

Working Paper

Scénarios de perspectives : quels potentiels des 5 leviers
de décarbonation des transports d'ici 2050 ?

Aurélien BIGO

Version provisoire – Avril 2020

Contact: Aurélien BIGO – aurelien.bigo@hotmail.fr

La Chaire Energie et Prospérité

La chaire Energie et Prospérité a été créée en 2015 pour éclairer les décisions des acteurs publics et privés dans le pilotage de la transition énergétique. Les travaux de recherche conduits s'attachent aux impacts de la transition énergétique sur les économies (croissance, emploi, dette), sur les secteurs d'activité (transport, construction, production d'énergie, finance) et aux modes de financement associés. Hébergée par la Fondation du Risque, la chaire bénéficie du soutien de l'ADEME, de l'Agence Française de Développement, de la Caisse des Dépôts, d'Engie et de la SNCF.

Les opinions exprimées dans ce papier sont celles de son auteur et ne reflètent pas nécessairement celles de la Chaire Energie et Prospérité. Ce document est publié sous l'entière responsabilité de son auteur.

Les Working paper de la Chaire Energie et Prospérité sont téléchargeables ici :

<http://www.chair-energy-prosperity.org/category/publications/>

Chair Energy and Prosperity

The Energy and Prosperity academic Chair was created in 2015 to inform decisions of public and private actors in managing the energy transition. The Chair research deals with the impacts of energy transition on national economies (growth, employment, debt), on specific sectors (transportation, construction, energy , finance) and with the associated financing issues. Hosted by the Risk Foundation, the chair has the support of ADEME, the French Development Agency, the Caisse des Dépôts, Engie and SNCF.

The opinions expressed in this paper are those of the author and do not necessarily reflect the position of Chair Energy and Prosperity. It is therefore published under the sole responsibility of its author.

Chair energy and Prosperity working paper can be downloaded here:

<http://www.chair-energy-prosperity.org/en/category/publications-2/>

Préambule

Ce document fait l'état des recherches réalisées dans le cadre de ma thèse. Il correspond à son **second chapitre**, portant sur l'analyse des trajectoires d'émissions d'ici 2050.

Des références à d'autres chapitres de la thèse apparaissent régulièrement dans le texte : chapitre 1 pour l'analyse des émissions passées des transports entre 1960 et 2017 ; chapitre 3 pour l'analyse des vitesses des déplacements ; chapitre 4 pour une discussion et une ouverture plus globales, y compris sur les politiques publiques.

Le chapitre 1 est déjà en ligne, et d'autres documents sont ou seront mis en ligne sur la page suivante : <http://www.chair-energy-prosperity.org/publications/travail-de-these-decarboner-transports-dici-2050/>

Ce document étant provisoire, **tous les retours et commentaires sont les bienvenus**. N'hésitez pas également à me contacter pour toute **question** à l'adresse mail indiquée en page de garde.

Il est **possible d'utiliser et de citer les résultats et analyses** de ce document. Un exemple de référence est donné ci-dessous à titre indicatif :

Bigo, A., 2020. Scénarios de perspectives : quels potentiels des 5 leviers de décarbonation des transports d'ici 2050 ? Working Paper, Avril 2020. Disponible sur : <http://www.chair-energy-prosperity.org/publications/working-papers/scenarios-decarbonation-transports-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 CO₂, 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'accélération 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.

Sommaire

PREAMBULE	3
RESUME.....	3
SOMMAIRE.....	4
1. INTRODUCTION, BIBLIOGRAPHIE ET OBJECTIFS	5
2. COMPARAISON DES SCENARIOS DE PROSPECTIVES D'ICI 2050.....	9
2.1. <i>Retour sur 15 ans de prospectives sur les émissions des transports.....</i>	9
2.1.1. Des scénarios de plus en plus difficiles à atteindre.....	9
2.1.2. Passage de l'exploratoire au normatif.....	11
2.1.3. Des scénarios aux logiques variées.....	12
2.2. <i>Les 15 scénarios de prospectives étudiés</i>	13
2.3. <i>Méthodologie.....</i>	16
2.3.1. Utilisation et interprétation des décompositions pour la prospective	16
2.3.2. Périmètres, difficultés de la comparaison et ajustements réalisés	19
3. RESULTATS DES DECOMPOSITIONS	22
3.1. <i>Résultats temporels par scénario</i>	22
3.1.1. Résultats des décompositions voyageurs.....	22
3.1.2. Résultats des décompositions marchandises.....	25
3.1.3. Comparaison des décompositions à 2050 et 2030	27
3.2. <i>Comparaison des scénarios tendanciels et ambitieux.....</i>	28
3.2.1. Comparaison pour les voyageurs.....	28
3.2.2. Comparaison pour les marchandises	31
3.2.3. Positionnement de la SNBC parmi les scénarios	32
3.3. <i>Détails des contributions par levier</i>	34
3.3.1. Demande de transport.....	35
3.3.2. Report modal	36
3.3.3. Taux de remplissage	37
3.3.4. Efficacité énergétique des véhicules.....	38
3.3.5. Intensité carbone de l'énergie.....	39
4. DISCUSSION ET CONCLUSION.....	42
REMERCIEMENTS	47
BIBLIOGRAPHIE	47
ANNEXES.....	52
<i>Résultats des décompositions des scénarios à 2050 et 2030.....</i>	52
Scénarios voyageurs	52
Scénarios marchandises	53
<i>Comparaison des tendances passées avec la SNBC, en additif.....</i>	54

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. 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 CO₂ 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 suivies 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 CO₂ 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. 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 CO₂, 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-DGEC, 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 1 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 **penne 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 tendanciel 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**. 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 1 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.

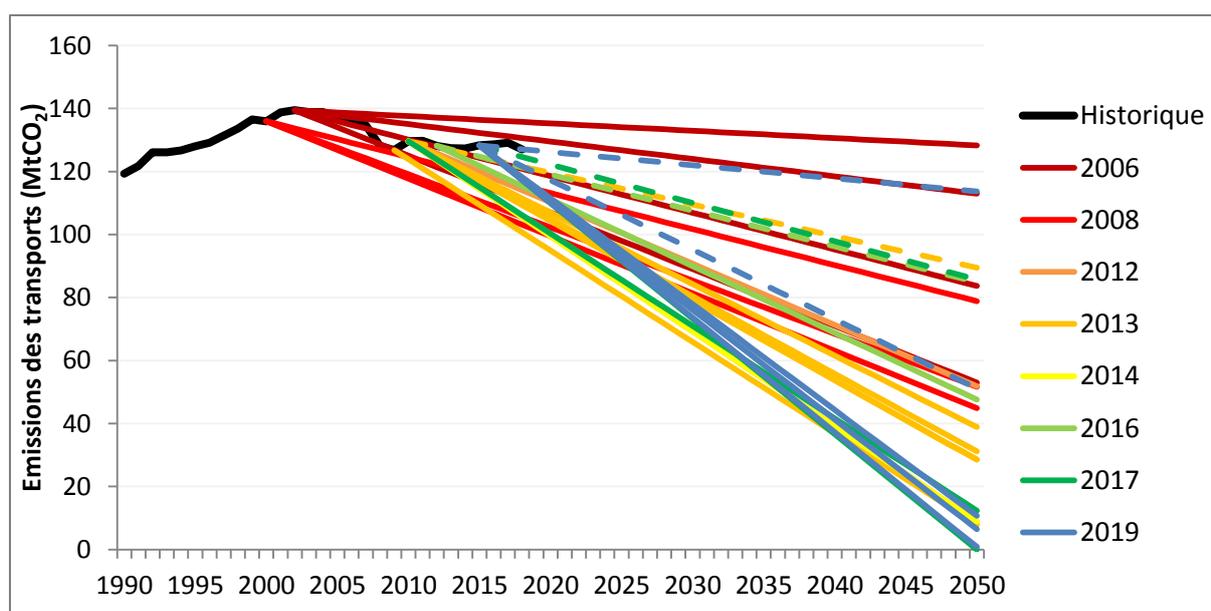


Figure 1 : Evolution de la baisse projetée des émissions entre l'année de référence et 2050 pour les scénarios de prospectives dans les transports, en relation avec les émissions sur 1990-2018 (scénarios tendanciels en pointillés)

2.1.2. Passage de l'exploratoire au normatif

A la lecture de l'évolution des scénarios et notamment de la Figure 1, 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 Enerdata-LET 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 1).

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.

Aussi, au moment où ce rapport est écrit, au moins deux études sont en préparation pour une 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 au moins pour partie un ou plusieurs scénarios compatibles avec la neutralité carbone.

Tableau 1 : 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 Détece 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 différents 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 (The Shift Project 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 (Enerdata-LET) 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 CO₂, 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 2. 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 **CO₂** 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 2 : 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	<i>AME</i>	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	<i>Tend.</i>	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	<i>NPS</i>	Transport	2015	-60%	-63%	-53%
			EV30		2015	-92%	-96%	-81%
IDDRI	Think tank international	2019	S1	Fret	2010			-99%
			S2		2010			-98%
IDDRI	Think tank international	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%	

> 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 (MTES-DGEC, 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 faite 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 CIREN, 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 CO₂ (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 leviers de la SNBC** : 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 le chapitre 1 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 :

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

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, 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 2 ; 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 2), 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.

