GOUVERNEMENT

Liberté
Égalité
Fraternité

RAPPORT THÉMATIQUE
Février 2022

PROSPECTIVE 2040-2060 DES TRANSPORTS ET DES MOBILITÉS

20 ans pour réussir collectivement les déplacements de demain

Motorisation

Travaux coordonnés par :
Dominique Auverlot

CGEDD
CONSEIL GÉNÉRAL DE L'ENVIRONNEMENT ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

FRANCE STRATÉGIE
ÉVALUER. ANTICIPER. DÉBATTRE. PROPOSER.

Résumé

En 2006, le Conseil général des ponts et chaussées a publié une démarche de prospective des transports à horizon 2050 : celle-ci avait permis de tracer des futurs possibles des transports et de la mobilité et d'en déduire quelques recommandations pour l'action publique. Les évolutions intervenues depuis cette date et la nécessité d'aller vers un monde neutre en carbone, prévue par l'Accord de Paris, obligent à revoir la copie. Dès lors, le Conseil général de l'environnement et du développement durable s'est associé à France stratégie pour mener à bien cette nouvelle démarche.

Le présent rapport rend compte des réflexions menées par le groupe de travail consacré à la décarbonation des motorisations et des véhicules de transport. Elles s'appuient sur :

- un constat d'échec : loin d'avoir connu une diminution, les émissions de gaz à effet de serre du transport sont toujours en 2021 supérieures à celles de 1990 ;
- un objectif extrêmement ambitieux : celui de la neutralité carbone qui suppose de réduire quasiment à zéro les émissions à la circulation du secteur des transports à 2050 et de diminuer l'empreinte carbone des véhicules ;
- une perspective technologique favorable : les analyses menées, à partir d'ACV simplifiées, des différentes motorisations alternatives et des carburants associés montrent la possibilité de gains extrêmement importants dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Des réductions par 4 à 2040 et 8 à 2060 (par rapport à 2019) de l'empreinte carbone des véhicules particuliers du segment C et des VUL mis en service à ces dates, et par 7 à 2040 et 10 à 2060 pour les bus et les PL 40 tonnes seraient ainsi envisageables. L'approche retenue par le rapport est différente pour l'aérien et le maritime en raison de données plus incertaines en ACV : une division par 2 des émissions directes à 2050 et une neutralité carbone à l'horizon 2060-2070 des segments domestiques et internationaux de l'aérien et du maritime seraient possibles. Pour le fluvial, un objectif de neutralité carbone des émissions directes à l'horizon 2050 est enfin concevable ;
- la construction de trois scénarios technologiques possibles : le développement de ces technologies sera plus ou moins important suivant l'évolution des comportements, la mise en place des leviers économiques et la coopération mondiale.

Pour arriver à de tels résultats, la décarbonation technologique des transports doit avancer suivant cinq axes distincts de manière simultanée :

- le déploiement accéléré des motorisations et des carburants « neutres en carbone », indispensable pour atteindre la neutralité carbone ;
- la mise au point de motorisations et de carburants similaires pour les poids lourds (les premiers prototypes électriques ou hydrogène apparaissent), pour les avions (la filière industrielle du biokérosène est à développer et les recherches sur les avions électriques (à courte distance) et hydrogène à mener) ainsi que pour le maritime (les différents types de carburants et de motorisations neutres en carbone doivent être expérimentés) ;
- la poursuite des efforts d'efficacité énergétique pour réduire les émissions durant la période de transition et pour diminuer la facture énergétique du consommateur ;

- la réduction des émissions de la fabrication des véhicules et de leurs batteries qui devrait devenir au-delà de 2040 le facteur essentiel de l'empreinte suppose la mise en place (si possible à court terme) d'une méthodologie de calcul de ces émissions, l'affichage de leurs résultats, la définition d'objectifs de réduction (européens de préférence) et la prise en compte de ces valeurs dans un certain nombre de leviers économiques (bonus/malus en particulier) ;
- la réduction des émissions liées à la mise en place et à l'entretien des infrastructures.

Certains considèreront la perspective de la neutralité carbone comme irréaliste. Le constat d'échec, évoqué plus haut, montre en effet que les réductions envisagées ne se concrétisent pas forcément. Vouloir, malgré tout, les réaliser suppose de mettre en place une régulation et des leviers économiques adaptés - et, si possible, pérennes dans le temps - qui soient acceptés de la part des Français.

La définition d'une trajectoire de référence du signal prix carbone pour l'ensemble de l'économie est une boussole nécessaire pour guider l'action des pouvoirs publics et des acteurs privés avec comme corollaire la nécessité de calculer, dans une approche socioéconomique, le coût de la tonne de CO_2 évitée pour les différents projets envisagés et de privilégier ceux pour lesquels cette valeur est la plus faible. Compte tenu de l'acceptation incertaine par la population de toute taxe nouvelle ou de l'alourdissement des taxes existantes, la transition sera vraisemblablement orchestrée non pas par un seul outil économique traduisant ce signal prix du carbone dans l'économie, mais par une palette de leviers économiques (et réglementaires), principalement les normes européennes sur les émissions des véhicules et les dates fixant l'interdiction de vente de véhicules neufs émetteurs de gaz à effet de serre, mais aussi l'instauration des zones à faibles émissions, les ZFE, le bonus/malus, le suramortissement pour les véhicules professionnels, la prime à la casse… L'augmentation de la contribution climat énergie ou la mise en place, comme la Commission européenne le propose, d'un marché de quotas propre aux transports et au chauffage, n'est probablement pas indispensable pour atteindre à terme la neutralité carbone du parc puisque les mesures précédentes devraient mener progressivement à l'interdiction de la vente des véhicules thermiques émetteurs de gaz à effet de serre d'origine fossile. Elle devrait cependant permettre de limiter les émissions durant la phase de transition et d'accélérer le passage à des véhicules décarbonés : elle rencontrera un degré d'acceptation d'autant plus important que les alternatives au véhicule thermique deviendront crédibles pour une grande majorité des usages et se seront largement diffusées.

Cette multiplicité de leviers économiques pose le problème de la visibilité (et de la crédibilité) de long terme du signal prix et nécessite un pilotage fin, d'autant plus difficile que ces leviers seront décidés à des niveaux différents : international (OMI, OACI, CCNUCC), européen, national, local. L'accompagnement industriel de cette transformation et les mesures redistributives à mettre en œuvre constituent bien entendu un élément clef de réussite de cette transformation : il faut en prendre conscience et les étudier de façon à en minimiser les effets.

∴
∴ ∴ ∴

Le lecteur pressé pourra se contenter de ce résumé ou des 50 premières pages de ce rapport (en particulier du chapitre 4, les chapitres deux et trois présentant la démarche

d'ensemble de l'exercice de prospective et dressant le constat de l'augmentation des émissions depuis 1990) : s'il dispose de plus de temps, les raisonnements sous-jacents sont explicités dans les annexes.

Les noms des participants et des intervenants dans ce groupe de travail figurent en annexe 2 de ce rapport. Leurs apports ont été notables. Ce rapport n'aurait pu être rédigé sans eux, même si les erreurs qu'il contient ne sauraient leur être imputées. Qu'ils en soient ici remerciés.

Un remerciement particulier s'adresse à l'IFPEN qui a accepté de partager avec le groupe de travail les données des ACV qu'il a établies pour son rapport sur l'Analyse du cycle de vie (ACV) des véhicules fonctionnant au GNV et bioGNV[1], à Lucinda Dinis da Silva, Marie André-Verhaeghe, les assistantes de la section Mobilité Transport du CGEDD, à la cellule de communication du CGEDD, ainsi qu'à ceux qui ont accepté de relire ce document dans sa version projet et dont les commentaires ont été précieux : Jean-Pierre Hauet (Connaissance des énergies), Denis Huneau (CGEDD), Stéphane Kaba (SpeedInnov), Servan Lacire (Bouygues Énergies Nouvelles), Marc Lejeune (Renault Trucks), Jean-Marc Moulinier (CGDD), Maxime Sagot et Christelle Werquin (France Hydrogène), Paul-Hervé Tamokoue Kamga (Haut Conseil pour le climat), Cyprien Ternel et Jean-Christophe Viguié (IFPEN).

