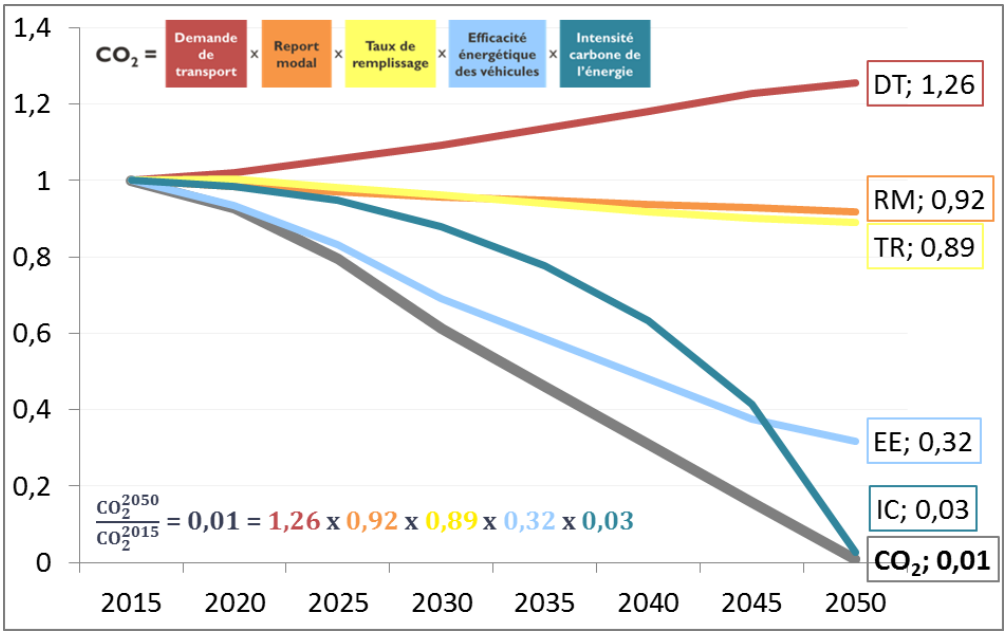
En conséquence, cela réduirait à seulement 7 % le découplage observé entre la demande et les émissions de CO_2 observé entre 1960 et 2017 (contre 12 % sans compter les émissions des biocarburants). Cela réduirait également l'effet mesurable des politiques publiques environnementales sur la baisse des émissions aux seuls 3 % du report modal.

Enfin, la première explication du pic d'émissions de CO_2 est la stabilisation de la demande totale entre 2002 et 2009, soit une baisse du nombre de kilomètres parcourus par personne, compensée par la croissance de la population. Cette évolution, parfois étudiée sous le nom de peak travel, sera étudiée plus bas, mais n'est pas le résultat des politiques publiques environnementales, qui n'ont pas cherché à réduire le nombre de kilomètres parcourus jusqu'à aujourd'hui. Au contraire, ces politiques ont pu encourager son augmentation par des mesures ayant des effets indirects sur la demande (par exemple avec l'augmentation de l'offre de transports en commun ou l'amélioration de l'efficacité énergétique des moteurs, encourageant ainsi à faire plus de kilomètres), par le financement d'infrastructures de transport y compris pour les modes polluants (création d'autoroutes, subventions aux petits aéroports), ou encore par un aménagement du territoire favorisant l'allongement des distances (étalement urbain, centres commerciaux en périphérie des villes).

Le défi de la décarbonation des mobilités

Les mêmes leviers peuvent être utilisés pour comparer la SNBC à d'autres scénarios prospectifs de décarbonation des mobilités, afin d'une part d'évaluer le potentiel de chaque levier, et d'autre part de comprendre les grands enseignements qui se dégagent de ces projections.

La Stratégie nationale bas-carbone, focalisée sur les leviers technologiques



Décomposition des émissions de CO_2 des transports de passagers pour le scénario SNBC entre 2015 et 2050

Le scénario de la stratégie française prévoit entre 2015 et 2050 [7] :