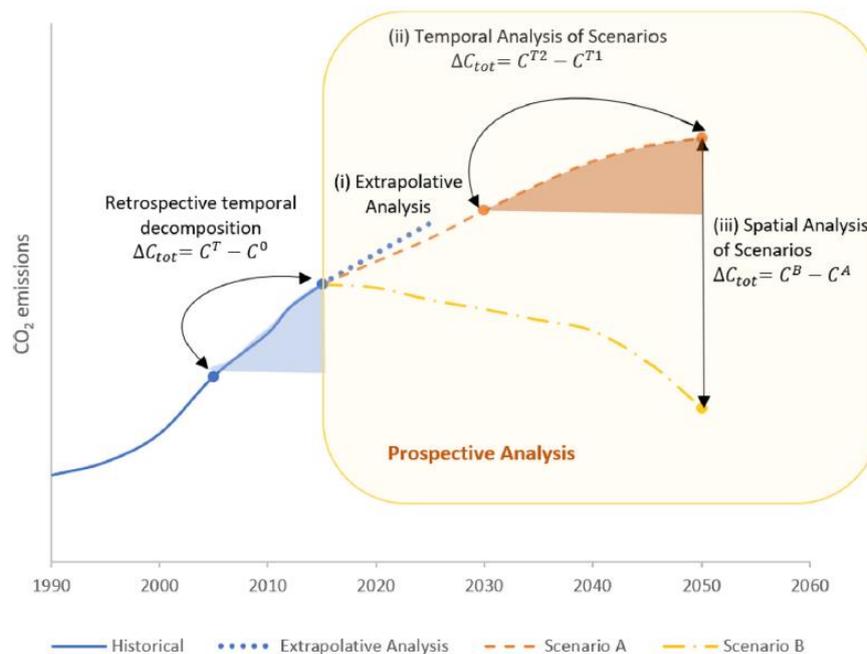


Figure 2 : Illustration graphique des analyses de décomposition rétrospectives et prospectives (Ang et Goh, 2019)

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. 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 MtCO₂. 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 MtCO₂ sur 2015-2050. La baisse d'émissions liée au report modal sera proche de 18 MtCO₂ 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 MtCO₂ 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 25 % et les scénarios volontaristes une baisse de 3 %, il peut ainsi être considéré que le potentiel de baisse par rapport à la tendance est de -22 % (car $0,97/1,25 = 0,78$; 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 3 : Périmètres des scénarios voyageurs, leurs émissions, et ajustements pour la comparaison

Institut	MTES		EpE	négaWatt		ADEME	IEA		IDDRI		SNCF		
	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	Vélo		Vélo	Marche + vélo		Vélo	Aucun		Marche + vélo		Marche + vélo		

Tableau 4 : Périmètres des scénarios marchandises, leurs émissions, et ajustements pour la comparaison

Institut	MTES		EpE	négaWatt		ADEME	IEA		IDDRI	
	AME	SNBC	ZEN	Tend	nW	Vision	NPS	EV30	S1	S2
Scénario	2015		2015	2015		2010	2015		2010	
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 MtCO₂ pour le transport de voyageurs et de 30 à 45 MtCO₂ pour le transport de marchandises (voir les différences de périmètres dans les Tableau 3 et Tableau 4). Les différences par rapport aux 90 et 33 MtCO₂ 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 MtCO₂ l'année de référence, une baisse de 11,7 MtCO₂ est ramenée à 9 MtCO₂). Cela permet de rendre les résultats de ces décompositions plus facilement comparables entre eux, comme par exemple dans la Figure 5 pour les décompositions additives du transport de voyageurs. En revanche, les résultats bruts des décompositions sont donnés dans les tableaux en annexe.

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 prévoit 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). 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 4^{ème} 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 4. 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 faites 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 3). 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 MtCO₂) ;
- ✓ 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 3.

La **décomposition multiplicative** (à gauche) montre : une croissance de 25 % de la demande de transport et qui participe à la hausse des émissions de CO₂ (le document de la SNBC indique +26 %, légère différence due à la prise en compte ici de 60 % des VUL et de la Métropole seule pour l'aérien) ; 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 MtCO₂ 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 (10,6 MtCO₂) et des contributions à la baisse du report modal (-4,4 MtCO₂), du taux de remplissage (-5,0 MtCO₂), de l'efficacité énergétique (-47,2 MtCO₂) et de l'intensité carbone de l'énergie (-43,5 MtCO₂).

Les décompositions montrent que les **trois premiers facteurs se compensent** quasiment (1,03 soit +3 % cumulés ; ou +1,2 MtCO₂). 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**.

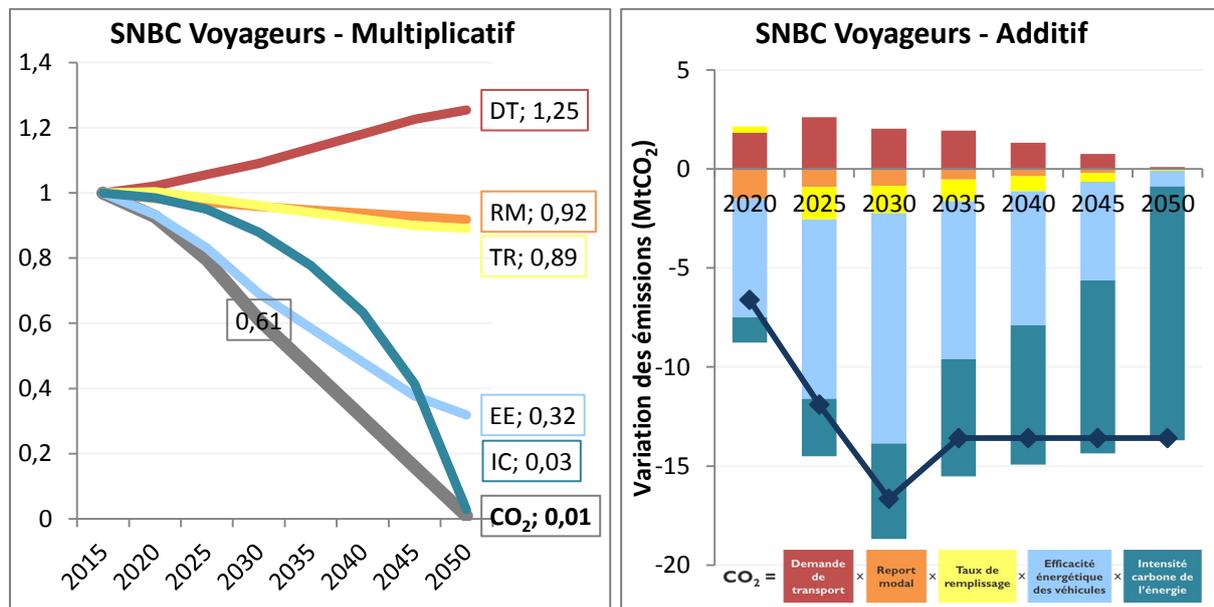


Figure 3 : Décompositions multiplicative (à gauche) et additive (à droite) du scénario voyageurs de la SNBC

Les Figure 4 et Figure 5 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 CO₂ sont représentées par les losanges noirs, et sont logiquement plus fortes pour les scénarios volontaristes que pour les scénarios tendanciels. Les résultats sont donnés 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

hausse 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.

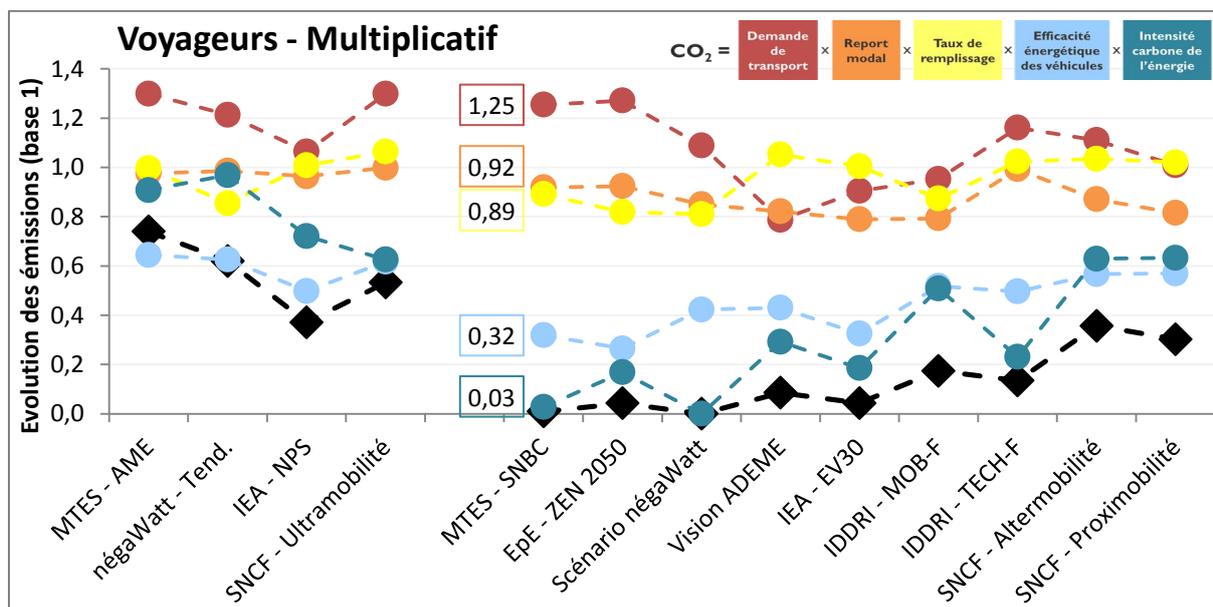


Figure 4 : Décomposition multiplicative de l'évolution des émissions de CO₂ des scénarios voyageurs jusqu'à 2050 (scénarios tendanciels à gauche, volontaristes à droite ; les traits pointillés visent à faciliter la lecture, mais ne représentent en aucun cas un lien entre les scénarios ou entre les évolutions des facteurs)