[1] *Analyse du cycle de vie (ACV) des véhicules fonctionnant au GNV et bioGNV,* Anne Bouter, Joris Melgar, Cyprien Ternel IFPEN, septembre 2019, https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/analyse-du-cycle-vie-acv-des-vehicules-fonctionnant-au-gnv-et-biognv

Sommaire

Résumé **3**

1 Introduction du rapport du groupe de travail relatif à la décarbonation des motorisations **8**

2 La démarche d'ensemble de l'exercice de prospective 2040-2060 des mobilités **13**

2.1 Les raisons d'un nouvel exercice de prospective des transports 13

2.2 Tenir compte des incertitudes et des risques liés à l'évolution des technologies et des comportements 17

2.3 La prospective 2040-2060 18

3 La réduction des émissions de gaz à effet de serre du secteur du transport n'est pas sur la bonne tendance **28**

3.1 Du facteur 4 à la neutralité carbone : un changement de paradigme 28

3.2 Les émissions françaises de gaz à effet de serre du secteur des transports sont toujours en 2018 supérieures à celles de 1990 29

3.3 Les effets non-CO_2 de l'aviation sont à prendre en compte 32

3.4 L'empreinte environnementale des émissions de gaz à effet de serre de la France a augmenté de 1995 à 2019 et serait d'environ 70 % supérieure aux émissions territoriales 34

4 L'évolution des motorisations et des carburants peut réduire significativement les émissions, mais cette évolution nécessite la mise en place de leviers économiques adaptés et pérennes **38**

4.1 Le recours aux énergies alternatives devrait permettre de réduire significativement les émissions de GES en ACV du secteur des transports 39

4.2 La transition énergétique ne se fera pas sans la mise en place des leviers économiques pertinents 50

4.3 Trois scénarios possibles à 2040-2060 56

Conclusion **59**

Annexes **61**

Annexe 1 : Lettre de mission **62**

Annexe 2 : Composition du groupe de travail et liste des intervenants 64

Annexe 3 : L'état des technologies 67

3.1 Les progrès considérables des batteries en dix ans devraient permettre un développement significatif de l'électricité dans les mobilités 67

3.2 Le moteur à combustion interne et ses évolutions possibles 75

3.3 L'utilisation du gaz naturel d'origine fossile devrait diminuer considérablement mais pourrait donner lieu, pour les PL et les navires, au développement du biogaz et du méthane de synthèse ainsi que, dans le maritime, à son utilisation associée à la capture du CO_2. 77

3.4 Le développement de l'hydrogène dans les transports ou le pari de la baisse des coûts rendant possible la création d'un marché de l'hydrogène 85

3.5 Les biocarburants durables peuvent être utilisés sur certaines niches et constituent aujourd'hui la solution principale pour l'aérien longue distance 103

3.6 Les carburants de synthèse : une question de coût et de disponibilité du CO_2 ! 111

3.7 Conclusion 112

Annexe 4 : Les réductions possibles d'émissions de gaz à effet de serre dans les différents secteurs du transport 113

4.1 Le mode routier : une division par quatre possible 114

4.2 L'aérien : une réduction par un facteur égal ou supérieur à deux des émissions de l'aviation à 2050 pour les vols au départs de la France est un objectif réaliste 148

4.3 Le maritime : une possible division par deux des émissions à l'horizon 2050 157

4.4 Le fluvial : un objectif de neutralité carbone à l'émission dès 2050 170

Annexe 5 : Quelques réflexions économiques sur la valeur du carbone dans le secteur du transport 174

Annexe 6 : Trois ambiances technologiques possibles et les risques associés 181

Annexe 7 : Un poids lourd électrique de 40 tonnes est-il possible ? 184

Annexe 8 : Glossaire des sigles et acronymes 196

1 Introduction du rapport du groupe de travail relatif à la décarbonation des motorisations

Dans le cadre de la démarche prospective 2040-2060 des mobilités, ce rapport présente les conclusions du groupe de travail relatif à la décarbonation des motorisations qui s'est réuni, parfois virtuellement, de janvier 2020 à juin 2021.

Le changement climatique conduit à l'adoption de nouvelles technologies décarbonées

Le changement climatique nous oblige à engager, et à mener à bien en moins d'une génération, une évolution majeure du mix énergétique dans le domaine des transports. De manière schématique, ainsi que nous l'a montré la SNBC, nous devons sortir des hydrocarbures d'origine fossile et les remplacer par les technologies décarbonées. Bonne nouvelle, les technologies décarbonées ont réalisé des progrès considérables depuis une dizaine d'années dans le monde du transport et les perspectives de réduction des émissions de gaz à effet de serre désormais possibles sont importantes. Bonne nouvelle également, dans bien des secteurs, plusieurs technologies différentes semblent désormais envisageables. Dans tous les cas cependant, le recours à des carburants ou à des systèmes de propulsion neutres en carbone apparaît indispensable. Point plus délicat cependant et à l'origine de fortes incertitudes, le déploiement de ces technologies est cependant loin d'être assuré parce que certaines d'entre elles présentent un coût économique important, mais aussi parce que l'opinion publique n'est pas forcément prête à en accepter la diffusion. Point encore plus délicat, la transition dans l'aérien et le maritime est confrontée à un certain nombre de difficultés particulières :

- première difficulté : contrairement au mode routier, il n'existe pas de solutions technologiques suffisamment matures aujourd'hui permettant d'atteindre la neutralité carbone du maritime et de l'aérien, en particulier pour les trajets longs : les solutions seront à adapter selon les différents segments de l'aérien et du maritime ;
- deuxième difficulté : la décarbonation des secteurs aérien et maritime, qui sont soumis à une forte concurrence internationale, est plus complexe à réaliser que celle d'autres secteurs d'activités économiques, car elle doit tenir compte de la compétitivité de ces secteurs et appelle des négociations aux niveaux internationaux, européens et nationaux. L'Organisation maritime internationale (OMI) et l'Organisation de l'aviation civile internationale (OACI) même si elles ont progressé ne sont pas encore parvenues, en 2021, à convaincre leurs membres d'arrêter une feuille de route contractualisée pour atteindre la neutralité carbone ;
- troisième difficulté : le degré de plus en plus pressant de l'urgence climatique conduit à renforcer régulièrement les objectifs de réduction des émissions. L'Union européenne a ainsi décidé en décembre 2020 de réduire de 15 % supplémentaires ses émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030. Or, un délai de dix ans est extrêmement court dans le secteur des transports : avant qu'une innovation technologique ne soit perceptible dans l'automobile, il faut un délai d'au moins cinq ans pour modifier les usines et de cinq à six ans supplémentaires pour que les véhicules neufs munis de cette innovation représentent une proportion significative du parc.

Les objectifs du groupe de travail relatif à la décarbonation des motorisations

Ce texte a pour objet de considérer les principales évolutions technologiques possibles des motorisations et les réductions d'émissions de GES qu'elles pourraient entraîner dans les différents modes de transport, et de donner quelques réflexions sur les leviers possibles de la transition vers un monde neutre en carbone.

De manière plus précise, le groupe de travail et ce rapport ont pour but :

- d'examiner les motorisations possibles à 2040-2060 pour les véhicules légers (VL), les véhicules utilitaires légers (VUL), les poids-lourds (PL), les navires, les bateaux, les avions et les trains et d'estimer les émissions de GES associées, si possible en analyse du cycle de vie (ACV), et en tenant compte des émissions internationales de l'aérien et du maritime ainsi que des effets non liés au CO_2 pour l'aérien ;
- d'examiner les avantages et les inconvénients de ces différentes motorisations : coût économique pour l'usager et la collectivité, rareté des ressources, impact sur l'environnement, le recyclage (en particulier pour les batteries) … Seront notamment considérés : les carburants classiques, les biocarburants, le gaz, le gaz renouvelable, les carburants synthétiques, l'électrique sous ses différentes formes de stockage et d'acheminement (batteries, hybride, hydrogène, caténaire …) ;
- de déterminer des scénarios possibles de développement de ces technologies.

La nécessité de raisonner en empreinte carbone

Dans toute la mesure du possible, les raisonnements effectués dans la suite de ce rapport le sont en termes d'empreinte carbone pour deux raisons :

- le choix des technologies de décarbonation doit correspondre à l'ensemble des émissions qui leur sont liées : comme le montre l'exemple du véhicule électrique, pour pouvoir comparer les émissions des véhicules thermiques et électriques, il est souhaitable de prendre en compte les émissions à l'amont, autrement dit dans le cycle de production, transport et raffinage du pétrole pour le véhicule thermique, ainsi que, pour le véhicule électrique, dans la fabrication et de la batterie et de la production et du transport de l'électricité. Le recyclage des batteries qui conduit à un certain nombre d'émissions mais permet de prolonger la vie des composants utilisés doit être également pris en compte dans toute la mesure du possible ;

