

Les transports face au défi de la transition énergétique. Explorations entre passé et avenir, technologie et sobriété, accélération et ralentissement.

Thèse de doctorat de l'Institut Polytechnique de Paris
préparée à l'École Polytechnique

École doctorale n°626

Spécialité de doctorat: Sciences économiques

Thèse présentée et soutenue en visioconférence, le 23 novembre 2020, par

Aurélien Bigo

Composition du jury :

Céline Guivarch,

Directrice de recherche, CIREN, Ecole des Ponts ParisTech

Rapporteuse, Présidente du jury

Yves Crozet,

Professeur émérite à Sciences-Po Lyon

Rapporteur

Guy Meunier,

Professeur, Ecole Polytechnique

Directeur de thèse

Patricia Crifo,

Professeure, Ecole Polytechnique

Co-Directrice de thèse

Ophélie Risler,

Cheffe du département de lutte contre l'effet de serre, MTE - DGEC

Examinatrice

Raphaël Poli,

Directeur de la Stratégie, SNCF

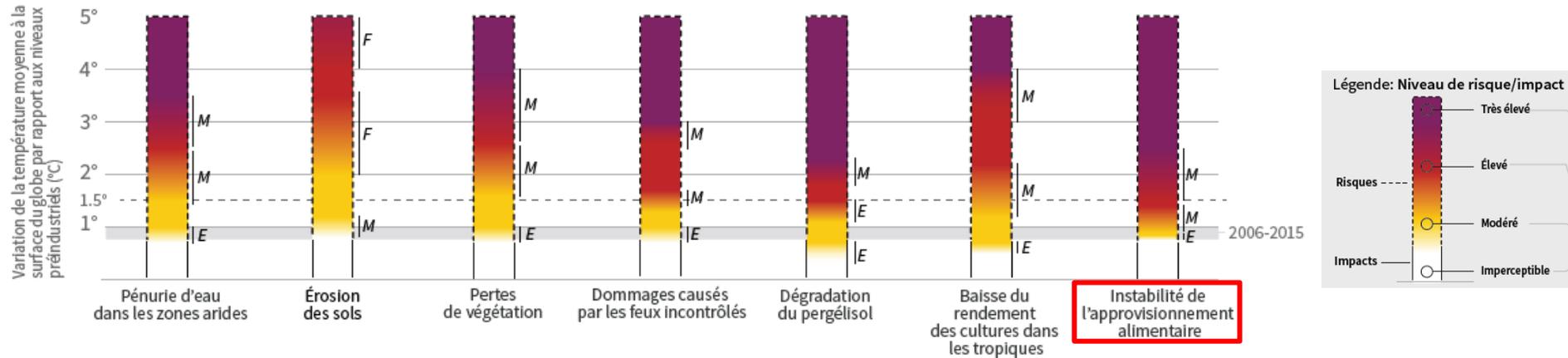
Invité

Jérémy Almosni,

Chef du Service Transports et Mobilités, ADEME

Invité

Le défi du changement climatique



Risques pour les populations humaines et les écosystèmes posés par les effets du changement climatique (GIEC, 2019)

Objectif mondial



2 °C
voire 1,5 °C
à 2100

Objectif France



Neutralité carbone
2050

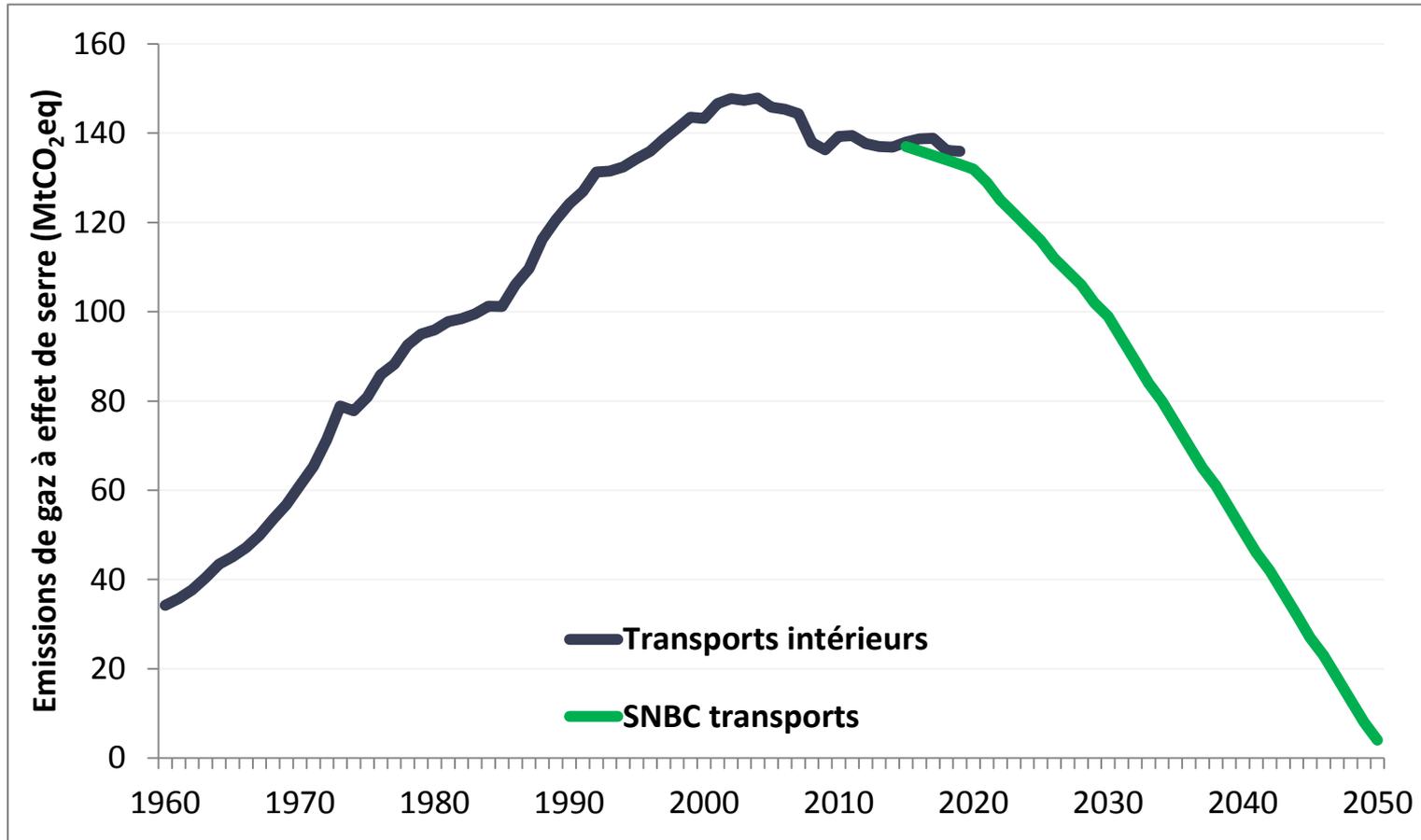
Transports France



Décarbonation
quasi-complète
2050

Objectifs climatiques mondiaux et français

Objectif décarbonation à 2050

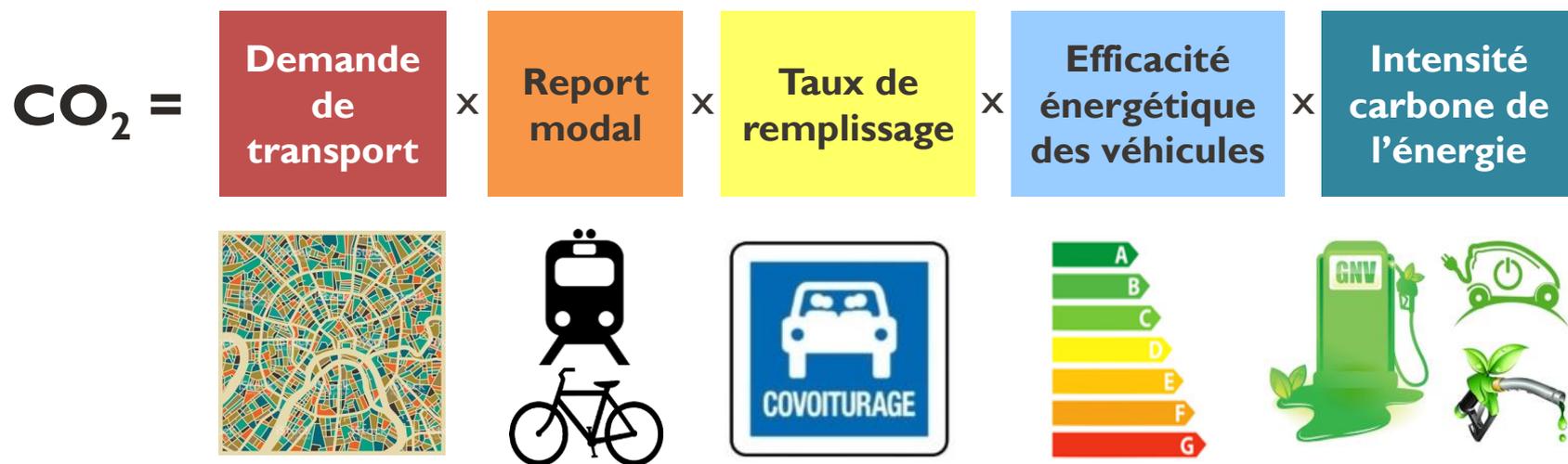


Emissions des transports depuis 1960, et objectif de décarbonation des transports d'ici 2050

Problématique et plan de thèse

Problématique

- Comment aligner le secteur des transports sur l'objectif de neutralité carbone en France à l'horizon 2050 ?