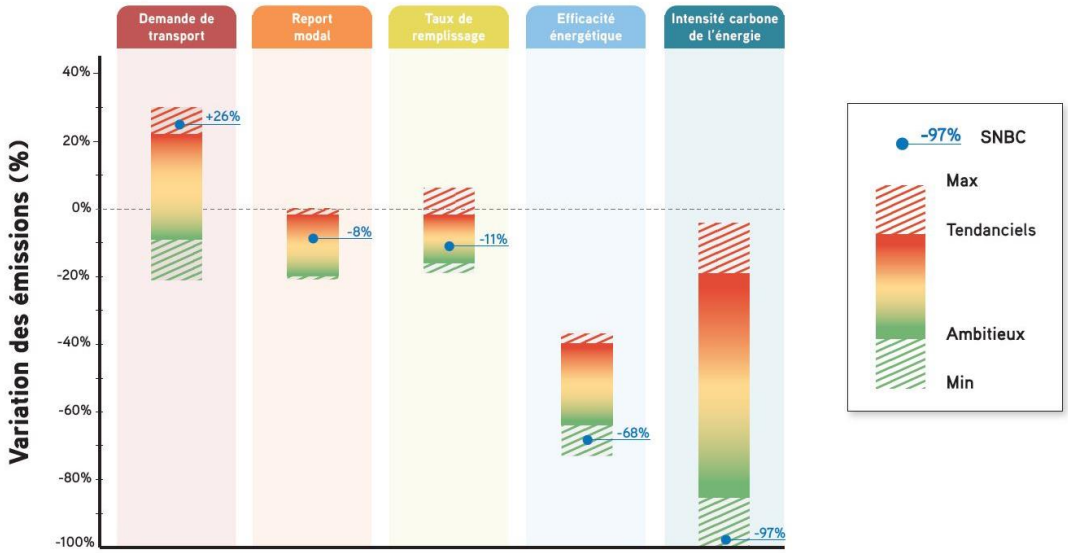
- une augmentation de la demande de transport de 26 %, via une hausse de la population et des kilomètres par personne (13 %) ;
- un report modal vers le train et le vélo, faisant baisser les émissions de 8 % ;
- un essor du covoiturage, qui permettrait de faire baisser les émissions de 11 % en améliorant le remplissage des voitures ;
- une forte amélioration de l'efficacité énergétique, les consommations par kilomètre diminuant de 68 %, grâce aux progrès sur les moteurs thermiques dans un premier temps, puis au développement de la voiture électrique [8] ;
- enfin, une forte décarbonation de l'énergie utilisée, de 97 %, qui permet de ramener le facteur d'intensité carbone à un taux proche de 0 en 2050, essentiellement par le passage à l'électricité.

Les principales baisses d'émissions du scénario proviennent donc très majoritairement de facteurs technologiques, en particulier de l'efficacité énergétique des véhicules dès les premières années, et du développement progressif du véhicule électrique. À ce titre, la stagnation des émissions de CO_2 des véhicules neufs entre 2015 et 2019, qui rend compte de l'évolution des progrès à la fois d'efficacité énergétique et d'intensité carbone, est inquiétante et risque de remettre en cause les objectifs climatiques de court terme. Les progrès attendus sur le plan de l'efficacité énergétique paraissent d'autant plus compliqués à réaliser que la SNBC ne prévoit pas de mesure pour faire fortement baisser le poids des véhicules ou pour

limiter la vitesse sur les routes les plus rapides, deux leviers majeurs dans ce domaine. Ces mesures seraient pourtant favorables non seulement à la baisse de la consommation des véhicules thermiques, mais aussi à la limitation de la taille des batteries des voitures électriques, et donc à la modération de l'impact environnemental de leur fabrication.

Où se situe la SNBC au sein des différents scénarios prospectifs ?

Les évolutions prévues dans la SNBC peuvent être comparées avec les potentiels identifiés par les autres scénarios de prospective existants en France, qui offrent des visions contrastées de la transition énergétique des transports. La contribution des cinq leviers a donc été évaluée pour 13 scénarios français produits par différents types d'acteurs : 4 scénarios tendanciels projetant une évolution dans la continuité des trajectoires actuelles, sans politiques publiques additionnelles, et 9 scénarios volontaristes visant une forte baisse des émissions de CO_2 par l'activation des différents leviers [9] . Sans donner les résultats pour chaque scénario [10] , la figure ci-dessous compare pour les cinq leviers : l'évolution prévue dans la SNBC (points bleus) ; l'évolution moyenne pour les quatre scénarios tendanciels (limite supérieure des rectangles, en rouge) ; l'évolution moyenne des quatre scénarios volontaristes les plus ambitieux sur chaque levier (limite inférieure des rectangles, en vert) ; enfin, pour chaque levier également, les valeurs extrêmes données par les scénarios les plus et les moins ambitieux (Min et Max).



