Comment décarboner les transports en France d'ici 2050 ?

Analyse des scénarios de prospectives et décomposition des émissions de CO_2

Aurélien Bigo
SNCF, Chaire Energie et Prospérité, CREST – Polytechnique

Novembre 2019

Préambule

Cette présentation

- Compile des résultats intermédiaires et analyses menées durant la thèse
- Certains résultats sont donc susceptibles d'être modifiés avant une éventuelle publication académique pour certains d'entre eux

Il est possible d'utiliser des éléments de cette présentation, en les citant par exemple de la manière suivante :

Bigo, A. (2019). Comment décarboner les transports en France d'ici 2050 ? Présentation des résultats intermédiaires de thèse. Novembre 2019. Disponible sur : http://www.chair-energy-prosperity.org/publications/travail-de-these-decarboner-transports-dici-2050/

Pour toute question ou commentaire, n'hésitez pas à me contacter à l'adresse aurelien.bigo@hotmail.fr

Plan

I. La comparaison des scénarios de prospectives

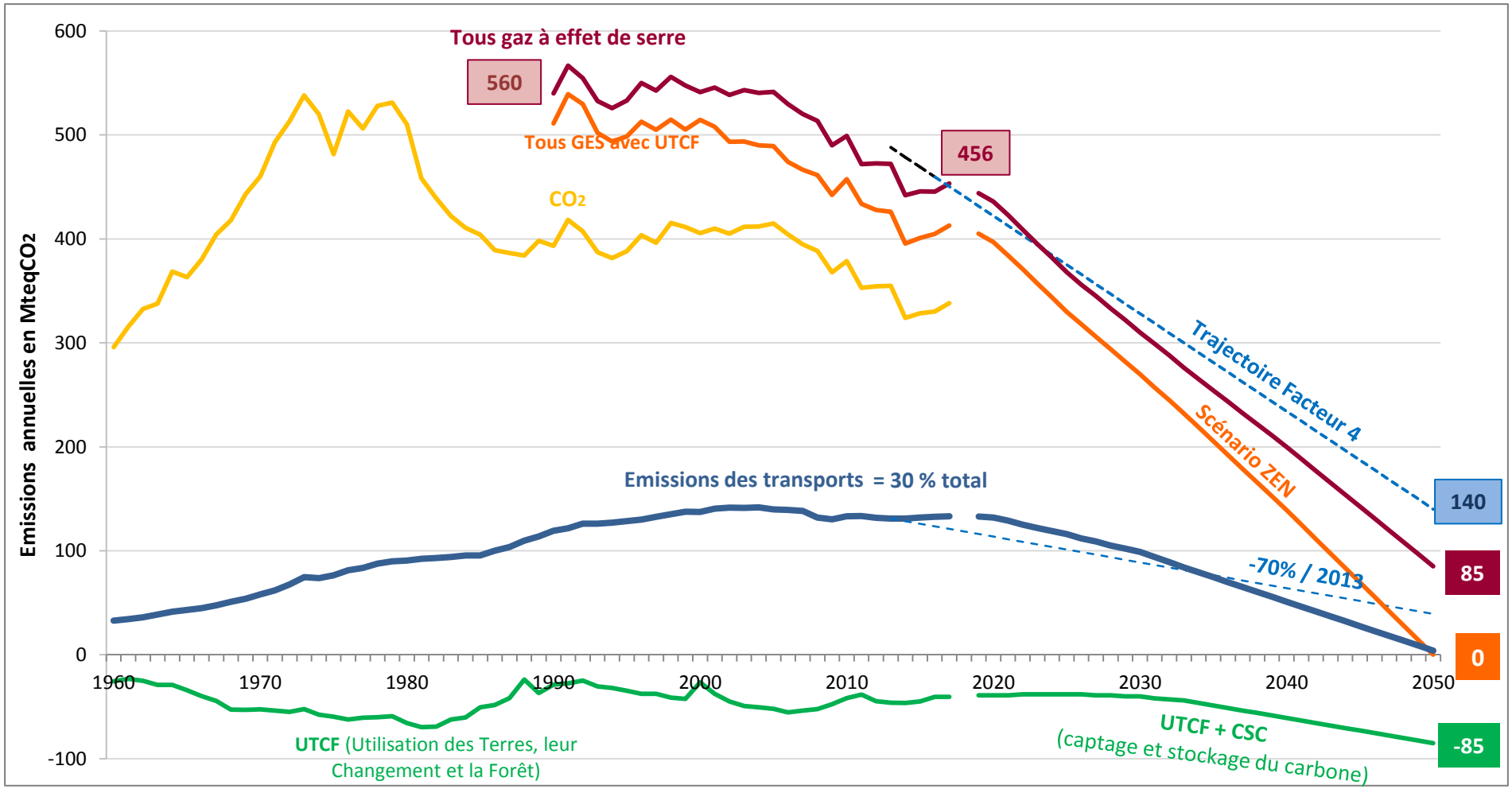
II. Les 5 facteurs clés pour décarboner les transports

III. L'identité de Kaya adaptée aux transports

IV. L'application aux émissions passées

V. L'application aux scénarios de prospective

Du Facteur 4 à la neutralité carbone



Comparaison des objectifs et trajectoires de Facteur 4 et neutralité carbone

Sources : CITEPA, MTES

Introduction: contexte et problématique

Périmètre de l'étude

- Transports de passagers et marchandises
- Emissions directes
- Echelle de la France
- Horizon 2050

Questions

- Quels sont les scénarios dans les transports et avec quels résultats ?
- Quelles évolutions sont nécessaires pour atteindre les objectifs ?
- Quel est le potentiel des différents leviers et mesures ?

La comparaison des scénarios de prospectives d'ici 2050

Une diversité de scénarios contrastés pour la France

Les scénarios de prospectives

Liste et périmètre des études et scénarios étudiés

Nouveaux scénarios

Mises à jour

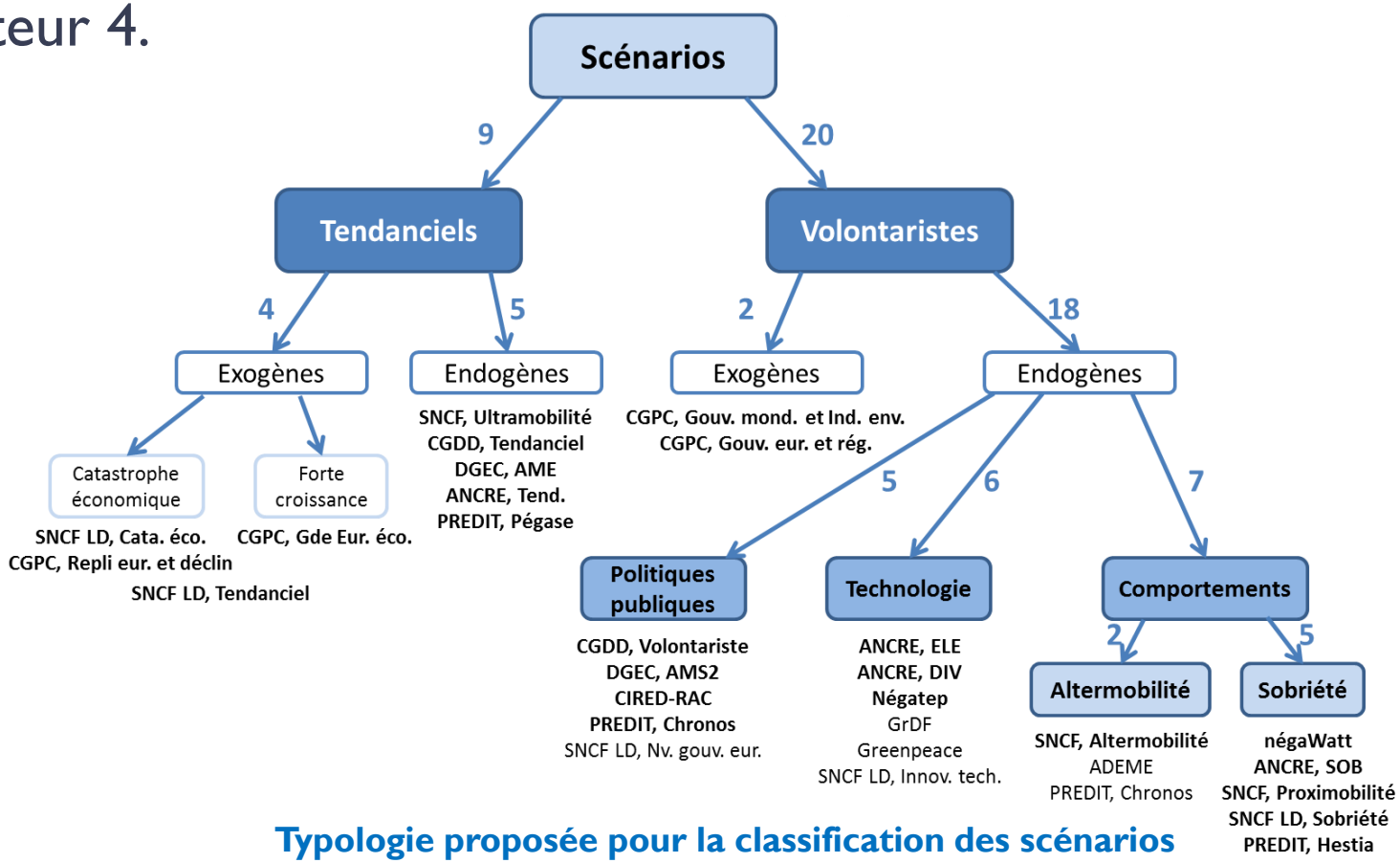
Mémoire 2016

Scénarios		Périmètre	
Publication	**Nom du scénario**	**Sectoriel**	**Temporel**
DGEC - SNBC, 2019	Neutralité carbone	Emissions GES	2050
EpE, 2019	ZEN 2050	Emissions GES	2015-2050
B&L évolution, 2018	Trajectoire 1,5 °C	Emissions GES	2018-2030
IDDRI 2019, DDPP freight	MOB-First ?	Marchandises	2010-2050 ?
	TECH-First ?		
IDDRI 2017, DDPP passengers	MOB-First	Voyageurs	2010-2050
	TECH-First		
ADEME 2017	Vision ADEME 2050	Energie	2015-2050
NégaWatt 2017	NégaWatt 2050	Energie	2015-2050
CGDD 2016, la demande de transport sur le LT	Tendanciel	Transport	2012-2050
	Volontariste SNBC		
DGEC 2014-15	AME 2035	Energie	2010-2035
	AMS2 2035		
SNCF 2015, vers une mobilité sobre en CO2	Ultramobilité	Voyageurs	2013-2050
	Altermobilité		
	Proximobilité		
SNCF 2015, mobilité longue distance	Tendanciel	Voyageurs LD	2013-2050
	Catastrophe économique		
	Société fondée sur la sobriété		
	Nouvelle gouvernance européenne		
	Innovations technologiques		
Négatep 2014	Négatep	Energie	2012-2050
NégaWatt 2011-2013	NégaWatt 2050	Energie	2010-2050
ADEME 2014	Vision ADEME 2050	Energie	2010-2050
ANCRE 2013	Tendanciel	Energie	2010-2050
	Sobriété renforcée SOB		
	Décarbonation par l'électricité ELE		
	Vecteurs diversifiés DIV		
GrDF 2013	GrDF 2050	Energie	2010-2050
Greenpeace 2013	Scénario de transition énergétique	Energie	2011-2050
CIRED et RAC, 2012	Scénario bas carbone acceptable	Energie	2010-2050
PREDIT 3 (Enerdata-LET) 2008	Pégase	Transport	2000-2050
	Chronos		
	Hestia		
CGPC 2006	Gouv. mondiale et industrie env	Transport	2002-2050
	Repli européen et déclin		
	Grande Europe économique		
	Gouv. européenne et régionalisation		

Source : Mémoire 2016, Comment atteindre le Facteur 4 dans les transports ? Novembre 2019

Principal résultat et typologie des scénarios

Seulement la **moitié** des scénarios volontaristes atteignent le Facteur 4.



Typologie proposée pour la classification des scénarios

Des scénarios variés

Logique intrinsèque des scénarios

- Modèles économiques et/ou techniques
- Exploratoires vs. normatifs
- Tendanciels vs. volontaristes, continu vs. discontinu
- Des paramètres clés variés entre les scénarios

		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)

Les quatre types de prospectives, Matrice de Theys

Des éléments à préciser

Des sujets pas ou peu évoqués

- Les comportements, l'acceptabilité des mesures
- L'analyse par territoire souvent manquante, impact sur les inégalités
- La question de la limitation des ressources, des impacts du climat
- La volatilité de l'économie, l'impact de ruptures organisationnelles, comportementales ou technologiques possibles
- Liens avec les autres secteurs : urbanisme, énergie, modes de vie…

Préconisations pour les futurs scénarios

- Le réalisme et l'acceptabilité des hypothèses : détailler et mettre en débat ; co-construction, enquêtes ou profils sociologiques, narratifs
- Présentation des résultats : externalités, impact relatif des mesures
- Périmètre : intégration de l'international, d'analyses en ACV

Les 5 leviers clés pour décarboner les transports

Demande, Report modal, Taux de remplissage, Efficacité énergétique, Intensité carbone

5 leviers pour réduire les émissions de CO_2

CO_2 = **Demande de transport** x **Report modal** x **Taux de remplissage** x **Efficacité énergétique des véhicules** x **Intensité carbone de l'énergie**

Les 5 leviers clés pour décarboner les transports

1) Modérer la demande de transport

Demande de transport

Une demande qui apparaît souvent croissante

- Avec de fortes disparités selon les scénarios
- Croissance généralement plus forte pour les marchandises

Les mesures déployées pour agir sur la demande

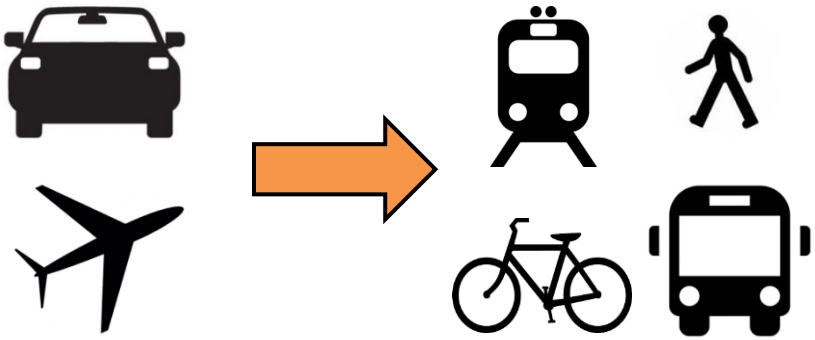
- La réorganisation du territoire
- Le télétravail
- Livraisons à domicile, consommations et productions locales, incitations à la sobriété

2) Le report modal vers les modes efficaces

Report modal

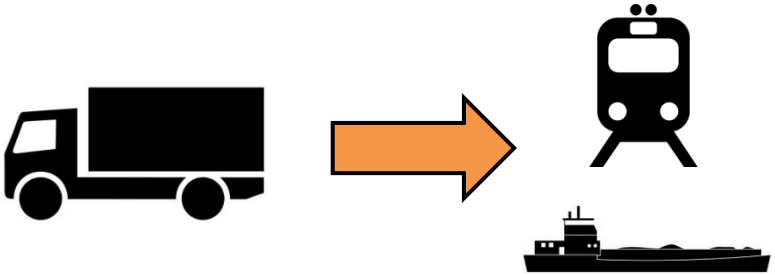
Fiscalité

- Taxe carbone
- Taxe poids-lourds
- Fin de l'exonération de TICPE et TVA réduite, PEN pour l'aérien



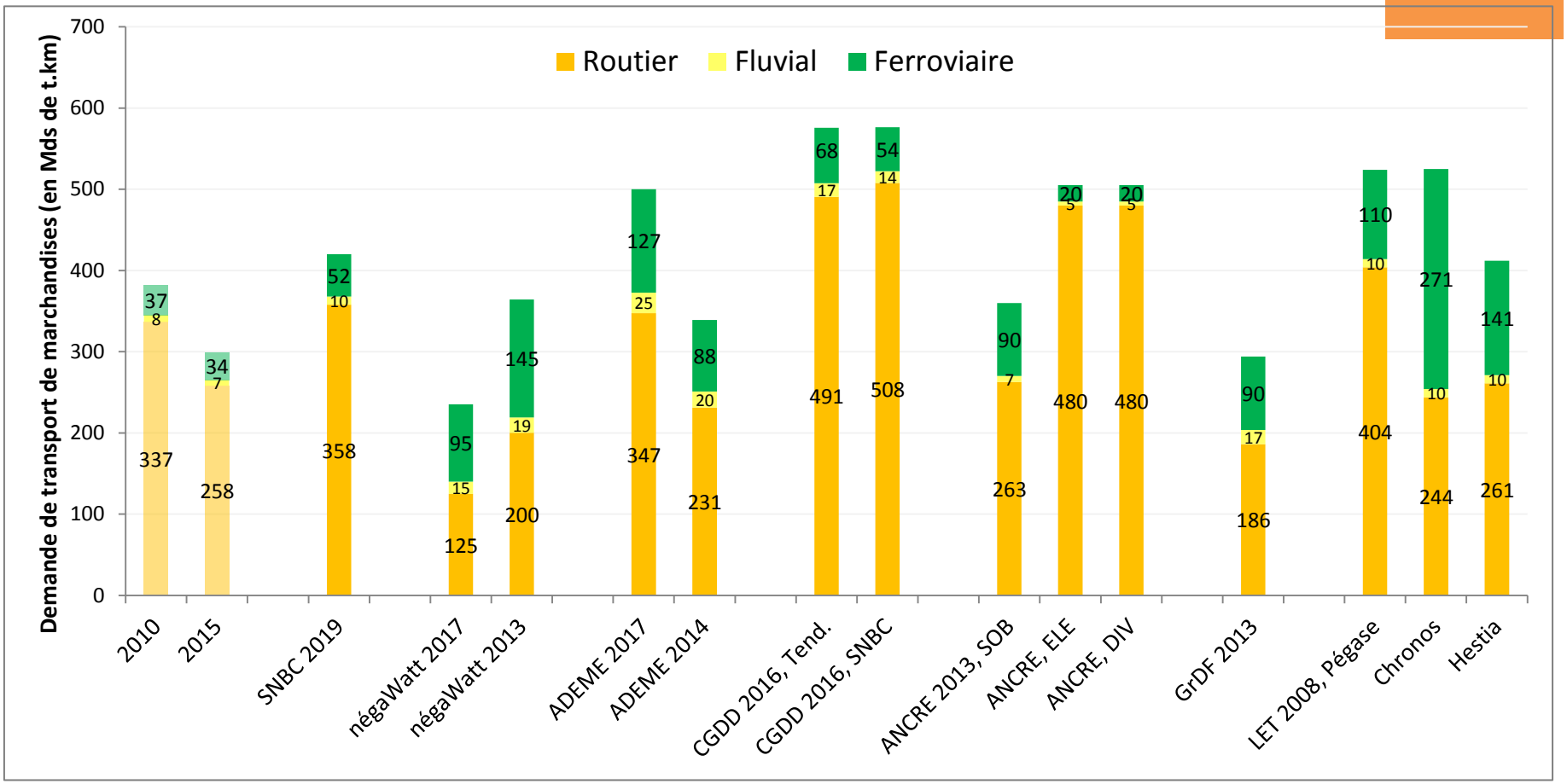
Infrastructures et services de transports en commun

Information et changements de comportement



2) Le report modal vers les modes efficaces

Report modal



Demande de transport de marchandises et parts modales dans les scénarios où les données sont disponibles

Source : actualisé depuis Mémoire Comment atteindre le Facteur 4 dans les transports ? Novembre 2019

3) Améliorer le taux de remplissage des véhicules

Taux de remplissage

Le covoiturage

- Impact incertain sur les émissions pour la longue distance
- Potentiel pour les zones de faibles densités

Améliorer le taux de remplissage pour les marchandises

L'autopartage et les services de mobilité

- Permet de diminuer le parc automobile

4) Améliorer l'efficacité énergétique

Efficacité énergétique des véhicules

Les progrès techniques sur les moteurs

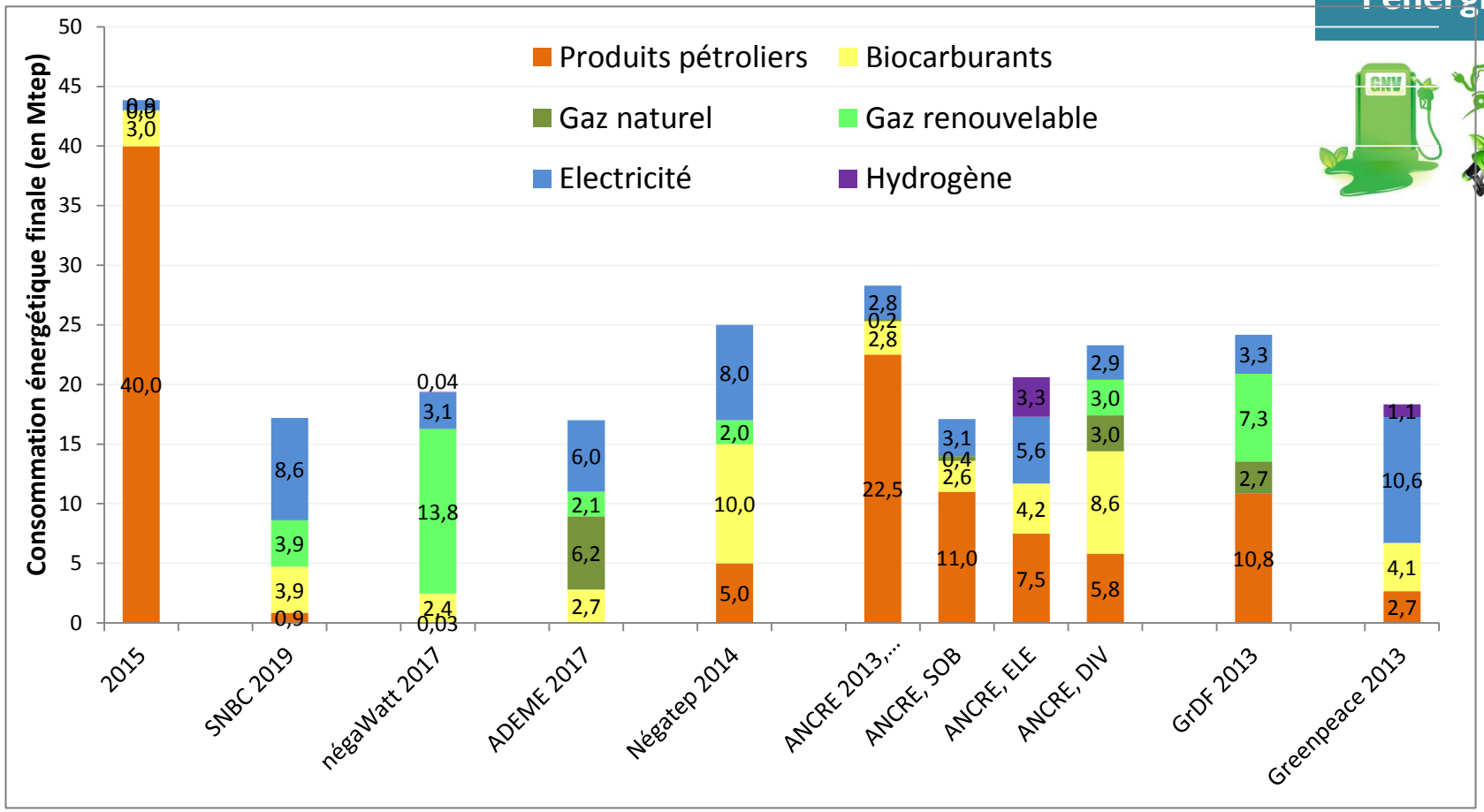
- Aidés par le développement des véhicules hybrides
- Actions normatives, bonus-malus

Sobriété et modération dans les usages

- Baisse du poids des voitures
- Baisse des vitesses
- Ecoconduite

5) Passer du pétrole aux renouvelables

Intensité carbone de l'énergie



Consommation énergétique finale des transports en 2050 et répartition par énergie dans les scénarios où les données sont disponibles

Source : actualisé Mémoire Comment atteindre le Facteur 4 dans les transports ? Novembre 2019

Evaluation qualitative des mesures

Quelques éléments sur les 3 tableaux suivants

- Ils tentent de mieux apprécier l'intérêt des différentes mesures présentes dans les scénarios de transition énergétique, leurs potentiels impacts et co-bénéfices pour la société
- En raison des incertitudes ou d'effets multiples qui jouent dans des sens opposés, une bonne partie des cases ont un "?"

1) Interactions

- Certaines mesures ont des risques d'effet rebond (interactions négatives) comme les progrès sur les moteurs ou le covoiturage, sur la demande et le report modal
- D'autres ont des effets indirects positifs, comme le vélo qui encourage à adopter une vie de proximité, mais aussi à se démotoriser et modifier ses déplacements à longue distance.

2) Externalités

- Donne le sens dans lequel joue la mesure sur les externalités des transports

3) Facilité de mise en œuvre

- Evalue quelques critères sur l'acceptabilité des citoyens et usagers, la facilité de la mise en œuvre politique, ou d'autres impacts ou bénéfices pour la société.