Les 5 leviers de décarbonation de la stratégie nationale bas-carbone (SNBC)

Problématique et plan de thèse

Problématique

- Comment aligner le secteur des transports sur l'objectif de neutralité carbone en France à l'horizon 2050 ?

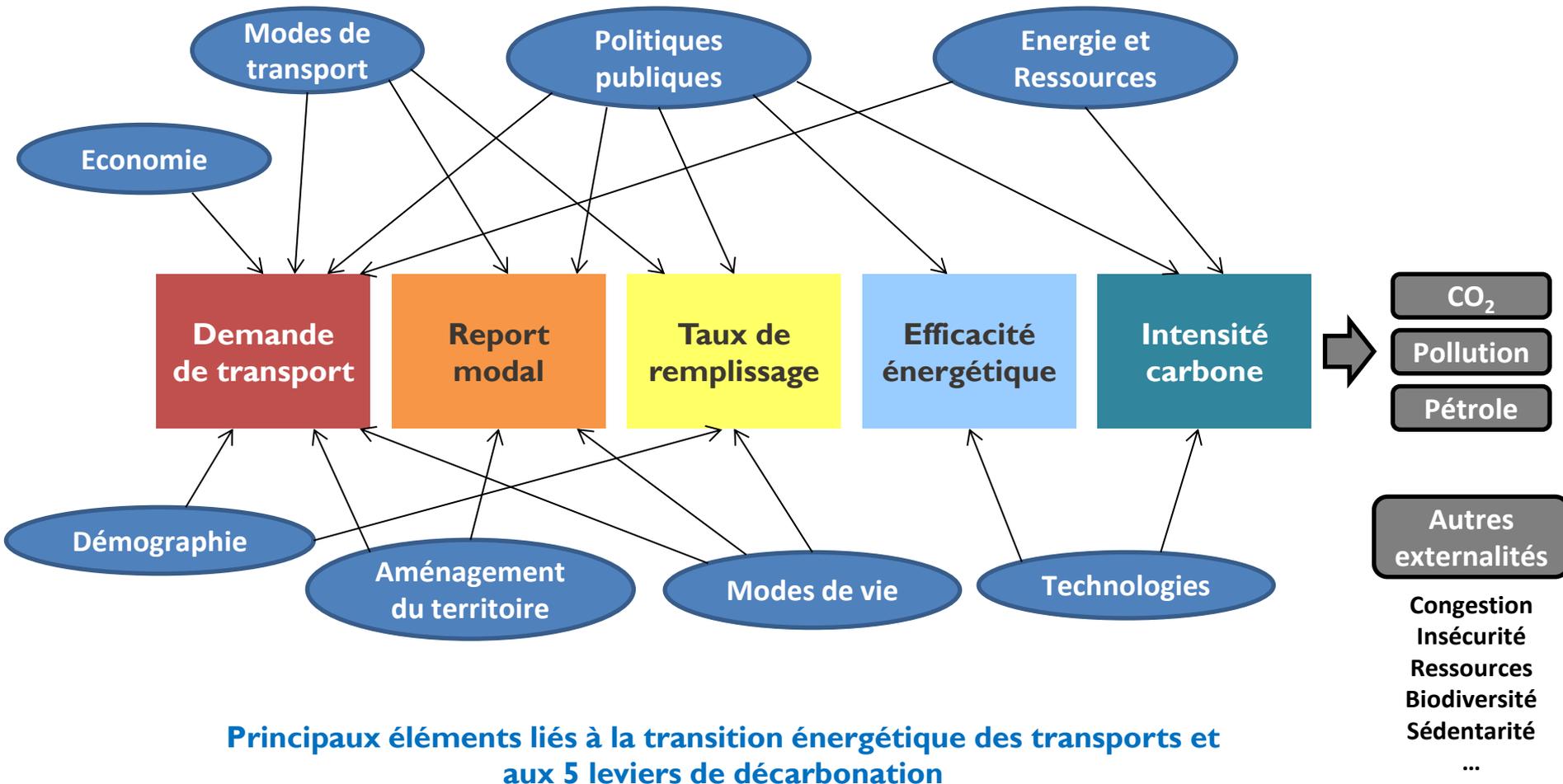
$$\text{CO}_2 = \text{Demande de transport} \times \text{Report modal} \times \text{Taux de remplissage} \times \text{Efficacité énergétique des véhicules} \times \text{Intensité carbone de l'énergie}$$

Un plan en 4 chapitres

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

Sujets principaux (vert foncé) et secondaires (vert clair) traités dans les 4 chapitres de la thèse

Une vision globale pour un système complexe



Décompositions des émissions : objectifs et méthodologie

Objectifs

- 1) Comprendre l'évolution passée des 5 leviers
- 2) Evaluer leurs potentiels d'ici 2050, à l'aide des scénarios de perspectives

Littérature existante

- Passé
 - 40 études recensées sur les transports
 - Dont 2 récentes en France : MEDDE, 2015 ; CGDD, 2020
- Scénarios
 - Application à des scénarios : McCollum, Yang, 2009; Yang et al, 2009; IEA, 2018
 - Comparaison de scénarios : Edelenbosch et al, 2017; Yeh et al, 2017; Mittal et al, 2017

Méthodologie LMDI

- Log-mean divisia index : Ang, 2004

$$\mathbf{CO}_2 \equiv \sum_i \mathbf{D} \cdot \frac{\mathbf{D}_i}{\mathbf{D}} \cdot \frac{\mathbf{C}_i}{\mathbf{D}_i} \cdot \frac{\mathbf{E}_i}{\mathbf{C}_i} \cdot \frac{\mathbf{CO}_{2,i}}{\mathbf{E}_i}$$

D : demande de transport (voy.km ou t.km)

D_i : demande de transport par mode i (voy.km or t.km)

C_i : trafic des véhicules du mode i (veh.km)

E_i : consommation énergétique du mode i (Mtep)

CO_{2,i} : émissions de CO₂ du mode i (MtCO₂)

Périmètre des analyses

Application à 5 modes voyageurs et 4 marchandises

Marche	Vélo	Ferroviaire	Bus & cars	2RM	Voiture	60% VUL	Avion
		Ferroviaire	Fluvial	Poids-lourds	40% VUL		

	Chapitre 1 Passé	Chapitre 2 Futur	Chapitre 3 Vitesse	Chapitre 4 Moyens
Temporel	1960-2017	Horizon 2050	1960-2017 1800-2050	2020-2050
Géographique (aérien international ?)	Intérieur (aussi total)	Métropole	Total (aussi intérieur)	Total
Transports	Voyageurs Marchandises	Voyageurs Marchandises	Voyageurs	Voyageurs Marchandises
Emissions	Directes	Directes		ACV (analyse de cycle de vie)
Données	Demande, Trafics, Energie, CO ₂	Demande, Trafics, Energie, CO ₂	Demande, Vitesse	Qualitatif ou études extérieures