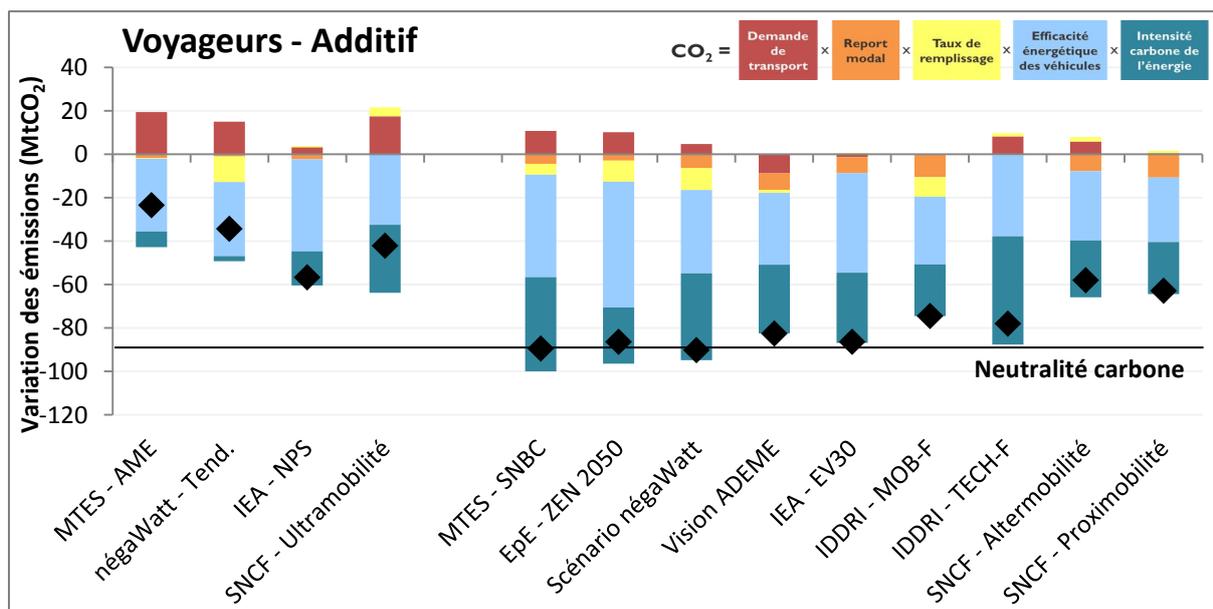


Figure 5 : Décomposition additive de l'évolution des émissions de CO₂ des scénarios voyageurs jusqu'à 2050

3.1.2. Résultats des décompositions marchandises

La Figure 6 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.

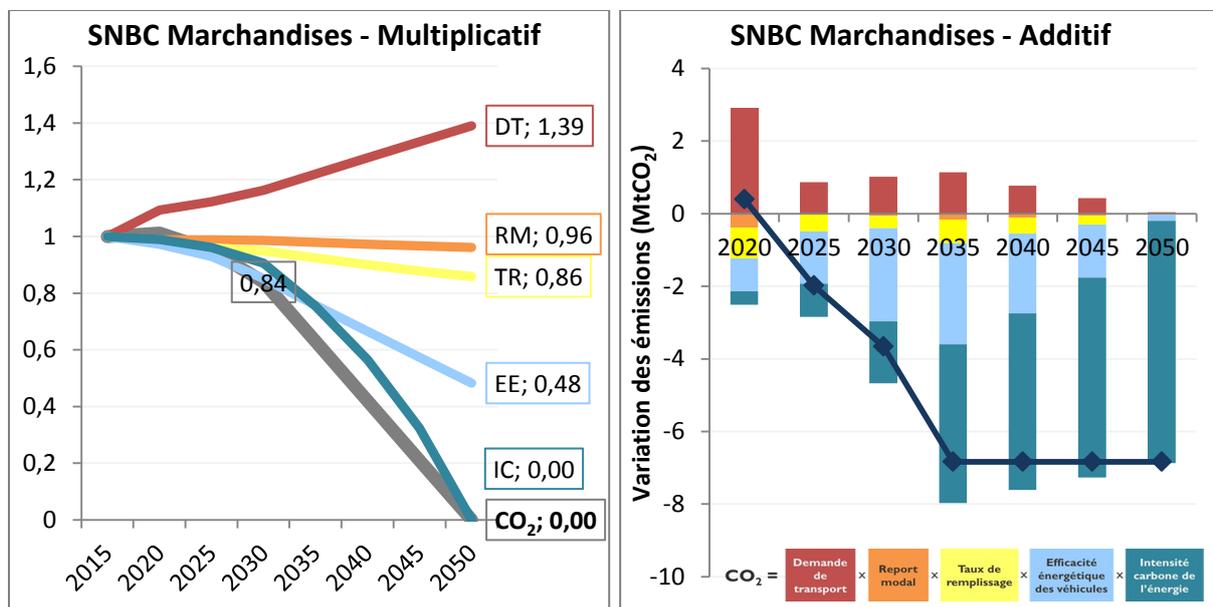


Figure 6 : Décompositions multiplicative (à gauche) et additive (à droite) du scénario marchandises de la SNBC

Les Figure 7 et Figure 8 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.

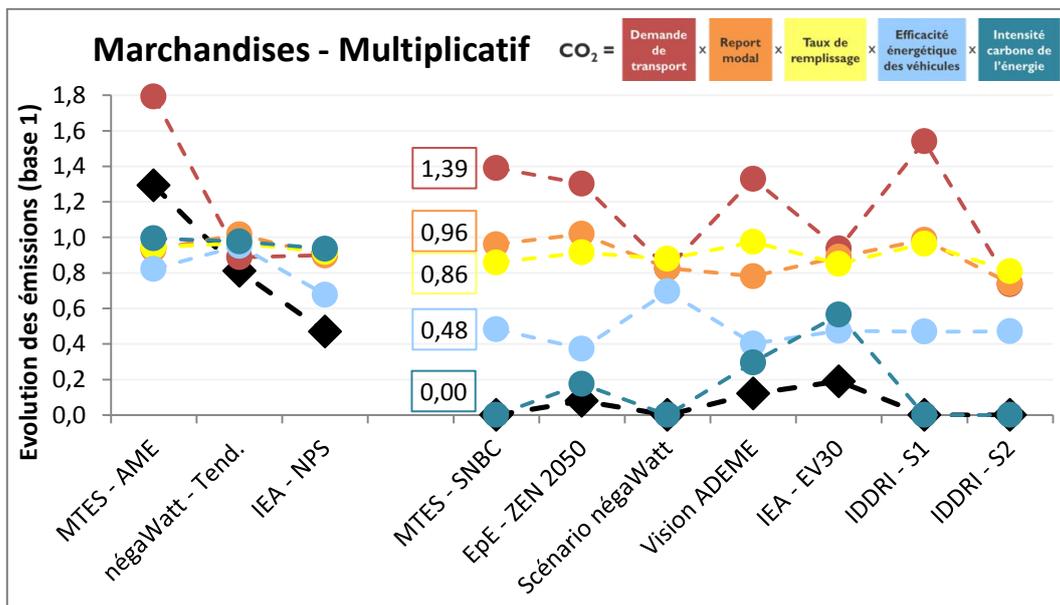


Figure 7 : Décomposition multiplicative de l'évolution des émissions de CO₂ des scénarios marchandises jusqu'à 2050 (scénarios tendanciels à gauche, volontaristes à droite)

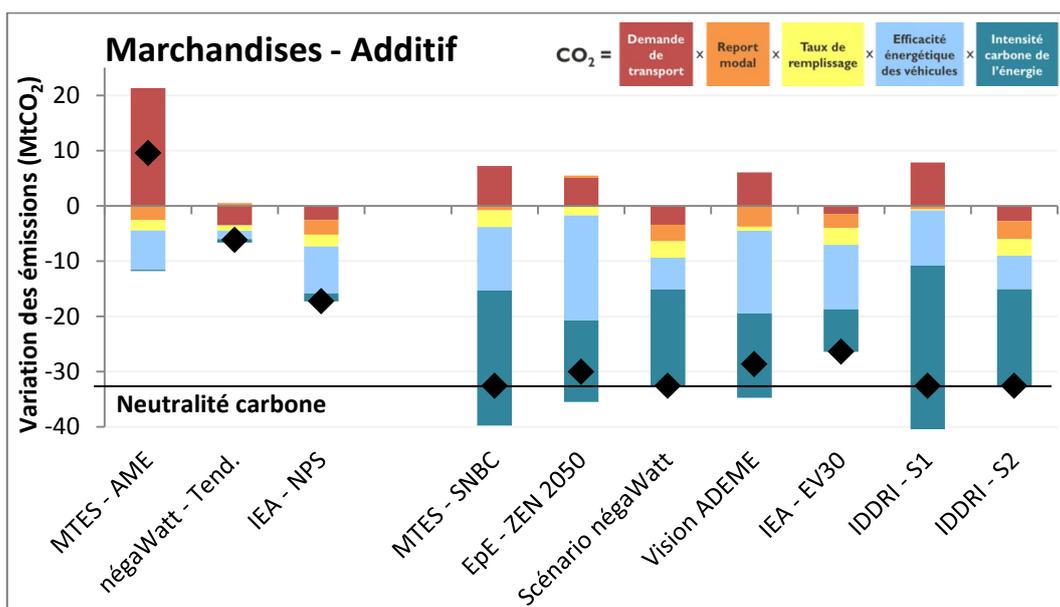


Figure 8 : Décomposition additive de l'évolution des émissions de CO₂ des scénarios marchandises jusqu'à 2050 (scénarios tendanciels à gauche, volontaristes à droite)

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 7 et Tableau 8, et pour les marchandises en Tableau 9 et Tableau 10. 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 3 et Figure 6, 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
- ✓ Ce type d'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 2), 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 9 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 1^{er} au 5^{ème} levier pour la comparaison entre les scénarios AME et **SNBC** : très faible baisse de la demande qui passe d'un facteur 1,30 à 1,25 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** : 5 % des baisses viennent de la modération de la demande, 7 % 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 9, 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 MtCO₂ en 2045, contre 14 MtCO₂ 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.