Comparaison des potentiels de réduction des émissions des 5 leviers d'ici 2050 dans les scénarios tendanciels, les scénarios volontaristes et la SNBC

Le premier constat est une ambition modérée voire très faible de la SNBC sur les trois premiers facteurs de la décomposition, qui sont des leviers essentiellement d'aménagements du territoire (comme la localisation des logements et des activités), d'organisation des mobilités (comme la mise en place de plateformes de covoiturage) et d'incitations aux changements de comportements (comme la construction d'infrastructures cyclables). La SNBC prévoit une hausse de la demande plus forte encore que les scénarios tendanciels, qui prévoient déjà en moyenne une hausse de l'ordre de 20 %, alors que les scénarios les plus ambitieux sur ce point projettent en moyenne une baisse de quasiment 10 % [11] . De manière

moins flagrante, la SNBC se montre relativement peu ambitieuse sur le report modal et le covoiturage, dont le potentiel identifié par les autres scénarios est de l'ordre d'une réduction des émissions de 20 %.
Ainsi, le rôle limité conféré à ces leviers tout en visant un objectif global de neutralité carbone force la stratégie à être encore plus ambitieuse que les autres scénarios volontaristes sur les leviers d'efficacité énergétique et d'intensité carbone de l'énergie.
Concrètement, la SNBC mise donc presque exclusivement sur la technologie, qui permettra selon elle de respecter ses objectifs climatiques, aussi bien à court qu'à long terme.

Quelles évolutions prévisibles d'ici 2030 ?
L'analyse des tendances récentes montre le besoin d'une forte accélération des baisses d'émissions de CO_2 par kilomètre parcouru si l'on veut voir se réaliser le scénario de la SNBC : si depuis 1993 les baisses des émissions par kilomètre parcouru sont relativement constantes et de l'ordre de -0,5 % par an (soit -0,5 gCO_2/km, tous modes confondus, en intégrant ici les émissions des agrocarburants), la SNBC prévoit de réaliser des progrès cinq fois plus importants entre 2015 et 2030 (de -2,7 %/an). Au lieu de cette accélération, la tendance est à la stagnation des émissions des véhicules neufs sur les quatre premières années de la période, soit une évolution bien moins favorable que ce que les scénarios tendanciels envisagent eux-mêmes. De plus, aucune évolution sur le covoiturage ou le report modal pouvant avoir un impact significatif sur les émissions n'a été observée.
Les tendances récentes indiquent que c'est la demande qui a le plus influencé l'évolution des émissions à court terme, en étant très réactive en particulier aux variations de prix des carburants. Et pourtant, la question de la demande brille par son absence dans les débats et les mesures de la loi d'orientation des mobilités (LOM) votée en 2019. La modération de la demande sera pourtant une condition majeure pour pouvoir espérer de forts reports modaux : par exemple, les reports vers le vélo pour les courtes distances et vers les trains de nuit pour les longues distances représenteront ainsi une part d'autant plus importante du nombre total de kilomètres parcourus si ce total diminue. La décarbonation de l'énergie dépendra également de la modération de la demande, car les technologies développées sont tributaires de ressources disponibles en quantités limitées, et dont les impacts environnementaux sont parfois importants [12] . Enfin, le transport aérien international (non pris en compte dans la précédente comparaison car il n'est pas étudié par tous les scénarios) ne dispose pas vraiment d'alternative de report modal, ni de technologie disponible à suffisamment court terme pour s'aligner sur une trajectoire compatible avec l'accord de Paris. Là aussi, seule une modération de la demande pourra permettre de faire baisser les émissions de CO_2 de ce secteur.