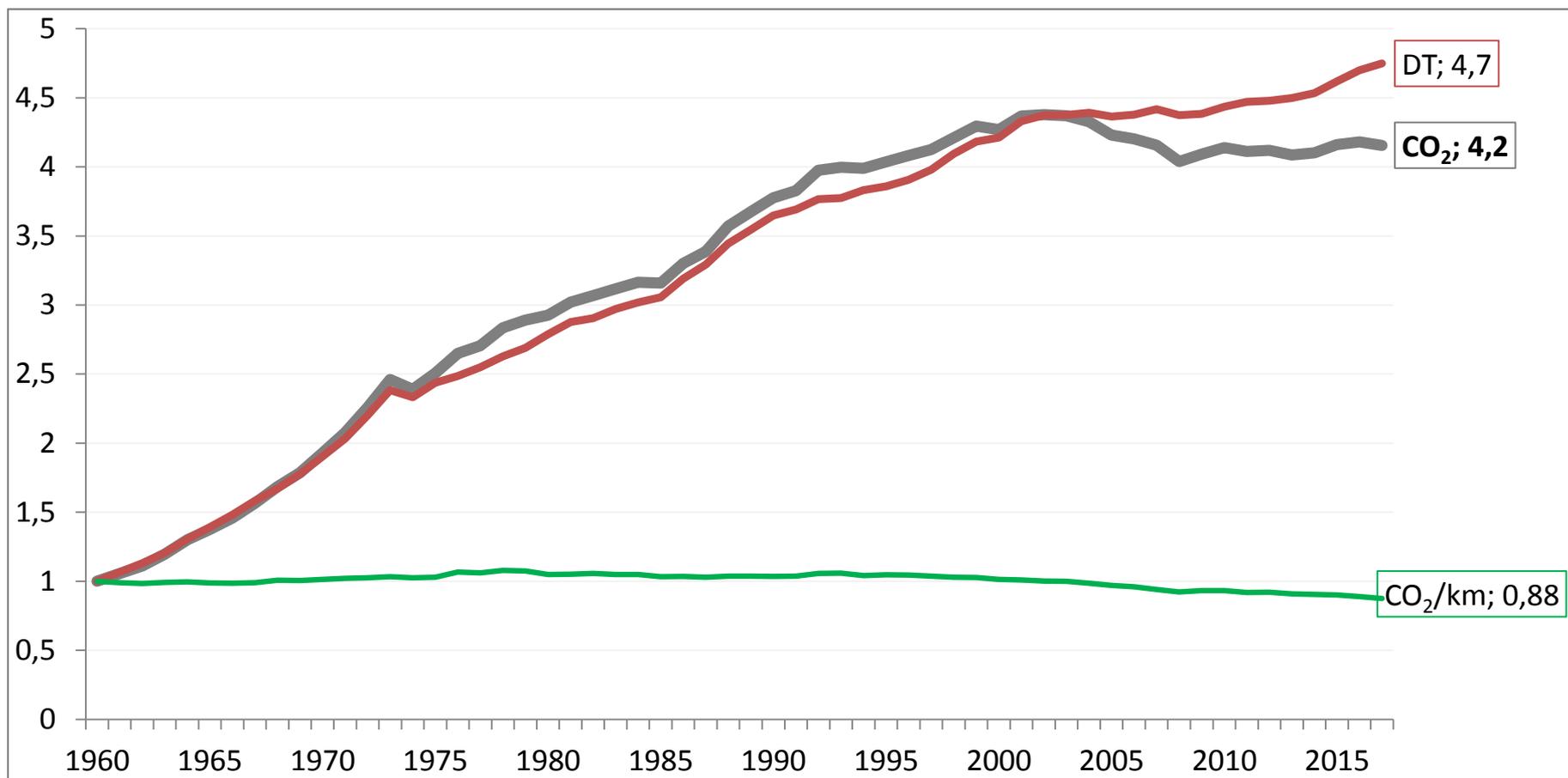
Périmètre temporel, géographique, des transports, des émissions et données pris en compte

Comment expliquer l'évolution des émissions depuis 1960 ?

Décomposition sur la période 1960-2017

Voyageurs 1960-2017

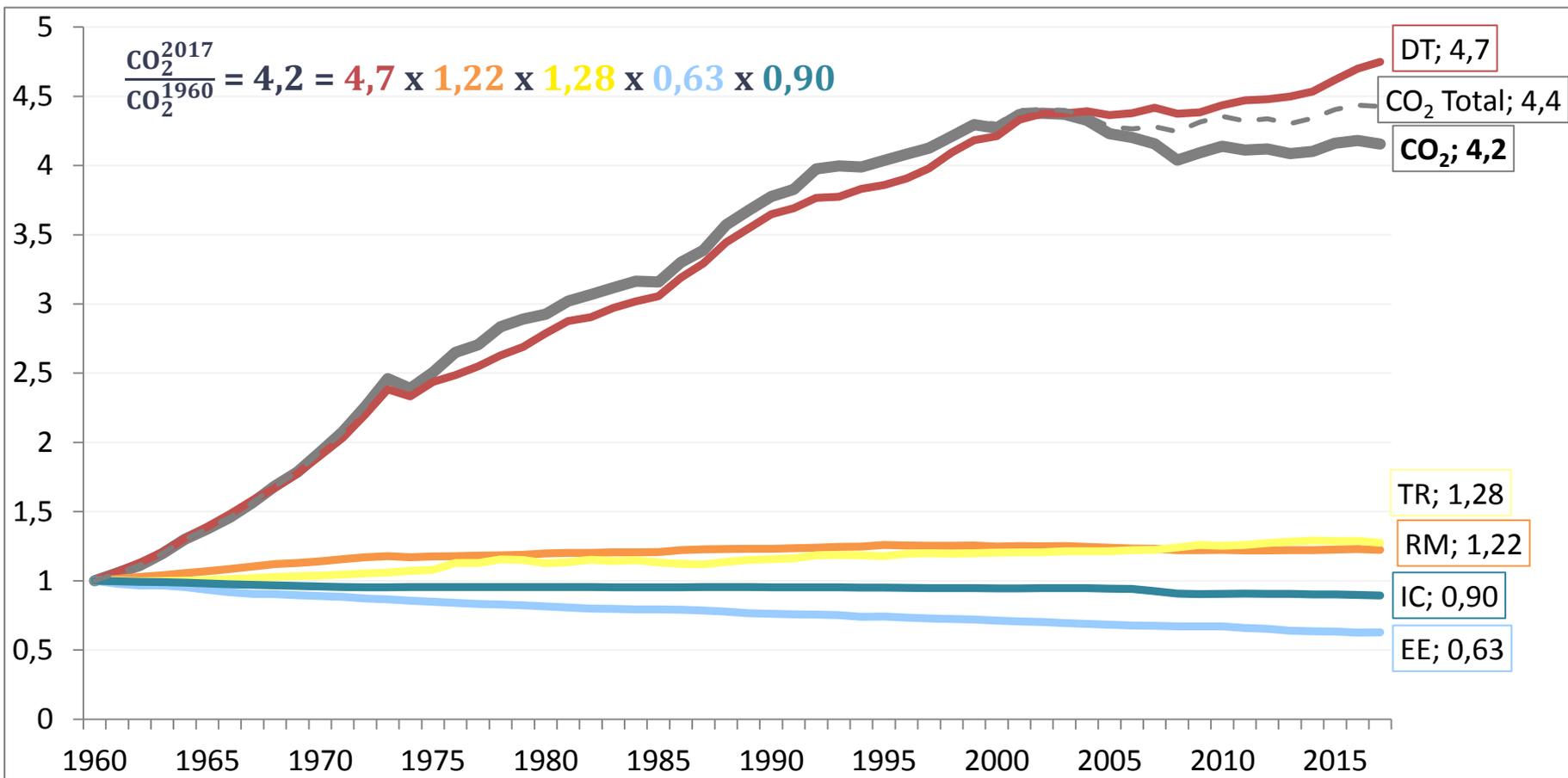
$$\text{CO}_2 = \text{Demande de transport} \times \text{Report modal} \times \text{Taux de remplissage} \times \text{Efficacité énergétique des véhicules} \times \text{Intensité carbone de l'énergie}$$



Variation des émissions de CO₂ du transport de voyageurs de 1960 à 2017
(forme multiplicative, pas de 1 an)