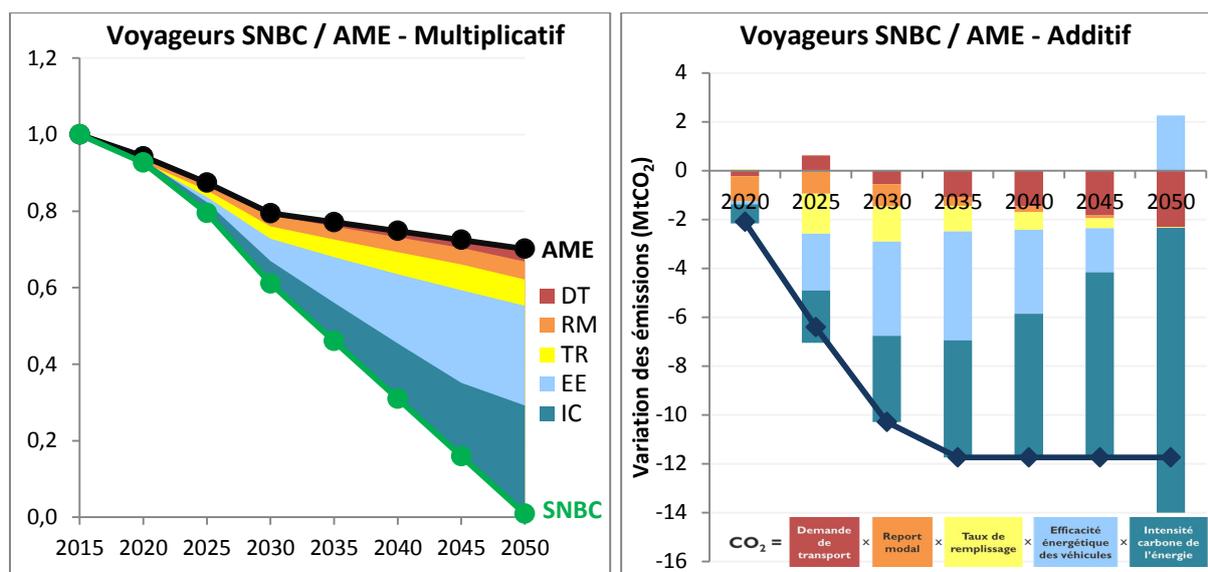


Figure 9 : Comparaison des scénarios voyageurs du MTEs, entre le tendanciel (AME) et la SNBC (comparaison des 5 facteurs en multiplicatif à gauche, différence entre les décompositions additives des scénarios à droite)

Comparaison des scénarios tendanciels et ambitieux pour chaque levier

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 10 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 10) 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 ($0,91 \text{ DT} \times 0,80 \text{ RM} = 0,73$; voir le résumé par facteur plus bas, en Tableau 5). 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 10 ci-dessous : $0,75 \text{ DT} \times 0,82 \text{ RM} = 0,61$).

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 CO₂, ce qui est davantage que les 54 MtCO₂ d'émissions restantes en 2050 pour la moyenne des scénarios tendanciels. Il ressort en ordre de grandeur des baisses possibles de **32 MtCO₂ pour les 3 premiers facteurs**, proches des potentiels cumulés de **35 MtCO₂ des facteurs plus technologiques** d'efficacité énergétique et d'intensité carbone.

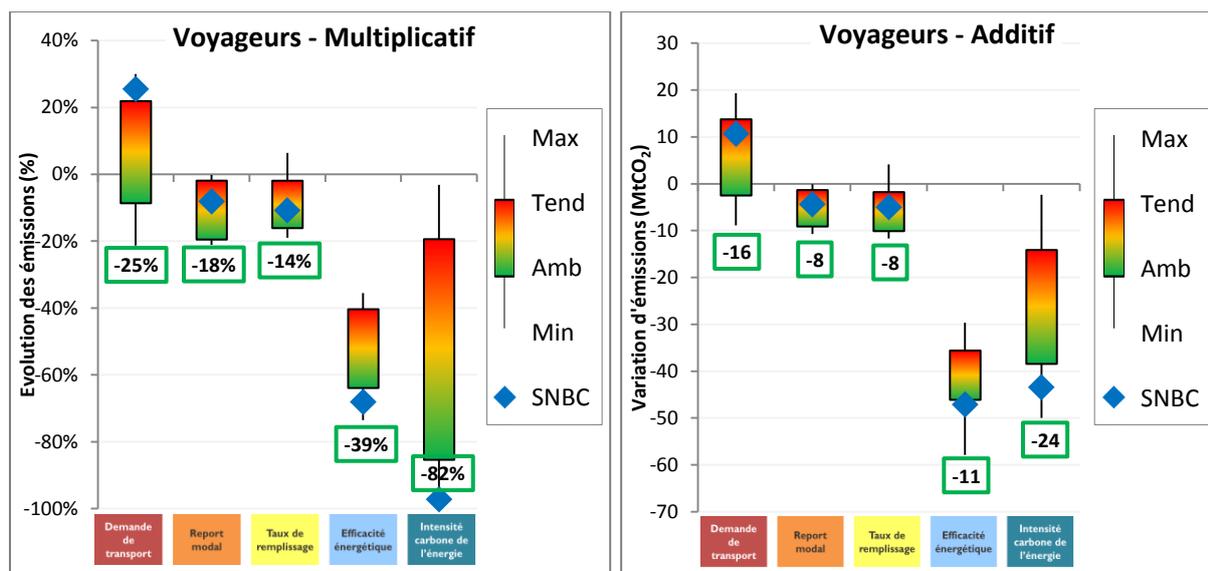


Figure 10 : Comparaison des 4 scénarios tendanciels avec les 4 scénarios voyageurs les plus ambitieux par facteur (facteurs multiplicatifs à gauche, variation d'émissions en additif à droite ; moyenne des 4 scénarios tendanciels en limite supérieure rouge du rectangle, des 4 les plus ambitieux (hors 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 11). 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 modulation 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 %).

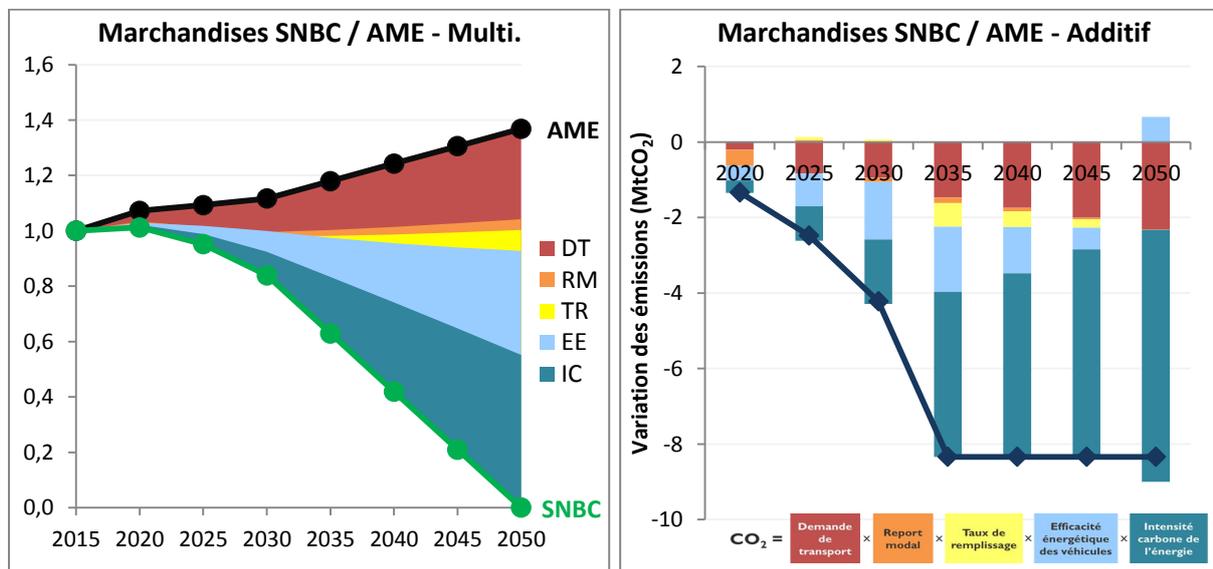


Figure 11 : Comparaison des scénarios marchandises tendanciel (AME) du MTES et de la SNBC
(comparaison des 5 facteurs en multiplicatif à gauche, différence entre les décompositions additives des scénarios à droite)

Comparaison des scénarios tendanciel 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 tendanciel et les 3 scénarios les plus ambitieux** sur chaque levier (en raison du plus faible nombre de scénarios ; Figure 12).

Comme cela a été vu en 3.1.2 et en Figure 7, 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 tendanciel 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 tendanciel et les 3 scénarios les plus ambitieux apparaît seulement de **-30 %** (Figure 12 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 ($0,70 \times 0,82 \times 0,90 = 0,52$). 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.