Au global

- Les mesures technologiques ont un potentiel de réduction des émissions important (voir partie scénarios de prospectives) et nécessitent peu de changements de comportements de mobilité ou d'organisation territoriale, facilitant leur acceptabilité
- En revanche, ils ont de plus grands risques d'effets rebonds, de moindres co-bénéfices sur les externalités, et de plus grands coûts économiques comparés aux mesures de sobriété

Interactions et effets rebonds entre les mesures

Interaction

- Positive
- Neutre
- Négative
- ? Incertain

	Demande T				Report modal					Tx rempli			Eff Ener					Carburant							
	Densification	- Etalement	Télétravail	Conso locales	+ TC routier	+ Train	+ Vélo	- Avion	- Voiture	Covoiturage	Autopartage	TR du TRM	Progrès moteur	↓ poids veh	↓ vit axes rapides	↓ vitesse ville	Ecoconduite	Electrique	Agrocarburants	GNV	BioGNV	Hydrogène	Taxe carbone	Sobriété	Technologie
Demande de T	?	?	?							?	?							?							
Report modal					?	?					?							?							?
Taux de remplissage																		?							?
Efficacité énerg.												?				?		?							
Carburant																									
Emissions indirectes	?	?	?		?	?	?	?	?	?	?	?	?		?	?			?	?	?				

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

TC = transports en commun ; TRM = transport routier de marchandises ; GNV = gaz naturel véhicule

Impacts sur les externalités

	Positif	Neutre	Négatif	? Incertain

	Demande T				Report modal					Tx rempli			Eff Ener					Carburant						
	Densification	- Etalement	Télétravail	Conso locales	+ TC routier	+ Train	+ Vélo	- Avion	- Voiture	Covoiturage	Autopartage	TR du TRM	Progrès moteur	↓ poids veh	↓ vit axes rapides	↓ vit ville	Ecoconduite	Electrique	Agrocarburants	GNV	BioGNV	Hydrogène	Sobriété	Technologie
Conso d'énergie	Positif	Positif	?	?	Positif	Positif	Positif	Positif	Positif	?	?	?	Neutre	Neutre	Neutre	?	Neutre	?	?	Neutre	Neutre	Négatif	Positif	?
Energies fossiles	Positif	Positif	?	?	Neutre	Positif	Positif	Positif	Positif	?	?	?	Neutre	Neutre	Neutre	?	Neutre	?	Neutre	Neutre	Positif	?	Positif	Positif
Métaux	Neutre	Neutre	?	Neutre	Positif	Positif	Positif	Positif	Positif	Neutre	Positif	?	?	?	Neutre	Neutre	Neutre	Négatif	Neutre	Neutre	Neutre	?	Positif	?
Pollution atm	?	Neutre	Positif	Positif	Positif	Positif	Positif	Positif	Positif	?	?	?	Positif	Positif	?	?	Positif	Neutre	?	Positif	Positif	Positif	Positif	?
Autres impacts env	?	Positif	?	Neutre	?	?	Positif	Positif	Positif	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Négatif	Négatif	?	?	?	Positif	?
Bruit	?	Neutre	Positif	?	?	?	Positif	Positif	Positif	Neutre	Neutre	?	Neutre	Neutre	?	Positif	Positif	Positif	Neutre	Neutre	Neutre	Positif	Positif	?
Congestion R	Négatif	?	Positif	?	Positif	?	Positif	?	?	?	Neutre	?	Neutre	Positif	Neutre	?	Positif	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Positif	Neutre
Conso d'espace	Positif	Positif	?	?	Positif	Positif	Positif	Neutre	Positif	?	?	?	Neutre	Positif	?	?	Neutre	Neutre	Négatif	Neutre	?	Neutre	Positif	Neutre
Accidentologie	?	?	Positif	Neutre	Positif	Positif	Négatif	Neutre	Positif	Neutre	Neutre	?	Neutre	?	Positif	Positif	Positif	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Positif	Neutre
Dépendance auto	Positif	Positif	?	?	Positif	Positif	Positif	Neutre	Positif	Positif	Positif	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Positif	Neutre
Sédentarité	Positif	?	Neutre	?	Positif	Positif	Positif	Neutre	Positif	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Neutre	Positif	Neutre
Inégalités terr	?	?	?	Positif	?	?	Positif	Négatif	Négatif	Positif	Positif	Neutre	Neutre	Neutre	?	Neutre	Neutre	?	Neutre	Neutre	?	?	?	?
Inégalités sociales	?	?	?	Neutre	Neutre	?	Positif	Positif	?	Positif	Positif	Neutre	Positif	Positif	Neutre	?	Positif	?	Neutre	Neutre	?	?	?	?
Résilience	?	?	Positif	Positif	?	?	Positif	Positif	?	Positif	Positif	?	?	?	?	?	?	?	?	Neutre	Positif	Négatif	Positif	Négatif

Principales mesures suggérées pour la transition énergétique, et leurs impacts potentiels sur les principales externalités positives et négatives liées aux transports

Facilité de mise en œuvre

	Demande T				Report modal					Tx rempli			Eff Ener					Carburant						
	Densification	- Etalement	Télétravail	Conso locales	+ TC routier	+ Train	+ Vélo	- Avion	- Voiture	Covoiturage	Autopartage	TR du TRM	Progrès moteur	↓ poids veh	↓ vit axes rapides	↓ vit ville	Ecoconduite	Electrique	Agrocarburants	GNV	BioGNV	Hydrogène	Sobriété	Technologie
Tendanciel	?			?					?				?		?		?			?			?	?
Rapidité mise en œuvre				?	?	?																	?	?
Acceptabilité	?	?					?							?	?	?		?	?	?	?	?		?
Chgmts comportements	?	?																						
Coût des politiques	?	?		?			?						?	?							?	?	?	?
Coût usagers	?			?				?	?		?							?	?	?	?	?	?	?
Temps transport			?		?	?	?								?	?							?	
Confort						?	?																?	
Distance / Accessibilité							?			?				?									?	
Emploi												?	?					?	?	?	?	?	?	
Lien social	?	?																					?	

Positif
≈
Négatif
? Incertain

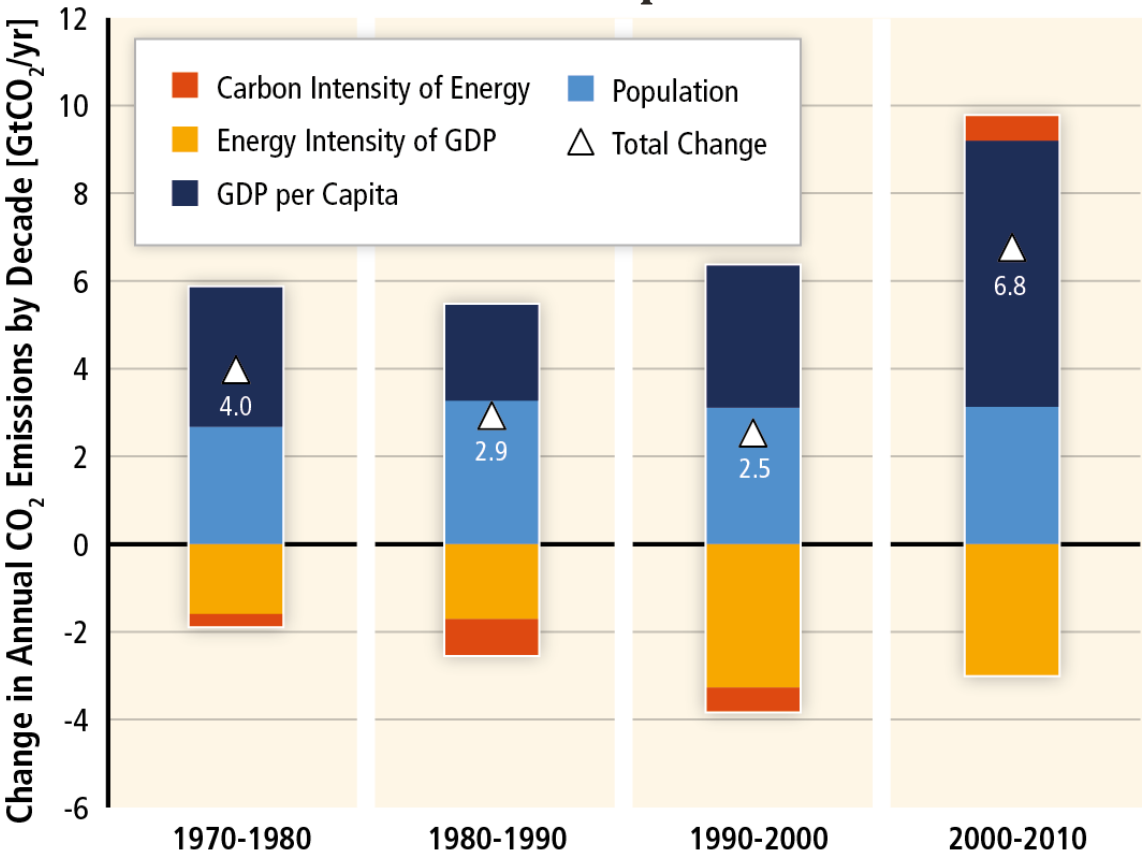
Principales mesures suggérées pour la transition énergétique, et quelques critères liés à la facilité de la mise en œuvre des mesures et évolutions

L'identité de Kaya adaptée aux transports

Méthodologie de décomposition des émissions

Reprendre l'identité de Kaya…

$$CO_2 \equiv Pop.\frac{PIB}{Pop}.\frac{E}{PIB}.\frac{CO_2}{E}$$



Décomposition du changement dans les émissions annuelles de CO2 de la combustion des énergies fossiles, par décennie (IPCCb, 2014, WG3)

… l'adapter aux 5 leviers des transports

L'identité de Kaya utilisée pour décomposer les émissions de CO_2

CO_2 = **Demande de transport** x **Report modal** x **Taux de remplissage** x **Efficacité énergétique des véhicules** x **Intensité carbone de l'énergie**

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

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

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

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

E_i : consommation énergétique du mode i (Mtep)

$CO_{2,i}$: émissions de CO_2 du mode i ($MtCO_2$)

La décomposition LMDI (log-mean divisia index)

La **forme additive** pour décomposer l'évolution des émissions de CO_2

$$\Delta CO_2 = CO_2^T - CO_2^0$$

$$\Delta CO_2 = \Delta CO_{2,Pop} + \Delta CO_{2,Act} + \Delta CO_{2,RM} + \Delta CO_{2,TR} + \Delta CO_{2,EE} + \Delta CO_{2,IC}$$

Exemple pour le calcul du facteur d'efficacité énergétique (EE) :

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

La **forme multiplicative**

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

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

$L(a,b) = \frac{a-b}{\ln a - \ln b}$ est la moyenne logarithmique de a et b

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

L'application aux émissions passées

Décomposition de 1960 à 2017

Introduction / Résumé

Décomposition des émissions 1960-2017

- Qq graphiques (en français) sont proposés dans les prochaines diapositives
- Le working paper en anglais est disponible sur le site de la chaire ici

Résumé

Le papier analyse les facteurs ayant influencé les émissions de CO_2 des transports sur la période 1960-2017. La période a connu une forte hausse des émissions de CO_2 des transports de 33 à 126 $MtCO_2$ en 2017, après un pic à 136 $MtCO_2$ au début des années 2000. Une décomposition des émissions est utilisée pour évaluer la contribution relative de cinq facteurs pour les transports de passagers et de marchandises : la demande de transport, le report modal, le taux de remplissage, l'efficacité énergétique des véhicules et l'intensité carbone de l'énergie. Elle 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 compensés : 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 sur les émissions apparaît limité pour le moment.

L'évolution de1960 à 2017 : méthodologie

Périmètre

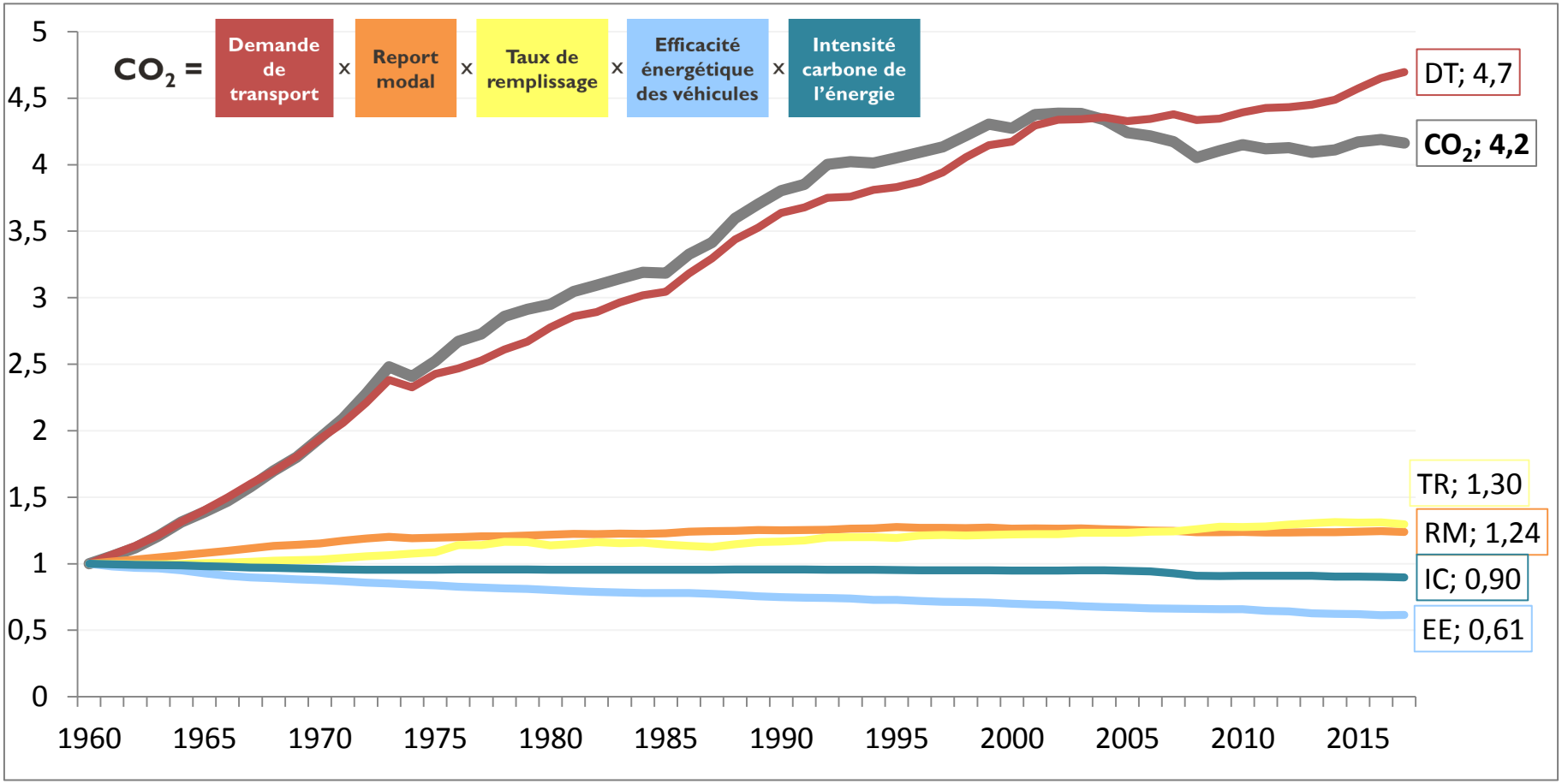
- Application à 5 modes voyageurs et 4 marchandises
- Emissions directes
- France intérieur
- De 1960 à 2017

		Demande de transport	Circulation	Energie	Emissions de CO_2
Passagers	**VP + 2RM + 60% VUL**	pass.km	veh.km	tep	tCO_2
	TC routiers	pass.km	veh.km	tep	tCO_2
	Ferroviaire	pass.km	veh.km	tep	tCO_2
	Aérien intérieur	pass.km		tep	tCO_2
	Modes actifs	pass.km		ε	ε
Marchandises	**Camions**	t.km	veh.km	tep	tCO_2
	40 % VUL	t.km	veh.km	tep	tCO_2
	Ferroviaire	t.km	veh.km	tep	tCO_2
	Fluvial et maritime	t.km	veh.km	tep	tCO_2

Données utilisées pour la décomposition
Sources : CITEPA, CGDD, SNCF, OECD, DGAC, WB, Papon

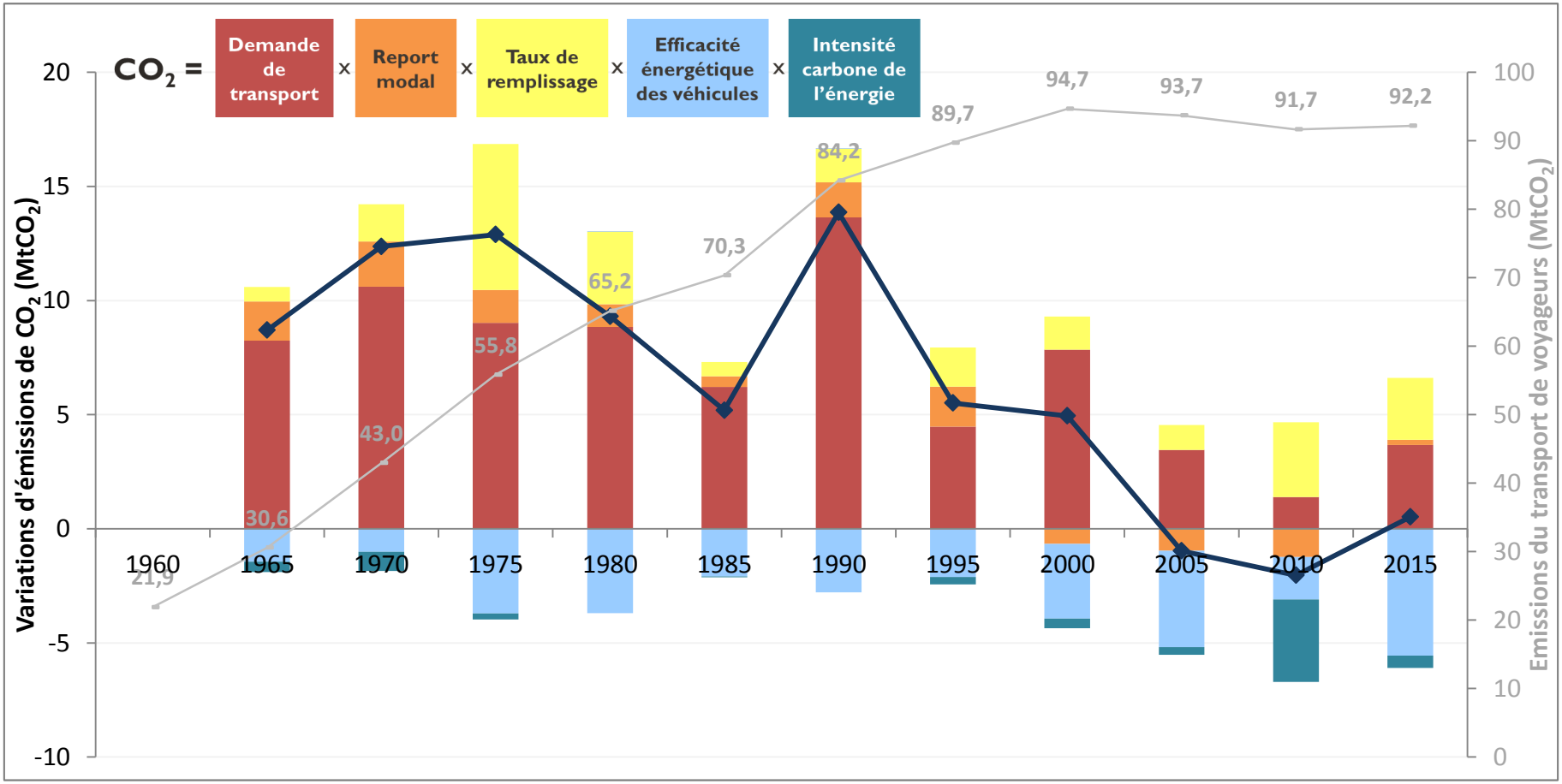
Voyageurs 1960-2017

$$\frac{CO_2^{2017}}{CO_2^{1960}} = 4{,}2 = 4{,}7 \times 1{,}24 \times 1{,}30 \times 0{,}61 \times 0{,}90$$



Variation des émissions de CO_2 du transport de voyageurs de 1960 à 2017
(forme multiplicative, pas de 1 an)

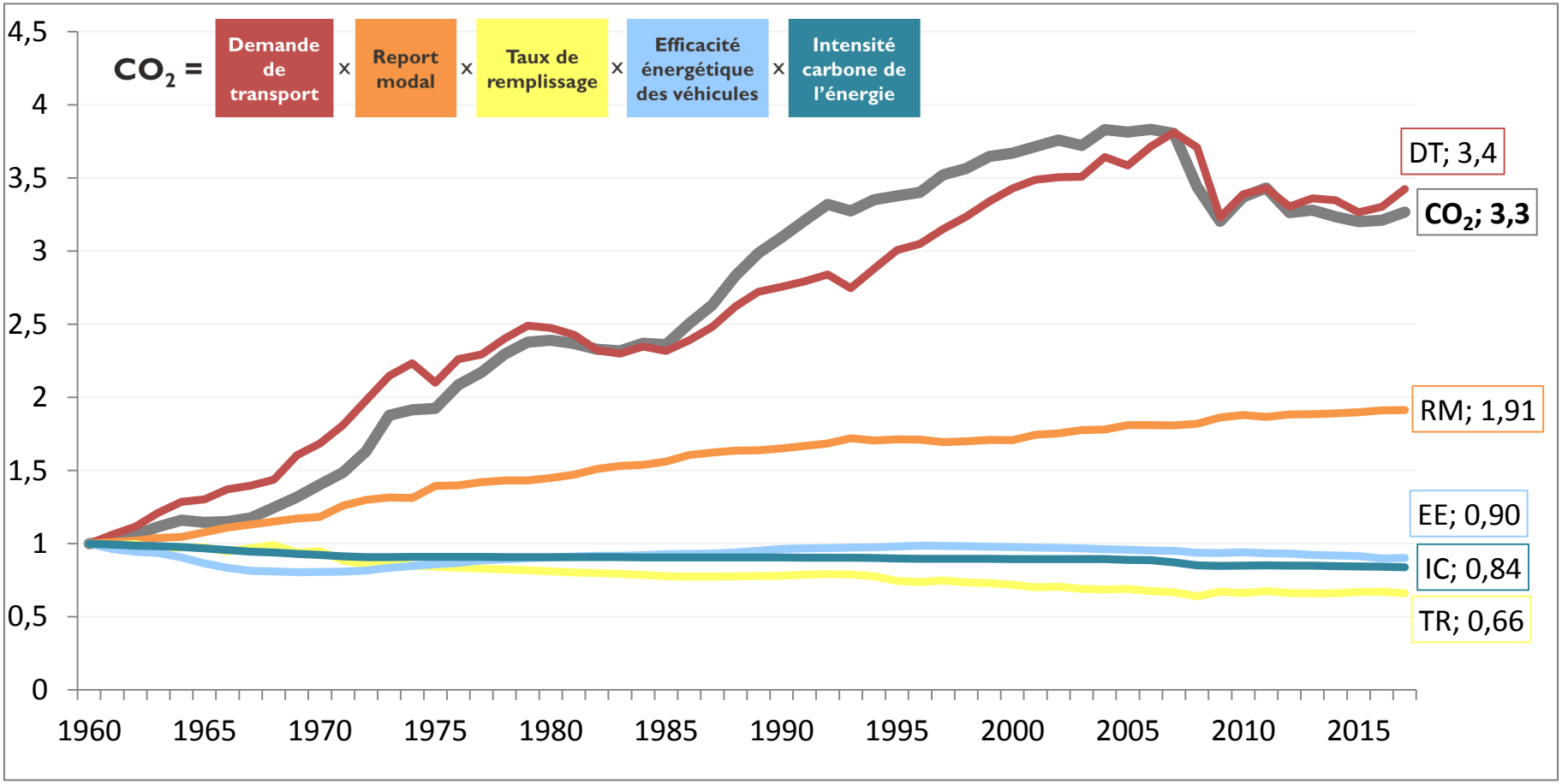
Voyageurs 1960-2015



Variation des émissions de CO_2 du transport de voyageurs de 1960 à 2015
(forme additive, pas de temps de 5 ans)