Voyageurs 1960-2017

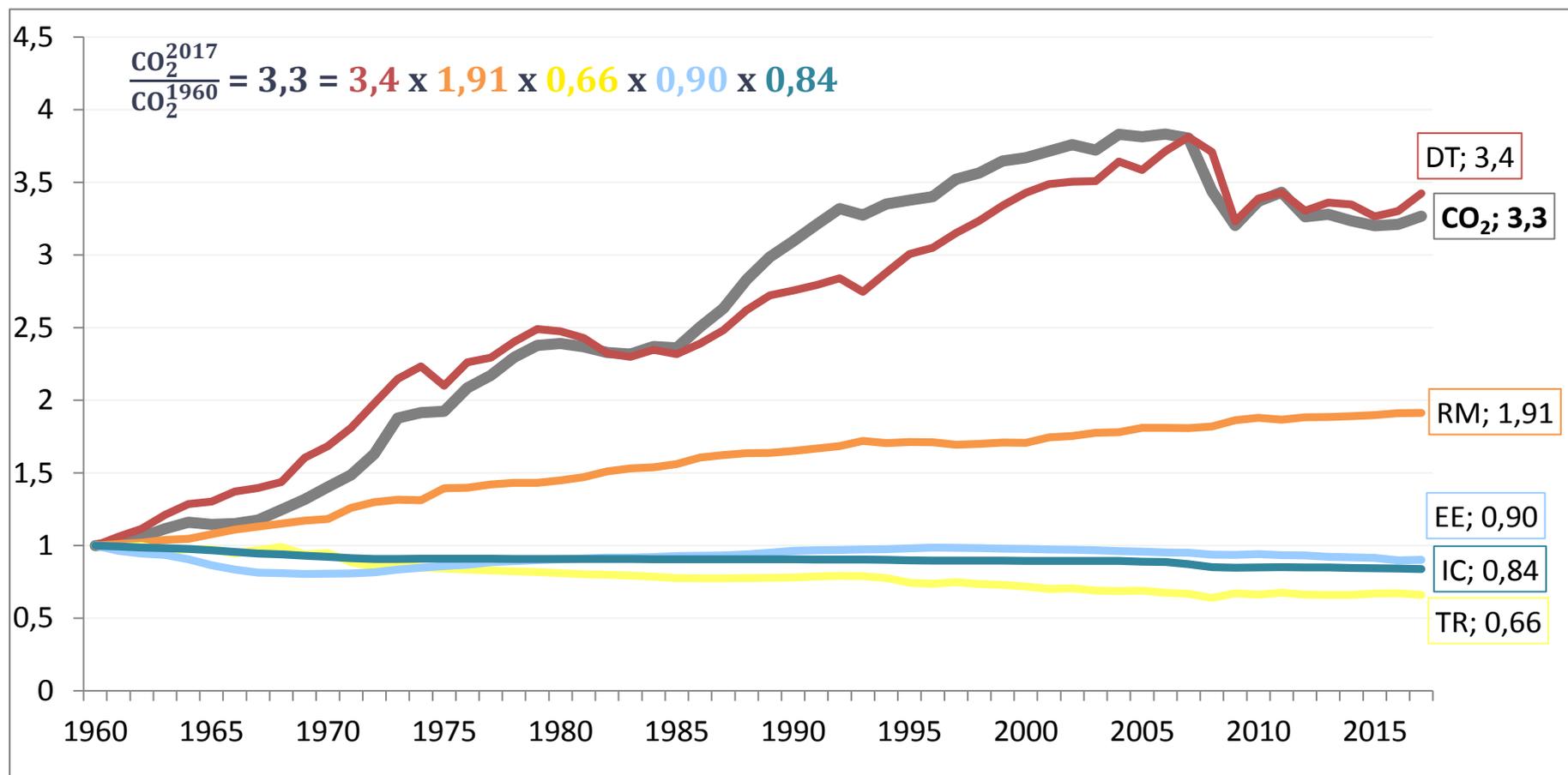
$$\text{CO}_2 = \text{Demande de transport} \times \text{Report modal} \times \text{Taux de remplissage} \times \text{Efficacité énergétique des véhicules} \times \text{Intensité carbone de l'énergie}$$



Variation des émissions de CO₂ du transport de voyageurs de 1960 à 2017
(forme multiplicative, pas de 1 an)

Marchandises 1960-2017

$$\text{CO}_2 = \text{Demande de transport} \times \text{Report modal} \times \text{Taux de remplissage} \times \text{Efficacité énergétique des véhicules} \times \text{Intensité carbone de l'énergie}$$



Variation des émissions de CO₂ du transport de marchandises de 1960 à 2017
(forme multiplicative, pas de 1 an)

Comment s'aligner sur la trajectoire de neutralité carbone ?

Comparaison des scénarios français et potentiels des 5 leviers d'ici 2050

13 scénarios voyageurs et 10 marchandises

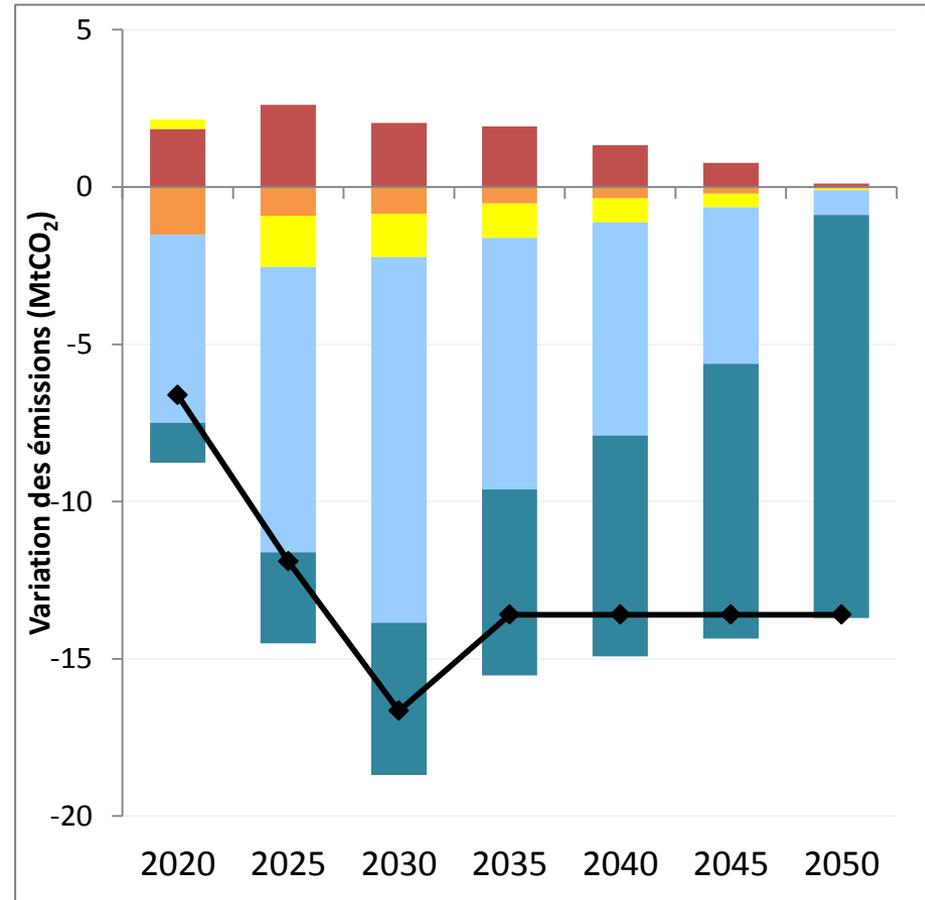
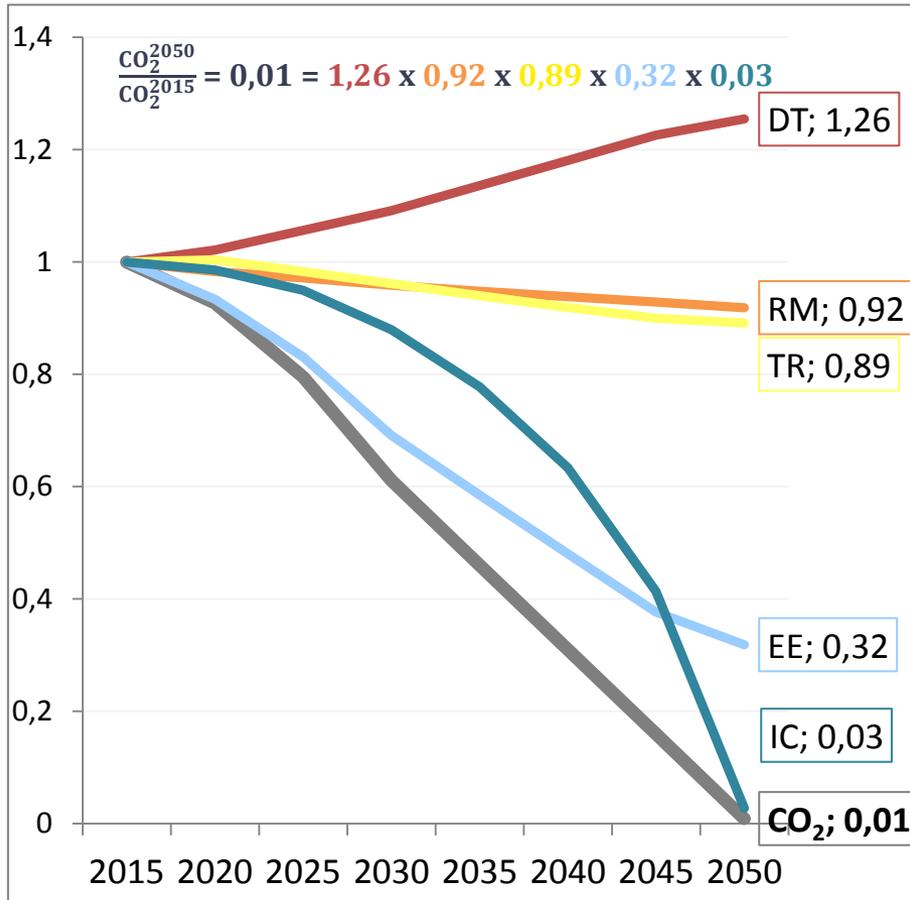
> 0 %
0 à -50%
-50 à -70 %
-70 à -90 %
-90 à -100%

Institut		Scénario		Périmètre		% CO ₂	
Nom	Type	Année	Nom	Secteur	Année réf.	Voyageurs	Marchandises
MTES	Ministère transition écologique et solidaire	2019	<i>AME</i>	Tous GES	2015	-26%	29%
			AMS / SNBC		2015	-99%	-100%
EpE	Entreprises pour l'Environnement	2019	ZEN 2050	Tous GES	2015	-96%	-92%
négaWatt	ONG française	2017	<i>Tend.</i>	Tous GES	2015	-38%	-19%
			négaWatt		2015	-100%	-100%
ADEME	Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie	2017	ADEME Vision	Tous GES	2010	-91%	-88%
IEA	Agence internationale de l'énergie	2019	<i>NPS</i>	Transport	2015	-63%	-53%
			EV30		2015	-96%	-81%
IDDRI	Institut du développement durable et des relations internationales	2019	S1	Marchandises	2015		-99%
			S2		2015		-98%
IDDRI	Institut du développement durable et des relations internationales	2017	MOB-First	Voyageurs	2010	-83%	
			TECH-First		2010	-87%	
SNCF	Société nationale des chemins de fer	2015	<i>Ultramobilité</i>	Voyageurs	2013	-47%	
			Altermobilité		2013	-64%	
			Proximobilité		2013	-70%	