La vitesse au cœur de l'évolution des mobilités

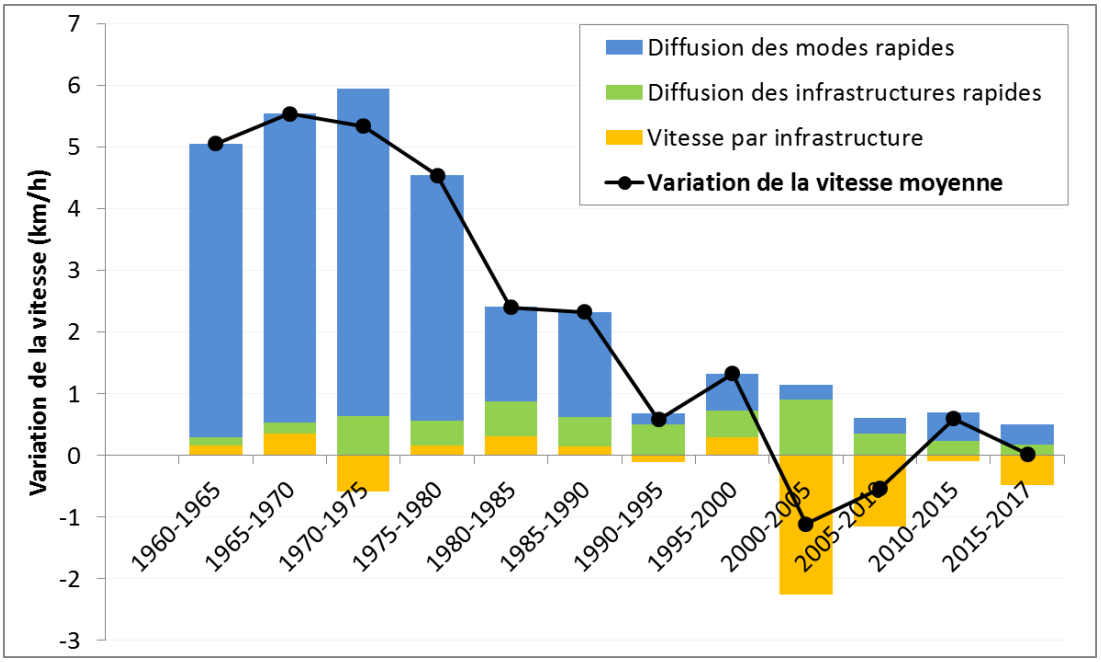
Temps de transport et vitesse des déplacements
Afin de mieux appréhender les marges de manœuvre dont disposent les politiques publiques pour agir sur la demande de mobilité, il convient de mieux comprendre les principaux déterminants de son évolution dans le temps.
Sur deux siècles, quelles ont été les mutations et les continuités de la mobilité ? Alors que la marche dominait largement les déplacements il y a 200 ans, les Français faisaient de l'ordre

de 4 à 5 kilomètres par jour, soit 10 fois moins qu'actuellement. Puisque le nombre de déplacements par jour et par personne est resté stable (entre 3 et 4), cela indique que c'est la distance moyenne des déplacements qui a été multipliée par 10. Parallèlement, les temps de transport sont restés relativement stables au cours du temps et dans diverses régions du monde, de l'ordre d'une heure de transport par jour, une constante connue sous le nom de « conjecture de Zahavi » [13].

Il faut donc en déduire que la multiplication des distances par 10 a été permise par une augmentation de la vitesse des déplacements à peu près équivalente. Pour une personne qui se déplace une heure par jour, le nombre de kilomètres parcourus est donc dix fois plus élevé qu'il y a 200 ans, ce qui a des conséquences fortes sur ses choix de lieux de vie, d'activités, de vacances, etc. La vitesse des modes à disposition des personnes est une condition majeure d'augmentation du nombre de kilomètres parcourus.

La diffusion des modes rapides, jusqu'à la saturation ?

L'étude de la vitesse moyenne des déplacements sur la période 1960-2017 permet d'identifier les différents facteurs de son évolution au cours du temps.



Évolution et déterminants de la vitesse moyenne des déplacements au cours du temps par période de 5 ans (sauf 2015-2017)

L'effet de diffusion des modes rapides a eu un impact majeur, en particulier sur les décennies 1960 et 1970. Sur ces deux décennies, la hausse de la vitesse moyenne d'environ 1 km/h chaque année s'est faite essentiellement par un report modal de la marche vers la voiture (en bleu sur le graphique ci-dessus) [14]. Alors que la voiture représente 62 % des temps de transport depuis le début des années 1990, le développement des autoroutes (en vert sur le graphique) a participé à la hausse de sa vitesse moyenne. La hausse de la vitesse moyenne des déplacements a cependant été stoppée au début des années 2000 par la mise en place des radars, qui a fait chuter les vitesses pratiquées de 7 km/h sur les routes limitées à 90 km/h ou plus entre 2002 et 2005 [15] (en jaune). Ce changement a suffi à faire baisser la vitesse moyenne de l'ensemble des déplacements de quasiment 4 %, et cette baisse est concomitante à la baisse

du nombre de kilomètres parcourus évoquée plus haut. En plus des explications généralement avancées dans la littérature sur l'impact du prix du pétrole ou de la saturation du taux de motorisation des ménages [16] , une explication complémentaire au pic de la demande individuelle des années 2000 découlerait donc du pic des vitesses de déplacements. Celui-ci a encouragé les usagers à réduire le nombre de kilomètres parcourus afin de préserver leurs temps de transport.

Même si la vitesse a légèrement augmenté sur la décennie 2010 en même temps que les kilomètres parcourus (voir figure en bas d'article), la tendance à la stagnation de la vitesse moyenne au tournant du millénaire pourrait remettre en cause certaines hypothèses des scénarios de prospectives, en particulier celui de la Stratégie nationale bas-carbone : si la vitesse de chaque mode à courte et longue distance reste stable, le report vers les modes actifs (plus lents) prévu dans le scénario se traduirait par une légère baisse de la vitesse moyenne des déplacements ; l'augmentation de 13 % des kilomètres parcourus par personne prévue sur la période ne pourrait alors être possible que par une augmentation du temps de transport individuel d'environ 10 minutes par personne et par jour. Bien que les temps de transport aient probablement augmenté ces dernières décennies, une hausse si forte en trois décennies paraît peu réaliste. Même si elle advenait, un tel scénario ne semble pas souhaitable [17] .