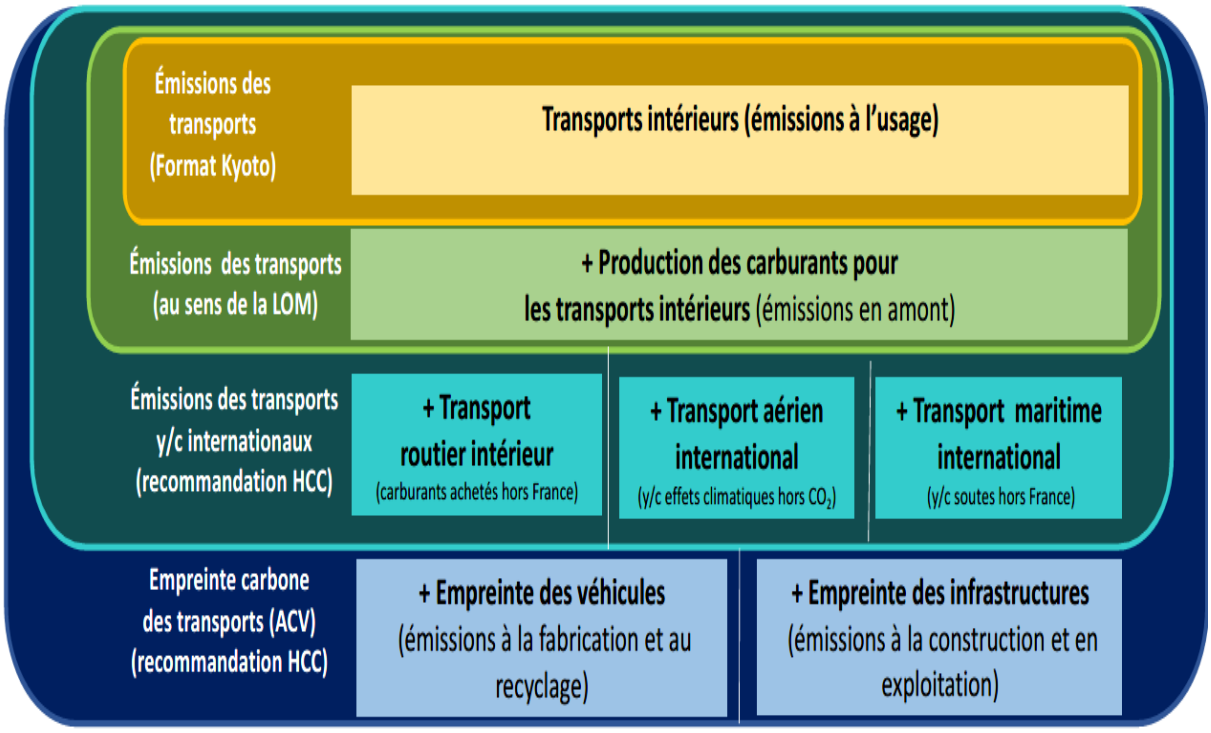


Figure 1 : Empreinte carbone complète des transports.
Source : Prospective des transports et de la mobilité, CGEDD, France stratégie

- ne pas raisonner en empreinte carbone pourrait conduire à délocaliser des activités carbonées ou à mettre en concurrence des produits fortement décarbonés (avec un certain surcoût) avec d'autres qui ne le seraient pas : seul un raisonnement en empreinte carbone permet de légitimer la fabrication (ou le recyclage) d'une batterie dans des pays dont le coût de main d'œuvre peut-être plus élevé que dans certaines parties du monde mais dont le mix électrique est décarboné. Il doit ensuite trouver sa traduction concrète dans l'économie, notamment par la mise en place d'un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières européennes (ou de normes appropriées).

Dans cette perspective, il serait souhaitable de mettre en place au niveau européen des règles de comptabilisation des émissions de gaz à effet de serre liées à la fabrication des véhicules, aéronefs, navires, bateaux, trains (et des carburants utilisés) et de rendre obligatoire l'affichage de leurs résultats lors de la vente des véhicules neufs.

La nécessité de la de neutralité carbone

L'article 4 de l'Accord de Paris prévoit l'atteinte de la neutralité carbone à l'échelle mondiale dans la seconde partie de ce siècle : « *En vue d'atteindre l'objectif de température à long terme énoncé à l'article 2, les Parties cherchent à parvenir au plafonnement mondial des émissions de gaz à effet de serre dans les meilleurs délais, étant entendu que le plafonnement prendra davantage de temps pour les pays en développement, et à opérer des réductions rapidement par la suite conformément aux meilleures données scientifiques disponibles de façon à parvenir à un équilibre entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre au cours de la deuxième moitié du siècle, sur la base de l'équité, et dans le*

contexte du développement durable et de la lutte contre la pauvreté ».

La France a donc adopté en novembre 2019 cet objectif de neutralité carbone à 2050 dans l'article premier de la loi relative à l'énergie et au climat[2] : celle-ci ajoute que cette notion conduit à diviser les émissions de gaz à effet de serre actuelles par un facteur supérieur à six. Ce même article précise la notion de neutralité carbone : « *Pour l'application du présent 1° [article], la neutralité carbone est entendue comme un équilibre, sur le territoire national, entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre, tel que mentionné à l'article 4 de l'accord de Paris ratifié le 5 octobre 2016. La comptabilisation de ces émissions et absorptions est réalisée selon les mêmes modalités que celles applicables aux inventaires nationaux de gaz à effet de serre notifiés à la Commission européenne et dans le cadre de la convention-cadre des Nations unies sur les changements climatiques, sans tenir compte des crédits internationaux de compensation carbone* ». La loi d'orientation des mobilités de décembre 2019 a adopté ce même objectif de neutralité carbone à 2050 pour les transports terrestres (entendue sur le cycle carbone de l'énergie utilisée).

Cette notion est inscrite dans la loi européenne sur le climat parue au JOUE du 9 juillet 2021[3] : « L'équilibre entre les émissions et les absorptions des gaz à effet de serre réglementées dans le droit de l'Union à l'échelle de l'Union est atteint dans l'Union d'ici à 2050 au plus tard, les émissions nettes se trouvant ainsi ramenées à zéro d'ici à cette date, et l'Union s'efforce de parvenir à des émissions négatives par la suite ». L'article 4 de la même loi précise de plus que : « Afin d'atteindre l'objectif de neutralité climatique énoncé à l'article 2, paragraphe 1, l'objectif contraignant de l'Union en matière de climat pour 2030 consiste en une réduction, dans l'Union, des émissions nettes de gaz à effet de serre (émissions après déduction des absorptions) d'au moins 55 % d'ici à 2030 par rapport aux niveaux de 1990 ».

Le présent exercice de prospective relatif au secteur des transports retient également un objectif de neutralité carbone du secteur des transports. Cette notion revêt pourtant un sens différent et correspond à une contrainte plus sévère que celle retenue dans le cadre de la loi :

i) l'exercice mené par le CGEDD prend en effet également en compte les émissions de gaz à effet de serre de l'amont pétrolier ainsi que ceux des transports maritimes et aériens internationaux au départ de la France : dans la comptabilisation actuelle de l'ONU et donc dans la loi française, ces transports ne relèvent pas des États, mais de l'OACI pour l'aérien et de l'OMI pour le maritime ;

ii) il évoque également les effets sur le climat des émissions de l'aviation autres que celles du CO_2, à savoir les émissions de NOx et de vapeur d'eau ;

iii) l'exercice utilise une comptabilisation en empreinte environnementale et s'appuie sur des analyses de cycle de vie, il prend donc en compte les émissions

[2] Loi n° 2019-1147 du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat, https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000039355955

[3] Loi européenne sur le climat, autrement appelée Règlement du Parlement européen et du Conseil établissant le cadre requis pour parvenir à la neutralité climatique et modifiant le règlement (UE) 2018/1999, JOUE 9 juillet 2021, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2021.243.01.0001.01.FRA

liées à la fabrication et au recyclage de produits finis importés ou de bien intermédiaires importés (en retirant le total correspondant aux exports). Les travaux du CGDD ont montré, comme l'illustre la figure 7, que, dans cette comptabilité, les émissions de la France étaient en 2014, avec 720 Mt CO_2e, supérieures de 66 % à celles de l'inventaire national. Ceux du Haut-Conseil pour le climat[4] présentés dans la figure 8 aboutissent à une empreinte carbone de la France en 2018 de 749 Mt CO_2e en 2018, soit 11,5 t CO_2e par habitant, empreinte supérieure d'environ 70 % plus élevée que ses émissions territoriales. Dans ce même rapport d'octobre 2020 sur la maîtrise de l'empreinte environnementale de la France, le Haut conseil pour le climat précise de plus « *qu'un objectif de réduction des émissions importées d'au moins 65 % d'ici à 2050 et de l'empreinte carbone de 80 % par rapport à 2005 permettrait de limiter le réchauffement planétaire à 1,5 °C, et permettrait à la France d'affirmer son leadership mondial* ».

La loi énergie-climat[5] de novembre 2019 demande d'ailleurs désormais au gouvernement de fixer lors de l'élaboration de la SNBC, et pour chacune des trois périodes envisagées, un plafond indicatif des émissions de gaz à effet de serre générées par les liaisons internationales de transport au départ ou à destination de la France, dénommé « budget carbone spécifique au transport international » ainsi qu'un plafond indicatif des émissions de gaz à effet de serre dénommé « empreinte carbone de la France »[6].

Les travaux menés par Alain Quinet[7] envisagent une trajectoire de la valeur tutélaire du carbone de 250 €/t CO_2 en 2030 et d'environ 500 et 750 €/t CO_2 à 2040 et 2050 pour atteindre la neutralité carbone au sens de la loi[8]. Comme la contrainte envisagée par cet exercice est plus sévère, la valeur tutélaire du carbone nécessaire pour atteindre la neutralité carbone du secteur des transports est donc plus élevée : sa traduction dans l'économie reste cependant à préciser.