Scénarios étudiés dans le cadre de la comparaison
(scénarios *tendanciels* en italique et volontaristes pour les autres)

SNBC - Voyageurs

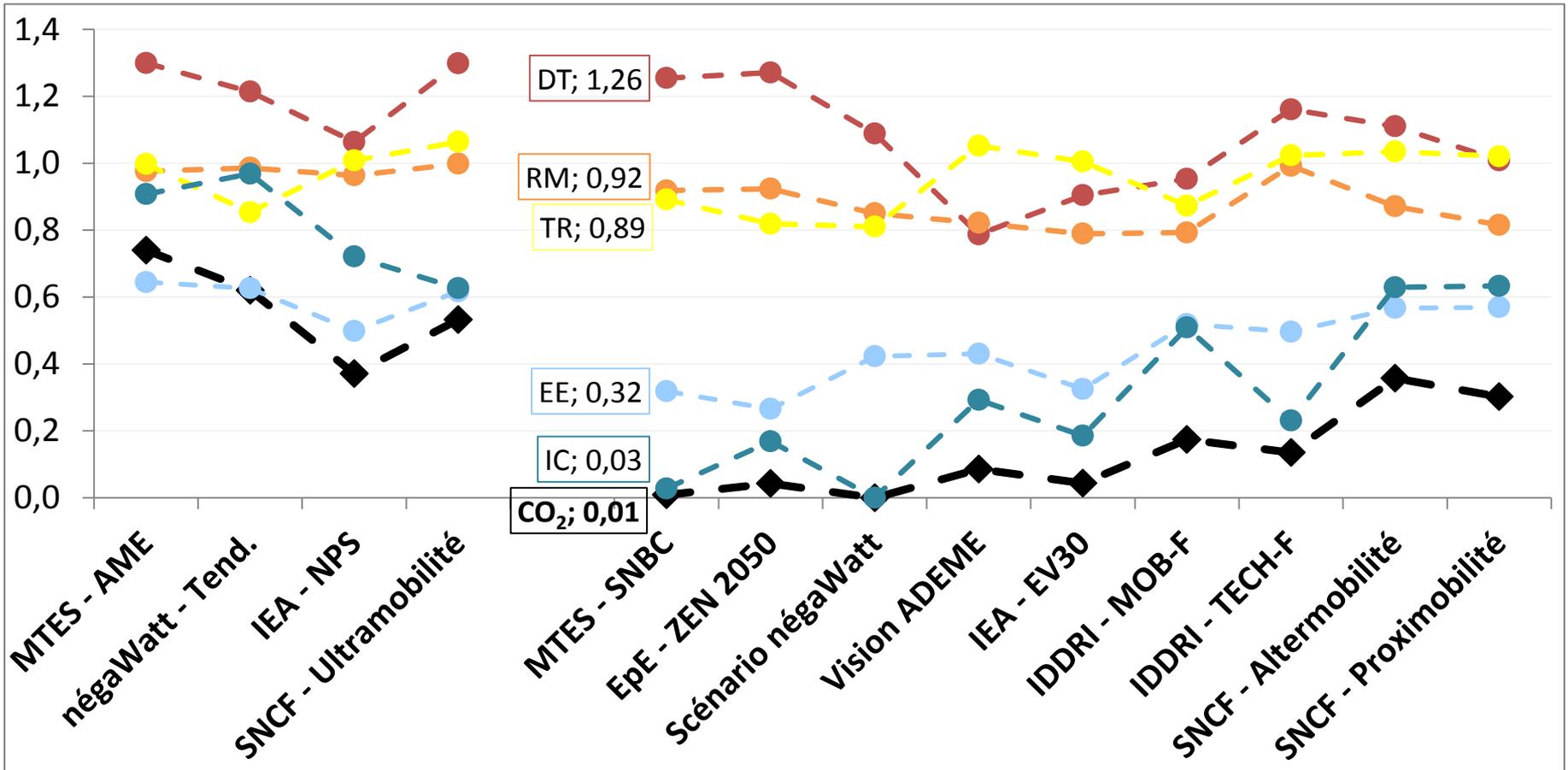
$$\text{CO}_2 = \text{Demande de transport} \times \text{Report modal} \times \text{Taux de remplissage} \times \text{Efficacité énergétique des véhicules} \times \text{Intensité carbone de l'énergie}$$



Décomposition des émissions de CO₂ des transports de passagers pour le scénario SNBC, 2015-2050
(forme multiplicative à gauche, additive à droite)

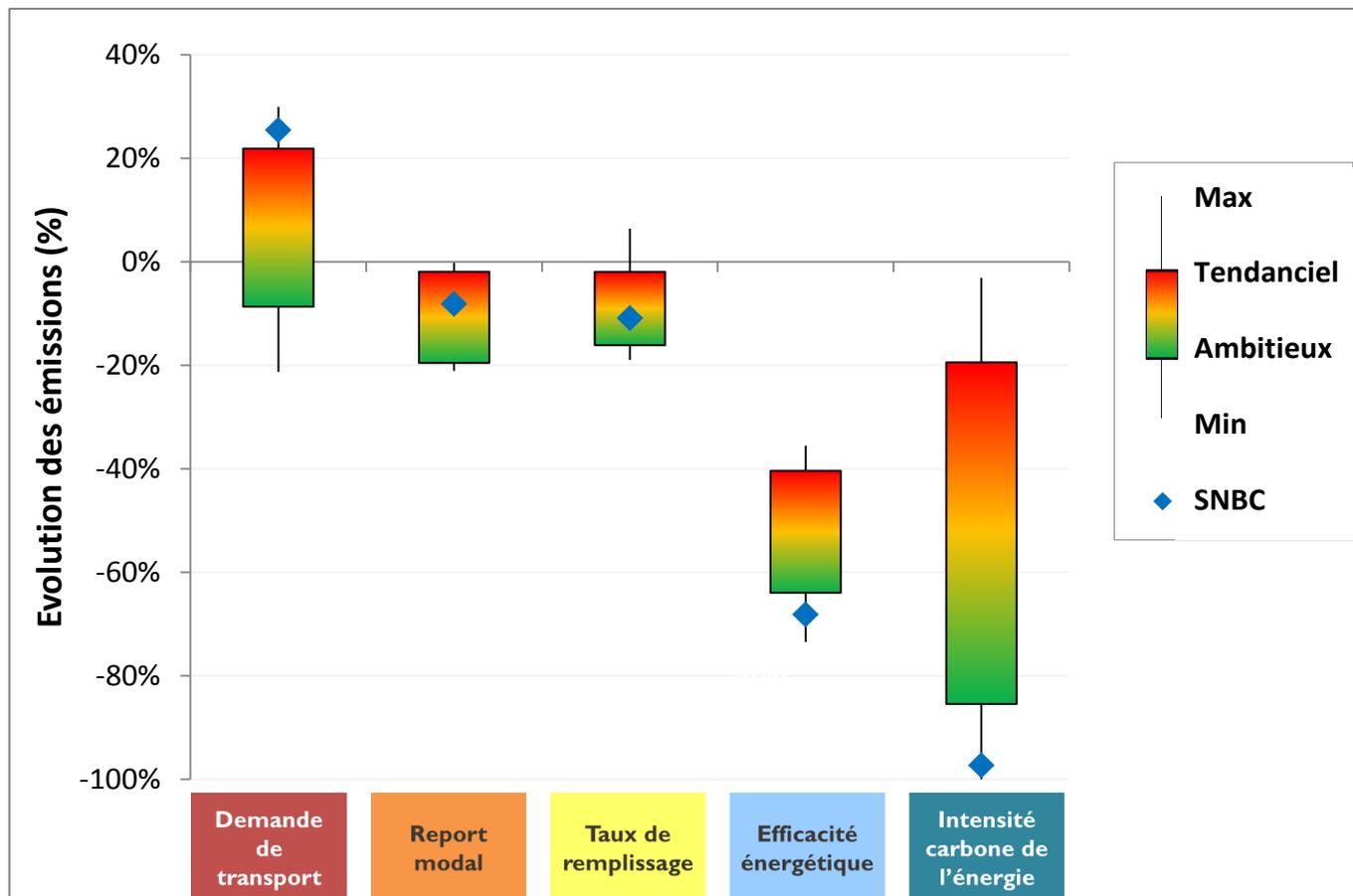
Scénarios Voyageurs

$$\text{CO}_2 = \text{Demande de transport} \times \text{Report modal} \times \text{Taux de remplissage} \times \text{Efficacité énergétique des véhicules} \times \text{Intensité carbone de l'énergie}$$