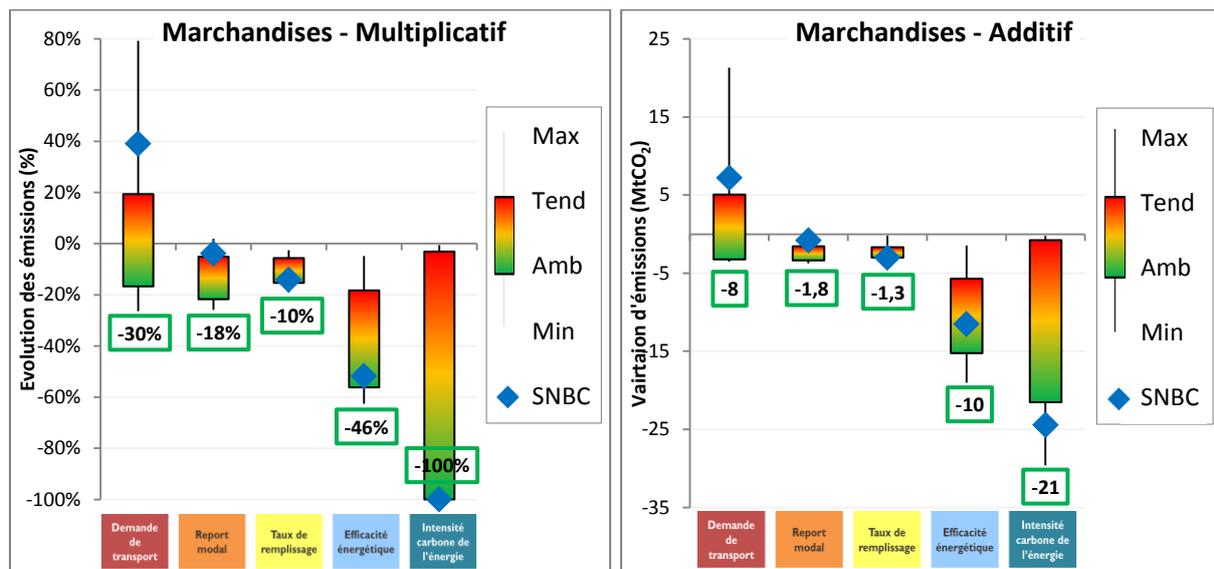


Figure 12 : Comparaison des 4 scénarios tendanciels avec les 4 scénarios marchandises les plus ambitieux par facteur (pour des explications complémentaires, voir la légende de la Figure 10 ci-dessus)

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 10 pour les voyageurs et la Figure 12 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 13 et Figure 14, 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.

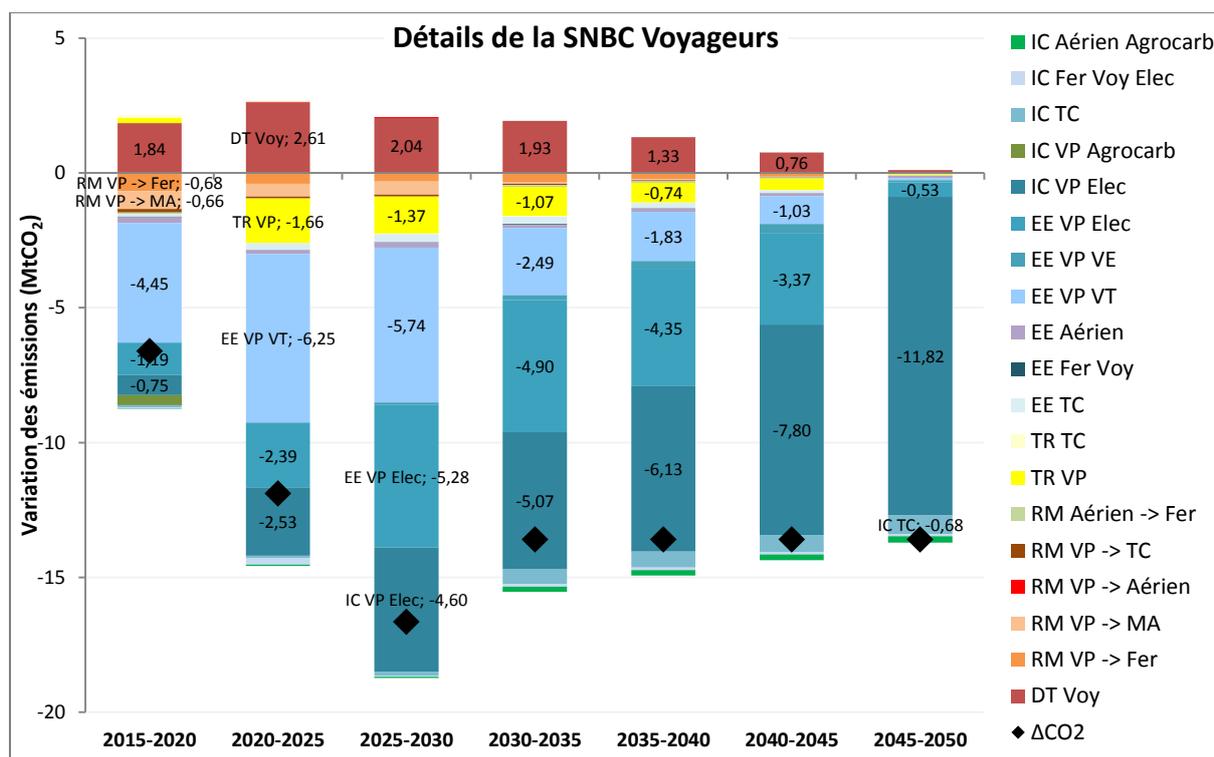


Figure 13 : Détails de la décomposition additive du scénario voyageurs de la SNBC

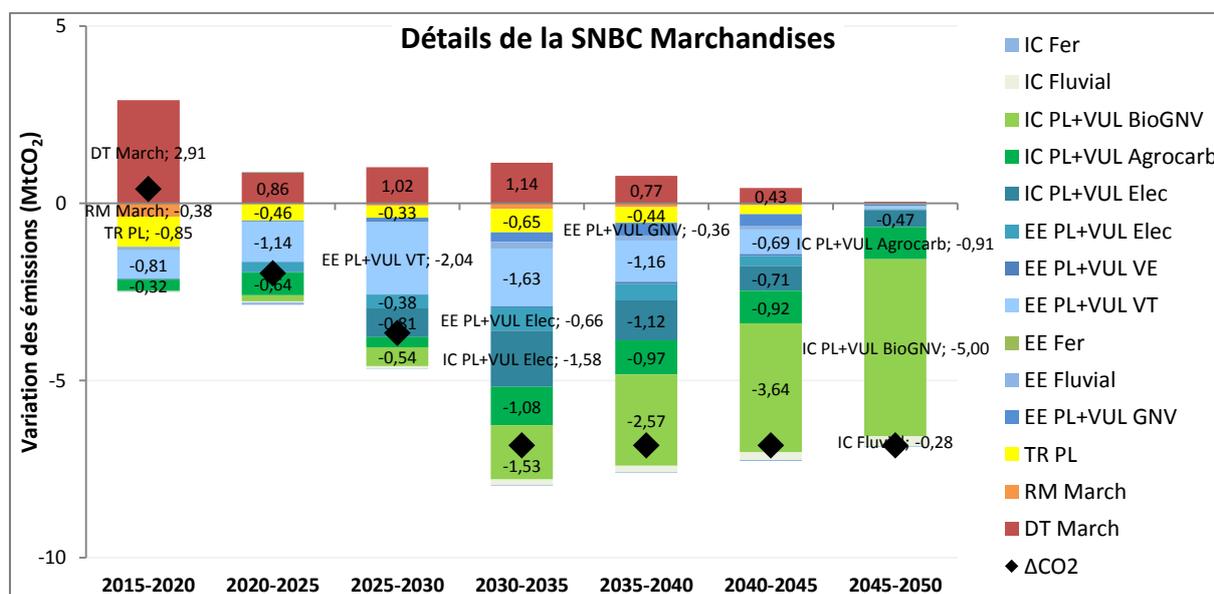


Figure 14 : Détails de la décomposition additive du scénario marchandises de la SNBC

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, et se fait majoritairement vers le train et le vélo pour les voyageurs, surtout vers le ferroviaire pour les marchandises
- ✓ 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 (et hydrogène), 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 CO₂ 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 5, et sur les détails des décompositions additives de la SNBC en Figure 13 et Figure 14. 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 5 : 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%	+25%	+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	-4,4
	Train voyageurs					0 à -6,7	-1,2	-5,4	-2,4
	Vélo (et marche)					0 à -6,4	-0,2	-4,3	-1,7
	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 4) **et encore plus pour les scénarios marchandises** (Figure 7). 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 tendanciennes 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 MtCO₂**, après l'intensité carbone (-45 MtCO₂), mais devant l'efficacité énergétique (-21 MtCO₂), le report modal et le taux de remplissage (quasiment -10 MtCO₂ chacun ; voir Figure 10, Figure 12 et Tableau 5). 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 tendanciennes 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 (+25 % 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 5 et détails par scénario dans le Tableau 9 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 6 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 +25 % ; 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 MtCO₂) 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 13 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 6 : Evolution du trafic ferroviaire, de sa part modale, et impact CO₂ 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%	
ΔMtCO 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 15 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 MtCO₂ respectivement pour le train et le vélo pour les 4 scénarios les plus ambitieux (Tableau 5). Pour le transport de marchandises (Figure 16), 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.