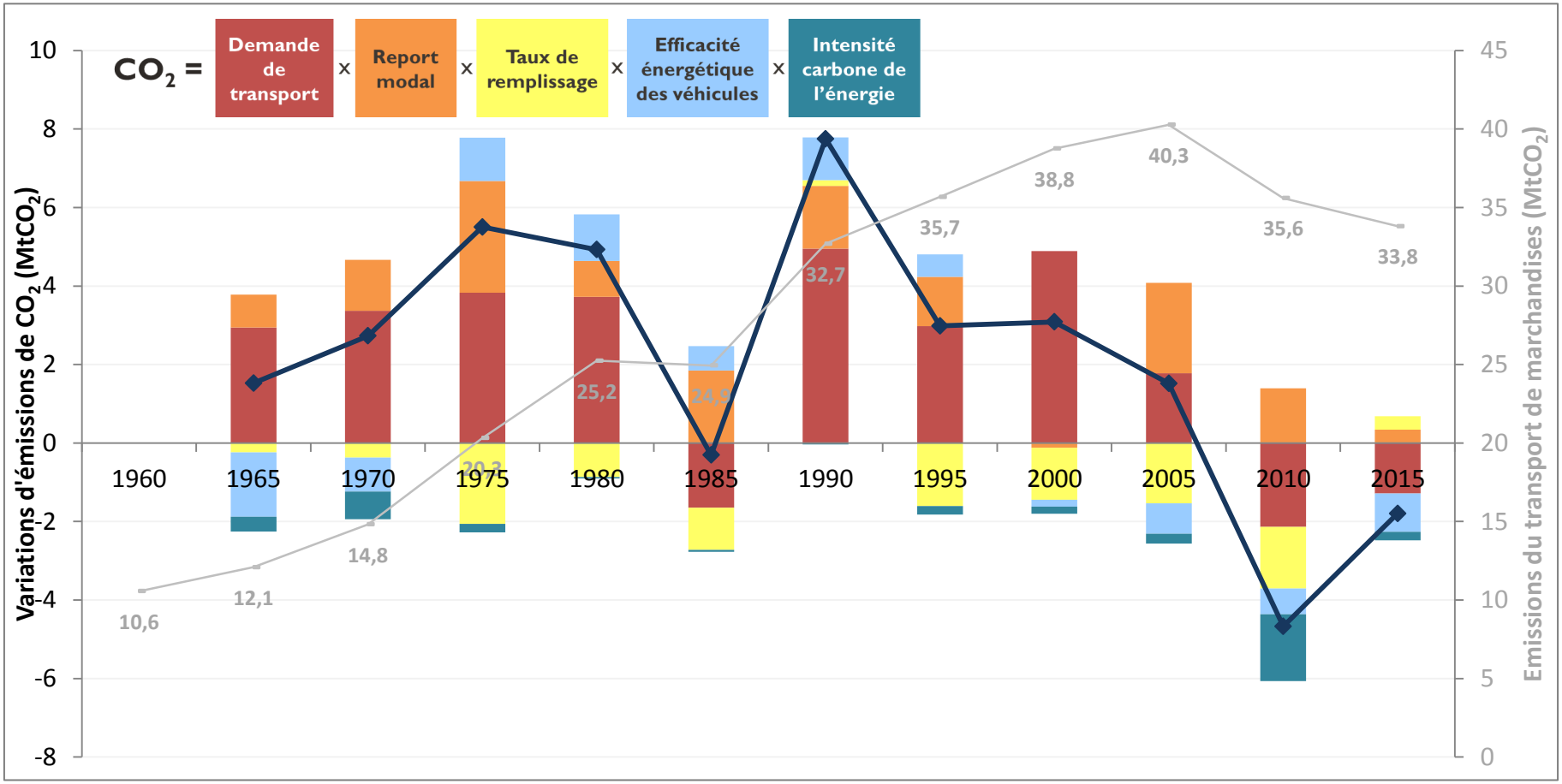
Marchandises 1960-2017

$$\frac{CO_2^{2017}}{CO_2^{1960}} = 3{,}3 = 3{,}4 \times 1{,}91 \times 0{,}66 \times 0{,}90 \times 0{,}84$$



Variation des émissions de CO_2 du transport de marchandises de 1960 à 2017
(forme multiplicative, pas de 1 an)

Marchandises 1960-2015



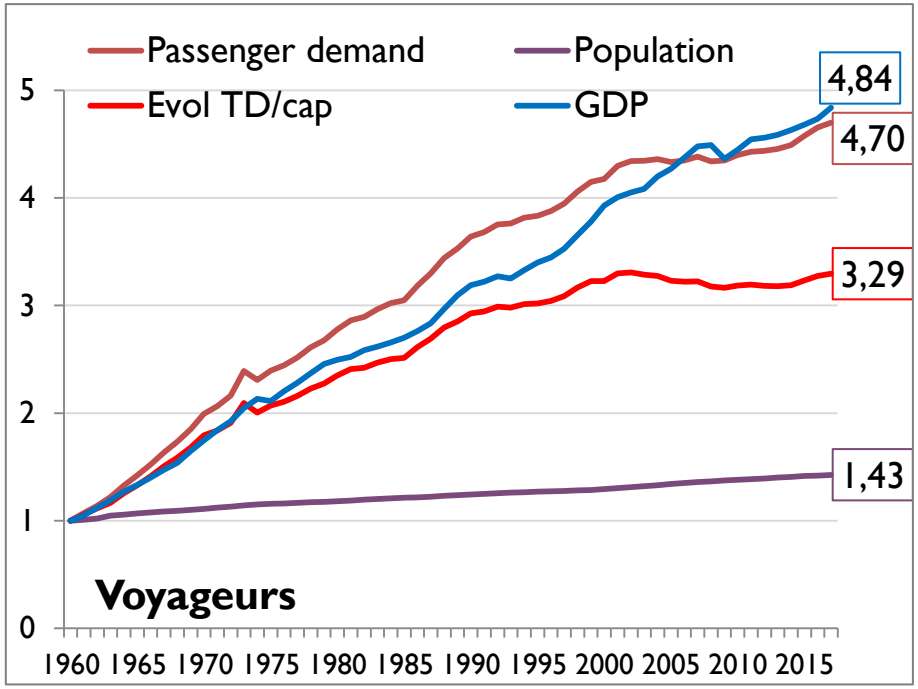
Variation des émissions de CO_2 du transport de marchandises de 1960 à 2015
(forme additive, pas de temps de 5 ans)

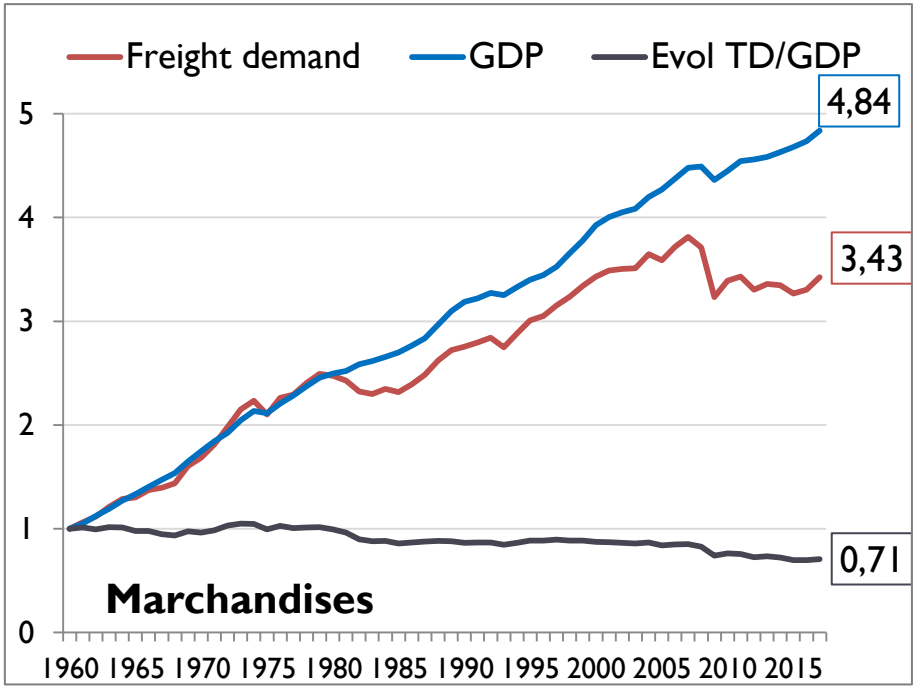
1) L'impact majeur de la demande de transport

Demande de transport

Principaux facteurs influençant la demande

- Variables socio-économiques : PIB, prix du pétrole, population
- Autres : taux de motorisation, vitesse moyenne, étalement urbain





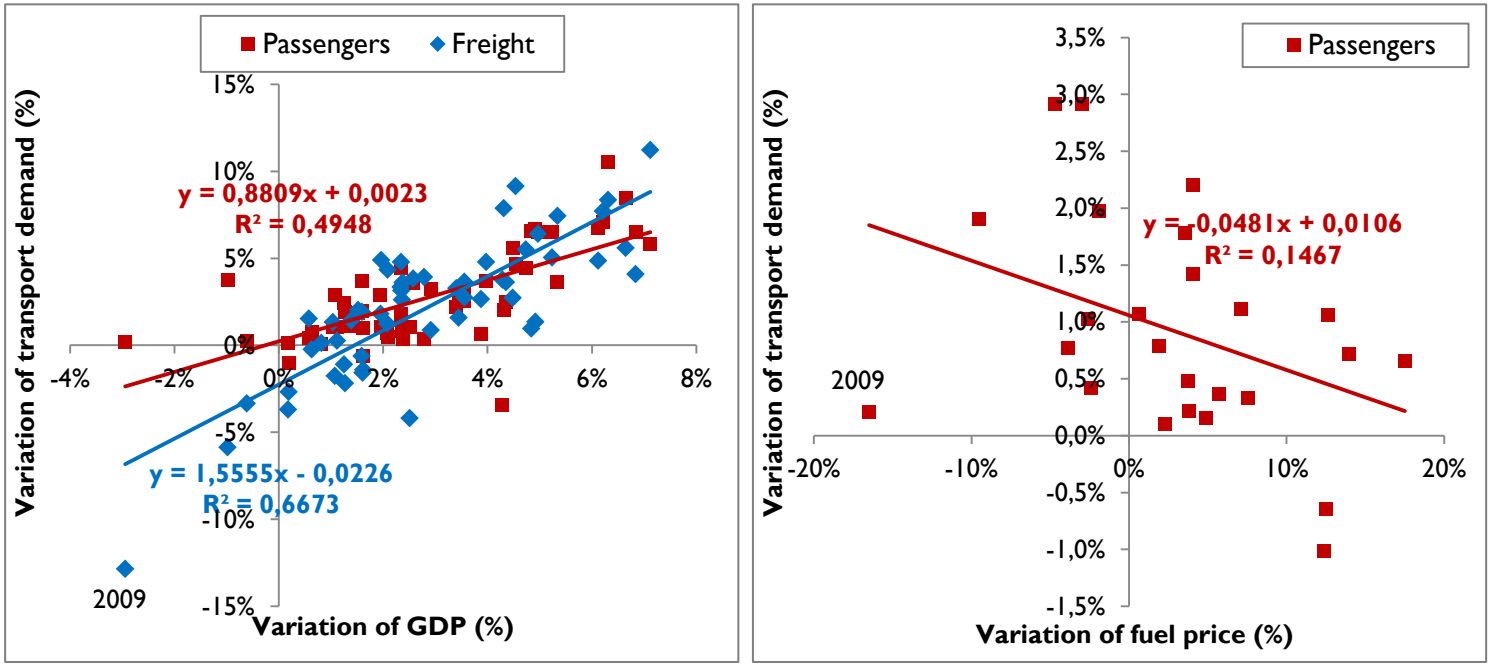
L'évolution de la demande de transport pour les voyageurs (en voy.km, à gauche) **et les marchandises** (en t.km, à droite)

1) L'impact majeur de la demande de transport

Demande de transport

Principaux facteurs influençant la demande

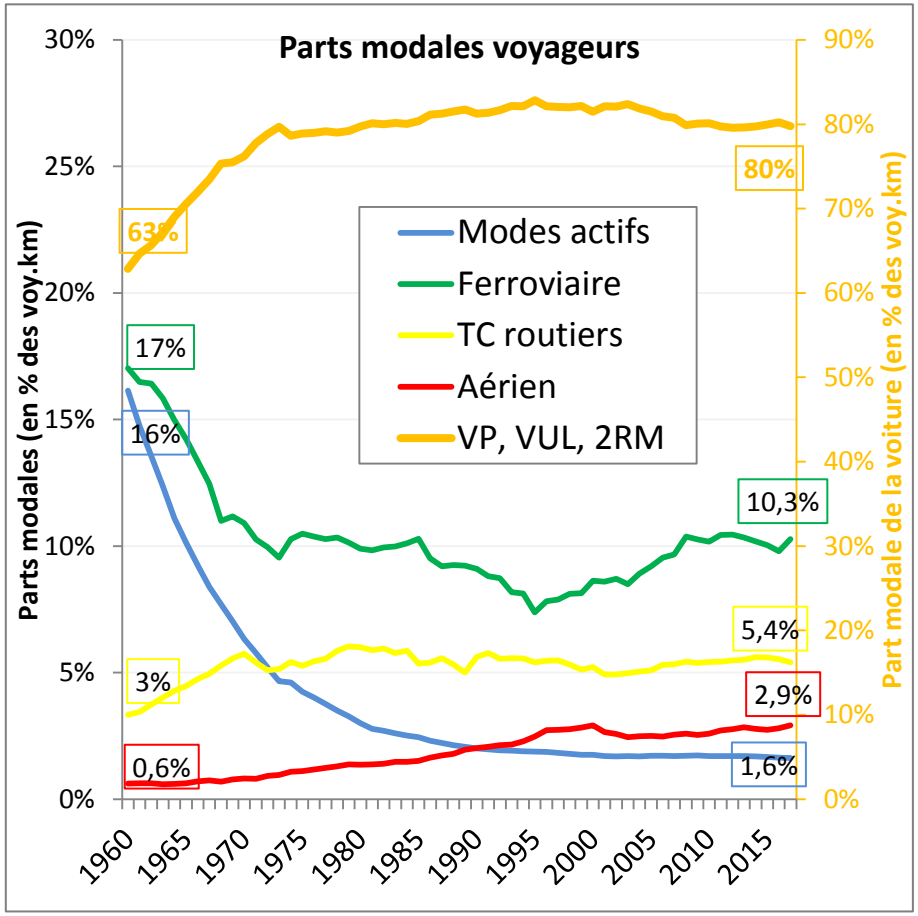
- Variables socio-économiques : PIB, prix du pétrole, population
- Autres : taux de motorisation, vitesse moyenne, étalement urbain

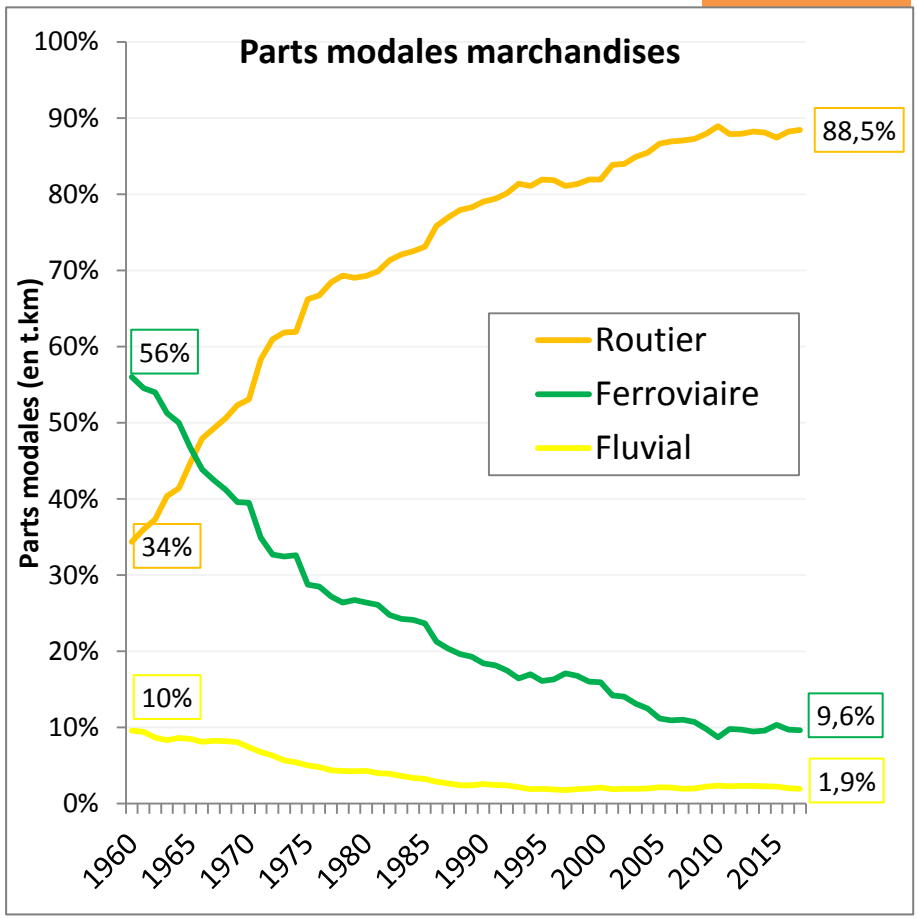


L'évolution de la demande de transport pour les voyageurs (en voy.km, à gauche) **et les marchandises** (en t.km, à droite)

2) Report modal surtout vers la route

Report modal



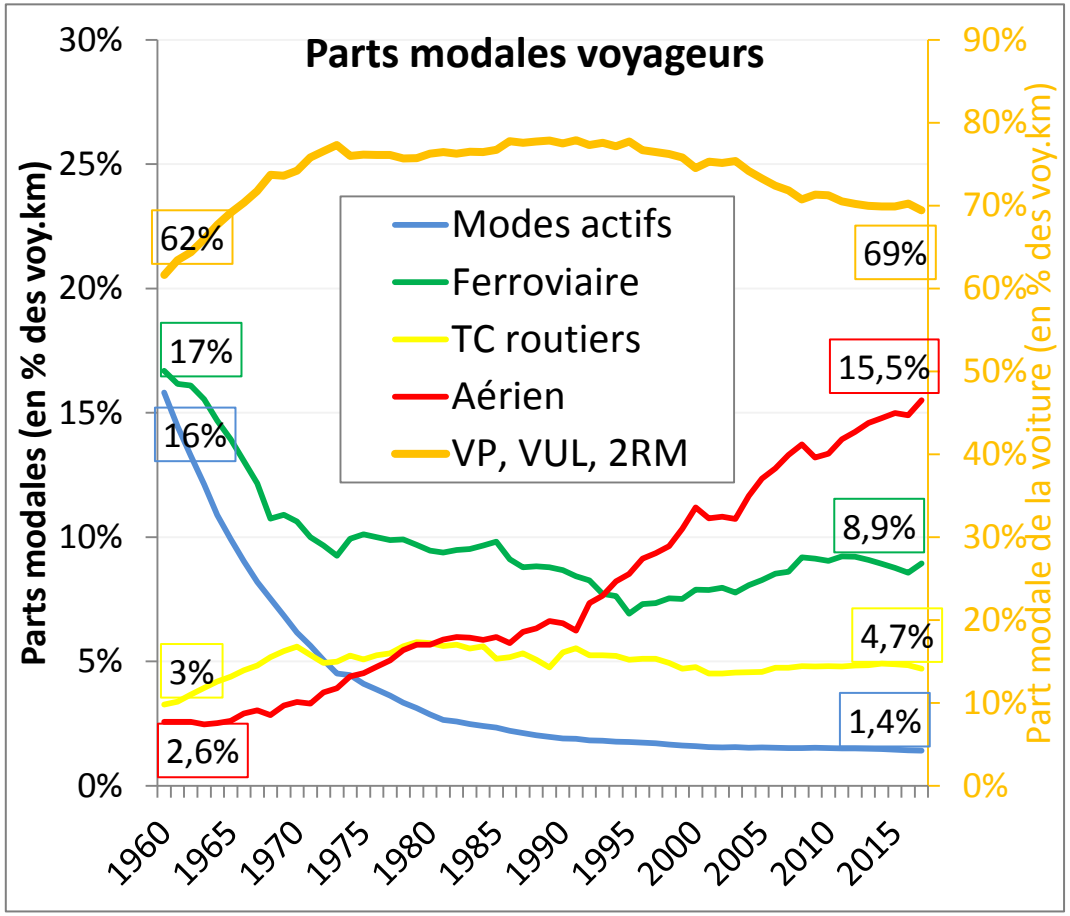


Parts modales du transport de passagers

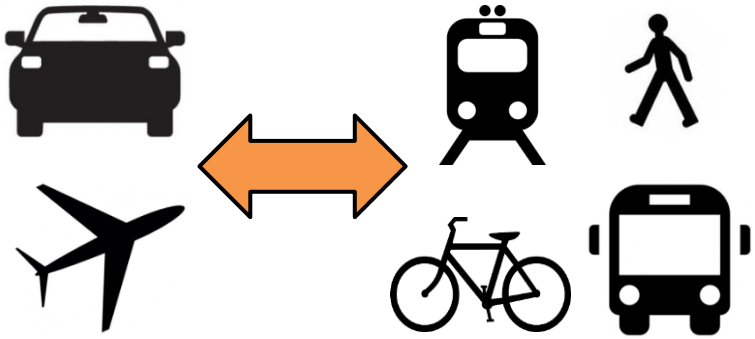
(en voy.km pour voyageurs; axe de droite pour routier individuel)

2) La forte croissance de l'aérien international

Report modal



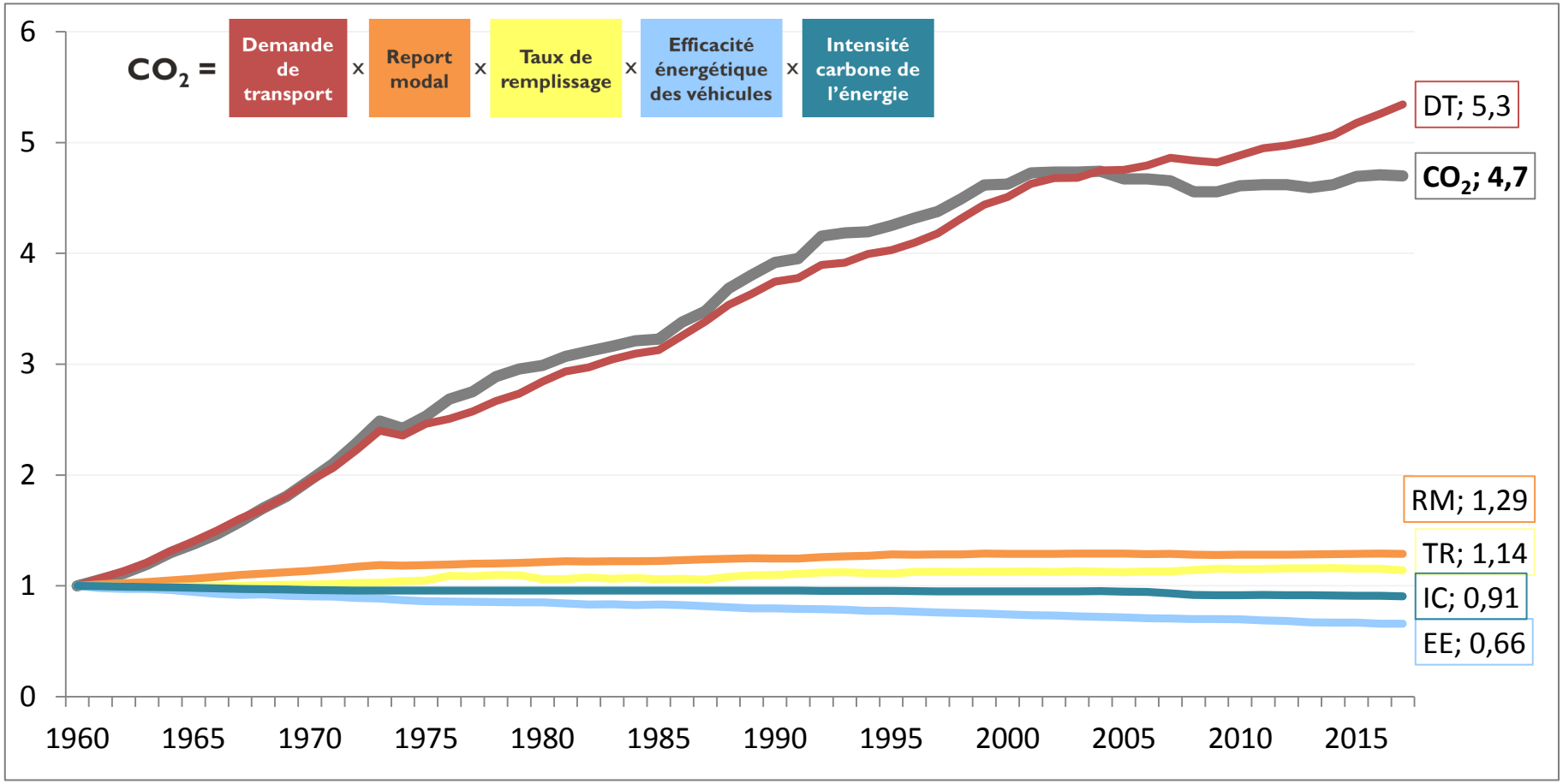
***Commentaire** : même graphique que la diapo précédente à gauche, mais aérien international compris. La décomposition avec l'aérien international est donnée en page suivante*



Parts modales du transport de passagers, aérien international compris
(en voy.km; axe de droite pour routier individuel)