La transition énergétique des mobilités, synonyme de ralentissement ?

Si prévoir l'avenir n'est pas chose aisée, il peut au moins être signalé que les marges pour de fortes hausses de la vitesse moyenne sont relativement limitées [18] . En outre, de nombreuses mesures de transition énergétique pourraient même encourager une baisse des vitesses moyennes, et en retour une baisse des distances de déplacements par personne.

Concernant l'effet de report modal, le renouveau de la marche et surtout du vélo observé en ville pourrait se développer sur l'ensemble du territoire dans les années à venir, ce qui contribuerait au ralentissement. Le développement des infrastructures cyclables [19] et des zones piétonnes [20] semblent aller dans ce sens. Si la croissance prévue de l'aérien contribue à l'augmentation du nombre de km parcourus (en particulier pour l'international, non pris en compte dans l'analyse), son fort impact climatique nécessiterait de freiner son développement à l'avenir.

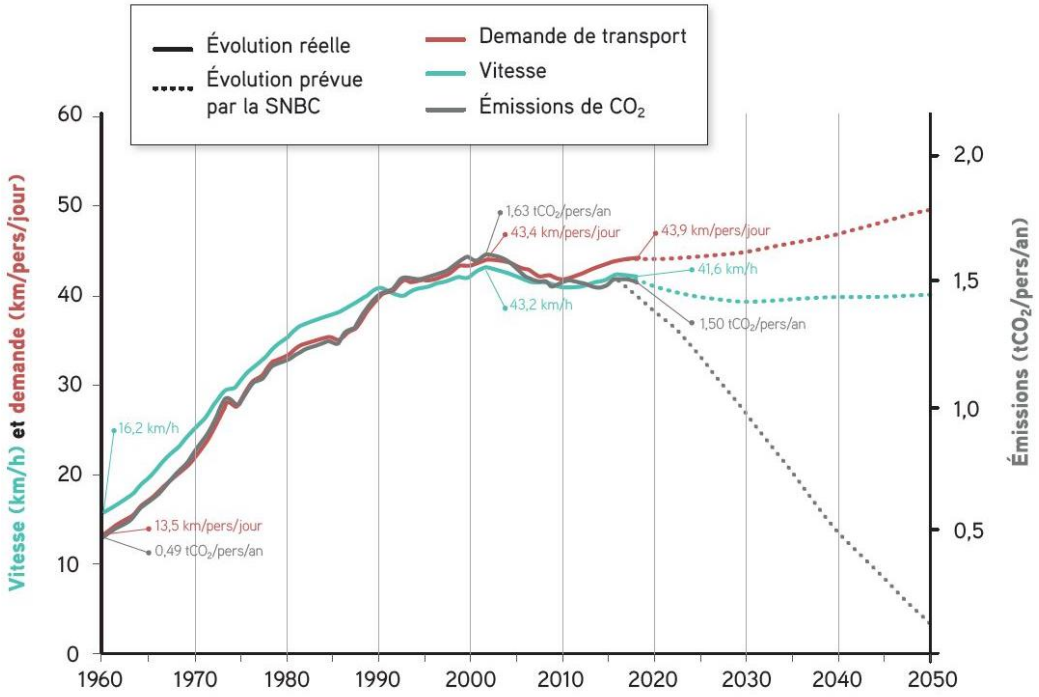
Concernant les infrastructures de transports rapides, un des moteurs de l'augmentation de la vitesse et des déplacements, la tendance est à la limitation du nombre de nouveaux projets pour des raisons budgétaires notamment. La cohérence avec les objectifs climatiques impliquerait la continuité de cette politique. Sur les routes, dans un contexte de retard important sur l'amélioration de l'efficacité énergétique, une des mesures les plus efficaces à court terme serait de baisser la vitesse sur les autoroutes : la baisse de consommation par kilomètre est de l'ordre de 17 % pour les véhicules thermiques et de 24 % pour les véhicules électriques avec un passage de 130 à 110 km/h. Une telle mesure toucherait davantage les ménages plus favorisés pour des trajets non contraints, ce qui la rendrait potentiellement plus acceptable socialement que le passage aux 80 km/h. Par ailleurs, cette baisse fournirait une incitation à privilégier le train pour les trajets longue distance. Enfin, en ville, les zones à 30 km/h se développent depuis plusieurs années, ralentissant le trafic motorisé au profit des modes alternatifs.