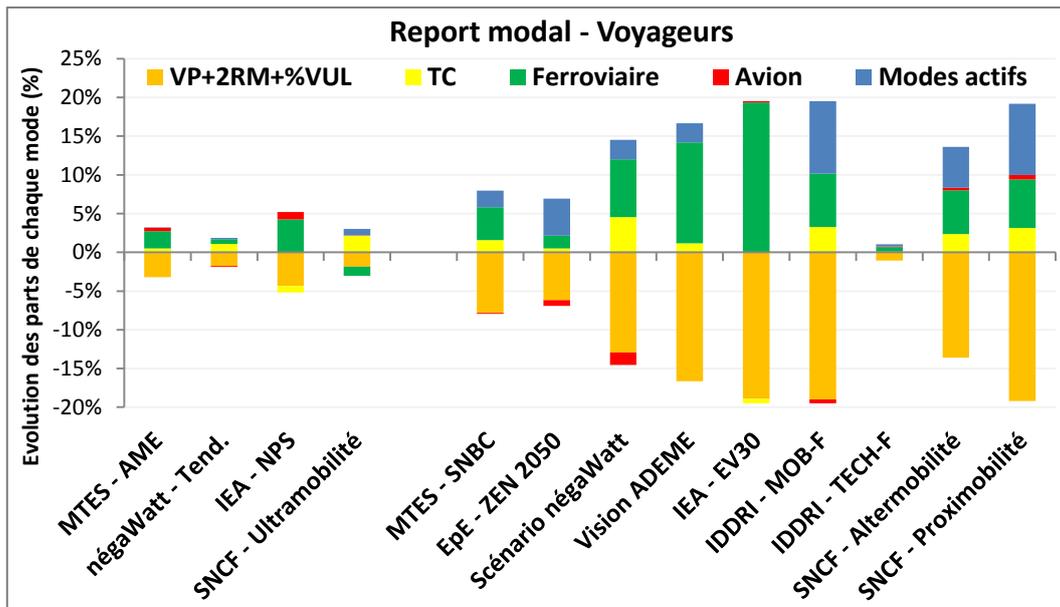


Figure 15 : Evolution des parts modales d'ici 2050 pour les scénarios voyageurs étudiés (scénarios tendanciels à gauche, volontaristes à droite)

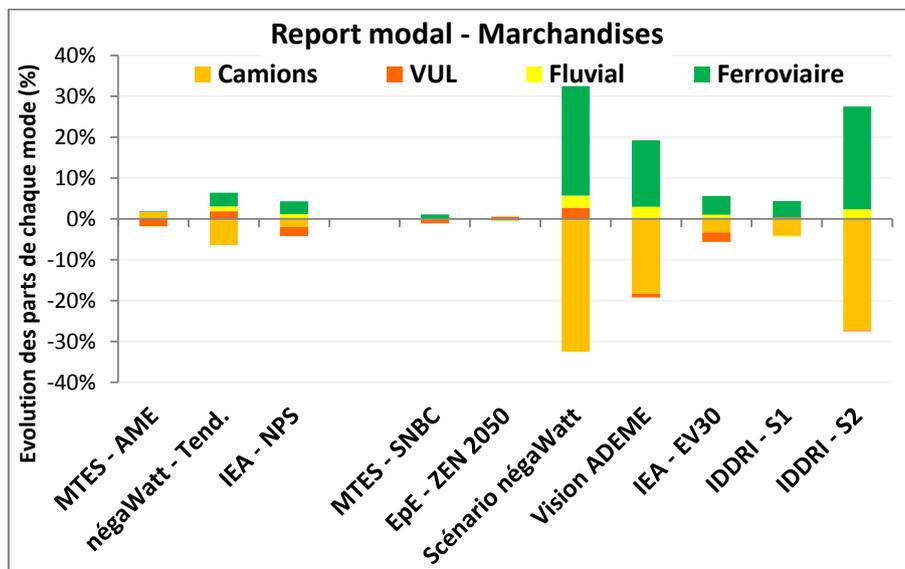


Figure 16 : Evolution des parts modales d'ici 2050 pour les scénarios marchandises étudiés (scénarios tendanciels à gauche, volontaristes à droite)

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 17, 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.

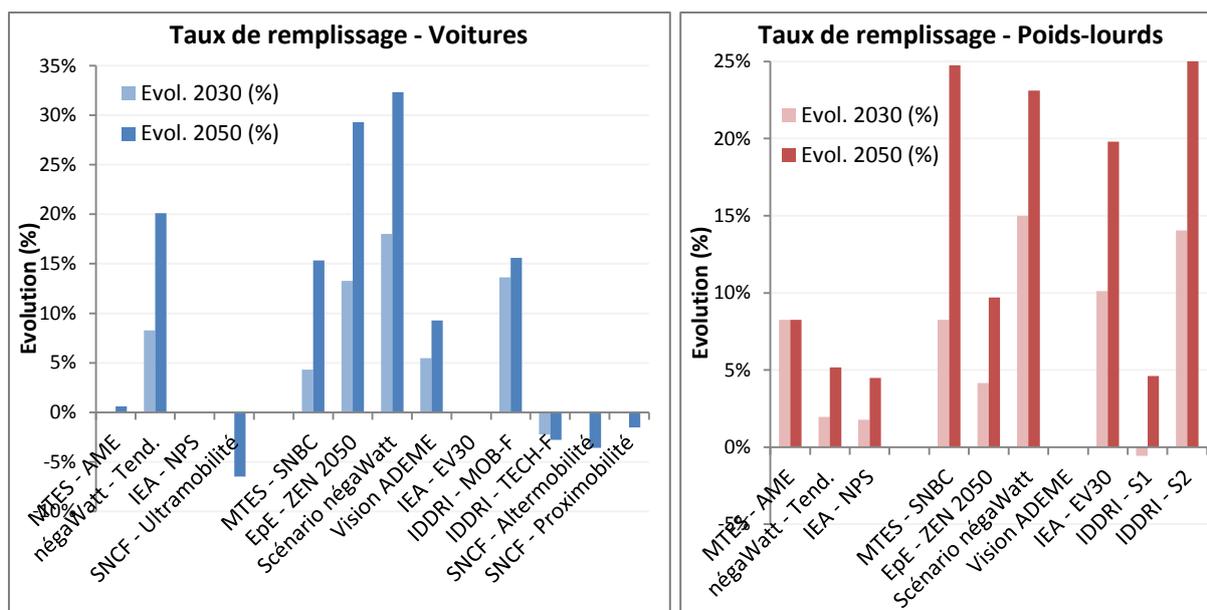


Figure 17 : Evolution du taux de remplissage des voitures (à gauche) et des poids-lourds (à droite) d'ici 2050

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 tendanciennes 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 5).

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 13 et Figure 14 : pour les voyageurs, il apparaît que sur les -47 MtCO₂ 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 13) 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 13). 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 CO₂ 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 9 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 MtCO₂ pour voyageurs et marchandises confondus. Le développement des énergies décarbonées sur la période équivaut à 12 Mtep, soit un gain de 38 MtCO₂ 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 équivalents à 13 MtCO₂, au lieu des 23 MtCO₂ 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 3 et Figure 6) 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 18. 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 19). 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.

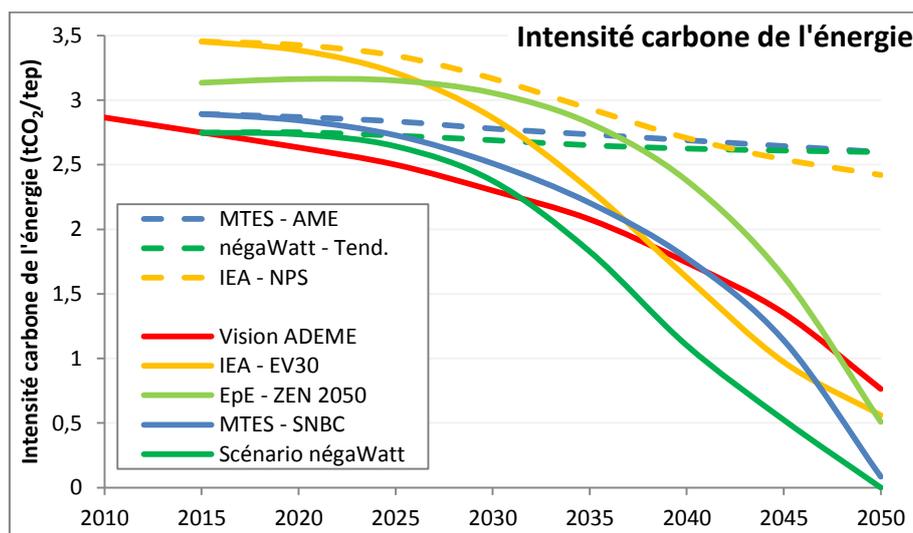


Figure 18 : Evolution de l'intensité carbone totale des transports de l'année de référence à 2050

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 19 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 MtCO₂ en moins par l'électrique, 15 Mt par le biogaz et 8 MtCO₂ grâce aux agrocarburants (Tableau 5).

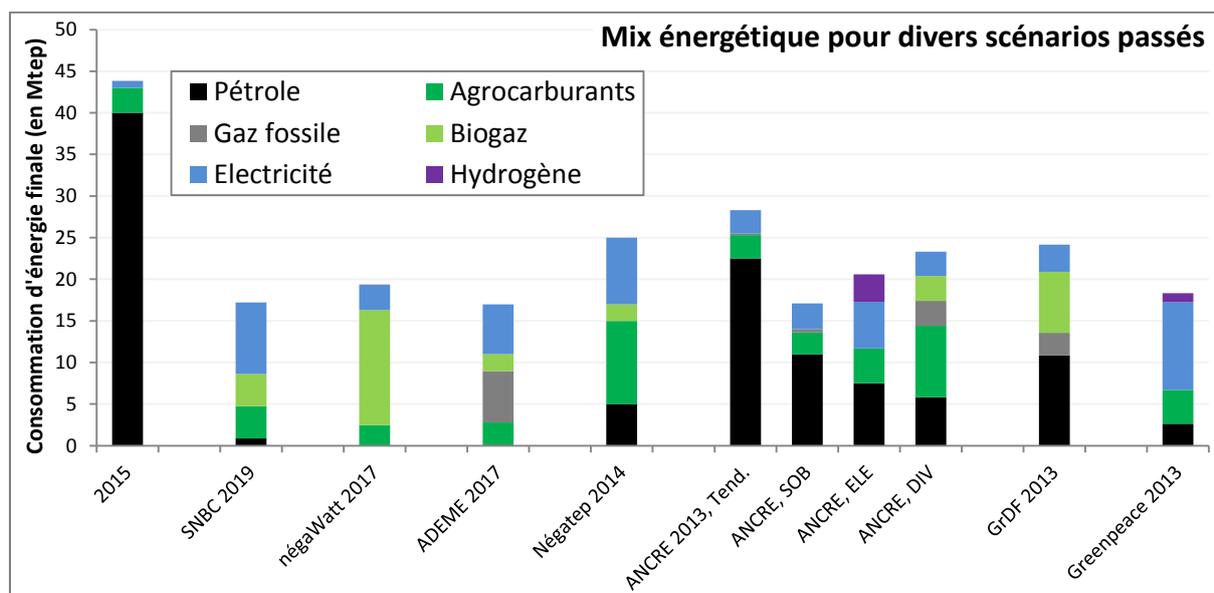


Figure 19 : Mix énergétique en 2015 et en 2050 pour divers scénarios dans les transports en France

Au-delà du mix énergétique total, la Figure 20 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.