Décomposition des émissions de CO₂ jusqu'à 2050, pour les 13 scénarios voyageurs (forme multiplicative ; scénarios tendanciels à gauche, volontaristes à droite)

Scénarios Voyageurs : Tendanciels vs. Ambitieux



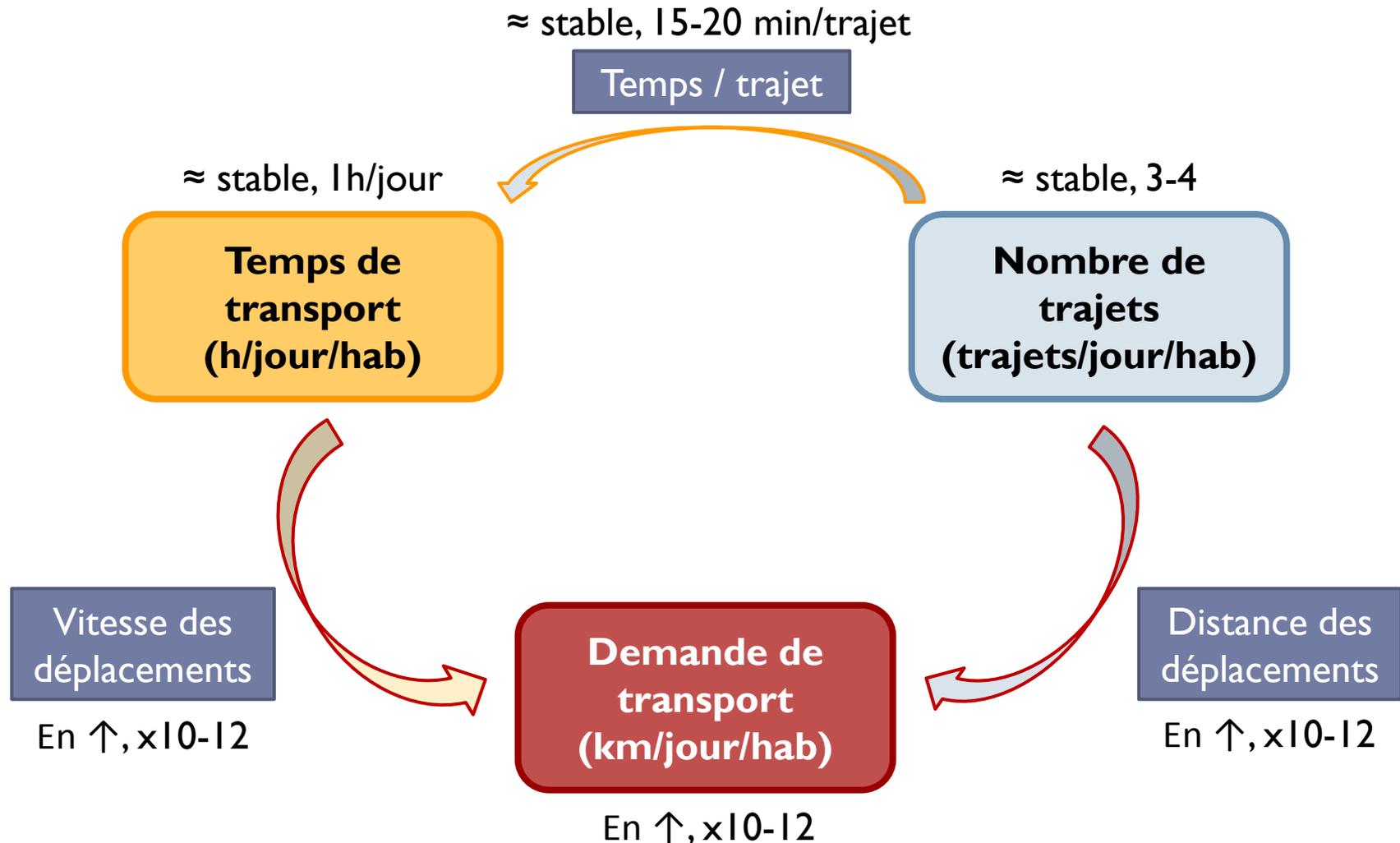
Décomposition des émissions de CO₂ des scénarios de transport de voyageurs jusqu'à 2050

(formes multiplicative et additive ; 4 scénarios tendanciels en rouge, 4 les plus ambitieux par facteur en vert, différence entre les deux en chiffre entouré en vert, SNBC en bleu)

Vitesse des déplacements

Accélération au 20^{ème} siècle,
ralentissement au 21^{ème} ?

Mobilités : quelles variables clés ?



Vitesse des déplacements : contexte et objectifs

Points de départ

- Mieux comprendre un des déterminants de l'évolution de la demande
- $\text{Km parcourus} = \text{Vitesse} \times \text{Temps de transport}$

Objectifs

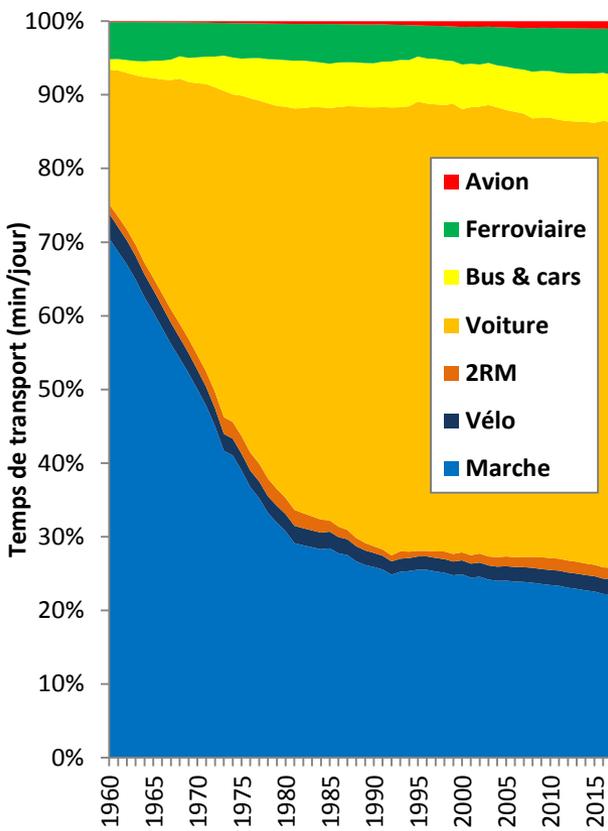
- Caractériser l'importance de la vitesse dans les comportements de mobilité
- Etudier l'évolution de la vitesse sur 1800-2050, avec un focus sur 1960-2017

Littérature associée

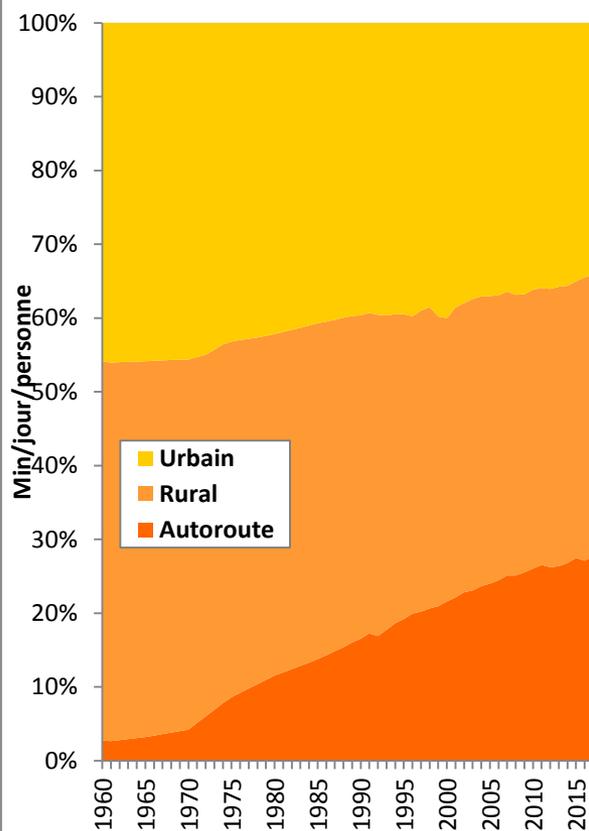
- Conjecture de Zahavi, budgets temps de transport
 - Zahavi, 1973; Marchetti, 1994; Schafer, 2000; Crozet and Joly, 2003
- Importance de la vitesse, ses avantages et limites
 - Studeny, 1995; Héran, 2009; Crozet, 2016
- Peak car, peak travel
 - Millard-Ball et Schipper, 2011 ; Newman et Kenworthy, 2011 ; Goodwin, 2012 ; Metz, 2010, 2013; Grimal, 2015, 2017