[4] *Maîtriser l'empreinte carbone de la France*, Rapport du Haut-Conseil pour le climat, 6 octobre 2020, https://www.hautconseilclimat.fr/actualites/le-hcc-presente-son-rapport-maitriser-lempreinte-carbone-de-la-france/

[5] https://circulaires.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000039355955/

[6] Ce plafond est calculé en ajoutant aux budgets carbone mentionnés au même article L. 222-1 A les émissions engendrées par la production et le transport vers la France de biens et de services importés et en soustrayant celles engendrées par la production de biens et de services exportés

[7] *La valeur de l'action pour le climat*, Rapport de la Commission présidée par Alain Quinet, France stratégie, février 2019, https://www.strategie.gouv.fr/publications/de-laction-climat

[8] Il s'agit d'euros courants 2019 (autrement dit, d'une valeur courante sans tenir compte de l'inflation à partir de 2019).

2 La démarche d'ensemble de l'exercice de prospective 2040-2060 des mobilités

2.1 Les raisons d'un nouvel exercice de prospective des transports

Sans même évoquer les réflexions prospectives sur l'aménagement des territoires et de leurs transports, bien illustrées par la vision de Paul Delouvrier sur le devenir de l'Île-de-France[9], le recours à la prospective et à la compréhension de l'avenir, pour reprendre les expressions de Gaston Berger[10], ont toujours servi à éclairer le futur des transports. Le partage modal entre le rail, la route et les voie d'eau, les instruments de régulation de ce partage, la tarification routière obligatoire, le tour de rôle, les concessions et les péages, les nouvelles infrastructures à réaliser ont constamment fait l'objet de réflexions au sein du monde des transports depuis plus d'un siècle[11]. La plupart de ces questions sont toujours d'actualité : la loi d'orientation sur les mobilités est ainsi directement issue des assises de la mobilité, démarche conjuguant écoute des attentes des citoyens, des territoires, et débat des acteurs du secteur, afin de préparer une politique qui réponde aux besoins des transports du quotidien. Plusieurs éléments de « compréhension de notre avenir » amènent cependant à poser aujourd'hui différemment les termes d'une prospective des transports : l'urgence climatique, le défi des pollutions atmosphérique, l'évolution de nos comportements dans ce contexte vont sans nul doute influencer très fortement le devenir des transports, mais aussi des politiques publiques associées. De plus, ces dernières devront prendre en compte, plus que jamais, les immenses incertitudes qui pèsent aujourd'hui sur le devenir des technologies carbonées et décarbonées et sur l'évolution de comportements partagés entre la soif de déplacements toujours plus lointains et plus rapides et la nécessité de la sobriété.

2.1.1 L'urgence climatique amène à repenser le futur des transports et de la mobilité

Le premier volume du sixième rapport scientifique du GIEC, paru début août 2021 montre que les émissions de gaz à effet de serre dues aux activités humaines ont élevé les températures d'environ 1,1 °C depuis la période 1850-1900 et conclut que la température mondiale, en moyenne sur les vingt prochaines années, devrait atteindre ou franchir le seuil de +1,5 °C. Il fait valoir qu'à moins de réductions immédiates, rapides et massives des émissions de gaz à effet de serre, la limitation du réchauffement aux alentours de 1,5 °C, ou même à 2 °C, sera hors de portée[12]. Nous commençons à comprendre, ou plutôt à percevoir, à l'occasion de certains phénomènes météorologiques, que l'augmentation de température d'un à deux degrés que nous devrions connaître d'ici 2050 est loin d'être

[9] Voir notamment : https://books.openedition.org/psorbonne/2426?lang=en

[10] Gaston Berger est un philosophe et haut fonctionnaire français, connu principalement pour ses études sur Husserl et pour ses travaux sur la caractérologie et la prospective.

[11] On peut ainsi citer à titre d'exemples : le rapport J. Toutée sur la coordination des transports. Conseil national économique, mai 1932 ;

L'automobile de l'an 2000, Adrien DUFFAU, L'Expansion octobre 1971 ;

Scénarios du futur, François de Closets, 1978 et 1979 ;

Prospective de la mobilité quotidienne, Alain BIEBER, Marie-Hélène MASSOT, Jean-Pierre ORFEUI, 1993.

[12] https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2021/08/IPCC_WGI-AR6-Press-Release_fr.pdf

anodine. Elle va se traduire dans notre pays par des événements météorologiques extrêmes qui sortent de nos règles habituelles de dimensionnement et auxquels nous devons nous préparer : épisodes non seulement de canicule extrême mais également de froid polaire pouvant durer plusieurs dizaines de jours, sécheresse prolongée, pluies particulièrement intenses.

Lors du sommet pour la planète le 12 décembre 2020, le secrétaire général de l'ONU a appelé les gouvernements à déclarer l'état d'urgence climatique dans leur pays jusqu'à ce que la neutralité carbone soit atteinte, tandis que, fin 2019, l'Union européenne avec le pacte vert et la France avec la loi climat-énergie se sont engagées à atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050.

Comme le souligne le rapport de l'ONU[13] de décembre 2020, « le transport est responsable de près du quart des émissions mondiales de gaz à effet de serre et ses émissions devraient doubler d'ici 2050 ». « Mais l'humanité, [selon ce rapport], peut réduire cette augmentation en adoptant la mobilité électrique à la fois pour les particuliers et les transports publics, et en créant des espaces sûrs où les personnes pourront marcher, pédaler et utiliser d'autres formes de transports non motorisés. De telles pratiques auront également d'autres bénéfices. Ainsi, en l'absence de réduction des émissions des véhicules, la mortalité résultant de l'exposition aux gaz d'échappement dans les zones urbaines devrait augmenter de plus de 50 % d'ici 2030 ».

[13] *Rapport 2020 sur l'écart entre les besoins et les perspectives en matière de réduction des émissions*, UNEP, UNEP DTU Partnership, https://www.unenvironment.org/fr/emissions-gap-report-2020 et https://www.unep.org/interactive/six-sector-solution-climate-change/ : *« Transport is responsible for about one-quarter of all greenhouse gas emissions. The sector's emissions are set to double by 2050. But humanity can reduce that tally by up to 4.7 Gt by embracing electric vehicles, both privately and in public transit systems, and by creating safe spaces where people can walk, cycle and use other forms of non-motorized transport. Doing those things would have other benefits, as well. For instance, without action to cut vehicle emissions, deaths from exposure to exhaust fumes in urban areas are set to increase by over 50 per cent by 2030 ».*

Les prévisions d'émissions de gaz à effet de serre de la Prospective 2006 du Conseil général des ponts et chaussées : un exercice à revisiter

En 2006, le Conseil général des ponts et chaussées avait publié un rapport de prospective des transports à horizon 2050. Celui-ci traçait des futurs possibles des transports et de la mobilité, en déduisait quelques recommandations pour l'action publique et identifiait un certain nombre de points communs aux différents scénarios étudiés :

- l'impact du changement modal vers les transports collectifs urbains, les TER ou le fret ferroviaire serait assez faible dans tous les cas ;
- les TGV et l'aviation continueraient de croître, portés par la croissance des déplacements à longue distance alors que les déplacements courts stagneraient ;
- les réductions d'émissions de CO_2 des transports routiers et la moindre dépendance au pétrole variaient selon les scénarios. Les politiques menées à l'égard des véhicules et des carburants étaient appelées à jouer un rôle majeur :
  - le véhicule le plus répandu resterait polyvalent : un même véhicule serait utilisé tant pour les déplacements quotidiens que pour les départs en vacances. Le moteur thermique garderait sa prédominance. Les motorisations hybrides rechargeables se généraliseraient, permettant de diminuer les émissions de CO_2 et polluants. Les rendements énergétiques des moteurs thermiques continueraient à progresser ;
  - une incorporation croissante de biocarburants durables permettrait les réductions d'émissions dans les parcours à longue distance ; l'usage de l'électricité pour la courte distance se généraliserait ;
- le transport routier de marchandises resterait largement dominant et serait peu électrifié ; la taille des PL passerait de 40t à 44t, voire 60t dans un scénario, ce qui permettrait à la fois une baisse des émissions et une baisse des prix.

Ces dispositions cherchaient à assurer une division par trois des émissions de gaz à effet de serre des transports terrestres à l'horizon 2050, loin des objectifs actuels de division par dix de ces mêmes émissions. Depuis cette parution, une meilleure connaissance de l'évolution climatique, dont la rapidité est sans précédent dans l'histoire humaine, et la trajectoire réelle des émissions ont très sensiblement modifié la donne.