2) La forte croissance de l'aérien international

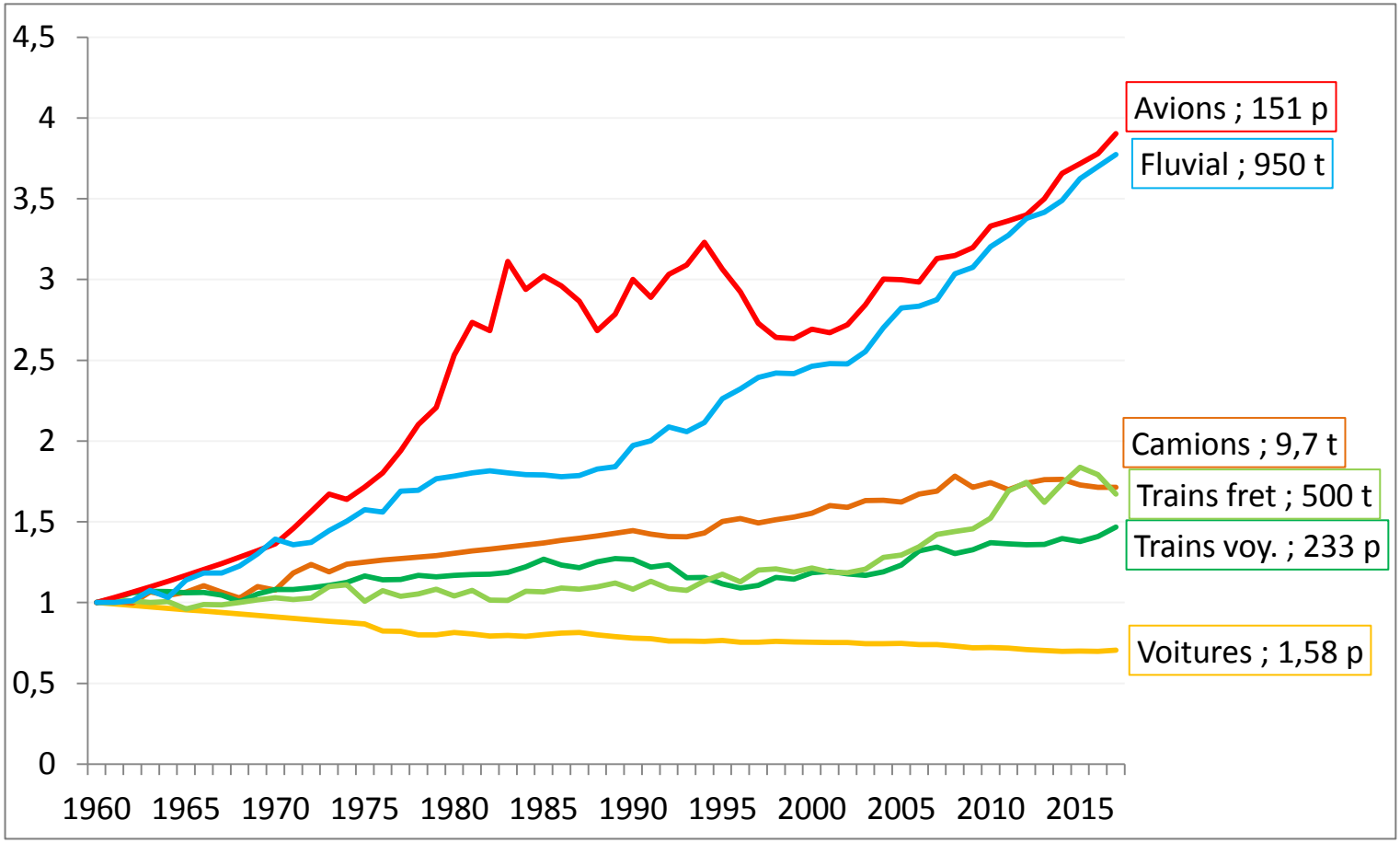
***Commentaire** : même grandes tendances que sans international, mais avec impact CO_2, demande et report modal supérieurs*



Variation des émissions de CO_2 du transport de voyageurs de 1960 à 2017, aérien international compris
(forme multiplicative, pas de 1 an)

3) Hausse du remplissage, sauf pour les voitures

Taux de remplissage



Evolution du remplissage de différents modes de transport
(base 1 en 1960 ; valeur à droite en 2017 ; p=passagers, t=tonnes)

4) Amélioration de l'efficacité énergétique

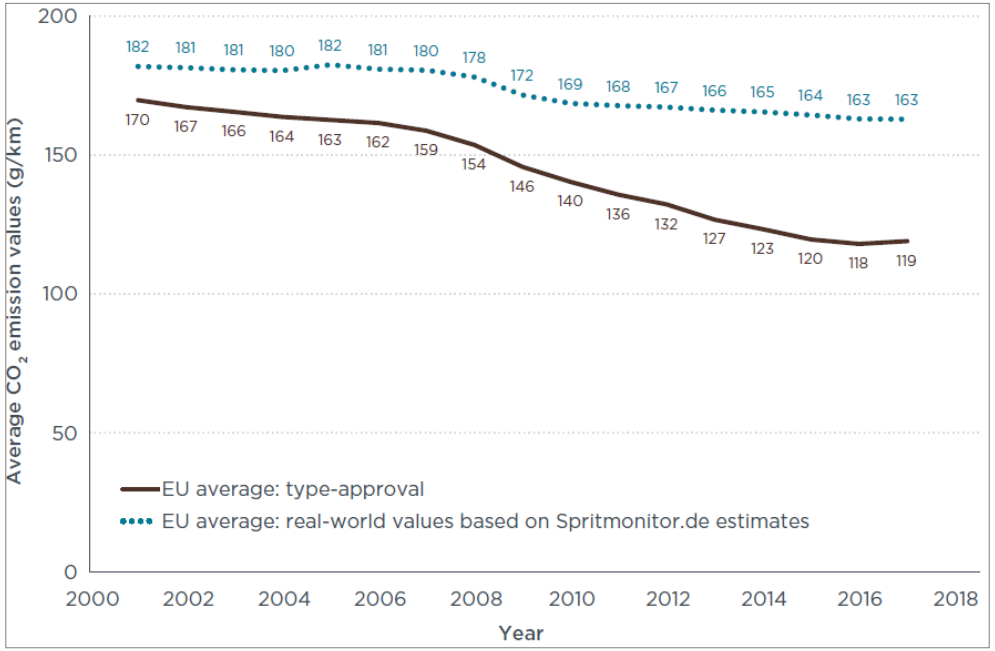
Efficacité énergétique des véhicules

A contribué à la limitation des émissions de CO_2

- Mais approche les limites techniques ?

Forte interaction avec le taux de remplissage

- La hausse du poids limite les gains d'efficacité énergétique



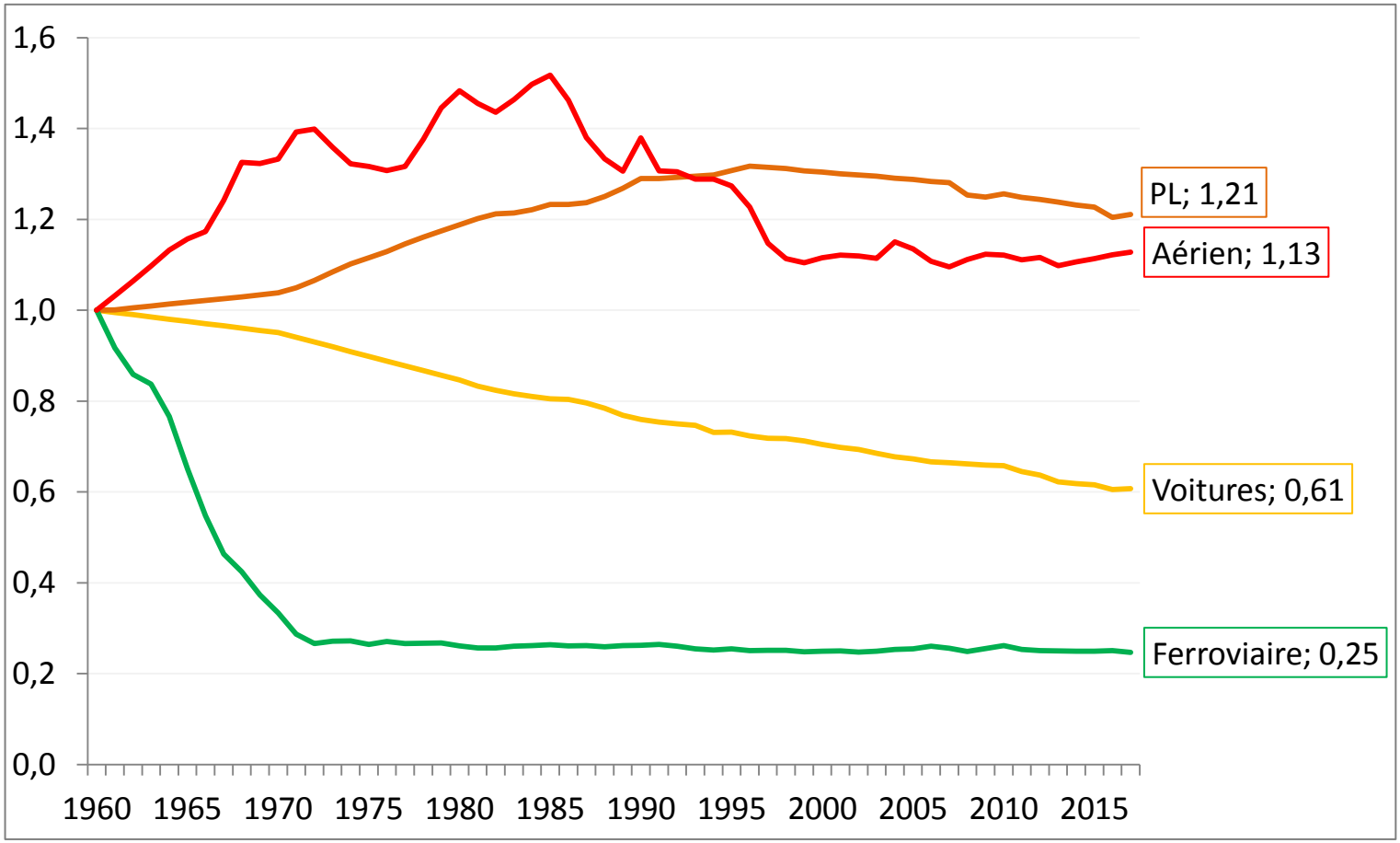
Valeurs d'émissions de CO_2 réelles vs. homologation pour les nouvelles voitures européennes

Source : ICCT, 2018

4) Amélioration de l'efficacité énergétique

Efficacité énergétique des véhicules

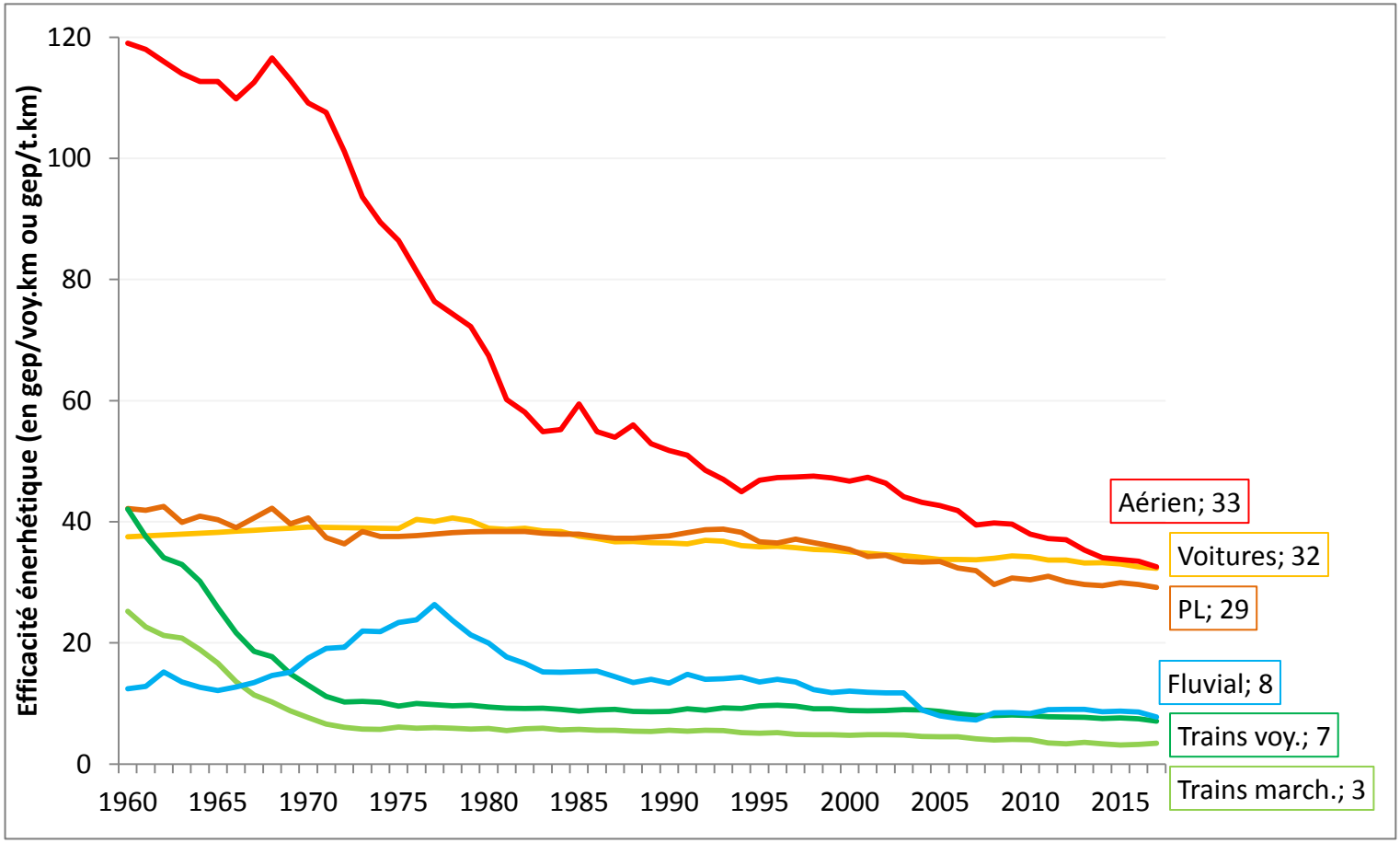
Commentaire *: Les augmentations de consommations de l'aérien et des poids-lourds en début de période s'expliquent par une augmentation de leur taille et leur chargement*



Evolution de l'efficacité énergétique (par véhicule.km) pour différents modes (base 1 en 1960)

4) Amélioration de l'efficacité énergétique

Efficacité énergétique des véhicules



Evolution de l'efficacité énergétique (en gep/voy.km ou gep/t.km) pour différents modes

5) Une décarbonation très limitée par le passé

Intensité carbone de l'énergie

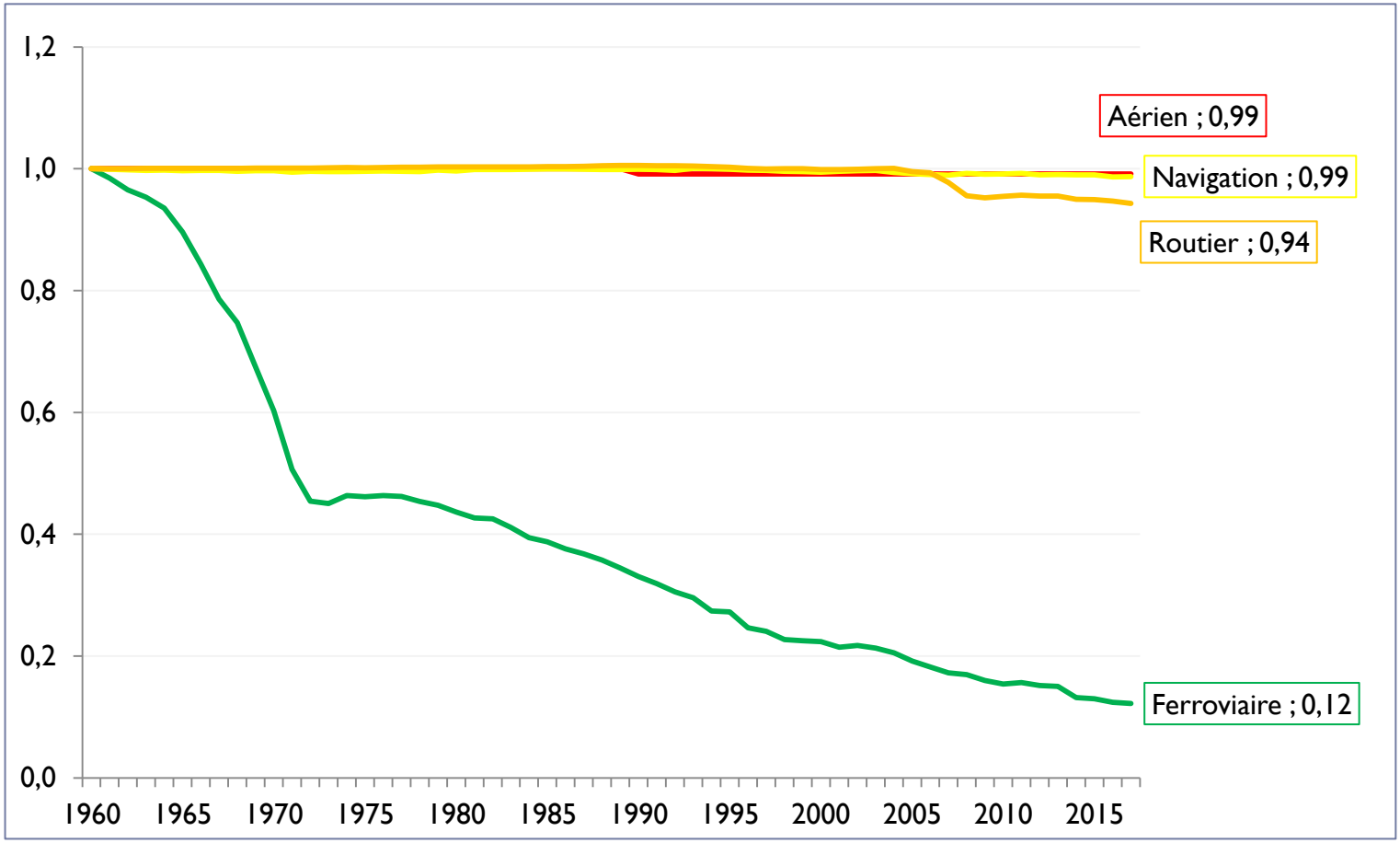
Toujours plus de 90 % de pétrole dans le mix énergétique

2 évolutions sur la période 1960-2017

- Fin du charbon dans le ferroviaire début des années 70
- Développement des agrocarburants pour le routier 2005-2010

5) Une décarbonation très limitée par le passé

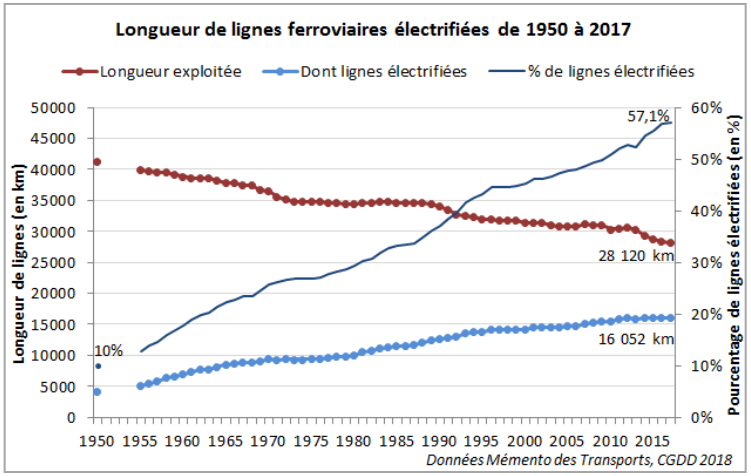
Intensité carbone de l'énergie

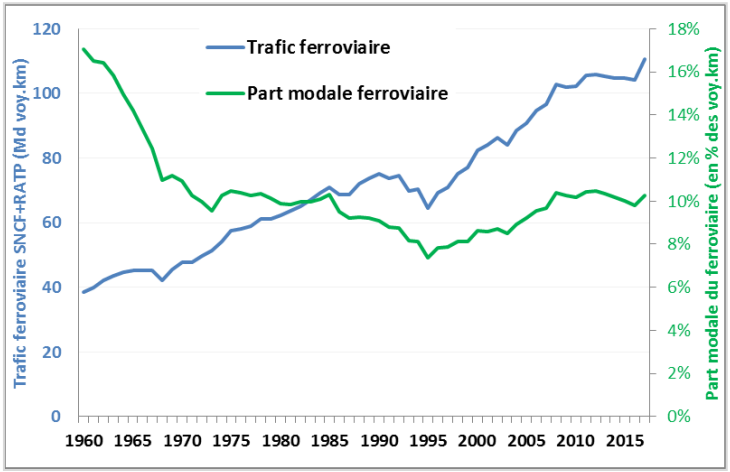


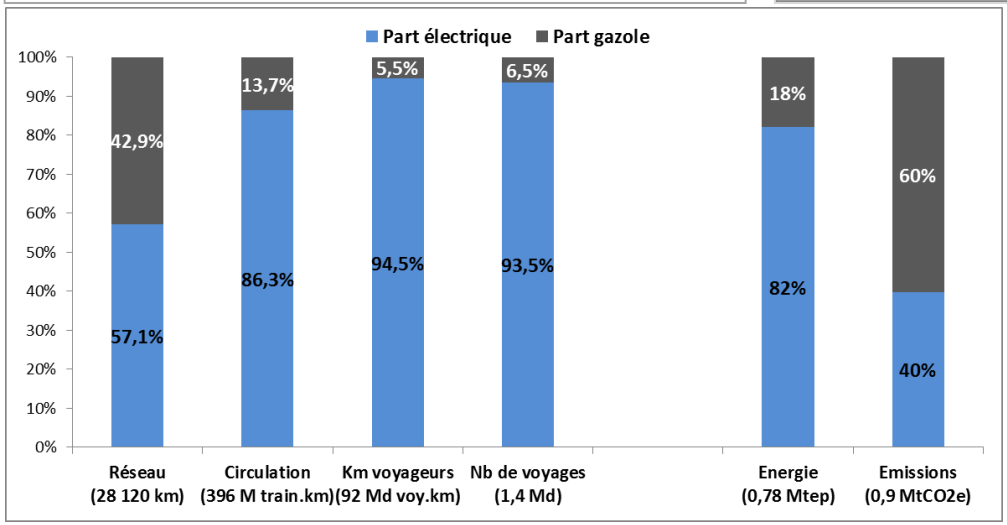
Evolution de l'intensité carbone pour différents modes
(base 1 en 1960)

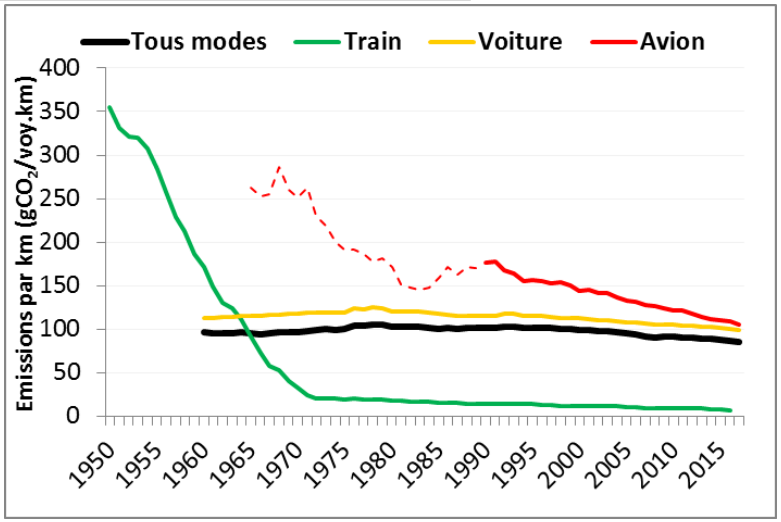
5) Une décarbonation très limitée par le passé