La sobriété, le défi collectif des mobilités de demain ?

Ce qui ressort en creux de l'analyse de la Stratégie nationale bas-carbone et des politiques publiques actuelles est la difficulté à penser et organiser la sobriété (par la diminution de la demande, l'allègement des véhicules, le développement des modes actifs, la réduction des vitesses, etc.) dans les politiques de mobilité et de transition écologique. Cette tendance se retrouve aussi bien dans les politiques de l'État que chez bon nombre de collectivités, d'entreprises ou de citoyens. Pourtant, la critique de la course à la croissance et la prise de conscience des besoins de sobriété ou des nécessaires changements de modes de vie sont de plus en plus présentes dans la société et documentées par de nombreux sondages : par exemple, en 2015, 83 % des Français répondaient qu'il faudrait changer de modes de vie de façon majeure pour faire face au changement climatique, et seuls 16 % d'entre eux pensaient que la technologie pouvait résoudre le problème [21] . Si des évolutions technologiques sont indispensables, elles sont en effet insuffisantes à elles seules et doivent être orientées vers une sobriété énergétique et matérielle pour éviter de créer de nouveaux problèmes environnementaux.

Historiquement, l'accélération de nos mobilités a rimé avec augmentation de la demande et hausse des émissions. Pour atteindre la neutralité carbone dans seulement 30 ans, peut-être serait-il raisonnable, voire urgent, de… ralentir ?

Les aspirations au ralentissement ou à vivre davantage en proximité sont déjà importantes [22] . Elles doivent maintenant être accompagnées pour se concrétiser. Le défi collectif serait donc désormais d'imaginer et de mettre en œuvre une transition à la fois juste, cohérente et enthousiasmante, pour aller vers des mobilités et des modes de vie plus sobres et plus résilients aux changements à venir.



Évolution historique et évolution prévue dans la SNBC de la vitesse, de la demande et des émissions individuelles (y compris CO_2 de combustion de la biomasse), 1960-2050

Références et compléments

Pour plus d'informations sur les travaux dont est issu cet article :

Bigo, Aurélien, 2020. « Comment décarboner les transports d'ici 2050 ? », Travail de thèse. http://www.chair-energy-prosperity.org/publications/travail-de-these-decarboner-transports-dici-2050/

Bigo, Aurélien, 2020. « Comment expliquer les tendances passées (1960-2017) des émissions de CO_2 dans les transports en France ? » http://www.chair-energy-prosperity.org/publications/expliquer-tendances-passees-1960-2017-emissions-de-co2-transports-france/

Bigo, Aurélien, 2020. « Scénarios de prospectives : quels potentiels des 5 leviers de décarbonation des transports d'ici 2050 ? » http://www.chair-energy-prosperity.org/publications/scenarios-decarbonation-transports-2050/

Bigo, Aurélien, 2020. « Vitesse des mobilités : accélération au 20ème siècle, ralentissement au 21e ? » http://www.chair-energy-prosperity.org/publications/vitesse-mobilites-france/

Références citées dans l'article :

ADEME, 2013. « Les impacts sur l'environnement des véhicules électriques et thermiques ». https://presse.ademe.fr/2013/12/les-impacts-sur-lenvironnement-des-vehicules-electriques-et-thermiques.html

ADEME, 2018. « L'analyse du cycle de vie ». https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-laction/dossier/lanalyse-cycle-vie/quest-lacv

Crozet, Yves, Forum Vies Mobiles, 2019. « Vitesse des déplacements ». https://fr.forumviesmobiles.org/reperes/vitesse-des-deplacements-12976

Forum Vies Mobiles et ObSoCo, 2016. « Aspirations liées à la mobilité et aux modes de vie - enquête internationale ». http://fr.forumviesmobiles.org/projet/2016/05/23/aspirations-liees-mobilite-et-aux-modes-vie-enquete-internationale-3240

Grimal, Richard, Forum Vies Mobiles, 2017. « Plafonnement de la circulation automobile : les prémisses d'un déclin ? ». https://fr.forumviesmobiles.org/mobilithese/2017/09/28/plafonnement-circulation-automobile-premisses-dun-declin-3694

MTES, 2020. « Projet de Stratégie nationale bas-carbone ». https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc

ONISR. « Observatoire des vitesses ». https://www.onisr.securite-routiere.interieur.gouv.fr/contenus/etudes-et-recherches/comportements-en-circulation/observations/observatoire-des-vitesses