L'Union européenne a présenté en décembre 2020 sa stratégie de mobilité durable et intelligente destinée à relever le défi de la réduction de 90 % d'ici 2050 des émissions (à l'échappement) du secteur des transports : « Afin d'atteindre nos objectifs climatiques, les émissions provenant du secteur des transports doivent s'inscrire nettement à la baisse. La stratégie présentée aujourd'hui bouleversera la façon dont les personnes et les marchandises circuleront partout en Europe et permettra de combiner aisément différents

modes de transport au cours d'un même trajet. »[14]

Avec 31 % des émissions françaises, les transports sont aujourd'hui le secteur le plus émissif de gaz à effet de serre : mais, surtout, elles ne sont pas sur la bonne trajectoire, elles ont augmenté de plus de 10 % ces trente dernières années, alors que, dans les trente prochaines, nous devrions les diviser par un facteur dix. Le message de la convention citoyenne pour le climat est le même lorsqu'elle "invite les acteurs économiques à mener une action plus volontariste en faveur de la transition écologique ». En moins d'une génération, les transports et la mobilité vont devoir apprendre à se passer d'hydrocarbures d'origine fossile, y compris dans les secteurs de l'aérien et du maritime. Nous devons donc repenser le futur de nos transports.

2.1.2 La sensibilité croissante aux effets de la pollution locale renforce la nécessité de cette réflexion

Les concentrations de polluants dans les villes européennes restent préoccupantes et entraînent des conséquences sur la santé des populations, qui se chiffrent en « centaines de milliers de décès prématurés ». Plusieurs grandes villes européennes ont ainsi annoncé à court terme des limitations de circulation pour les véhicules les plus polluants, suite au scandale du *dieselgate*[15] et aux dépassements à répétition des normes européennes de qualité de l'air. La part des ventes de diesel continue de décroître en France, mais aussi dans la plupart des pays européens, au profit aujourd'hui principalement de l'essence. En juillet 2020, le Conseil d'État avait ordonné au gouvernement d'agir pour améliorer la qualité de l'air dans plusieurs zones en France, sous peine d'une astreinte de dix millions d'euros par semestre de retard.

En août 2021, le Conseil d'État a estimé que les mesures prises aujourd'hui ne permettraient pas d'améliorer la situation dans le délai le plus court possible, et a condamné l'État à payer l'astreinte de dix millions d'euros pour le premier semestre de l'année 2021[16].

Là encore, une évolution plus volontariste, qui passe par une réflexion sur le devenir de nos transports et de nos mobilités, est nécessaire.

2.1.3 Réconcilier les comportements et les modes de vie avec la nécessaire transition écologique et énergétique

Le transport ou la mobilité sont des intermédiaires économiques qui rendent possibles des consommations ou des usages. Ils ne sont donc généralement pas recherchés pour eux-mêmes. Les bénéfices que l'on en tire sont attachés à l'atteinte d'un but et non au déplacement en lui-même, dont on ne perçoit bien souvent directement que les

[14] Déclaration de Frans Timmermans, premier Vice-Président exécutif de la Commission européenne en charge du pacte vert pour l'Europe, 9 décembre 2020 *Une transformation fondamentale du secteur des transports : la Commission présente son plan en faveur d'une mobilité verte, intelligente et abordable*, Communiqué de presse de la Commission européenne, Bruxelles, le 9 décembre 2020, https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/ip_20_2329

[15] Le scandale du *dieselgate* correspond à l'utilisation par *Volkswagen*, mais aussi par un certain nombre d'autres constructeurs, de dispositifs interdits destinés à réduire les émissions polluantes de NOx lors d'essais d'homologation de véhicules diesel.

[16] https://www.conseil-etat.fr/actualites/actualites/pollution-de-l-air-le-conseil-d-etat-condamne-l-etat-a-payer-10-millions-d-euros

désagréments (émissions, bruit, temps passé, accidents, coût, etc.). Les modifier pour réduire les émissions de gaz à effet de serre ou la pollution locale suppose ainsi une évolution plus générale des pratiques de vie, et implique d'importants enjeux économiques et sociaux.

Or, l'urgence climatique appelle à des changements profonds dans nos façons de vivre, de consommer et de se déplacer, en un mot à plus de sobriété. Les tendances les plus visibles aujourd'hui, développement des *low costs* aériens ou multiplication des livraisons instantanées à domicile par exemple, révèlent plutôt une aspiration à plus de rapidité : seule une faible minorité de la population traduit ses préoccupations environnementales dans un ajustement spontané vers plus de sobriété et vers des modes de transports lents, voire du non-déplacement, ainsi que vers de nouvelles formes de mobilité grâce aux progrès numériques. Ainsi, si l'enquête « Conditions de vie et aspirations » du Crédoc[17] montre, ce qui est une source d'optimisme, que les jeunes Français délaissent de plus en plus la voiture, se tournent vers des modes de transports alternatifs (covoiturage, vélo partage, transports en commun) et sont prêts à s'impliquer dans des pratiques collaboratives, la part modale du véhicule particulier reste supérieure à 80 % et le transport aérien intérieur est le mode qui, avec une augmentation de 15 %, a le plus progressé depuis 2012[18].

De plus, la mobilité des personnes et des biens est un domaine où les tensions et attentes contradictoires sont fortes : l'histoire récente a vu des mesures engageant des transitions volontaristes buter sur de très fortes réticences. La crise des bonnets rouges qui a fait reculer le gouvernement sur l'écotaxe, puis celle des gilets jaunes qui a conduit à abandonner la trajectoire de taxation du carburant initialement envisagée, ont montré que les tentatives d'adresser des signaux économiques à des acteurs dont l'univers de choix et les motivations ne sont pas préparés à les recevoir était une impasse.

Ainsi, là encore, la réflexion est nécessaire pour réconcilier l'évolution de nos comportements non seulement avec l'urgence climatique et la réduction des pollutions locales, mais aussi avec les conséquences économiques de leur prise en compte.

2.2 Tenir compte des incertitudes et des risques liés à l'évolution des technologies et des comportements

La connaissance prospective du fonctionnement du système climatique (terre-océan-atmosphère) a notablement progressé grâce aux travaux collectifs de la communauté scientifique menés ces trente dernières années ce qui permet au premier volume du sixième rapport scientifique du GIEC d'affirmer « qu'à moins de réductions immédiates, rapides et massives des émissions de gaz à effet de serre, la limitation du réchauffement aux alentours de 1,5 °C, ou même à 2 °C, sera hors de portée ».

---

[17] *Pour protéger l'environnement, les jeunes se tournent vers des transports alternatifs et les pratiques collaboratives,* Lucie BRICE, Patricia CROUTTE et Sandra HOIBIAN, Crédoc, Avril 2018, chapitre du rapport du CGDD sur les Modes de vie et pratiques environnementales des Français, https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2018-10/thema-03-modes-vie-pratiques-environnementales-francais-b.pdf

[18] Chiffres en voyageurs kilomètres. *Bilan annuel des transports en 2019,* Ministère de la transition écologique https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/sites/default/files/2021-02/datalab_82_bilan_transports_2019_decembre2020.pdf

Mais, à l'inverse, l'évolution des technologies aussi bien que des comportements des personnes ainsi que les moyens économiques dont elles disposeront pour réaliser les mutations nécessaires restent soumis à de puissantes incertitudes. Nul ne peut dire si les motorisations à base d'énergie fossile auront laissé la place en moins d'une génération à des moteurs neutres en carbone. Nul ne peut dire quel sera le véritable avenir de l'aviation long courrier entre la persistance de l'usage du kérosène fossile, le recours massif à des biocarburants durables, qui lui permettrait de garder le design actuel des appareils, et l'espoir d'un avion hydrogène qui, sur la longue distance, pourrait ressembler à une aile volante. L'évolution des comportements est tout aussi incertaine : la recherche d'une vitesse toujours plus élevée dans les transports va-t-elle s'effacer devant les aspirations vers des modes de transports plus lents, voire du non-déplacement, et de nouvelles formes de mobilité permises par les progrès du numérique ? La personnalisation, permise par le numérique des produits dès l'usine de fabrication - même si elle est située en Chine - entraînera-t-elle une complexification de la chaîne logistique jusqu'au consommateur et une multiplication des transports ou s'intégrera-t-elle dans l'optimisation actuelle du transport de fret ? Les politiques publiques trouveront-elles les moyens de réconcilier les incitations économiques nécessaires à la transition écologique avec le refus de citoyens qui ne s'en sentent pas les moyens : « près d'un Français sur trois estime ainsi vivre dans un territoire délaissé par les pouvoirs publics »[19]. Le relatif retard pris dans la révolution numérique[20], les inégalités territoriales et de revenus, la fiscalité, les évolutions du marché du travail, la compétitivité ou encore la polarisation générationnelle sont autant de facteurs d'incertitude pour l'avenir.