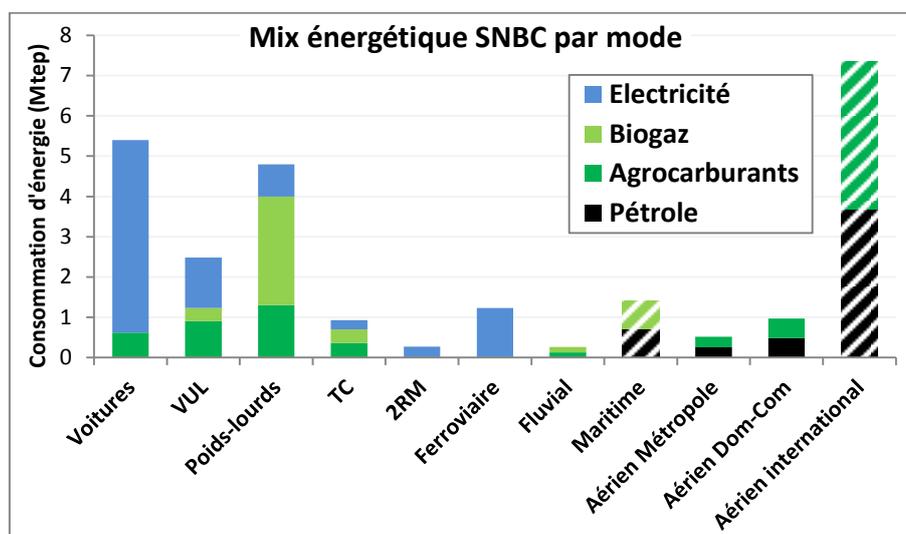


Figure 20 : Mix énergétique par mode de transport en 2050 dans la SNBC

(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 CO₂** 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 CO₂ 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 21 pour les voyageurs et en Figure 22 pour les marchandises (voir également en annexe pour les décompositions additives en Figure 23 et Figure 24 pour la SNBC).

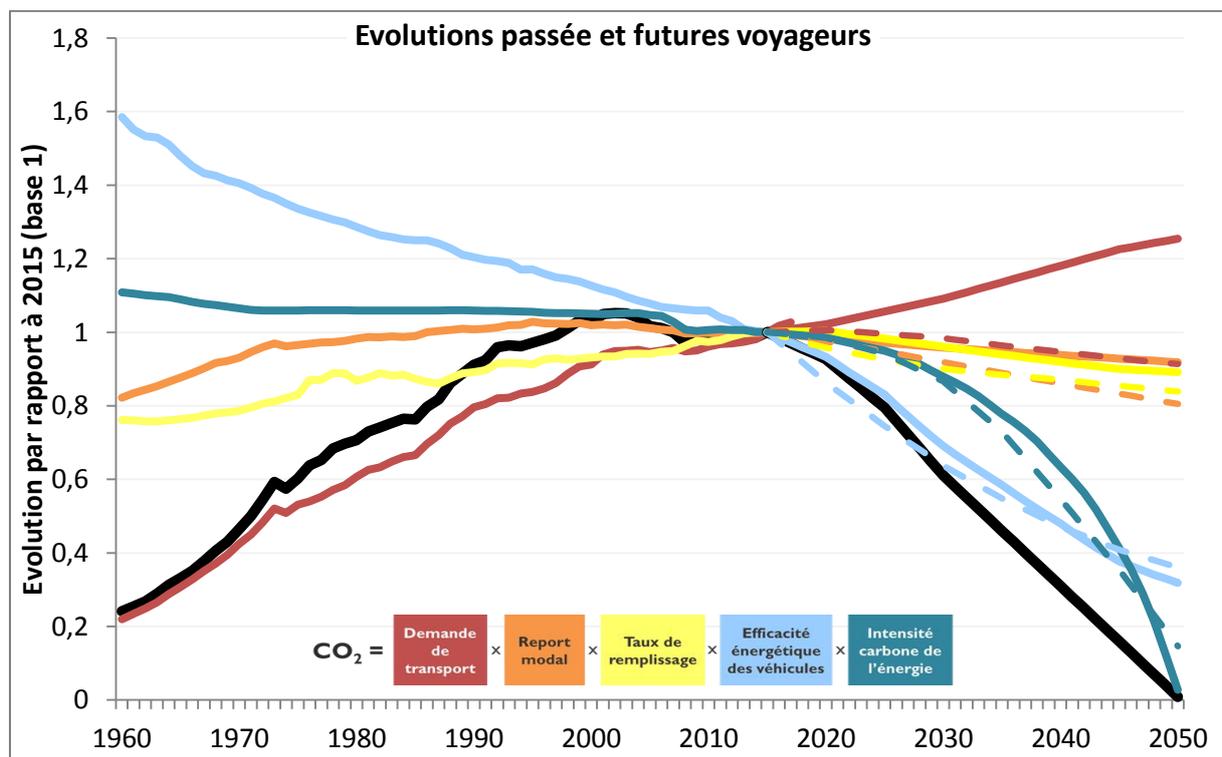


Figure 21 : Evolutions passées (1960-2017) et d'ici 2050 de la SNBC (lignes continues, dont CO₂) et de la moyenne des 4 scénarios les plus ambitieux (en pointillés), pour les 5 facteurs d'évolution des émissions voyageurs

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 CO₂ 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 XX^{ème} siècle.

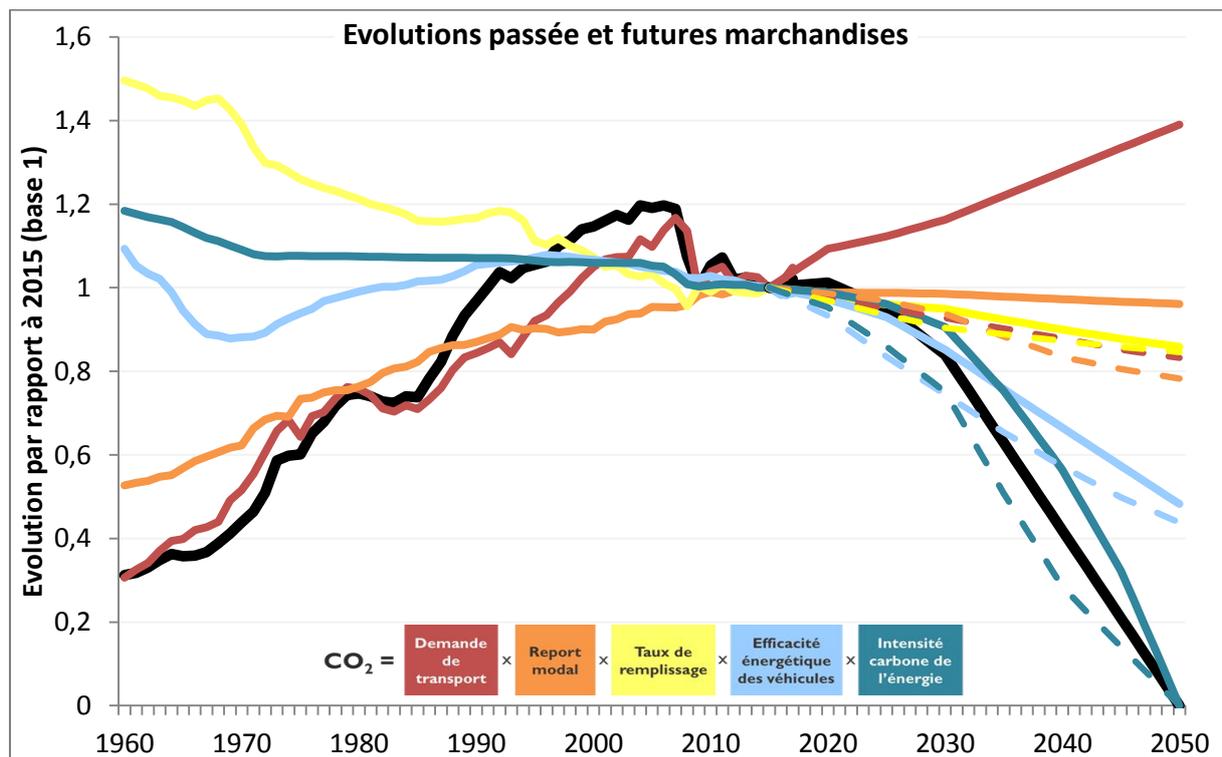


Figure 22 : Evolutions passées (1960-2017) et d'ici 2050 de la SNBC (lignes continues, dont CO₂) et de la moyenne des 4 scénarios les plus ambitieux (en pointillés), pour les 5 facteurs d'évolution des émissions marchandises

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 CO₂, 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.