Pew Research Center, 2015. « Global Concern about Climate Change, Broad Support for Limiting Emissions ». https://www.pewresearch.org/global/2015/11/05/global-concern-about-climate-change-broad-support-for-limiting-emissions/

Notes

1 MTES, 2020. « Projet de Stratégie Nnationale Bbas-Ccarbone ». https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc

2 https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/2020-03-25_MTES_SNBC2.pdf (consulté en mai 2020). Ces cinq leviers s'appliquent aussi au transport de marchandises, avec

des unités un peu différentes (tonnes.km, remplissage en tonnes/veh…), mais nous ne traitons ici que la mobilité des voyageurs. Les kilomètres parcourus par les conducteurs de transports de marchandises ne sont pas comptabilisés ; seuls sont pris en compte ceux qui correspondent à du transport de voyageurs, estimés à 60 % des VUL (véhicules utilitaires légers).

3 L'article prend comme périmètre le transport intérieur de voyageurs, hors trafic aérien international, en raison de l'indisponibilité des données pour l'international pour certains scénarios de prospectives, et afin de garder un périmètre constant entre les trois analyses (passé, scénarios et vitesse). En incluant l'international, les émissions sont à peu près constantes depuis le début des années 2000. Elles ont été multipliées par 4,7 depuis 1960 et la demande a été multipliée par 5,3. Seules les émissions directes (liées à la combustion du pétrole) sont comptabilisées.

4 France Stratégie, 2019. « Comment faire enfin baisser les émissions de CO_2 des voitures », https://www.strategie.gouv.fr/publications/faire-enfin-baisser-emissions-de-co2-voitures (consulté en mai 2020).

5 Selon l'ADEME, « L'analyse du cycle de vie (ACV) recense et quantifie, tout au long de la vie des produits, les flux physiques de matière et d'énergie associés aux activités humaines. Elle en évalue les impacts potentiels puis interprète les résultats obtenus en fonction de ses objectifs initiaux. » https://www.ademe.fr/expertises/consommer-autrement/passer-a-laction/dossier/lanalyse-cycle-vie/quest-lacv

6 *Voir chapitre 1 de la thèse*

7 Pour chaque levier, le coefficient calculé correspond à l'évolution des émissions par l'activation de ce seul levier : par exemple, le coefficient de la demande de 1,26 implique que les émissions augmenteront de 26 % si la demande est le seul levier à être modifié d'ici 2050. Dans le calcul des coefficients de la décomposition, chacun des cinq leviers est considéré indépendant des autres. En revanche, dans la réalité il existe des interactions entre ces leviers : par exemple, la décarbonation (intensité carbone) sera d'autant plus facile que les consommations d'énergie totales (qui résultent des évolutions des quatre autres facteurs) seront faibles ; le report modal est plus facile si la demande est faible ; ou encore, l'électrification des véhicules agit simultanément sur l'efficacité énergétique et l'intensité carbone. Cela plaide pour une action simultanée sur les 5 leviers pour éviter les effets rebonds.

8 La voiture électrique bénéficie d'une meilleure efficacité en énergie finale (énergie utilisée, après transformation en électricité dans ce cas). Dans la décomposition réalisée, le passage à la voiture électrique se traduit donc par des gains sur l'efficacité énergétique et l'intensité carbone de l'énergie. Mesurés en analyse de cycle de vie en énergie primaire, ces forts gains d'efficacité énergétique ne sont plus valables : ADEME, 2013, « Les impacts sur l'environnement des véhicules électriques et thermiques », https://presse.ademe.fr/2013/12/les-impacts-sur-lenvironnement-des-vehicules-electriques-et-thermiques.html (consulté en mai 2020).

9 En plus des scénarios du ministère, ont été étudiés les scénarios d'Entreprises pour l'environnement (EpE), de l'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME), de l'association NégaWatt, de l'Agence internationale de l'énergie (AIE), de l'Institut du développement durable et des relations internationales (IDDRI) et de la SNCF.