Enfin, sans même évoquer le devenir incertain de la construction européenne, la situation internationale connaît, des facteurs de fragmentation du monde (poursuite et non résolution de conflits régionaux, accroissement des différentiels de développement, dont les tensions provoquent par exemple des restrictions au commerce des biens et à la liberté de circulation et des entraves aux flux migratoires) qui pourraient conduire à un monde non coopératif et à un reflux de la mondialisation. De plus les risques relatifs à l'approvisionnement énergétique et à la disponibilité de nombreuses ressources laissent craindre de nouvelles tensions géopolitiques.

2.3 La prospective 2040-2060

2.3.1 Objectifs de la démarche

Les travaux répondent à une commande de la ministre, présidente du Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD), incluse dans son programme de travail. Le CGEDD et France Stratégie se sont associés pour mener à bien cette nouvelle démarche qui a démarré en 2019.

La mobilité est ici exprimée comme un déplacement de biens ou de personnes, quels que soient les modes utilisés, les motorisations et les distances parcourues, en France ou en

[19] *Près d'un Français sur trois estime vivre dans un territoire délaissé par les pouvoirs publics,* Nelly Guisse et Sandra Hoibian, Crédoc, Octobre 2017, https://www.credoc.fr/publications/pres-dun-francais-sur-trois-estime-vivre-dans-un-territoire-delaisse-par-les-pouvoirs-publics-1

[20] Voir notamment : *5G : « La France est plombée par des grands groupes ayant du mal à engager leur transformation numérique »,* Philippe Lemoine, https://www.lemonde.fr/idees/article/2020/10/13/5g-la-france-est-plombee-par-des-grands-groupes-ayant-du-mal-a-engager-leur-transformation-numerique_6055796_3232.html

origine ou à destination de celle-ci, ou en transit (tous modes y compris air, mer et fluvial).

Cette prospective des mobilités 2040-2060 a pour objectif principal d'examiner comment la France pourrait atteindre, pour la part qui revient aux transports et à la mobilité, la neutralité carbone qu'elle ambitionne pour 2050 et, plus généralement, d'envisager le futur de nos déplacements. Cet exercice s'intéresse donc aux différents facteurs explicatifs du niveau des émissions, en particulier aux motorisations ainsi qu'aux comportements de mobilité des ménages qui dépendent eux-mêmes de leur consommation de biens et services mais aussi des conséquences de l'urbanisation sur la mobilité. Elle a pour ambition de donner des clefs de réflexion et des indications :

- sur les outils d'aide à la décision publique dans un monde de plus en plus incertain ;
- sur les inscriptions sociales et territoriales des évolutions de la mobilité ;
- et sur les articulations entre mobilité, planification urbaine et aménagement du territoire.

L'aide à la décision publique que peut apporter un exercice de prospective, dans un contexte d'incertitude, est de faire apparaître les efforts d'anticipation rendus nécessaires par les délais, souvent importants, d'obtention des effets attendus (pour éviter l'effet de mur), et inversement les risques de « fausses manœuvres » (dépenses ou actions sur des pistes qui ont de forts risques d'être rapidement ou à moyen terme obsolètes, voire qui vont à l'encontre des objectifs poursuivis). Elle peut enfin aider à discerner les leviers dont l'effet sera prépondérant et ceux qui restent mineurs et à estimer le niveau de satisfaction d'objectifs individuels et collectifs (niveau de vie, qualité de vie, efficacité économique et sociale, préservation de l'environnement) dans différents cas.

Le présent exercice cherche ainsi à faire émerger une vision partagée des conséquences d'un certain nombre de choix possibles de politique publique aux différents niveaux, des possibilités de les décentraliser, mais aussi de la gravité des conséquences et des risques associés si certains choix n'étaient pas effectués, à moyen comme à long terme.

2.3.2 Organisation des travaux

Cette démarche de prospective s'est construite en collaboration avec de nombreux acteurs, notamment des industriels et entreprises des transports, des administrations, des ONG et associations : qu'ils en soient ici remerciés.

Cinq groupes de travail thématiques ont été constitués pour mener à bien cette nouvelle prospective :

- le groupe motorisation a réalisé une revue détaillée des technologies disponibles ou envisageables et quantifié pour chacun des modes de transport les réductions possibles des émissions de gaz à effet de serre ;
- le groupe voyageurs a étudié et quantifié les différents scénarios retenus pour le transport de voyageurs ;
- le groupe marchandises a cherché à éclairer les évolutions possibles des trafics routiers, ferroviaires, fluviaux et de la logistique urbaine. Un groupe dédié a été mis en place et un rapport séparé réalisé pour le maritime et le portuaire;
- le groupe aménagement a évalué la contribution d'une politique d'aménagement

sur les émissions de CO_2 dues aux transports et à la mobilité ;

- le groupe risques et incertitudes a travaillé à « préciser ce que nous ne savons pas ».

2.3.3 Méthodologie

Jusqu'à présent, réaliser un exercice de prospective des transports, ou des mobilités, consistait généralement à prendre en compte divers scénarios de grands cadrages internationaux (évolution des échanges économiques) et macroéconomiques nationaux (évolutions de PIB) plus ou moins raffinés pour en déduire les besoins de déplacements des biens et de personnes qui en résultaient, et à analyser les mesures vertueuses susceptibles de les accompagner (internalisation des externalités) et delà décrire les conséquences qui en résultaient (notamment les besoins de services et d'infrastructures).

Dans le contexte actuel, ce n'est plus ainsi qu'il faut s'y prendre.

La méthodologie mise en œuvre relève du compromis entre deux approches :

- une approche exploratoire qui consiste classiquement à partir du contexte économique et de variables exogènes, à envisager des mesures de politique publique, à modéliser la demande qui en résulte et les parts modales, et à en analyser les conséquences ; néanmoins, la construction de ces scénarios repose sur les paramètres technologiques et comportementaux ;
- une approche normative rétrospective, dite de *backcasting*, qui commence par la définition d'un avenir souhaitable, puis fonctionne à rebours pour identifier les politiques et les programmes qui relieront cet avenir spécifié au présent.

Deux horizons principaux de temps sont proposés, mais les échéances intermédiaires 2030 et 2050 sont également analysées :

- 2040 : horizon à vingt ans, correspondant à un horizon vraisemblable de « prévisibilité » de la montée en puissance des évolutions technologiques et des comportements connus ou envisagés aujourd'hui et associée à des réseaux d'infrastructures existants ou décidés ;
- 2060 : horizon de long terme (ambition de profondeur prospective analogue à celle de l'exercice de 2006) où les scénarios sont beaucoup plus ouverts, mais encore reliés à des décisions prises aujourd'hui (infrastructures de transport, organisation des territoires, recherche et technologies…).

Afin de mener à bien cet exercice, au sein de chaque groupe, le travail a été structuré autour de scénarios, chacun étant décliné en un narratif et une simulation.

2.3.3.1 Les scénarios étudiés

Les différents scénarios sont construits autour de deux axes (voir la figure 2) :

Axe 1 : Trois ambiances technologiques possibles :

- ambiance technologique « haute » qui prévoit la mise au point de technologies bas carbone et la diffusion rapide du progrès technologique ;
- ambiance technologique « moyenne » dans laquelle les accords de Paris sont mis en

œuvre ;

- ambiance technologique « basse » caractérisée par l'absence du développement de nouvelles technologies et le délitement des accords de Paris.

Axe 2 : Trois orientations de politique de mobilité :

- « sobriété forte », politique qui limite les déplacements et dans laquelle l'aménagement urbain et du territoire minimise les émissions de gaz à effet de serre ;
- « sobriété moyenne », politique qui prolonge la tendance actuelle avec le développement des transports en commun et des véhicules propres et où l'étalement urbain est freiné mais continue de progresser ;
- « mobilité individuelle », caractérisée par l'utilisation de la voiture individuelle et le développement de comportements individualistes, conduisant notamment à une absence de limitation de l'étalement urbain.

Ces différents axes sont notamment étudiés dans les rapports thématiques motorisation, mobilité des personnes, marchandises et aménagement du territoire. Pour atteindre la neutralité carbone, des efforts supplémentaires de sobriété ont été envisagés à travers deux scénarios complémentaires dénommés « sobriété très forte » et « sobriété ultra-forte ».

2.3.3.2 Sept scénarios pour rendre compte des futurs possibles

Afin d'illustrer de manière détaillée l'approche prospective des mobilités, sept scénarios ont ensuite été construits et sont présentés dans les rapports de synthèse et transverse de l'exercice.

Cinq de ces scénarios relèvent d'une logique de *forecasting*, c'est-à-dire qu'il ne prennent pas l'objectif de neutralité carbone comme une donnée d'entrée :

- Le scénario « ambition de base » intègre l'ensemble des mesures et objectifs décidés aujourd'hui. Les progrès technologiques y sont importants et les comportements plutôt parcimonieux. C'est donc un scénario plus ambitieux qu'une prolongation des tendances actuelles.
- Les scénarios « poussée de sobriété » et « poussée de technologie » considèrent l'un davantage d'efforts en termes de sobriété et l'autre des avancées technologiques plus marquées.
- Le scénario « hypercontraint » fait l'hypothèse qu'en l'absence d'amélioration technologique probante, les contraintes d'usage sont fortement renforcées.
- Le scénario du « pire climatique » allie de faibles progrès technologique et une faible évolution des usages.