3 déterminants : report modal, infrastructures, vitesse

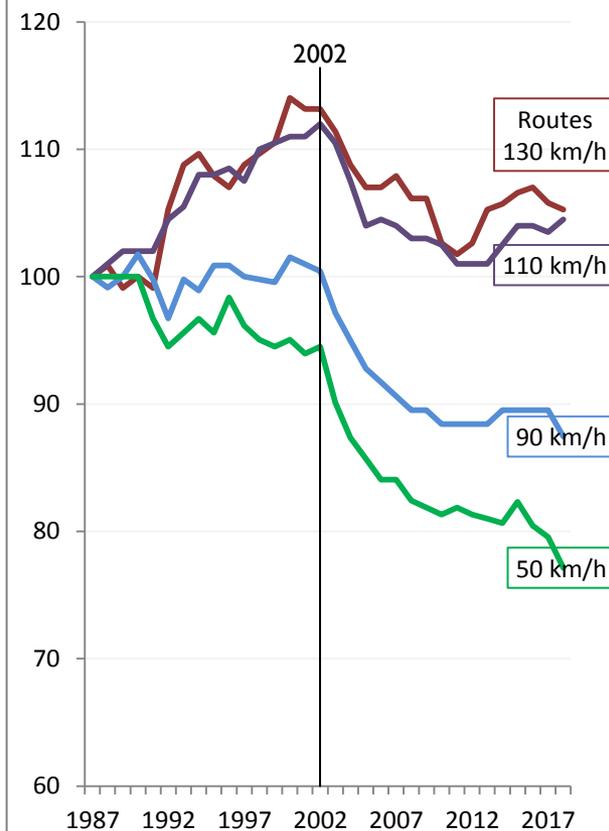
Report modal



Report d'infrastructures

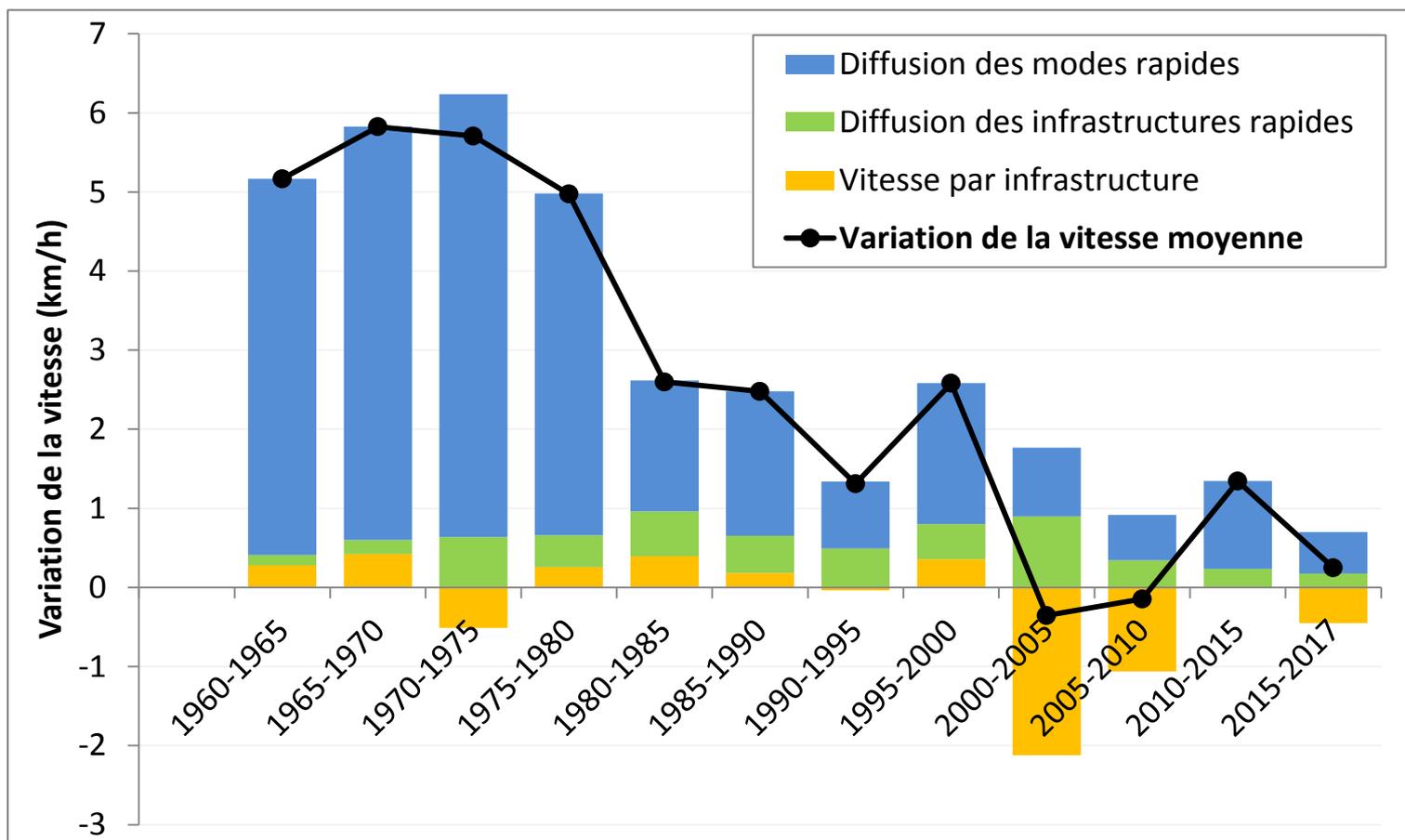


Vitesse sur les réseaux routiers



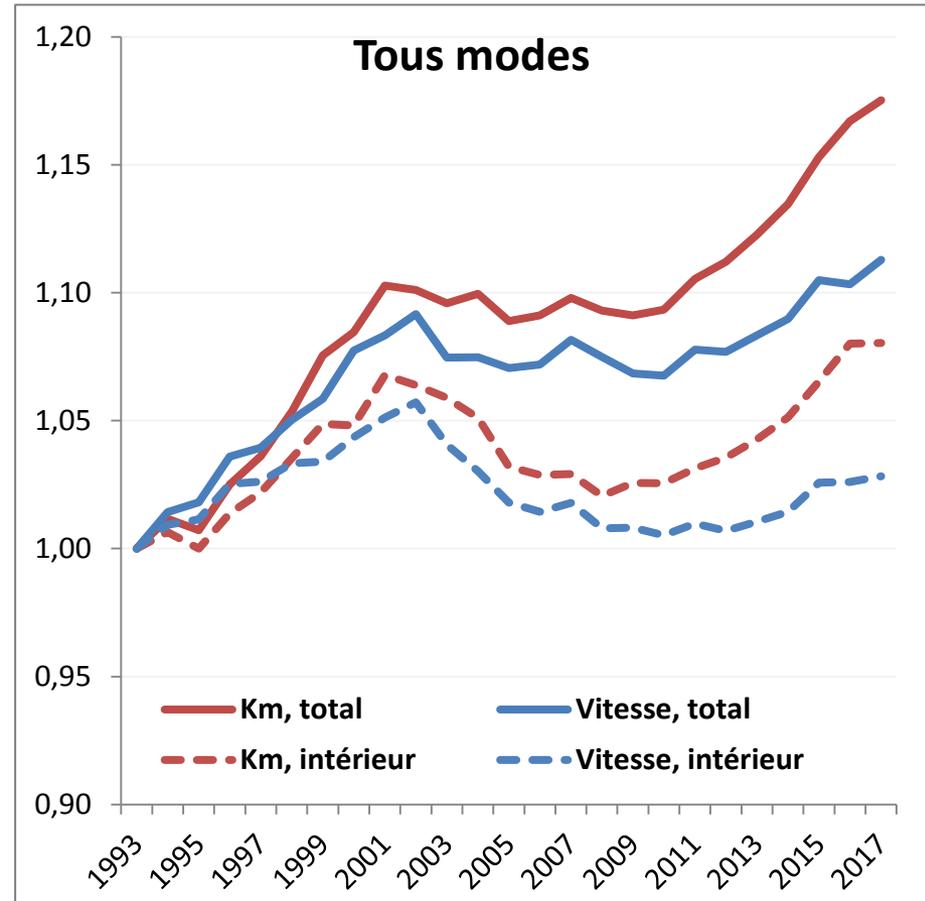
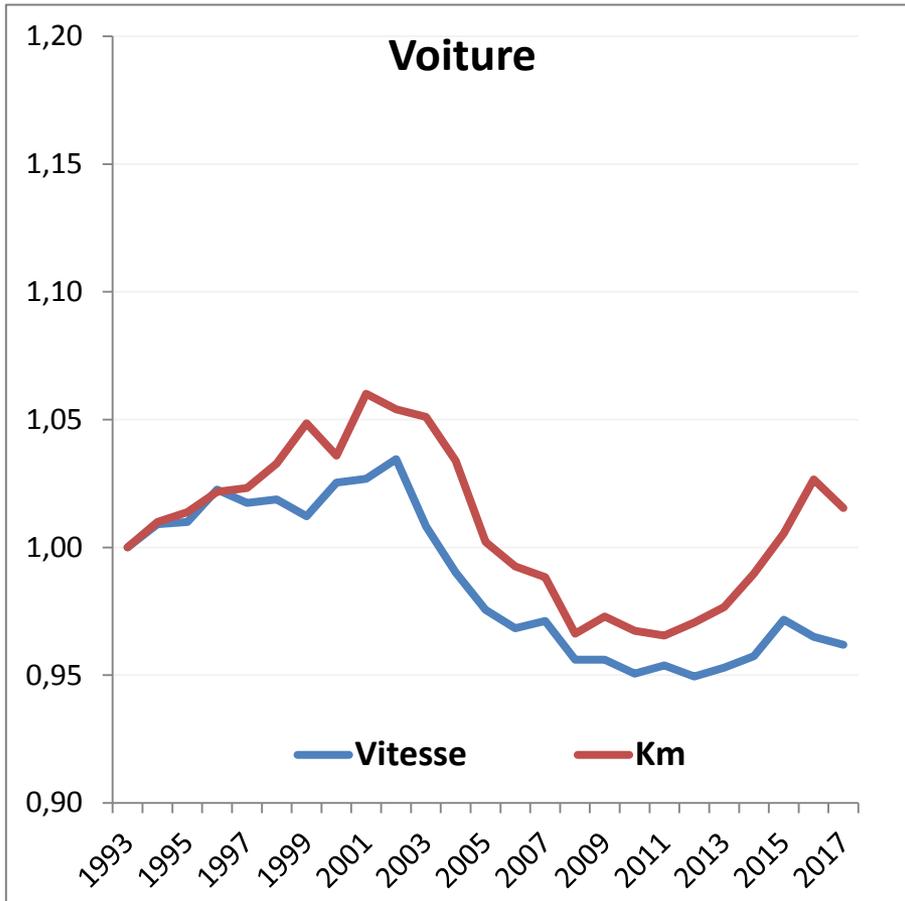
Déterminants de l'évolution de la vitesse des déplacements de 1960 à 2017