10 *Voir chapitre 2 de la thèse*

11 -21 % pour le scénario ADEME, -10 % pour le scénario EV30 de l'AIE, -5 % pour le scénario MOB-first de l'IDDRI, et +1 % pour le scénario Proximobilité de la SNCF.
12 Par exemple : consommation de métaux et écotoxicité pour la fabrication des batteries des véhicules électriques, ressources en biomasse (pour les biocarburants ou le biogaz) en quantités limitées pour éviter la déforestation ou la concurrence avec les usages alimentaires.
13 À ce sujet, voir Crozet, Yves, Forum Vies Mobiles, 2019. « Vitesse des déplacements ». https://fr.forumviesmobiles.org/reperes/vitesse-des-deplacements-12976
14 La diffusion des modes rapides (voiture, train, avion...) est calculée comme un effet de structure entre les parts des différents modes de déplacements. Les parts modales sont calculées en termes de temps de déplacements et non en kilomètres parcourus, d'où l'importance forte de la marche.
15 ONISR. « Observatoire des vitesses ». https://www.onisr.securite-routiere.interieur.gouv.fr/contenus/etudes-et-recherches/comportements-en-circulation/observations/observatoire-des-vitesses
16 Grimal, Richard, Forum Vies Mobiles, 2017. « Plafonnement de la circulation automobile : les prémisses d'un déclin ? ». https://fr.forumviesmobiles.org/mobilithese/2017/09/28/plafonnement-circulation-automobile-premisses-dun-declin-3694
17 Voir les résultats de l'enquête : Forum Vies Mobiles et ObSoCo, 2016. « Aspirations liées à la mobilité et aux modes de vie - enquête internationale ». https://fr.forumviesmobiles.org/projet/2016/05/23/aspirations-liees-mobilite-et-aux-modes-vie-enquete-internationale-3240
18 Voir Crozet, Yves, Forum Vies Mobiles, 2019. « Vitesse des déplacements ». https://fr.forumviesmobiles.org/reperes/vitesse-des-deplacements-12976
19 Voir https://fr.forumviesmobiles.org/reperes/systeme-velo-12437
20 Voir https://fr.forumviesmobiles.org/projet/2019/01/17/centre-ville-pietonnisation-et-modes-vie-12832
21 Pew Research Center, 2015. « Global Concern about Climate Change, Broad Support for Limiting Emissions ». https://www.pewresearch.org/global/2015/11/05/global-concern-about-climate-change-broad-support-for-limiting-emissions/
22 Forum Vies Mobiles et ObSoCo, 2016. « Aspirations liées à la mobilité et aux modes de vie - enquête internationale ». https://fr.forumviesmobiles.org/projet/2016/05/23/aspirations-liees-mobilite-et-aux-modes-vie-enquete-internationale-3240

Titre : Les transports face au défi de la transition énergétique. Explorations entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement.

Mots clés : Transports, Transition énergétique, Emissions de CO_2, Demande de transport, Vitesse, France

Résumé : La thèse s'intéresse aux émissions de CO_2 des transports en France. Elle questionne l'alignement des politiques publiques et des évolutions actuelles, avec l'objectif d'atteindre la neutralité carbone en France en 2050. A cet horizon, la stratégie nationale bas-carbone vise une sortie quasiment totale du pétrole, en misant sur 5 leviers : la modération de la demande de transport, le report modal, un meilleur remplissage des véhicules, l'efficacité énergétique, et la décarbonation de l'énergie. La thèse étudie (1) l'évolution de ces leviers par le passé, (2) leur évolution possible d'ici 2050, (3) l'importance de la vitesse des mobilités, et (4) les les implications pour les politiques publiques. Il en ressort que l'accélération des transports et l'augmentation de la demande qu'elle a permise, ont fortement tiré les émissions vers le haut sur la fin du XXème siècle. Depuis le tournant du millénaire, ces variables sont plus stagnantes, par la combinaison de facteurs structurels orientés vers leur saturation, et de facteurs conjoncturels tels que la hausse des prix du pétrole et la mise en place des radars. A l'avenir, de fortes évolutions technologiques et de sobriété seront indispensables pour atteindre la neutralité, nécessitant des ruptures par rapport aux trajectoires actuelles.

Title: Transport facing the challenge of energy transition. Explorations between the past and the future, technology and sufficiency, acceleration and slowdown

Keywords: Transport, Energy transition, CO_2 emissions, Transport demand, Speed, France

Abstract: The thesis deals with transport CO_2 emissions in France. It questions the alignment of current trends and public policies with the French climate ambition of reaching carbon neutrality by 2050. The national low carbon strategy identifies 5 drivers to decarbonize the transport sector: the moderation of transport demand, modal shift, load factor optimization, energy efficiency, and carbon intensity of energy. The thesis studies (1) their evolution in the past, (2) their possible changes by 2050, (3) the importance of travel speed, and (4) some policy implications. It appears that the acceleration of transports and the subsequent increase of transport demand, participated in the rise of transport emissions in the second half of the 20th century. Since the beginning of the 21st century, these variables are relatively stable, due to long-term trends towards saturation and short-term changes as the rise of oil prices and the implementation of speed control radars. In the future, important changes in terms of technology and sufficiency measures will be needed to reach carbon neutrality.