Remerciements

L'auteur tient à remercier avant tout les instituts et personnes qui ont produit les scénarios, pour leur collaboration dans le partage des données et les réponses à mes (parfois) nombreuses questions, sans lesquels ce travail n'aurait pas été possible. Sont notamment grandement remerciés pour l'aide apportée pour la production ou la relecture de ce travail : Stéphane Barbusse, Yann Briand, Stéphane Chatelin, Emmanuel Combet, Aurore Fabre-Landry, Marine Gorner, David Laurent, Nicolas Raillard, Sébastien Timsit, ainsi que les nombreuses personnes ayant fait des retours lors de présentations ou d'échanges plus informels.

Les soutiens financiers et académiques des 3 partenaires de la thèse, à savoir la SNCF, la Chaire Energie et Prospérité et le laboratoire du CREST à l'Institut Polytechnique de Paris, sont grandement remerciés.

Les recherches et points de vue exprimés dans ce document n'engagent que l'auteur, et aucunement les personnes ou instituts cités ci-dessus.

Bibliographie

- ADEME, 2013a. *Contribution de l'ADEME à l'élaboration de visions énergétiques 2030-2050*. Synthèse et document technique. Disponible sur : <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. Disponible sur : <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 ?* Disponible sur : <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. Disponible sur : <https://www.ademe.fr/mix-electrique-100-renouvelable-analyses-optimisations>
- ADEME, 2017a. *Actualisation du scénario énergie-climat ADEME 2035-2050*. Disponible sur : <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. Disponible sur : <https://www.ademe.fr/propositions-mesures-politiques-publiques-scenario-bas-carbone>
- ADEME, 2018. *Mix de gaz 100 % renouvelable en 2050 ? Synthèse de l'étude*. Disponible sur : <https://www.ademe.fr/mix-gaz-100-renouvelable-2050>
- ADEME, 2019. *Climat air et énergie, Chiffres clés - édition 2018*. Available at: <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, 15 April 2009, Pages 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, February 2012, Pages 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, June 2004, Pages 1131-1139. [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(03\)00076-4](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, September 2019, Pages 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. Disponible sur : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00797980>
- Bigo, A., 2016. *Comment atteindre le facteur 4 dans les transports ? Analyse comparée de scénarios de perspectives à 2050.* Mémoire de Master 2 EDDEE. Disponible sur : <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. <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, Iddri. Disponible sur: <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.* Disponible sur : <http://www.carbone4.com/etude-des-4-trajectoires-du-debat-national-sur-la-transition-energetique-2/>
- Cerema, 2015. *Revue comparée des études de perspectives de transports à l'international.* Rapport d'étude, Mars 2015. Disponible sur : <https://www.cerema.fr/fr/centre-ressources/boutique/revue-comparee-etudes-prospectives-transports-international>
- CGDD, 2019. *Les comptes des transports en 2018. 56^e 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-2018-56e-rapport-de-la-commission-des-comptes-des-transports-de-la>
- CGPC, 2006. *Démarche prospective transports 2050.* Eléments de réflexion.
- Creutzig, F., 2016. *Evolving Narratives of Low-Carbon Futures in Transportation.* Transport Reviews, Volume 36, No. 3, Pages 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, Pages 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. <halshs-00293725>
- DGEC, 2015. *Scénarios prospectifs Energie-Climat-Air pour la France à l'horizon 2035.* Rapport final, synthèse des résultats. Disponible sur : <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, August 2017, Pages 281-293. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.07.003>
- 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/>
- 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 10 (1): e89. <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, April 2013, Pages 183-197. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.01.046>
- GrDF, 2013. *Scénario facteur 4 GrDF*. Synthèse et description des hypothèses.
- Greenpeace, 2013. *Scénario Transition Énergétique*. Disponible sur : <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, Pages 515–527. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0172-6>
- IEA 2017. *The Future of Trucks. Implications for Energy and the Environment*. Available at: <https://webstore.iea.org/the-future-of-trucks>
- IEA, 2019. *Global EV Outlook 2019. Scaling up the transition to electric mobility*. Available at: <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, November 2011, Pages 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, 15 December 2017, Pages 2613-2627. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.07.065>
- Lin, B., Xie, C., 2014. *Reduction potential of CO₂ emissions in China's transport industry*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 33, May 2014, Pages 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, August 2018, Pages 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, December 2009, Pages 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, August 2017, Pages 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. *Projet de Stratégie Nationale Bas-Carbone (SNBC)*. Projet pour consultation du public. Janvier 2020. 194 p. Disponible sur : <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/strategie-nationale-bas-carbone-snbc>
- négaWatt, 2013. *Scénario négaWatt. Dossier de synthèse*. Disponible sur : <https://negawatt.org/Scenario-negaWatt-2011-2050-39>
- négaWatt, 2014. *Scénario négaWatt 2011-2050. Hypothèses et méthode. Rapport technique*. Disponible sur : <https://negawatt.org/Rapport-technique-du-scenario-negaWatt-2011-2050-189>
- négaWatt, 2017. *Scénario négaWatt 2017-2050. Dossier de synthèse*. Available at: <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, November 2017, Pages 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. Disponible sur : <https://afterres2050.solagro.org/a-propos/le-projet-afterres-2050/>
- SNCF, 2015. *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*. Available at: <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., Fishedick, 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, November 2017, Pages 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 CO₂ emissions*. Energy Policy, Volume 39, Issue 6, June 2011, Pages 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, Sept. 2006, Pages 369-376. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2006.07.003>
- The Shift Project, 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, January 2016, Pages 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, Pages 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, 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, May 2009, Pages 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, August 2017, Pages 294-309. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.11.001>

Annexes

Résultats des décompositions des scénarios à 2050 et 2030

Contrairement aux figures des décompositions additives présentes dans le texte, pour lesquelles le niveau des émissions de départ a été ramené aux émissions de la SNBC (environ 90 MtCO₂ pour les voyageurs et 33 MtCO₂ pour les marchandises), ici les résultats bruts sont donnés.

Scénarios voyageurs

Tableau 7 : 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	1,25	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	19,3	10,6	12,0	14,5	4,5	-8,5	4,2	-1,8	-0,2	6,8	18,5	6,2	0,5
ΔRM	-1,9	-4,4	-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 8 : 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 9 : 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 10 : 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

Comparaison des tendances passées avec la SNBC, en additif

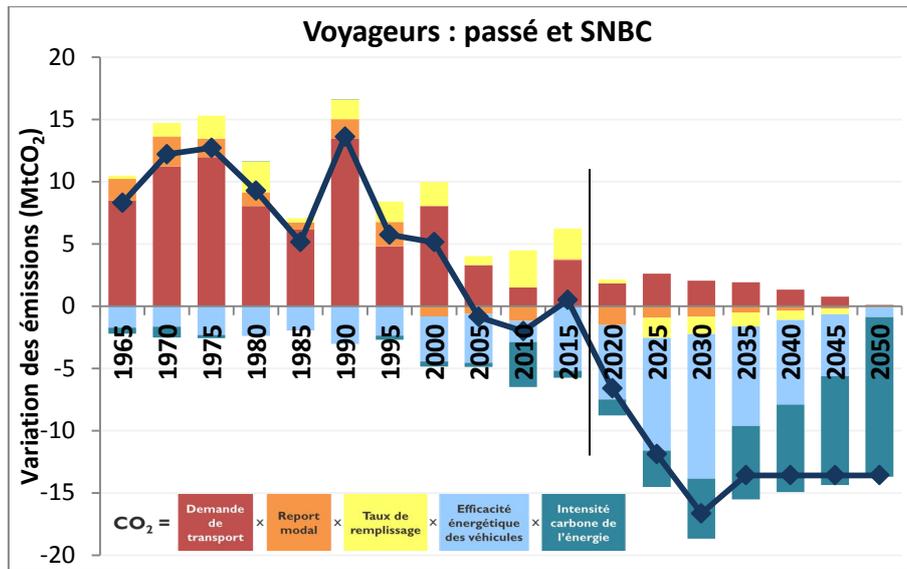


Figure 23 : Décomposition des émissions passées (1960-2015) du transport de voyageurs et de la SNBC d'ici 2050 (forme additive, pas de 5 ans)

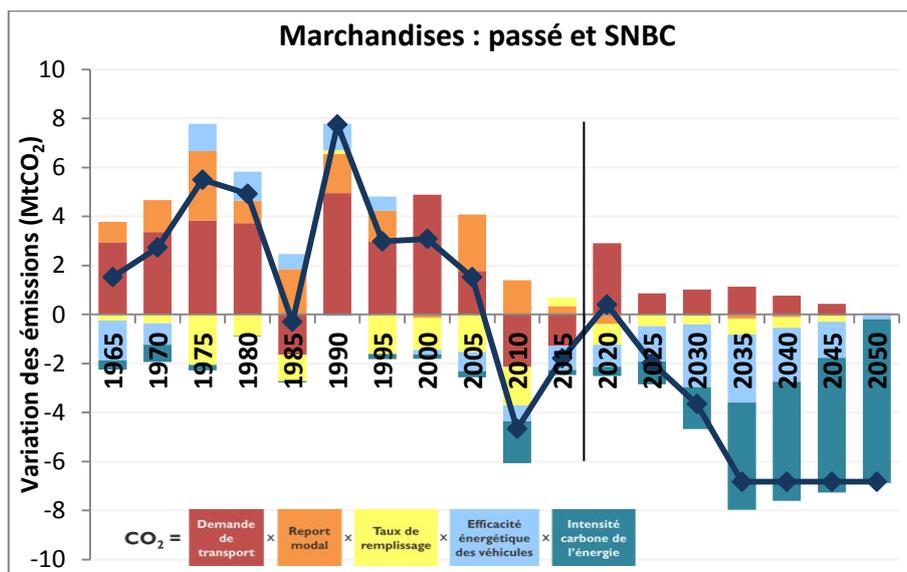


Figure 24 : Décomposition des émissions passées (1960-2015) du transport de marchandises et de la SNBC d'ici 2050 (forme additive, pas de 5 ans)