Deux autres scénarios ont été construits dans une logique de *backcasting* à partir de l'objectif de neutralité carbone « complète » en 2060, l'un jouant davantage sur les leviers technologiques (« pari technologique »), l'autre sur les leviers comportementaux (« pari sociétal »). Le scénario « pari technologique » retient les mêmes hypothèses technologiques que le scénario « poussée de technologie », mais avec davantage de sobriété. Le scénario « pari sociétal » retient les mêmes hypothèses technologiques que les scénarios « ambitions de base » et « poussée de sobriété », mais est beaucoup plus

volontariste que tous les scénarios de *forecasting* en termes de sobriété.

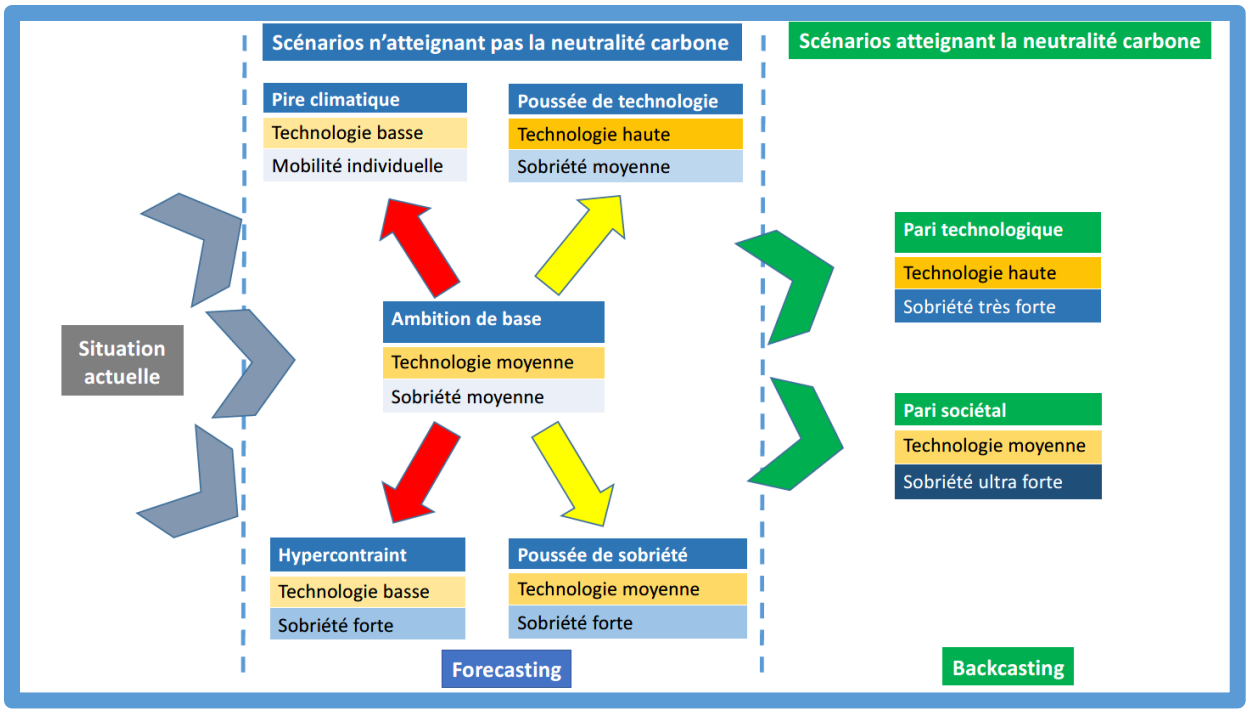


Figure 2 : les scénarios étudiés
Source : Prospective des transports et de la mobilité – CGEDD, France stratégie

2.3.4 Quelques éléments de cadrage

Les simulations de la présente prospective s'appuient sur quelques éléments communs de cadrage.

2.3.4.1 La démographie [21]

La révision récente des prévisions de long terme de l'Insee pour la population française[22] montre qu'au-delà d'une vingtaine d'années, où les effets tendanciels sont forts, des inflexions marquées de la fertilité et de l'évolution de l'espérance de vie à la naissance peuvent intervenir. Le scénario central actuel de l'Insee, paru fin novembre, cible la population française autour de 68,7 millions d'habitants en 2060, soit un niveau assez proche de l'actuel (67,4 millions en 2021) alors que la prévision antérieure, datant de 2016, était de 75,2 millions d'habitants[23] : dans ce scénario, la population atteindrait 69,3 millions d'habitants en 2044 avant de décroître progressivement. Ceci ne tient pas compte des inévitables aléas à de telles échéances sur les flux migratoires. Cette fourchette d'incertitude de l'ordre de la dizaine de millions en plus ou en moins à 2060 semble

[21] *World population prospects 2019*, ONU, https://population.un.org/wpp/Publications/

[22] *68,1 millions d'habitants en 2070 : une population un peu plus nombreuse qu'en 2021, mais plus âgée, INSEE,* https://www.insee.fr/fr/statistiques/5893969

23 Projections de population à l'horizon 2070 : Deux fois plus de personnes de 75 ans ou plus qu'en 2013, INSEE https://www.insee.fr/fr/statistiques/2496228

toutefois assez faible du fait des incertitudes sur le solde migratoire notamment dans un contexte de forte croissance démographique du continent africain, dont la population pourrait, selon les prévisions de l'ONU, augmenter de près de 90 % d'ici à 2050[24]. En outre, la population de l'espace francophone devrait connaître une croissance très forte et pourrait atteindre 700 millions d'habitants vers 2050 : une partie d'entre elle pourrait être attirée par les emplois et le niveau de vie existant en France.

Des crises économiques ou climatiques dans les pays d'origine pourraient accroître les flux migratoires, même si les pays de destination sont souvent proches des pays origine pour les trois quarts des migrants : l'Allemagne a cependant accueilli plus d'un million de réfugiés à la suite de la crise syrienne de 2015[25]. Selon la Banque mondiale[26], plus de 140 millions de personnes pourraient ainsi devenir des réfugiés climatiques d'ici 2050. D'un autre côté, les populations très pauvres migrent peu, si bien que la résorption de la très grande pauvreté dans le monde pourrait aussi être un facteur de croissance des migrations. Inversement, il peut aussi y avoir des surprises à la baisse (crise sanitaire (pouvant être amplifiée dans un contexte d'inefficacité des antibiotiques), développement d'une émigration …) amenant à s'interroger sur une fourchette d'incertitude plus forte que celle prise en compte par l'Insee.

Dans tous les cas, l'âge moyen de la population devrait être plus élevé (avec un rajeunissement possible toutefois en cas de forte immigration). En 2050, une personne sur six (contre une sur neuf aujourd'hui) devrait avoir plus de 65 ans. Les questions d'adaptation aux handicaps en tenant compte du vieillissement de la population sont aussi à considérer pour repenser les transports et la mobilité. Ces facteurs créent une incertitude supplémentaire sur le degré de vieillissement et la dynamique économique.

2.3.4.2 Le contexte macroéconomique[27]

Comme l'écrivait France stratégie avant la crise de la COVID-19, le contexte économique et institutionnel européen reste incertain. La période 2007-2016 demeurera dans les mémoires parce que la crise financière aura été l'occasion d'un basculement historique : au cours de ces dix ans, les six septièmes de la croissance mondiale sont venus des pays émergents. Pour les années à venir, dans un contexte d'incertitude élevée marqué par la faiblesse des gains de productivité et la faiblesse des taux d'intérêt réels à long terme, il paraissait raisonnable de tabler, au niveau mondial, sur une croissance voisine des 3,5 % enregistrés au cours de la dernière décennie. Cependant, fin 2019, l'OCDE constatait que le rythme de l'économie mondiale se situait plutôt autour de 3 % en raison notamment des évolutions de l'économie chinoise qui se tourne désormais plus fortement vers son marché interne. Le présent exercice conservera cette vision de la croissance, même si, comme le souligne le paragraphe ci-dessous, la crise de la COVID-19 a profondément affecté l'économie mondiale et pourrait probablement accentuer les inégalités entre les pays.

---

[24] https://www.atlas-mag.net/article/evolution-demographique-en-afrique-une-croissance-de-la-population-a-un-rythme-effrene

[25] *Angela Merkel face à la crise migratoire de 2015 : entre précautions d'usage et formules « politiquement correctes »*

Philippe Verronneau, https://doi.org/10.4000/ilcea.11997

[26] Groundswell—Preparing for Internal Climate Migration, World bank report, March 2018

[27] Le premier paragraphe provient de la note de France stratégie http://francestrategie1727.fr/thematiques/la-croissance-mondiale-d-une-decennie-a-l-autre/

En France, la hausse de la dette publique et une croissance plutôt faible réduisent les marges de manœuvre et imposent davantage d'efficience dans la dépense publique. On ne peut pas exclure, surtout dans un contexte de croissance faible et potentiellement ralentie, que cela réduise assez durablement les possibilités de l'investissement public, qui soutient une partie des investissements de transports, ou du financement de l'exploitation de services collectifs de transport.