Intensité carbone de l'énergie





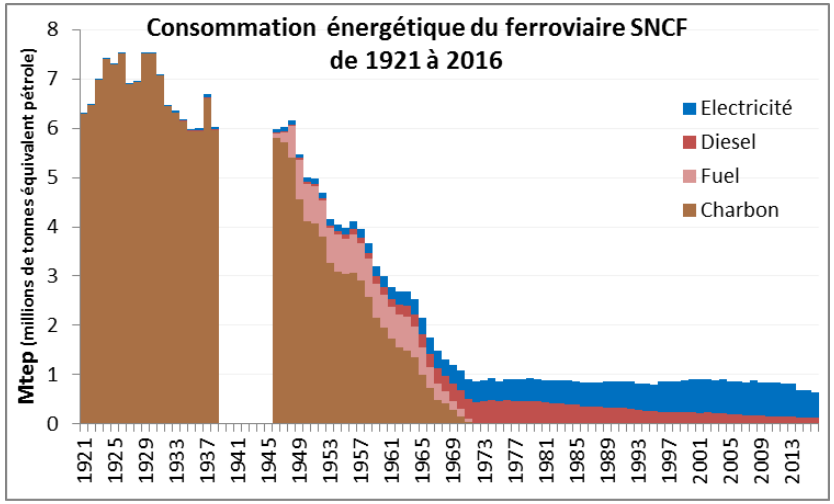


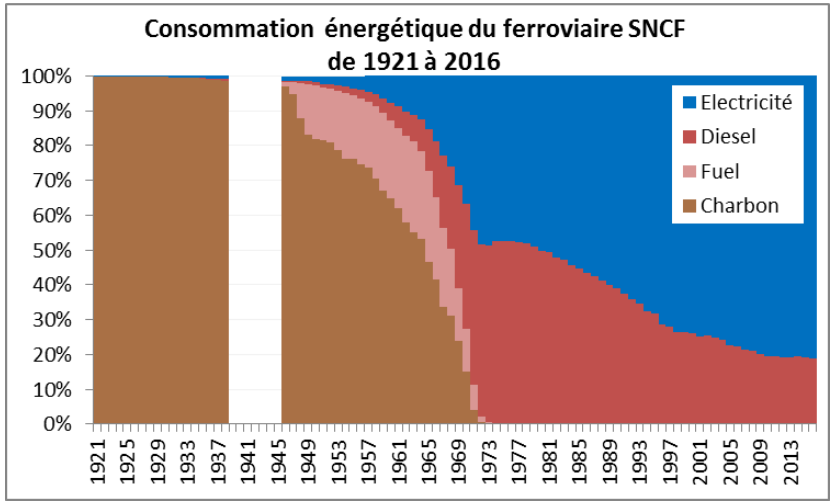


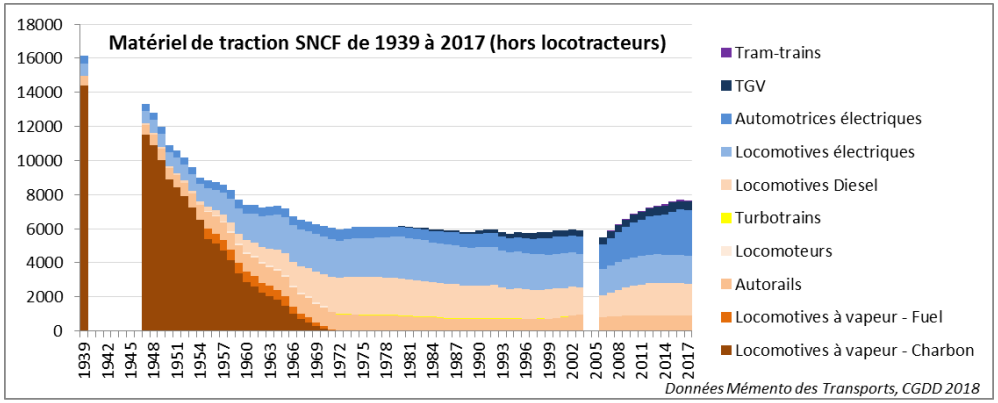
Longueurs de lignes, dont électrifiées (haut gauche) ; **trafic et part modale voyageur du train** (haut droite); **parts électrique et gazole en 2017 selon le critère** (bas gauche) ; **émissions des modes voyageurs** (bas droite)

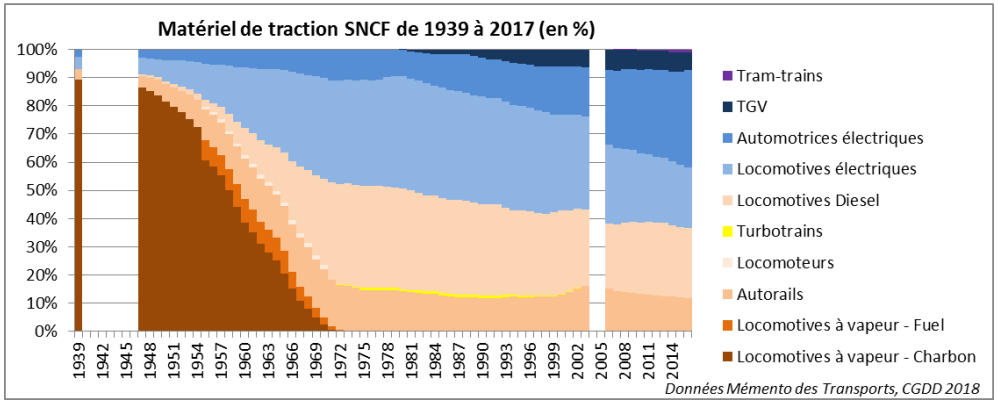
5) Une décarbonation très limitée par le passé

Intensité carbone de l'énergie







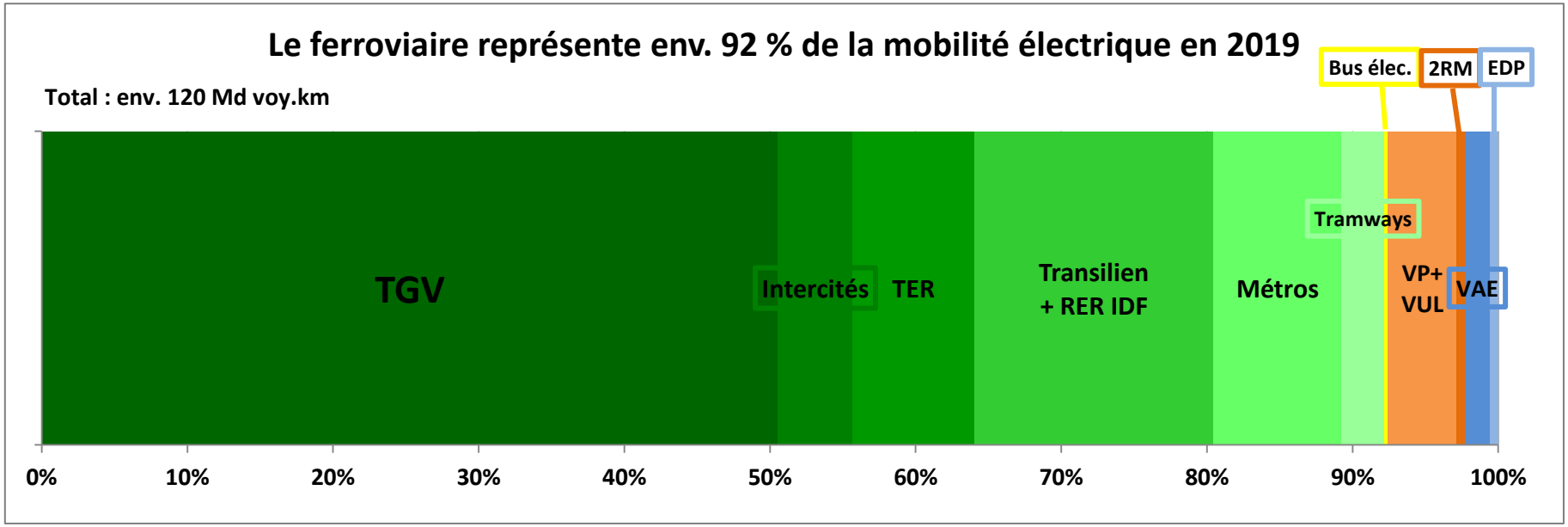


Evolution historique des consommations énergétiques et du matériel de traction SNCF

5) Une décarbonation très limitée par le passé

Intensité carbone de l'énergie

Commentaire *: La mobilité électrique, pour le moment, c'est surtout le ferroviaire, et encore très peu ce à qu'on l'on fait habituellement référence lorsque l'on parle de « mobilité électrique »*

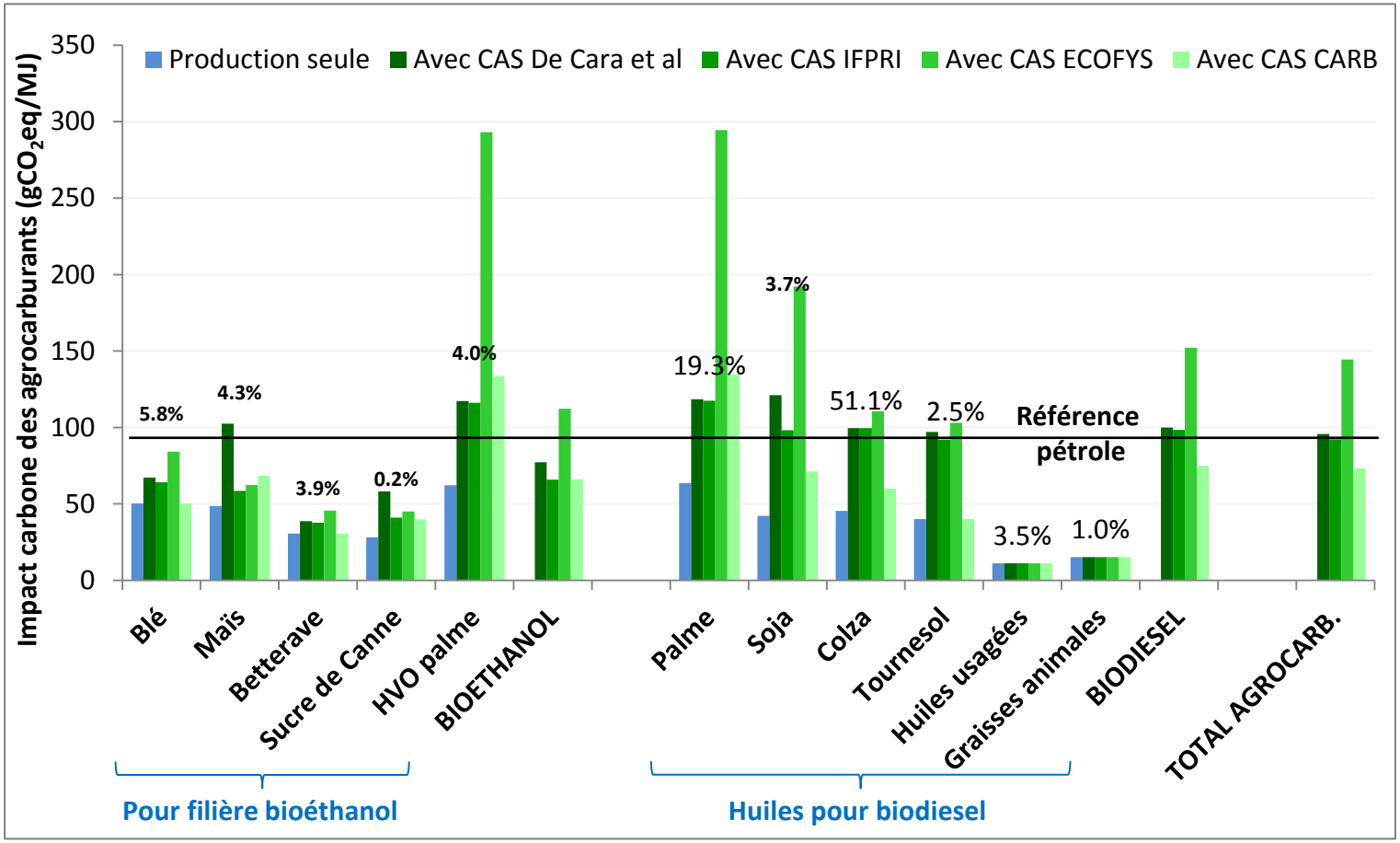


Estimation des kilomètres parcourus en France par les modes de transport électriques

5) Une décarbonation très limitée par le passé

Intensité carbone de l'énergie

***Commentaire** : les agrocarburants consommés en 2017 sont en moyenne aussi émetteurs que le pétrole*



Proportion des différentes matières premières (en % d'énergie) des agrocarburants consommés en France en 2017, et leur impact carbone, compris leur production + changement d'affectation des terres (CAS)

Interactions et effets rebonds entre les mesures

Interaction

- Positive
- Neutre
- Négative
- ? Incertain

		Demande T				Report modal					Tx rempli			Eff Ener					Carburant						
	Population	Densification	- Etalement	Télétravail	Conso locales	+ TC routier	+ Train	+ Vélo	- Avion	- Voiture	Covoiturage	Autopartage	TR du TRM	Progrès moteur	↓ poids veh	↓ vit axes rapides	↓ vitesse ville	Ecoconduite	Electrique	Agrocarburants	GNV	BioGNV	Hydrogène	Taxe carbone	Sobriété	Technologie
Demande de T		?	?	?							?	?							?							
Report modal						?	?					?							?							?
Taux de remplissage																			?							?
Efficacité énerg.													?				?		?							
Carburant																										
Emissions indirectes		?	?	?		?	?	?	?	?	?	?	?	?		?	?			?	?	?				

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

Commentaire *: par le passé, les politiques publiques ont surtout encouragé des mesures qui ont des effets rebonds potentiels sur la demande de transport. Elles ont donc (au moins indirectement) encouragé le principal moteur historique des émissions*

TC = transports en commun ; TRM = transport routier de marchandises ; GNV = gaz naturel véhicule

L'application aux scénarios de prospectives

Quels potentiels d'ici 2050 ?

Introduction / Résumé

Décomposition des scénarios de prospectives d'ici 2050

- Qq graphiques (en français) sont proposés dans les prochaines diapositives
- Le working paper est en préparation et sera prochainement (d'ici fin 2019 ?) ici

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 facteurs de la stratégie de développement de la mobilité propre : 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 énergétiques et l'intensité carbone représentent les plus gros potentiels de réduction des émissions pour tous les scénarios. (2) La comparaison avec les tendances passées montrent 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 pour réduire la demande finale en énergie, facteurs pour lesquels les scénarios montrent des ambitions contrastées, notamment sur la demande qui a été le principal facteur d'évolution des émissions par le passé. (4) Ainsi, l'action coordonnée sur les 5 facteurs apparaît essentielle, afin d'atteindre les très fortes baisses d'émissions visées par l'objectif de neutralité, mais aussi pour limiter les effets rebonds, et pour profiter de large bénéfices sur d'autres externalités des transports.

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	*AME*	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	*Tend.*	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	*NPS*	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		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%	

Scénarios étudiés dans le cadre de la comparaison

(scénarios *tendanciels en italique* et volontaristes pour les autres)

Décomposition et hypothèses pour la comparaison

CO_2 = Demande de transport × Report modal × Taux de remplissage × Efficacité énergétique des véhicules × Intensité carbone de l'énergie

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

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

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

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

E_i : consommation énergétique du mode i (Mtep)

$CO_{2,i}$: émissions de CO_2 du mode i ($MtCO_2$)

Véhicules utilitaires légers (VUL)

- Hypothèses très variées selon les scénarios
- 60 % des veh.km, consommations et émissions dans les voyageurs
- 40 % comptés en marchandises

Périmètre du trafic aérien

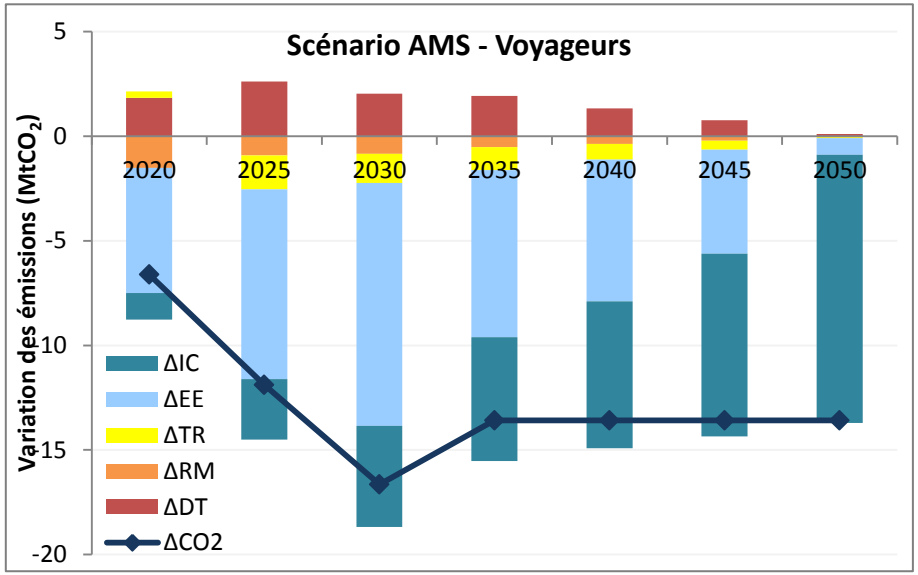
- Trafic métropolitain seul pris en compte
- Permet d'avoir un maximum de scénarios à périmètre constant

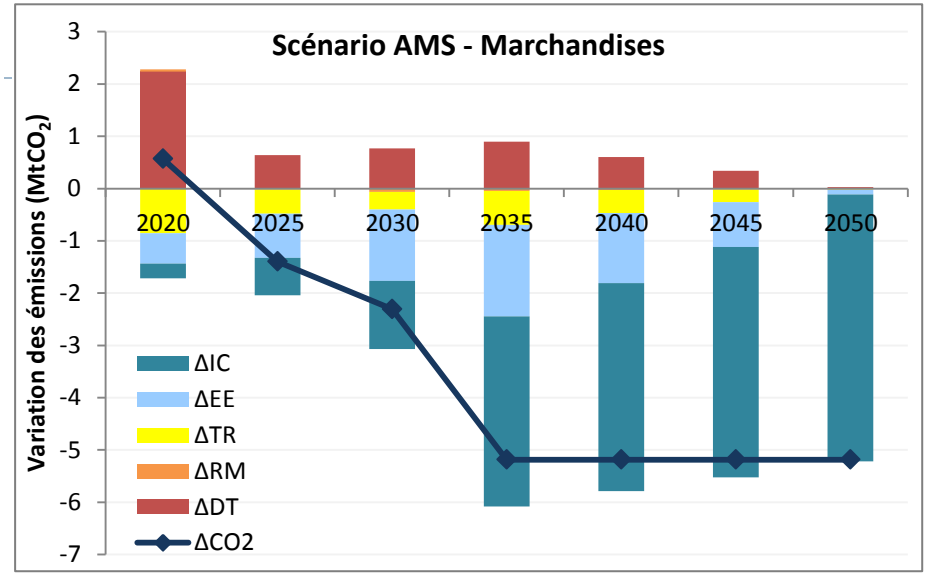
Modes actifs

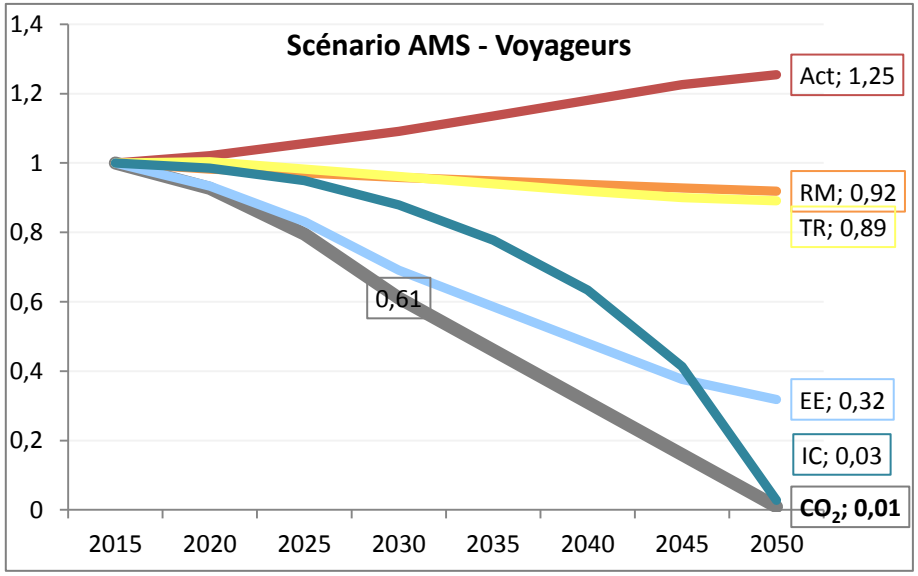
- Aucun, vélo seul, ou vélo&marche considérés selon les scénarios

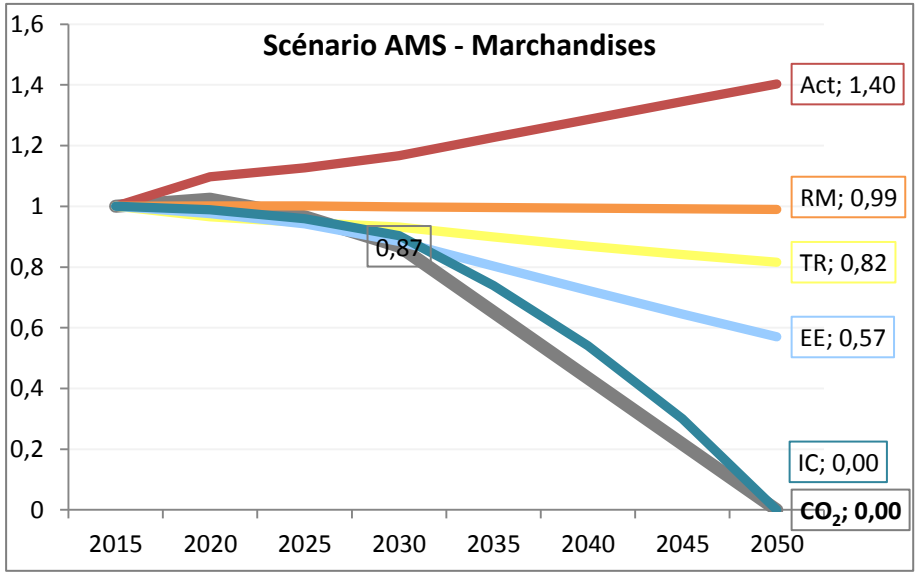
Scénario SNBC

CO_2 = Demande de transport × Report modal × Taux de remplissage × Efficacité énergétique des véhicules × Intensité carbone de l'énergie



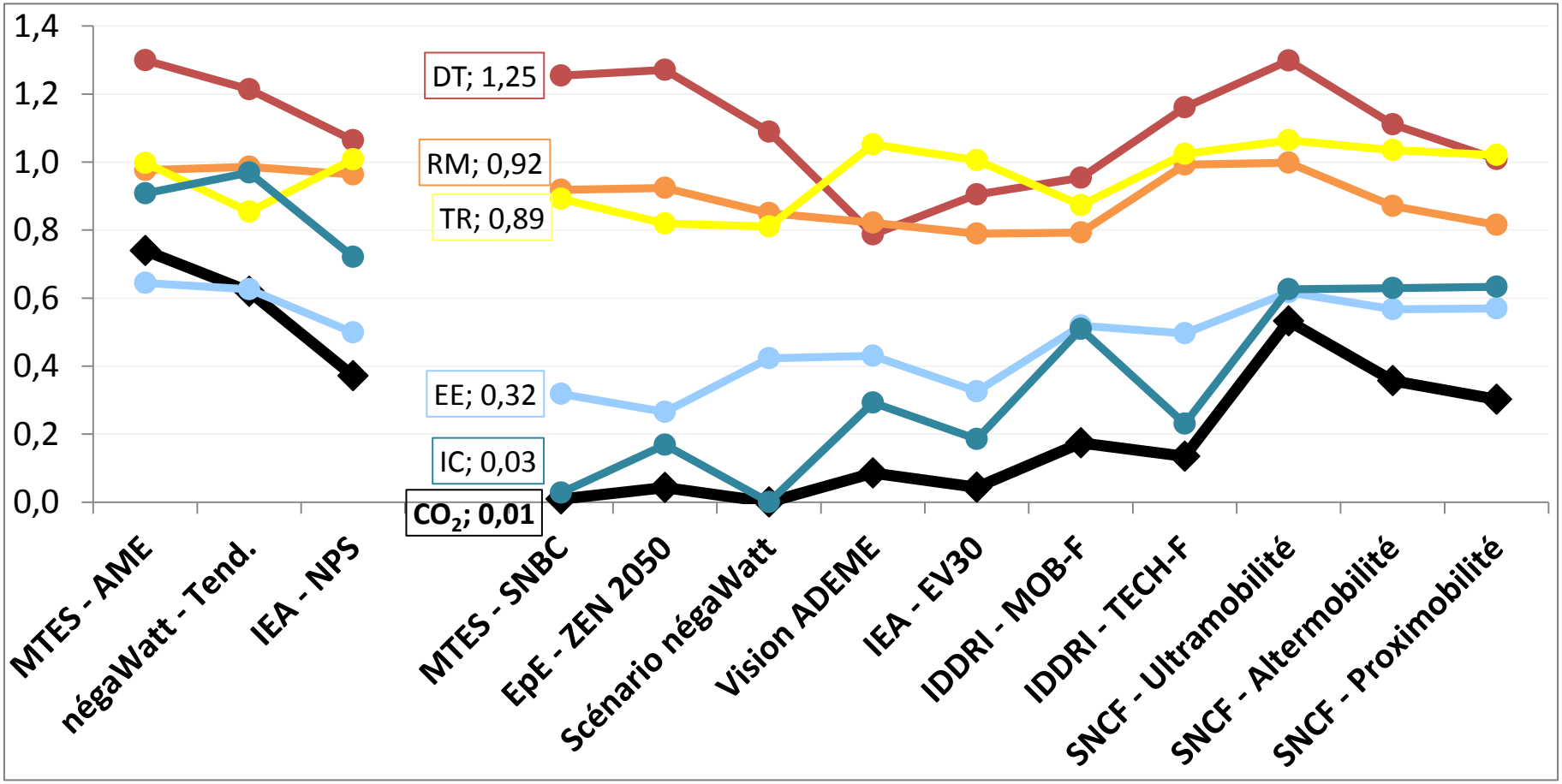






Scénarios Voyageurs

CO_2 = Demande de transport × Report modal × Taux de remplissage × Efficacité énergétique des véhicules × Intensité carbone de l'énergie