Facteurs explicatifs de l'évolution de la vitesse



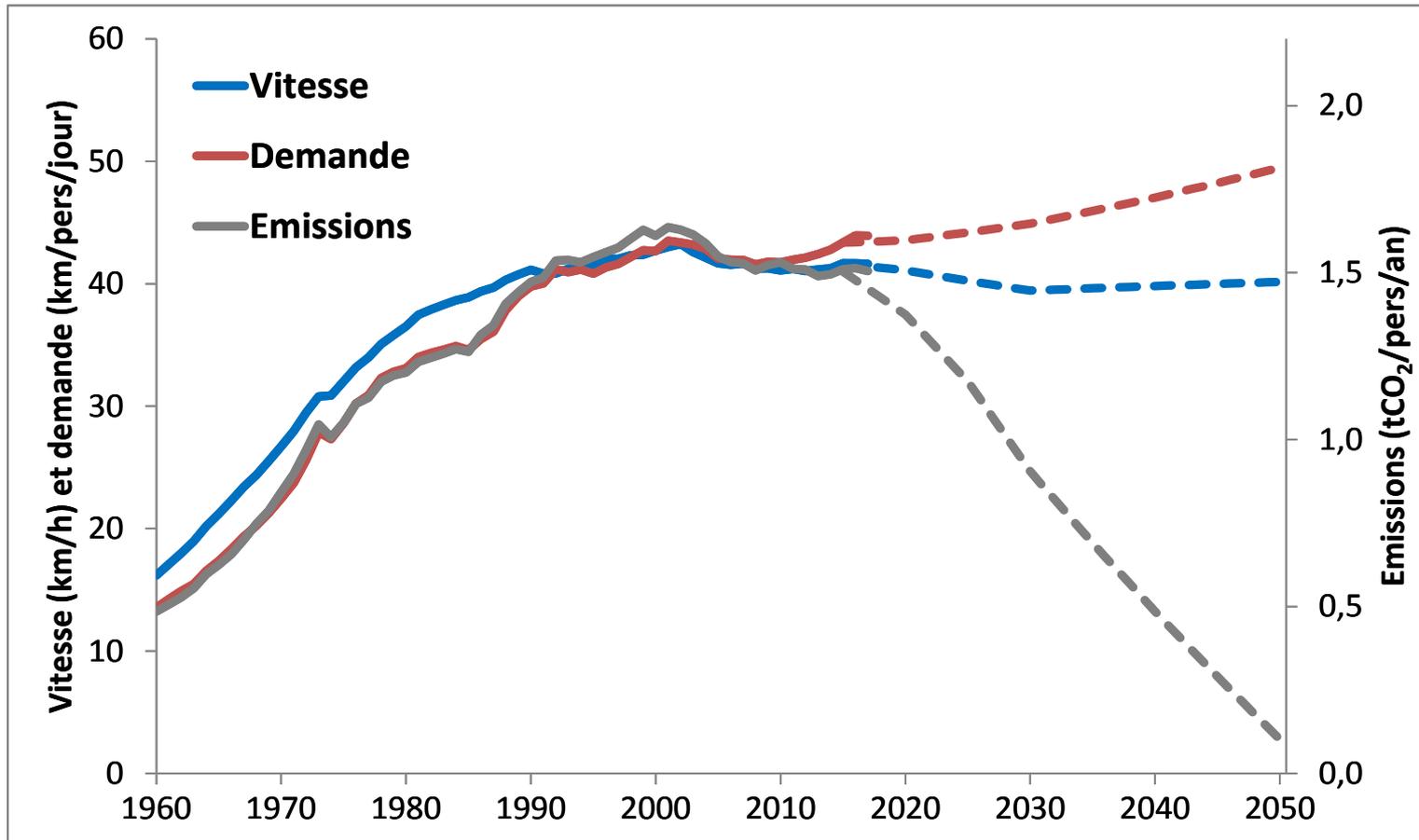
Décomposition des 3 facteurs explicatifs de l'évolution de la vitesse moyenne, de 1960 à 2017
Echelle de 5 ans, sauf sur 2015-2017 ; international compris

Une explication complémentaire au *peak travel*



Evolution de la vitesse moyenne et des kilomètres parcourus par personne, de 1993 à 2017
(voiture seule à gauche, tous modes de déplacements à droite)

CO₂, demande et vitesse (passé + SNBC)



Evolution de la vitesse moyenne, de la demande et des émissions individuelles de 1960 à 2050
(périmètre Métropole ; voyageurs avec 60%VUL ; CO₂ biomasse inclus ; trajectoire 2015-2050 SNBC)

Sur quels leviers compter ?
Quelles politiques publiques ?

Principaux enseignements

Interactions et effets rebonds entre les mesures

Impact	Demande de T.					Report modal					Tx rempli	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	
Positif																													
Neutre																													
Négatif																													
Incertain																													
DT	?	?	?	?																									
RM																													
TR																													
EE																													
IC																													
Emissions indirectes	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	?	

Principales mesures suggérées pour la transition énergétique, et leurs interactions avec les autres facteurs (en rouge, les principales mesures favorisées par le passé)

GNV = gaz naturel véhicule

Facilité et coûts de mise en œuvre

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	
Positif																													
Neutre																													
Négatif																													
Incertain																													
FACILITE / COÛTS																													
Tendanciel		?			?	?			?	?							?		?	?			?				?	?	?
Rapidité mise en œuvre					?	?	?	?					?	?														?	?
Coût politiques publiques		?	?		?	?		?								?				?		?		?	?			?	?
Coût usagers		?			?	?			?	?				?							?	?	?	?	?	?		?	?
Acceptabilité		?	?					?	?	?						?	?	?			?	?	?	?	?	?		?	?
Chgmts comportements		?	?																										
Temps de transport				?			?	?	?								?	?										?	?
Distance / Accessibilité								?					?			?	?	?									?	?	?
Confort							?	?	?																			?	?
Emploi															?						?	?	?	?	?			?	?
Lien social		?	?																									?	?

Principales mesures suggérées pour la transition énergétique, et leurs interactions avec les autres facteurs

Principaux enseignements

1) Le lien historique fort entre vitesse, distances et CO₂

- Temps de transport proches d'1 h/jour en moyenne
- Faible découplage entre les kilomètres parcourus et les émissions

2) Un plafonnement de ces variables au début des années 2000

- Saturation / pic de la vitesse moyenne début 2000, lien avec les radars
- Faible effet des politiques publiques environnementales

3) Un fort découplage entre demande et CO₂ prévu d'ici 2050

- Voyageurs : passage de -0,5 %/an de CO₂/km à -3,8 %/an sur 2015-2030
- 2 leviers majeurs dans la SNBC : efficacité énergétique et intensité carbone

4) Technologie ET sobriété, des évolutions fortes à combiner

- La sobriété permettrait de diviser par 2 les consommations d'énergie
- Mesures de transition énergétique vont dans le sens d'un ralentissement