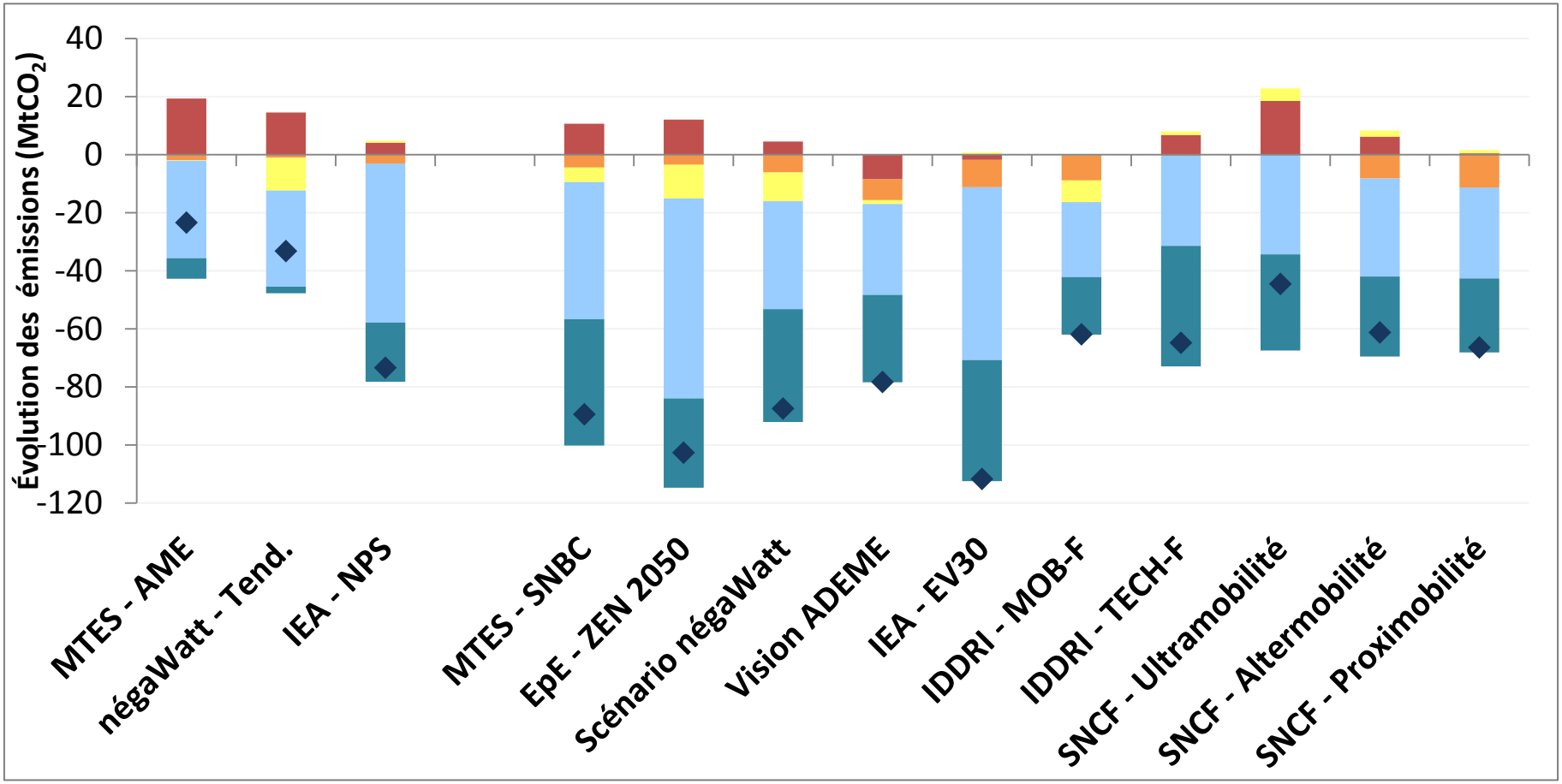


Décomposition des émissions de CO_2 des transports de voyageurs jusqu'à 2050
(forme multiplicative ; scénarios tendanciels à gauche, volontaristes à droite)

***Commentaire** : Le coefficient RM de 0,92 peut s'interpréter comme une baisse des émissions de 8% due au report modal ; elle va de 0 à -20% pour les autres scénarios*

Scénarios Voyageurs

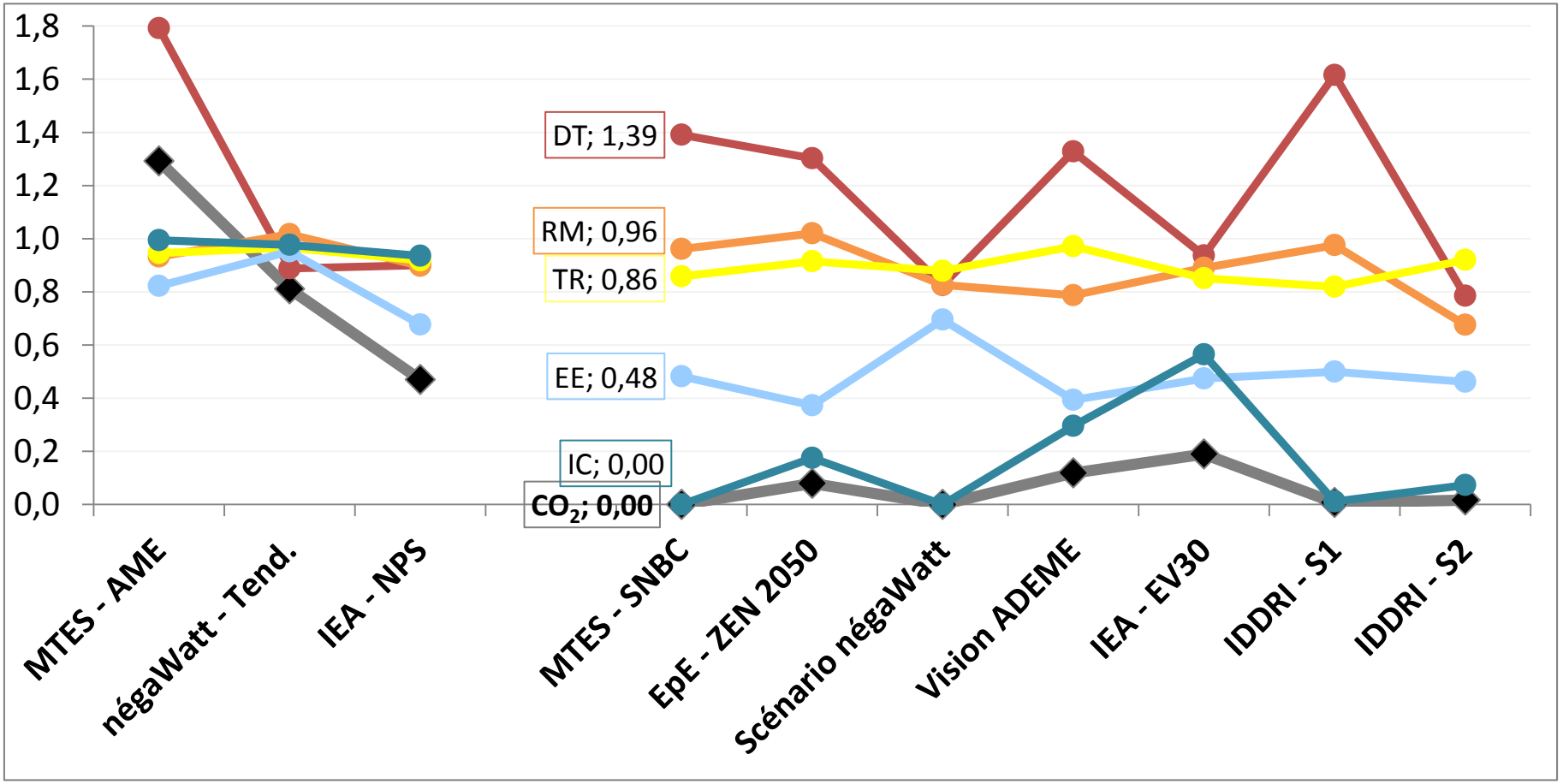
CO_2 = Demande de transport × Report modal × Taux de remplissage × Efficacité énergétique des véhicules × Intensité carbone de l'énergie



Décomposition des émissions de CO_2 des transports de voyageurs jusqu'à 2050
(forme additive ; scénarios tendanciels à gauche, volontaristes à droite)

Scénarios Marchandises

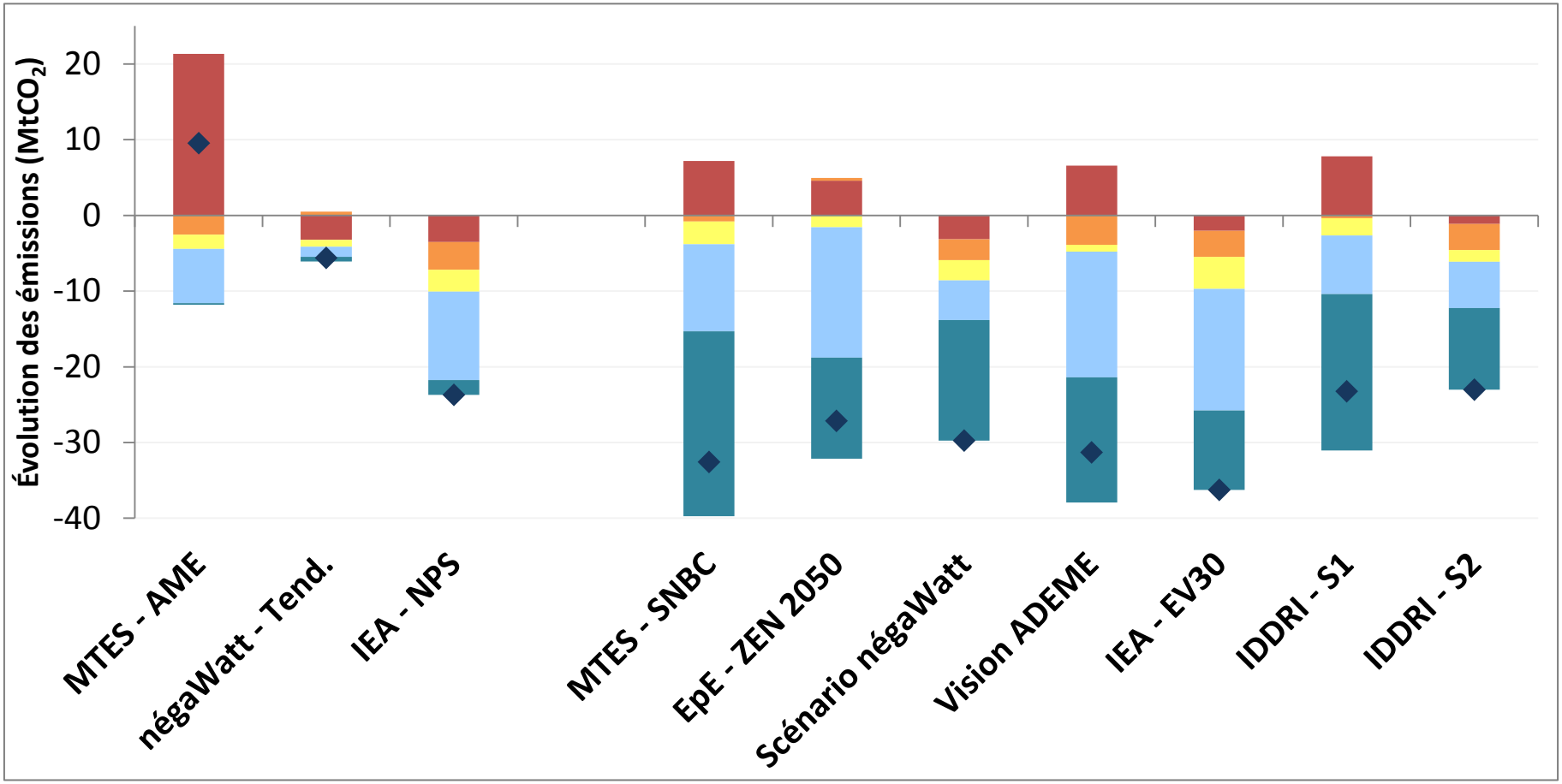
CO_2 = Demande de transport × Report modal × Taux de remplissage × Efficacité énergétique des véhicules × Intensité carbone de l'énergie



Décomposition des émissions de CO_2 des transports de marchandises jusqu'à 2050
(forme multiplicative ; scénarios tendanciels à gauche, volontaristes à droite)

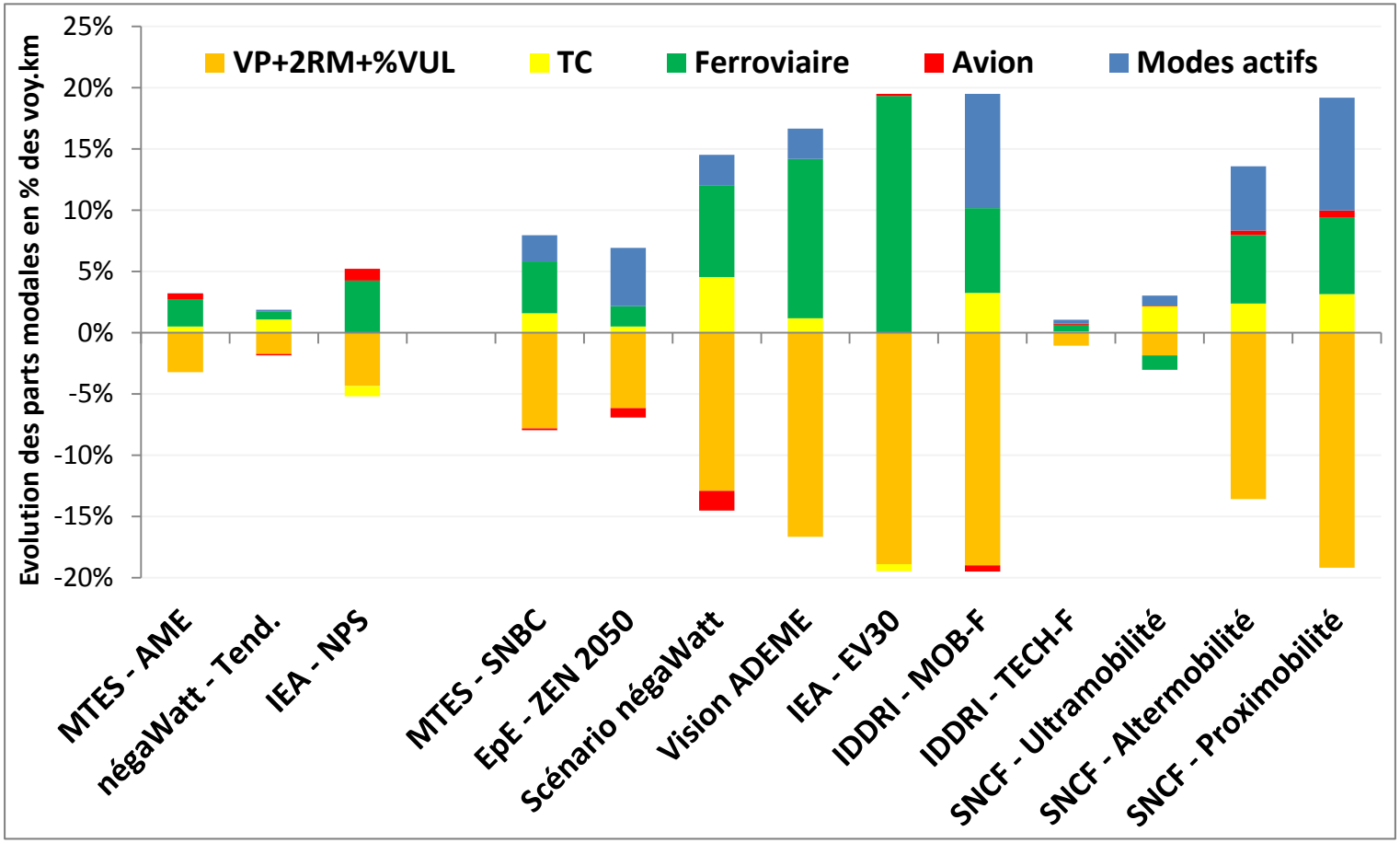
Scénarios Marchandises

CO_2 = Demande de transport × Report modal × Taux de remplissage × Efficacité énergétique des véhicules × Intensité carbone de l'énergie



Décomposition des émissions de CO_2 des transports de marchandises jusqu'à 2050
(forme additive ; scénarios tendanciels à gauche, volontaristes à droite)

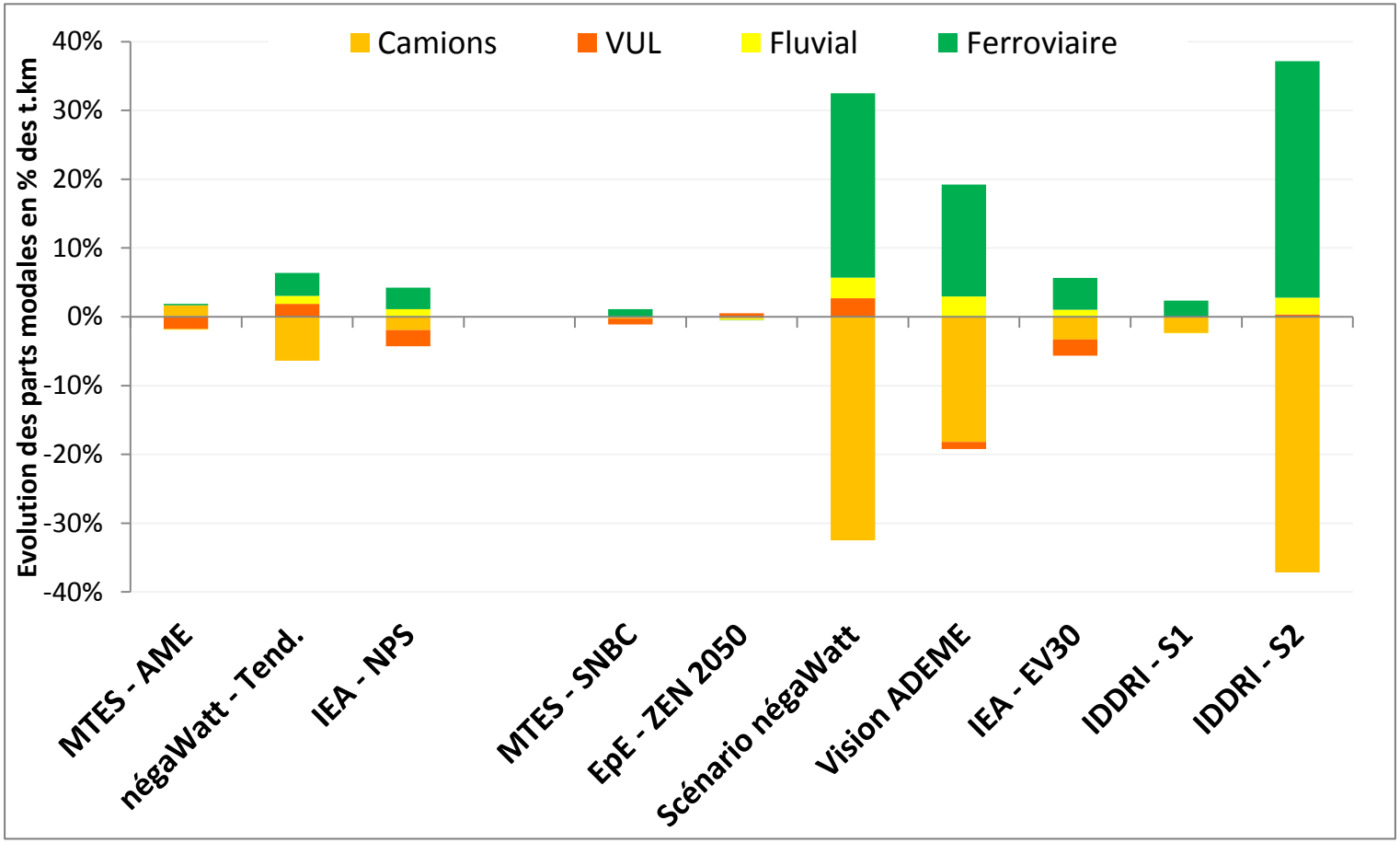
Report modal - Voyageurs



Evolution des parts modales des modes voyageurs d'ici 2050 (au-dessus de 0, les modes qui gagnent des parts modales, en-dessous ceux qui en perdent ; scénarios tendanciels à gauche, volontaristes à droite)

60% de VUL dans les transports routiers individuels
2RM = 2-roues motorisés ; TC = transports en commun

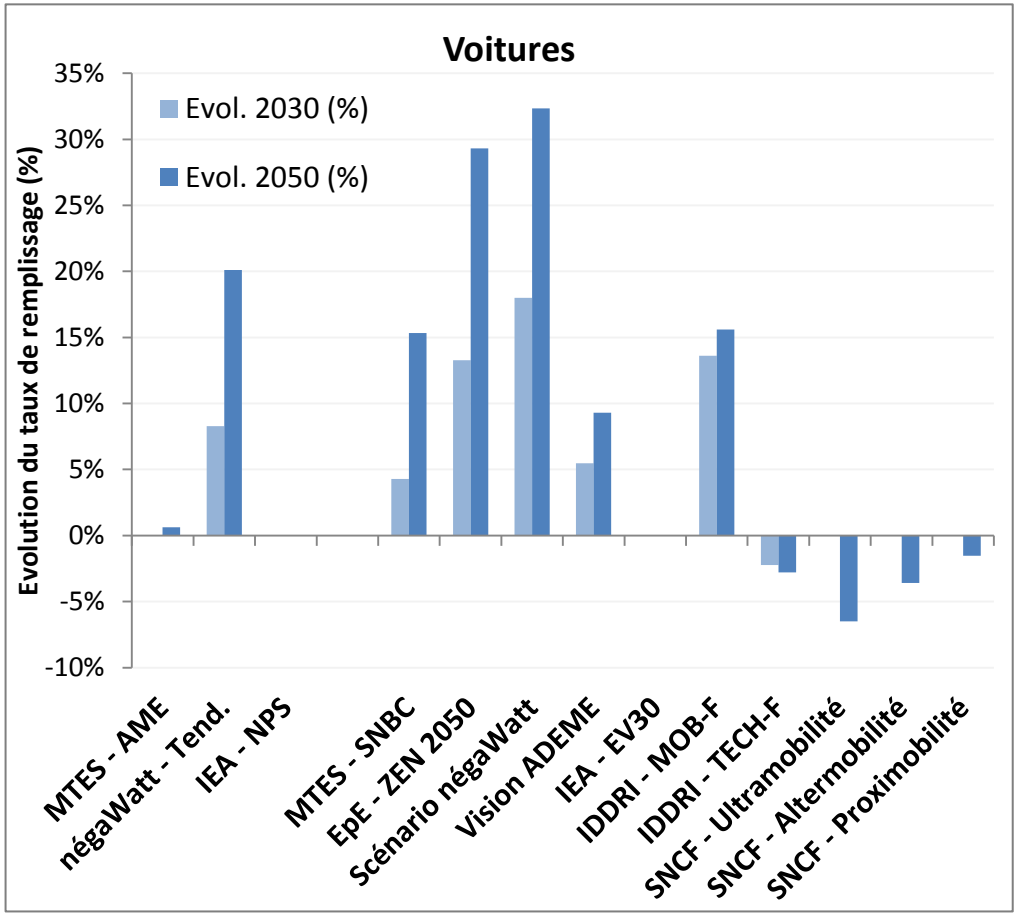
Report modal - Marchandises

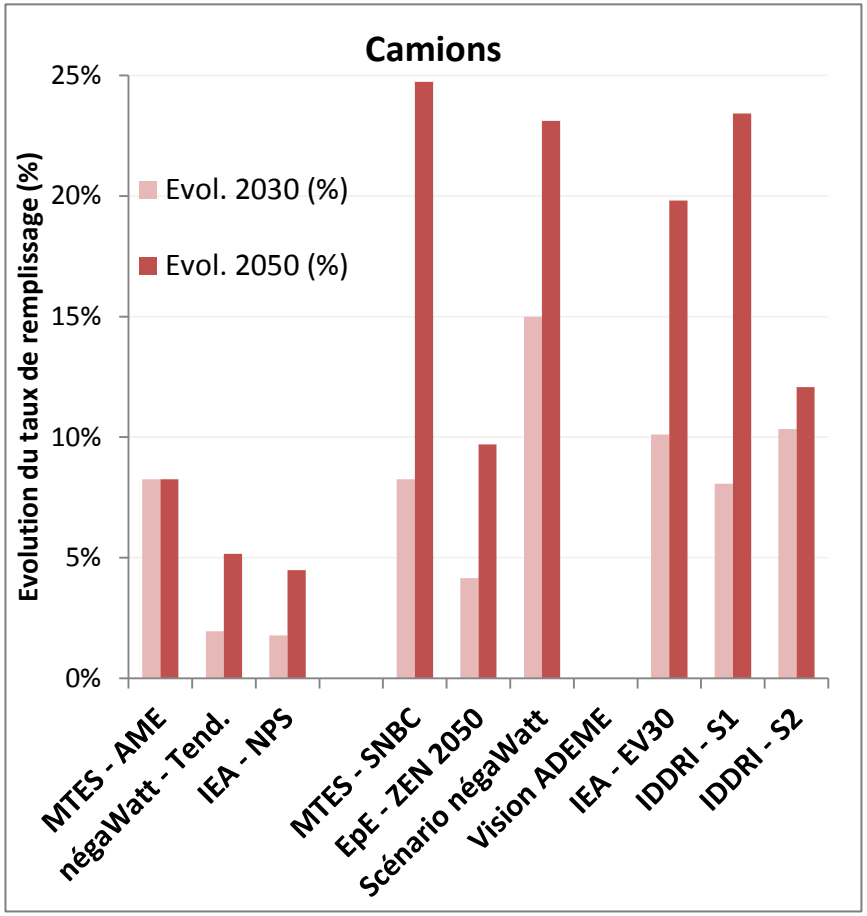


Evolution des parts modales des modes marchandises d'ici 2050
(scénarios tendanciels à gauche, volontaristes à droite)

VUL = véhicules utilitaires légers

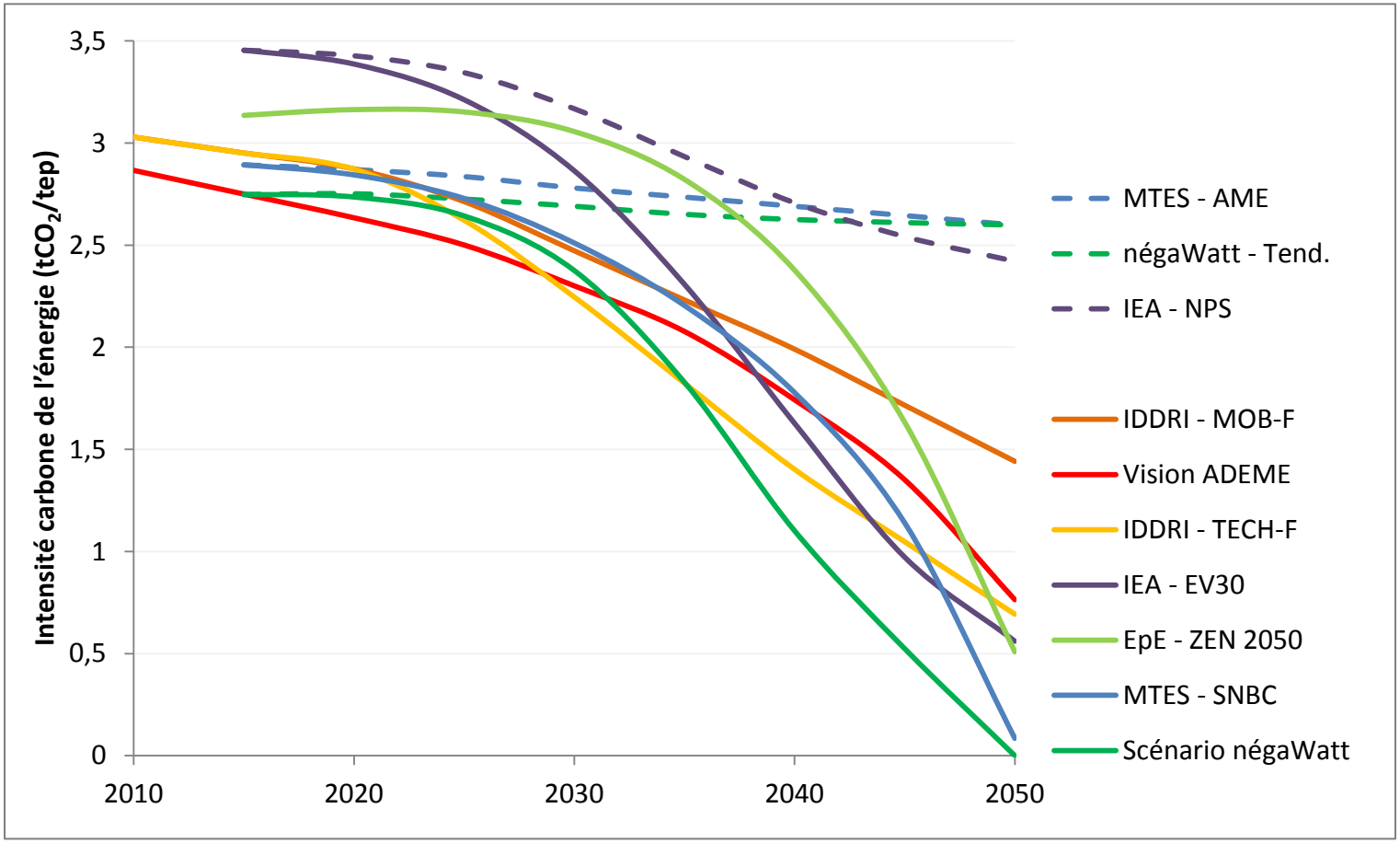
Taux de remplissage – Voitures et camions





Evolution des parts modales des modes marchandises d'ici 2050
(scénarios tendanciels à gauche, volontaristes à droite)

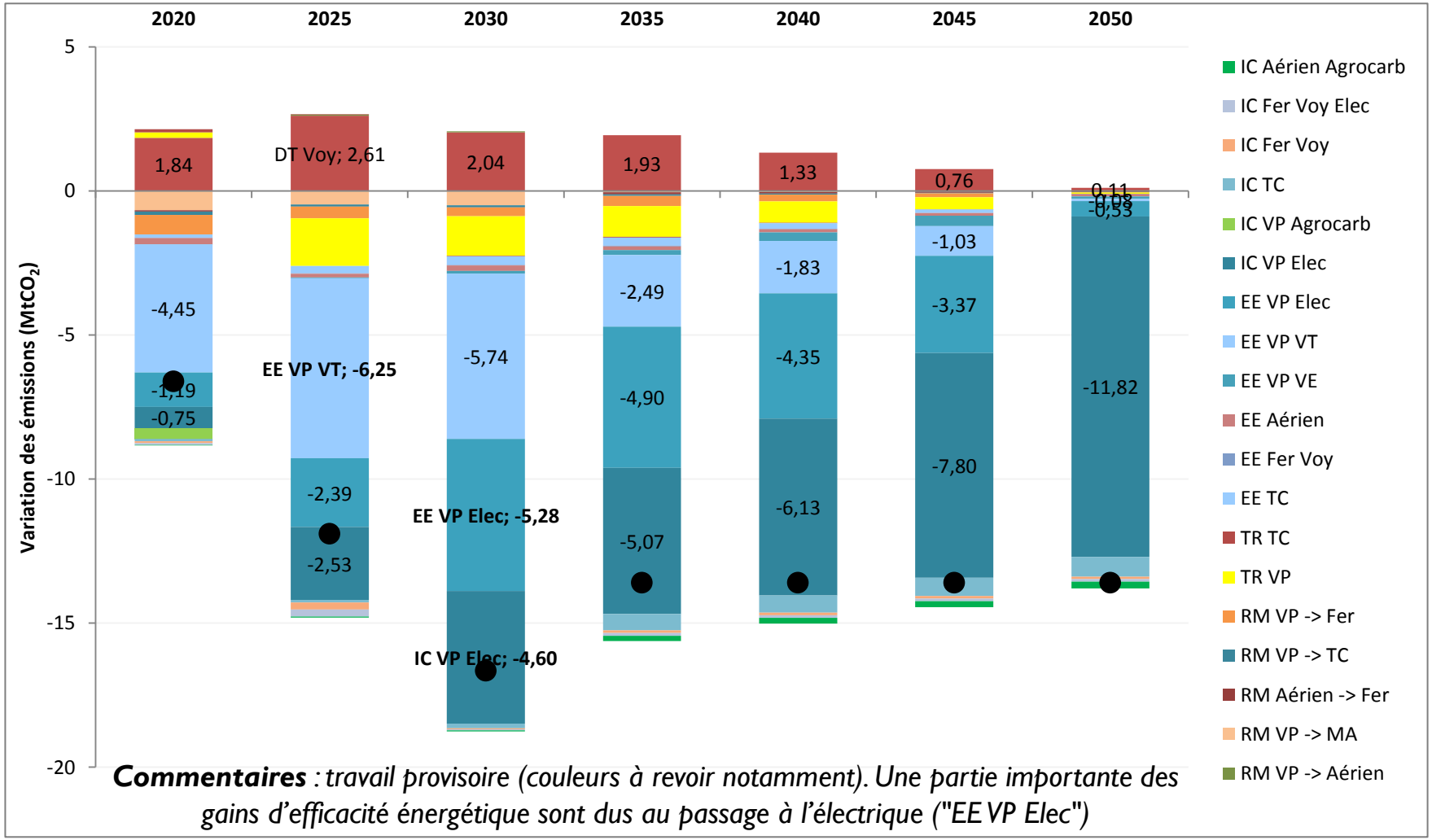
Intensité carbone de l'énergie



Evolution de l'intensité carbone de l'énergie d'ici 2050
(scénarios tendanciels en pointillés, volontaristes en traits pleins)

 ***Commentaire** : les effets de l'intensité carbone sont significatifs surtout à partir de 2030*

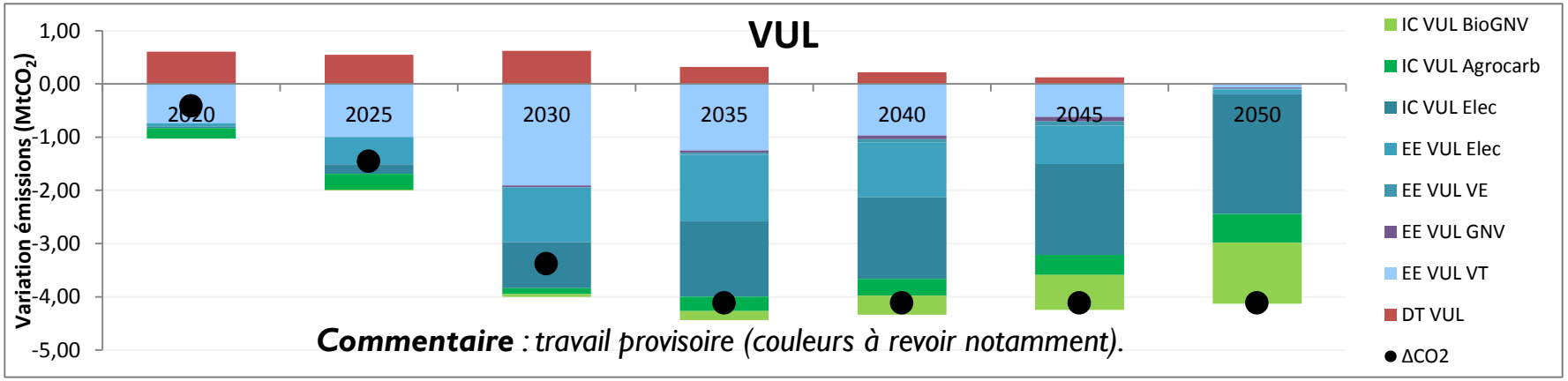
Détails sur la SNBC - Voyageurs

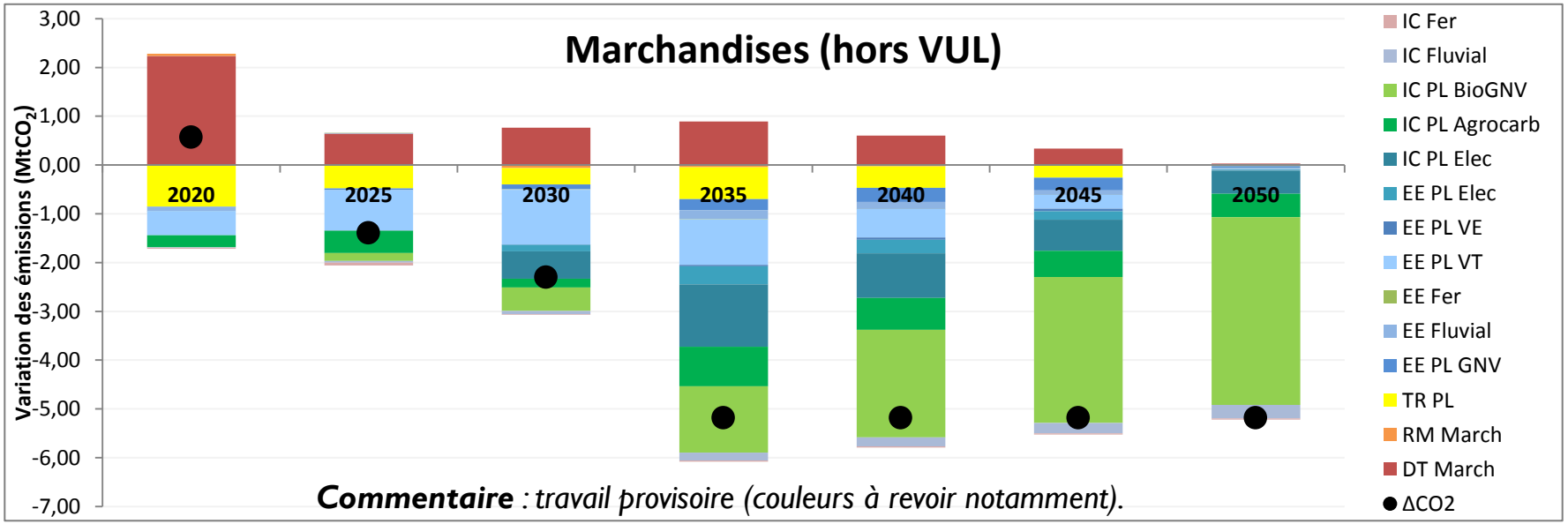


***Commentaires** : travail provisoire (couleurs à revoir notamment). Une partie importante des gains d'efficacité énergétique sont dus au passage à l'électrique ("EE VP Elec")*

Décomposition détaillée des émissions voyageurs dans la stratégie nationale bas-carbone (SNBC)

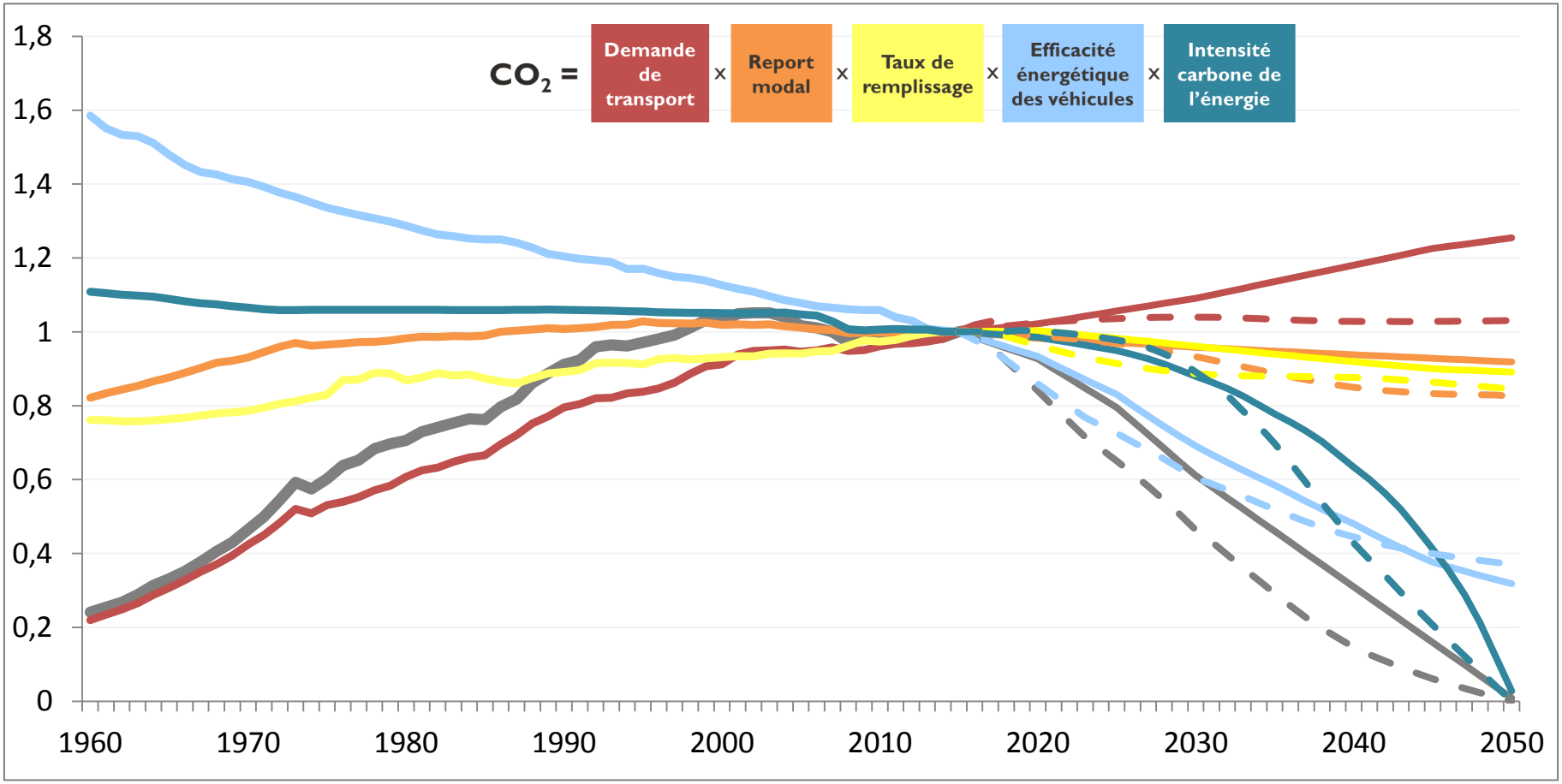
Détails sur la SNBC - VUL et Marchandises





Décomposition détaillée des émissions VUL (en haut) et marchandises (en bas, hors VUL) dans la SNBC

Voyageurs 1960-2050 : SNBC & négaWatt



Décomposition des émissions des transports de voyageurs de 1960 à 2050
(après 2015, scénario SNBC lignes continues, et négaWatt en pointillés)

Enseignements

Par période

Pour les politiques publiques

Enseignements des décompositions – par période

Tendances passées depuis 1960

- Augmentation de la demande de transport en principal facteur
- Les autres facteurs se sont compensés
- Très faible impact des politiques publiques sur les émissions

A court terme (budgets carbone)

- La demande restera le facteur majeur : importante du contexte économique, fiscalité carbone, aménagement et localisations
- Potentiels sur l'efficacité énergétique : réduction des vitesses, bonus-malus, taxation au poids / puissance…

Scénarios de prospectives

- Décarbonation (intensité carbone) importante de l'énergie pour tous les scénarios, associée à l'efficacité énergétique
- Divergence entre scénarios sur la contribution de la modération de la demande, le report modal et le taux de remplissage des véhicules

Enseignements des décompositions – SNBC

La stratégie nationale bas-carbone

- Repose très largement sur l'efficacité énergétique et l'intensité carbone
- Peu d'ambition sur les facteurs de demande et report modal

Pourtant, importance d'agir sur les 5 facteurs, car

- Risque d'effets rebonds liés à la technologie
- Impact carbone plus important de certaines technologies sur le reste du cycle de vie (hors émissions directes)
- Moindres coûts et nombreux co-bénéfices des mesures de sobriété sur les autres externalités
- Haut niveau d'incertitude pour un objectif très ambitieux
- Importance de la demande pour les tendances de court terme

Enseignements des décompositions – par facteur

Demande de transport

- ← Principal facteur sur les émissions passées, inflexion dans les années 2000
- → Jouera toujours un rôle majeur à court terme (ajustements rapides)
- → Rôle à long terme différent entre les scénarios de Sobriété (jusqu'à -20 %/personne) et les scénarios Technologiques

Report modal

- ← Principalement report vers les modes les plus carbonés depuis 1960, à l'exception des passagers depuis la fin des années 1990
- → Potentiel de réduction d'émissions important dans certains scénarios (jusqu'à -20%), aucun changement pour d'autres

Taux de remplissage

- ← En baisse pour les voitures et en hausse pour les poids-lourds, trains, avions, bateaux
- → Potentiel à court terme (-10%), en particulier par le covoiturage et la logistique

Efficacité énergétique

- ← Les progrès des moteurs ont contribué régulièrement à limiter les émissions
- → Pour les voitures, potentiels désormais surtout via la réduction du poids, de la puissance, des vitesses, l'hybridation et les véhicules électriques

Intensité carbone de l'énergie

- ← Impact marginal par le passé, excepté le développement des agrocarburants 2005-2010
- → Fortes attentes de décarbonation du mix énergétique à l'avenir, surtout après 2030

Enseignements – mesures prioritaires

Demande de transport

- Connecter les politiques de transport à celles d'**aménagement** du territoire
- Incitations aux **relocalisations** (habitat, activités, industries) et ↓ des distances

Report modal

- Incitations **fiscales** au report modal : fiscalité sur aérien, PL péages / TICPE…
- Développer massivement un système **vélo** efficace

Taux de remplissage

- Soutenir le covoiturage en priorité pour les zones **peu denses**

Efficacité énergétique

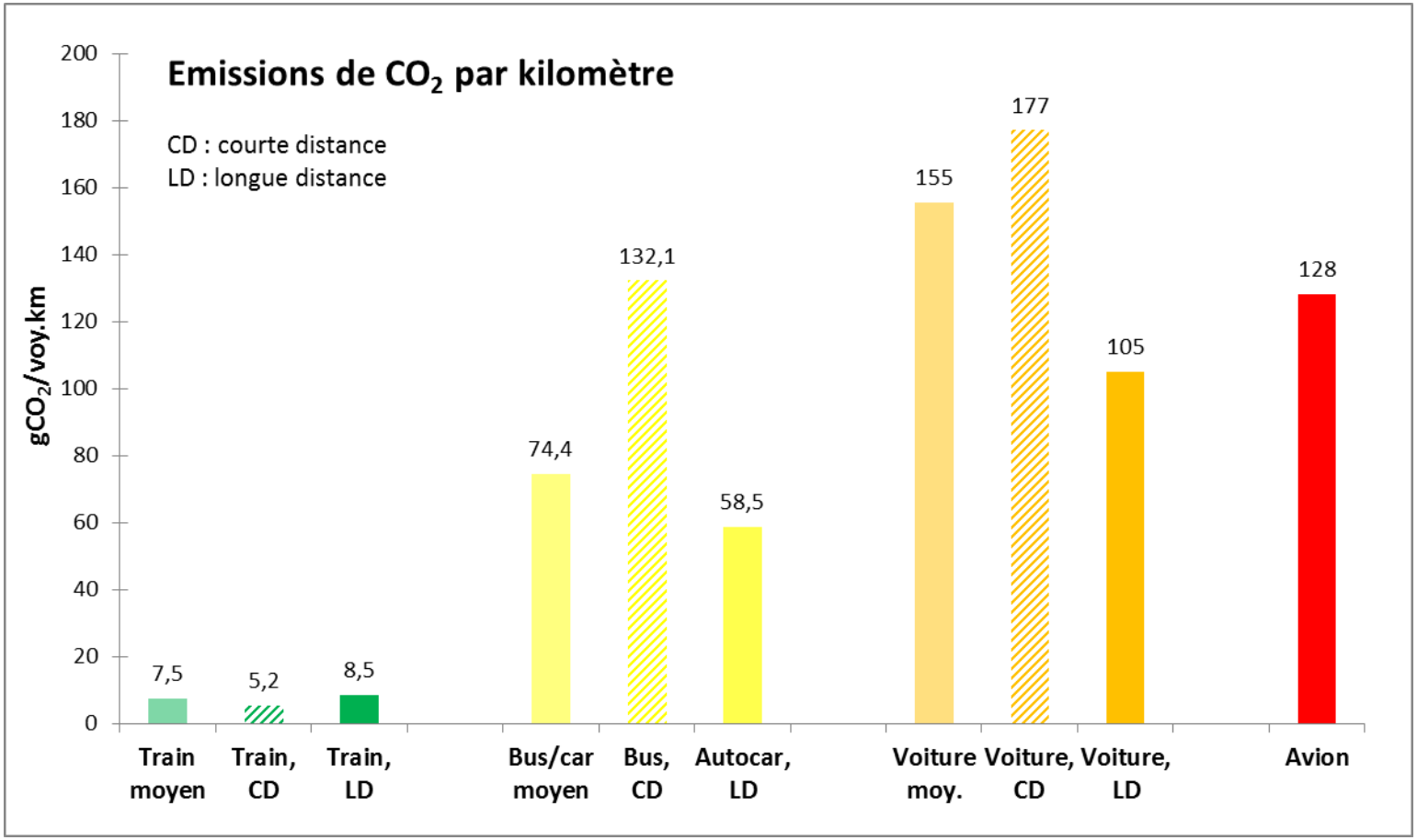
- Incitations fiscales / normes fortes sur bonus-malus, **poids**, puissance, vitesse max
- Potentiel important sur la baisse des **vitesses** sur routes rapides

Intensité carbone de l'énergie

- Soutenir plus fortement le développement du **bioGNV**
- Orienter les aides pour la voiture électrique vers les véhicules **légers**

Autres diapositives

Le report modal : émissions par mode

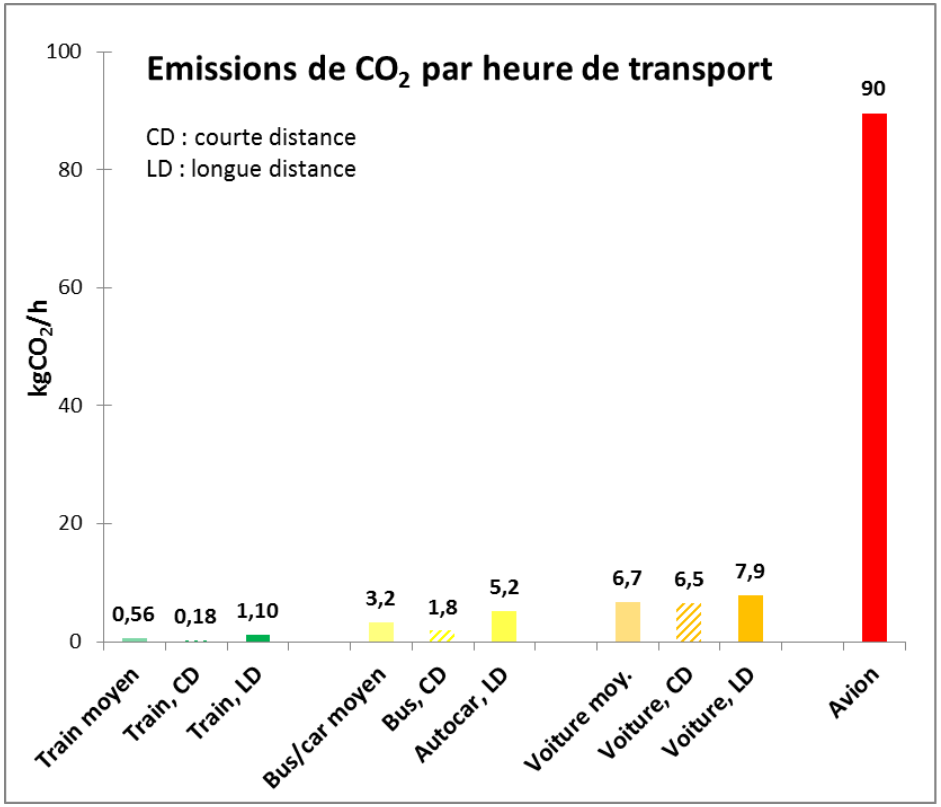


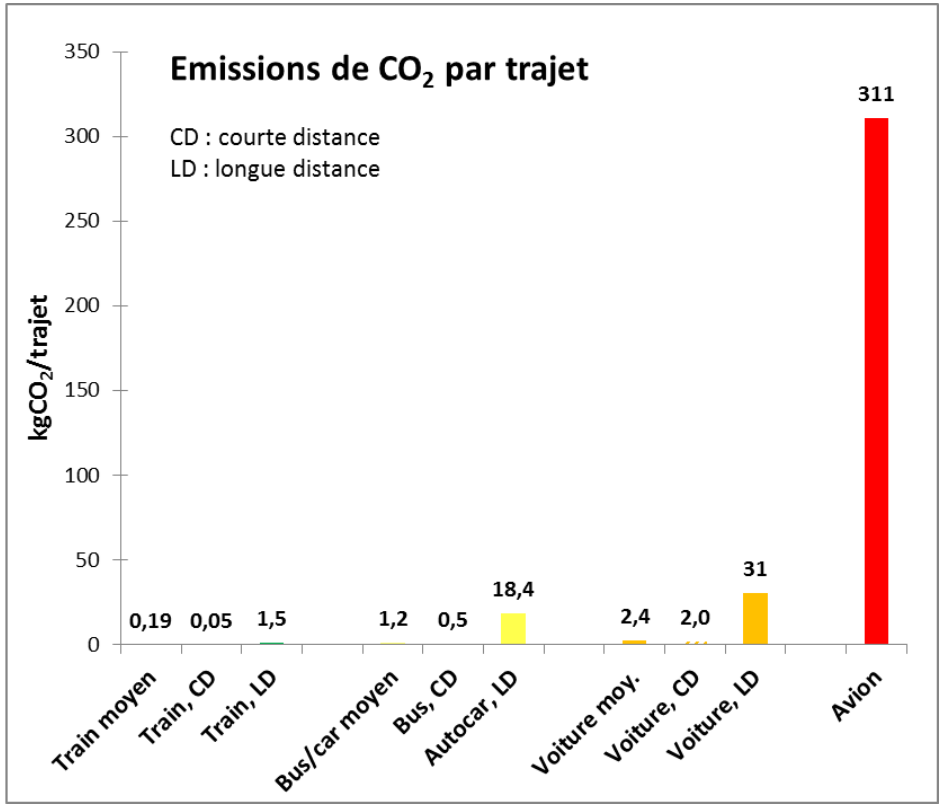
Emissions des modes de transport, par kilomètre, par heure et par trajet
(calcul d'après données ADEME, ENTD, CGDD, Arafer, Omnil)

Source : Article The Conversation, mai 2019. Impact du transport aérien sur le climat : pourquoi il faut refaire les calculs. Voir Annexe méthodologique des calculs

Le report modal : émissions par mode

***Commentaire** : les fortes émissions de l'aérien sont davantage mises en évidences en calculant les émissions par heure ou par trajet (cf article en lien ci-dessous pour plus de détails)*





Emissions des modes de transport, par kilomètre, par heure et par trajet
(calcul d'après données ADEME, ENTD, CGDD, Arafer, Omnil)

Source : Article The Conversation, mai 2019. Impact du transport aérien sur le climat : pourquoi il faut refaire les calculs. Voir Annexe méthodologique des calculs

Encourager les véhicules légers

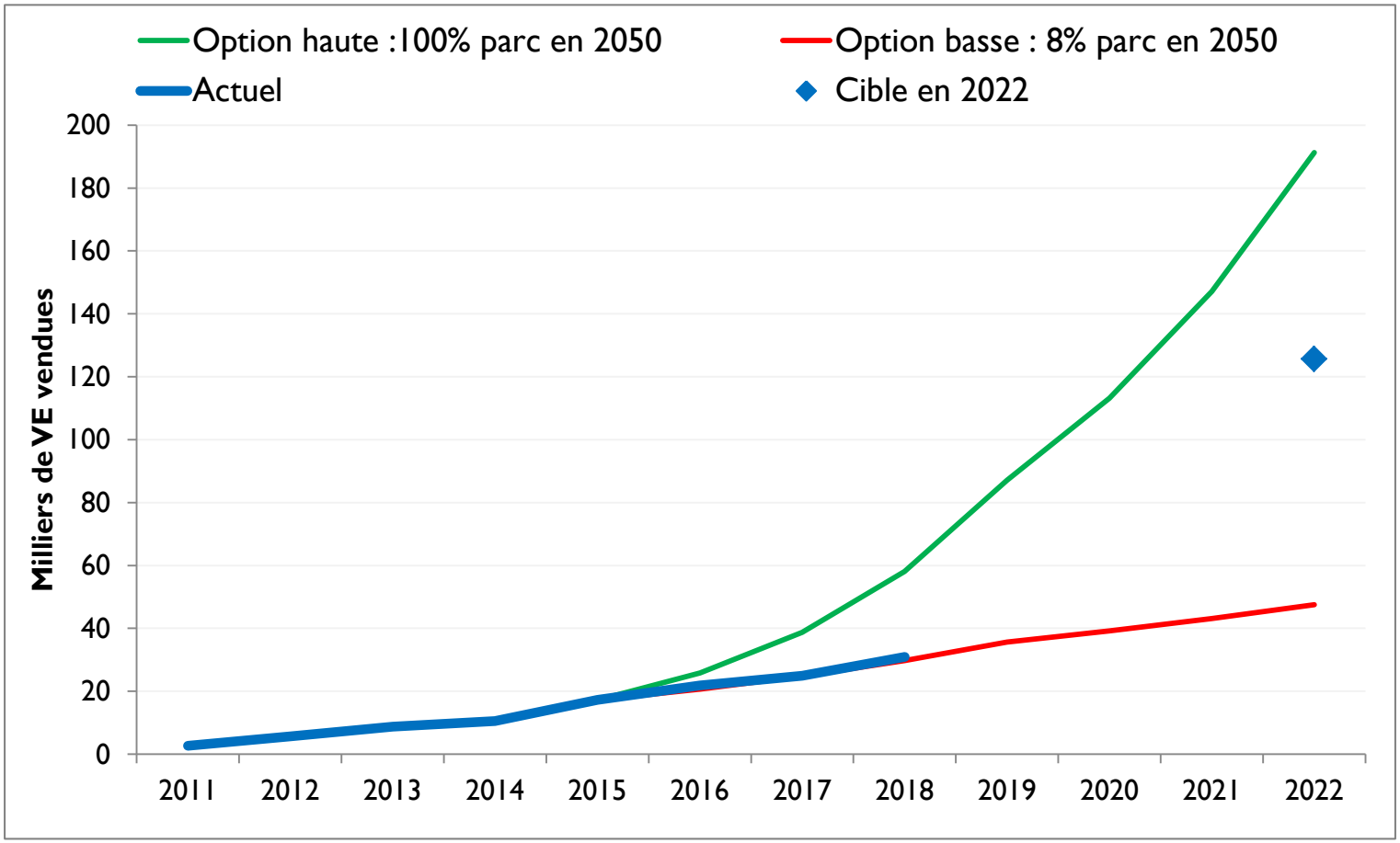
Type de véhicule	Vélo	VAE	Twizy 80	Renault Zoé	Voiture neuve moyenne en 2016
Prix	339 € prix moyen	1 564 € prix moyen	11 439 € avec batterie, portes	32 600 € avec batterie	25 828 €
Aide à l'achat	0 € 0 %	200 € / 13 % ménages non imposables	900 € 8 %	6 000 € 18 %	Malus selon les modèles
Poids à vide (kg)	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 €

Comparaison de différents véhicules, en termes d'efficacité énergétique, de coûts et d'aides publiques

Commentaire *: les aides fiscales ne sont pas orientées vers les véhicules les plus efficaces et les moins carbonés actuellement.*

Source : Article publié dans The Conversation, janvier 2019. Dépendance à la voiture en zone rurale, quelles solutions ?. Novembre 2019. Voir calculs dans Annexe méthodologique

Voiture électrique : une croissance suffisante ?



Rythme de développement des ventes de voitures électriques et objectifs

Commentaires *: jusqu'à 2018, les ventes de VE suivent l'option basse des scénarios de France Stratégie, qui mène à seulement 8 % du parc électrique en 2050 ; l'atteinte de l'objectif de multiplication des ventes par 5 sur le quinquennat demande une forte accélération*

Sources : France Stratégie 2016 ; CGDD et Automobile Propre

La voiture électrique est-elle écologique ?

Lecture :

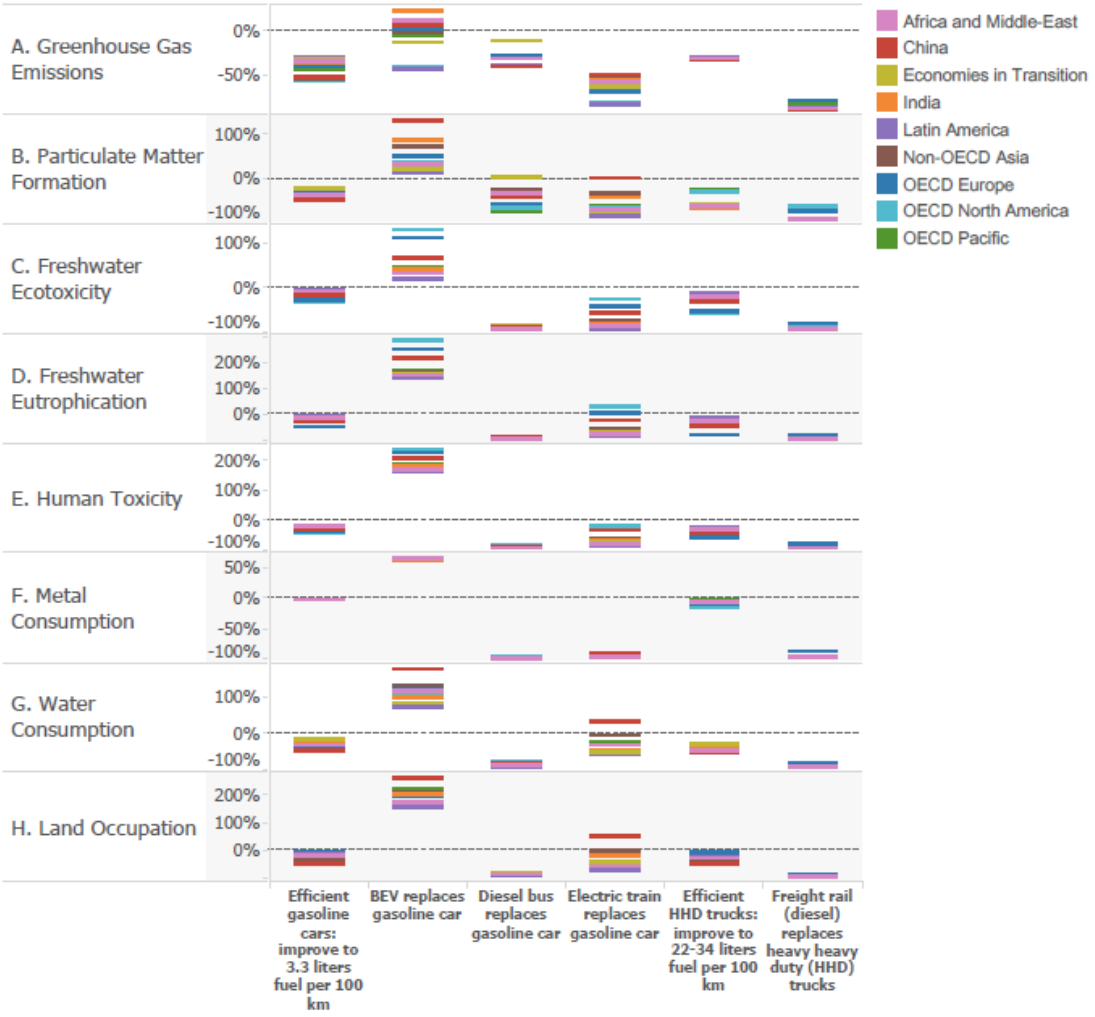
La colonne 2 indique les impacts positifs (barres colorées sous le 0 %) ou négatifs (> 0%) pour l'environnement du passage d'une voiture essence à une voiture électrique, en analyse de cycle de vie

Résultat :

Sur 7 des 8 impacts environnementaux évalués, les impacts de la voiture électrique sont plus importants. Pour les gaz à effet de serre, cela dépend des régions du monde, la France étant dans le cas favorable avec une électricité faiblement carbonée (voir slide précédente)

Commentaires :

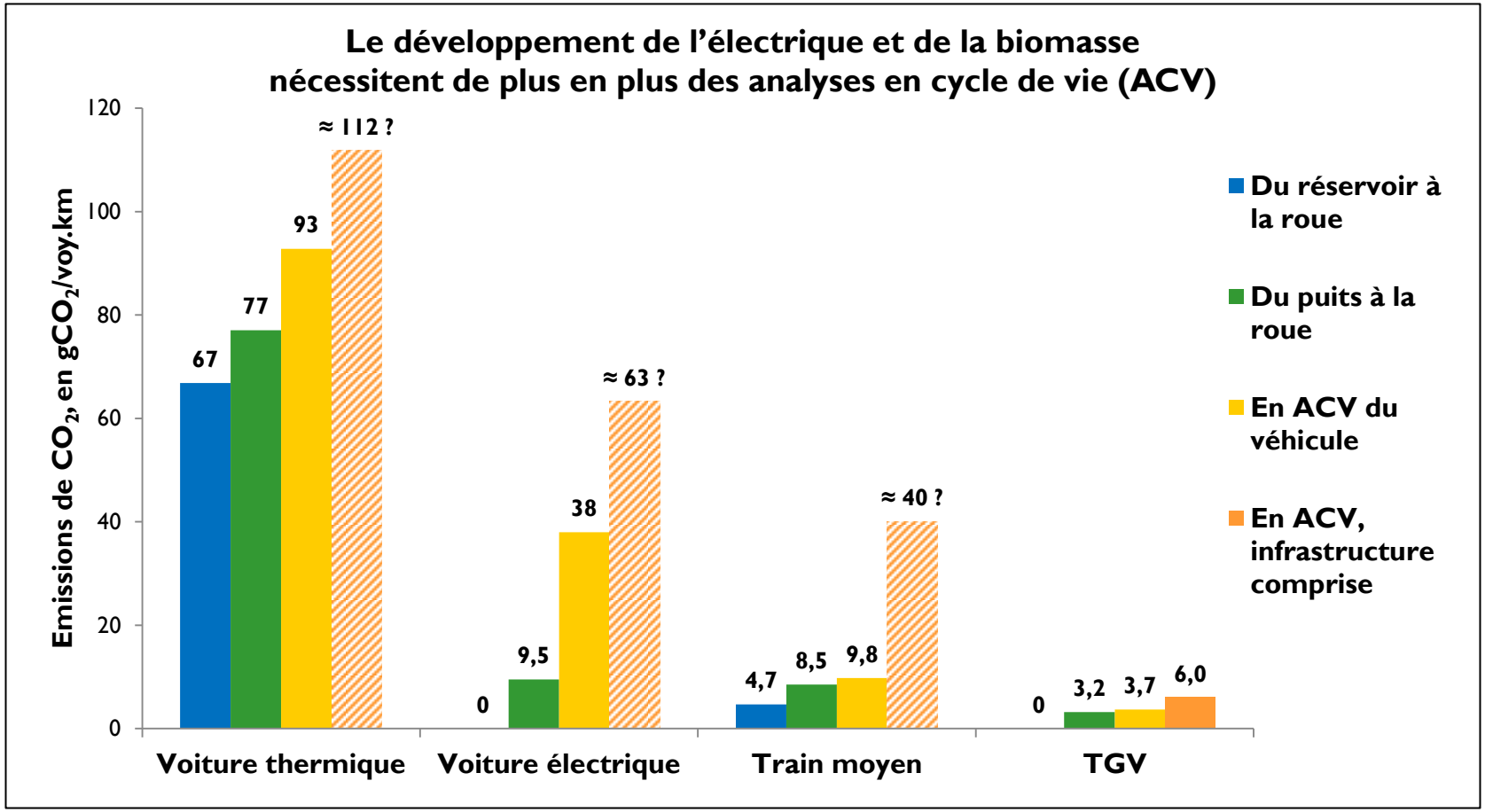
La voiture électrique n'est donc pas "écologique". Il faut donc simultanément limiter l'utilisation globale de la voiture, et favoriser les véhicules électriques les plus légers et avec une capacité de batterie limitée, afin de maximiser leur intérêt climatique et environnemental



Changement des impacts environnementaux des modes alternatifs aux voitures et poids-lourds thermiques

Sources : UNEP 2017, p46

Voiture électrique : le besoin d'ACV



Emissions de CO_2 en voiture et en train selon le périmètre du bilan carbone.

L'analyse infrastructure comprise correspond essentiellement à des émissions passées et résulte d'approximations

Commentaire *: en ACV du véhicule, la voiture électrique est aujourd'hui 2 à 3 fois moins émettrice qu'une voiture thermique*

Sources : calculs d'après données ADEME, BCO2, SNCF, RFF

Références et bibliographie

Références des scénarios de prospectives

- **4D**. 2008. Le défi du facteur 4 dans les transports. Des scénarios qui interrogent.
- **ADEME**, 2017. Actualisation du scénario énergie-climat ADEME 2035-2050. Disponible sur : http://presse.ademe.fr/2017/10/lademe-actualise-son-scenario-energie-climat.html
- **ANCRE**, 2013. Scénarios énergétiques de l'ANCRE. Disponible sur : http://www.allianceenergie.fr/presentation-des-scenarios-energetiques-de-l-ancre.aspx
- **ANCRE**. 2014. Scénarios pour la transition énergétique. Rapport 2013. Disponible sur : http://www.allianceenergie.fr/page000100dc.asp?card=985
- **CGDD**, 2016. *Projections de la demande de transport sur le long terme*. Disponible sur : http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/document.html?id=Temis-0085036
- **CGPC**. 2006. *Démarche prospective transports 2050. Eléments de réflexion*.
- **CIRED et RAC**. 2012. *Un scénario bas carbone "acceptable" pour la France: Elaboration participative et analyse macroéconomique*. Bibas, R., Mathy, S., Fink, M. Disponible sur : <halshs-00797980>
- **DGEC**. 2015. *Scénarios prospectifs Energie-Climat-Air pour la France à l'horizon 2035*. Disponible sur : http://www.developpement-durable.gouv.fr/scenarios-a-l-horizon-2020-2030.html
- **EpE**, 2019. ZEN 2050 – Imaginer et construire une France neutre en carbone. Disponible sur : http://www.epe-asso.org/zen-2050-imaginer-et-construire-une-france-neutre-en-carbone-mai-2019/
- **GrDF**. 2013. *Scénario facteur 4 GrDF*. Synthèse et description des hypothèses.
- **Greenpeace**. 2013. *Scénario Transition Energétique*. Disponible sur : http://www.greenpeace.fr/energie/enjeux/ajax/scenario/scenario-transition.html
- **IDDRI:** 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. ⟨hal-01688931⟩
- **IEA**, 2019. *Global EV Outlook 2019. Scaling up the transition to electric mobility.* Available at: https://www.iea.org/gevo2019/
- **LET & Enerdata**. 2008. *Phase 2 du programme de recherche consacré à la construction de scénarios de mobilité durable. Comment satisfaire les objectifs internationaux de la France en terme d'émissions de gaz à effet de serre et de pollution trans-frontières*. PREDIT 3, GO n° 11 Politique des transports. Disponible sur : http://www.predit.prd.fr/predit3/synthesePublication.fo?inCde=35204
- **Lopez-Ruiz**, H. G. & **Crozet**, Y. 2011. *La voie étroite du facteur 4 dans le secteur des transports : quelles politiques publiques, pour quelles mobilités?*
- **MTES**, 2019. *Projet de Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC)*. Disponible sur : https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc
- **négaWatt**, 2017. *Scénario négaWatt 2017-2050. Dossier de synthèse*. Available at: https://negawatt.org/Scenario-negaWatt-2017-2050
- **Sauvons le climat**. 2014. *Diviser par quatre les rejets de CO2 dus à l'énergie. Le scénario Négatep*. Disponible sur : http://www.sauvonsleclimat.org/best-of-slchtml/diviser-par-quatre-les-rejets-de-co2-dus-a-lenergie-le-scenario-negatep/35-fparticles/465-diviser-par-quatre-les-rejets-de-co2-dus-a-lenergie-le-scenario-negatep.html
- **SNCF**, 2015a. *Vers une mobilité sobre en CO2 : Une opportunité pour vivre mieux ? Regards croisés pour éclairer les choix de société en matière de mobilité des voyageurs*. Disponible sur : http://www.sncf.com/ressources/facteur_4.pdf
- **SNCF**, 2015b. *Etude prospective 2050, mobilité longue distance. Prospective 2030 & 2050*. Voyages SNCF – FSJ / DGPP – Document confidentiel.

Sources des données Kaya passé

- **CGDD**, 2012. *Les Véhicules utilitaires légers au 01-01-2011*. Disponible sur : 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*. Disponible sur : https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-vehicules-utilitaires-legers-une-bonne-complementarite-avec-les-poids-lourds
- **CGDD**, 2018. *Les comptes des transports en 2017 – 55e rapport de la Commission des comptes des transports de la Nation*. Disponible sur : https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-comptes-des-transports-en-2017-55e-rapport-de-la-commission-des-comptes-des-transports-de-la
- **CGDD**, 2019. *Les émissions de CO_2 liées à l'énergie en France de 1990 à 2017 - Facteurs d'évolution et éléments de comparaison internationale*. Disponible sur : https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-emissions-de-co2-liees-lenergie-en-france-de-1990-2017-facteurs-devolution-et-elements-de
- **CGDD**, 2019. *Mémento de statistiques des transports*. Disponible sur : https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/memento-de-statistiques-des-transports-2017
- **CITEPA**, 2018. *Inventaire SECTEN* [en ligne]. Disponible sur : https://www.citepa.org/fr/ activites/inventaires-des-emissions/secten
- **DGAC**, 2018. *Statistiques du trafic aérien*. Disponible sur : https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/statistiques-du-trafic-aerien#e3
- **OECD**, 2019. *Passenger transport* [online]. Available at: https://stats.oecd.org/Index.aspx?&datasetcode=ITF_PASSENGER_TRANSPORT
- **Omnil**, 2019. *Trafic annuel et journalier*. Disponible sur : http://www.omnil.fr/spip.php?article119
- **Papon**, F., 2012. *The evolution of bicycle mobility in France*. Conference Paper XXII nd International Cycle History Conference. Available at: https://www.researchgate.net/ publication/258160941_The_evolution_of_bicycle_mobility_in_France
- **SNCF**, 2019. *Trafic de voyageurs et marchandises depuis 1841*. Opendata SNCF. Disponible sur : https://data.sncf.com/explore/dataset/trafic-de-voyageurs-et-marchandises-depuis-1841/
- **World Bank**, 2019. *Air transport, passengers carried* [online]. Available at: https://data.worldbank.org/indicator/IS.AIR.PSGR