Sur le plan économique, la transition énergétique pour atteindre la neutralité carbone va représenter des investissements massifs, des subventions publiques importantes pour favoriser la R&D et le développement des technologies bas carbone, une évolution extrêmement rapide du secteur industriel et des dépenses d'accompagnement non seulement à l'égard des industries concernées, de leurs employés, des territoires associés, mais aussi à l'égard des Français qui devront payer, de manière directe à travers des taxes ou indirecte à travers des normes, leurs émissions de CO_2. Ainsi que Jean Pisani Ferry[28] le souligne, en prenant l'exemple du secteur automobile dont les investissements, les brevets et le savoir-faire dans la fabrication des véhicules thermiques seront en partie perdus dès 2035, si le paquet *Fit for 55* de la Commission européenne, qui prévoit la fin de la vente des véhicules neufs émetteurs de gaz à effet de serre à cette date, est adopté, les conséquences macroéconomiques d'une transition énergétique - trop longtemps différée et devenue urgente - seront probablement notables sur notre croissance et nos emplois. Il est de plus probable que ces investissements publics massifs et les coûts privés (fiscalité, redevances, prix de l'énergie...) qu'ils entraîneront ne seront acceptables que dans un scénario de croissance soutenue et de dynamique positive des revenus des particuliers.

Une étude de sensibilité a été conduite, pour chacun des scénarios, selon des hypothèses haute et basse d'évolution du PIB. Elle montre que ce paramètre n'est pas le facteur d'incertitude le plus déterminant dans cet exercice prospectif. Le PIB devient le déterminant non plus tant du volume des échanges (les tests de sensibilité montrent que cela ne joue que sur 10 % à 30 % *in fine* des résultats des projections), mais principalement celui de la capacité à faire face aux mutations nécessaires :

- acquérir les outils de déplacements compatibles avec les objectifs mondiaux,
- adapter les outils industriels,
- disposer des moyens d'organiser les transferts financiers nécessaires pour assurer la faisabilité sociale).

Si les ressources financières ne parvenaient pas à être dégagées cela signifierait au mieux, si la communauté internationale et les pays leaders relevaient effectivement le défi, une relégation progressive internationale, et au pire, si la communauté internationale elle-même ne le relevait pas, des effets environnementaux délétères. Faire partie du petit peloton des pays qui seront producteurs de ces technologies est essentiel pour l'économie.

2.3.4.3 Les mutations du travail[29]

Le numérique, mais aussi les transformations de l'entreprise et l'évolution des attentes des actifs se conjuguent pour mettre en cause la prédominance de l'emploi salarié stable, à

[28] *Climate Policy is Macroeconomic Policy, and the Implications Will Be Significant*, Jean Pisani-Ferry, August 2021, Policy Brief, Peterson institute for International economics https://www.piie.com/system/files/documents/pb21-20.pdf

[29] http://francestrategie1727.fr/thematiques/nouvelles-formes-du-travail-et-de-la-protection-sociale/

plein temps et entièrement en présentiel. Intermittence, nouvelles formes de travail indépendant, poly-activité, et bien entendu télétravail, se développent. Les mêmes personnes pourront ainsi, pour certaines d'entre elles, effectuer une partie de leur travail depuis leur domicile, voire passer d'un statut à l'autre, ou cumuler plusieurs statuts. La vitesse et l'étendue de cette transformation demeurent incertaines. Dans cette vision d'un travail éclaté entre plusieurs lieux, voire plusieurs activités, la notion même des liaisons quotidiennes entre le domicile et le travail, effectuées durant les périodes de pointe du matin et du soir, pourrait s'estomper pour laisser la place à plusieurs déplacements dans la journée permettant de passer d'un lieu à un autre en fonction des horaires de chacun, voire à un habitat plus éloigné du travail et à quelques déplacements hebdomadaires.

2.3.4.4 La prospective de long terme doit tenir compte des tendances révélées par la crise sanitaire

À première vue, on pourrait penser qu'il n'y aurait pas beaucoup de liens entre l'analyse de la présente crise économique et sanitaire d'une part et une démarche de prospective des mobilités de long terme à vingt et quarante ans d'autre part, les horizons de temps des deux démarches étant a *priori* très différents. Ce serait pourtant une erreur : la crise de la COVID-19 au-delà de ses impacts sanitaires et économiques a modifié le comportement, de façon plus ou moins durable, de ceux qui y ont été confrontés et a servi de révélateur à certaines tendances de la société qui peuvent se prolonger dans le temps, en particulier le recours accru au télétravail. Elles seront développées dans le chapitre suivant.

Sur le plan économique, les prévisions de l'OCDE publiées en septembre 2021 font état d'une reprise nettement plus rapide que ce qui était anticipé un an auparavant, comme le montrent les diagrammes ci-dessous. Non seulement les économies avancées du G20 retrouveraient en 2022, grâce à la manière dont ils ont géré la crise, un rythme de croissance comparable à celui d'avant crise, mais ils effaceraient de plus la perte de croissance liée à la COVID-19.

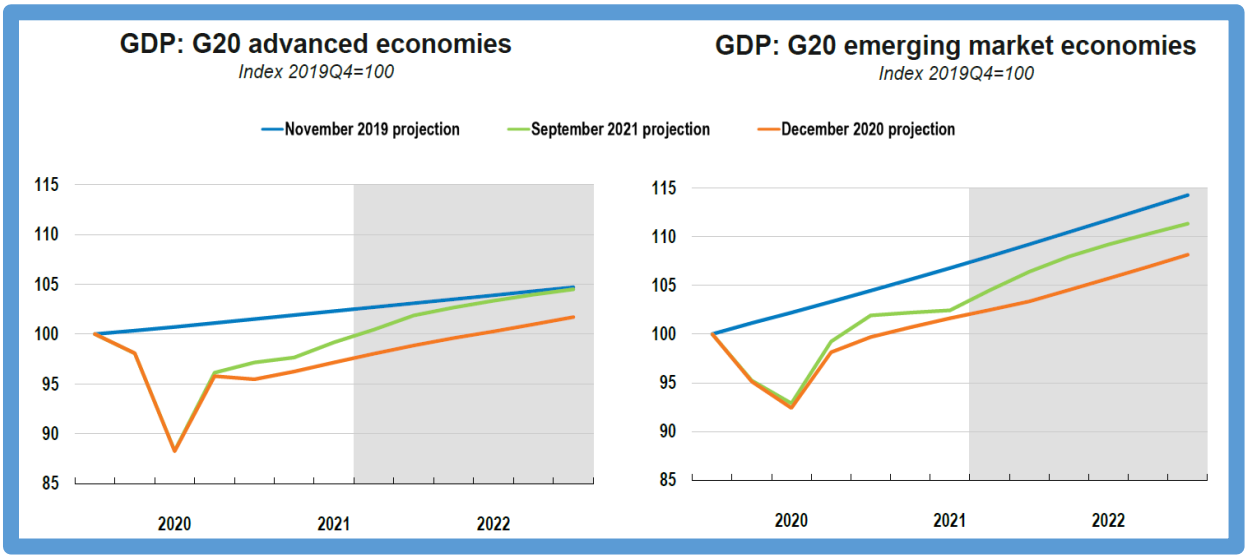


Figure 3 : Les prévisions économiques des différents pays du G20 en septembre 2021[30]

[30] *Keeping the recovery on track, OECD interim economic outlook*, 21 september 2021, Mathias Cormannand, Laurence Boone, OECD Secretary-General and OECD Chief Economist

Selon les estimations de la Banque de France datées de septembre 2021, la France devait retrouver fin 2021 son niveau de PIB de 2019, et connaître en 2022 une année de forte croissance (qui pourrait être voisine de 4 %), avant de revenir vers une rythme d'évolution plus proche de son sentier de croissance potentiel.

À l'inverse, les pays émergents du G20 n'arriveraient pas à compenser la croissance perdue durant la crise de la COVID-19. De plus, le taux de vaccination inégal suivant les pays, les tendances inflationnistes, les dettes élevées d'un certain nombre de pays sont susceptibles de compromettre cette reprise. L'économie mondiale post-crise risque donc d'accentuer encore plus fortement qu'auparavant les écarts entre les pays riches, notamment entre les États-Unis dopés par leur plan de relance, et d'autres, moins fortunés, d'Amérique du sud et d'Afrique subsaharienne notamment, qui n'auront pas retrouvé en 2022 leur niveau de PIB/habitant de 2019[31]. Dans ce contexte, il paraît donc raisonnable de prendre pour cet exercice, une croissance économique de notre pays quasi-équivalente à celle qui prévalait avant la crise.

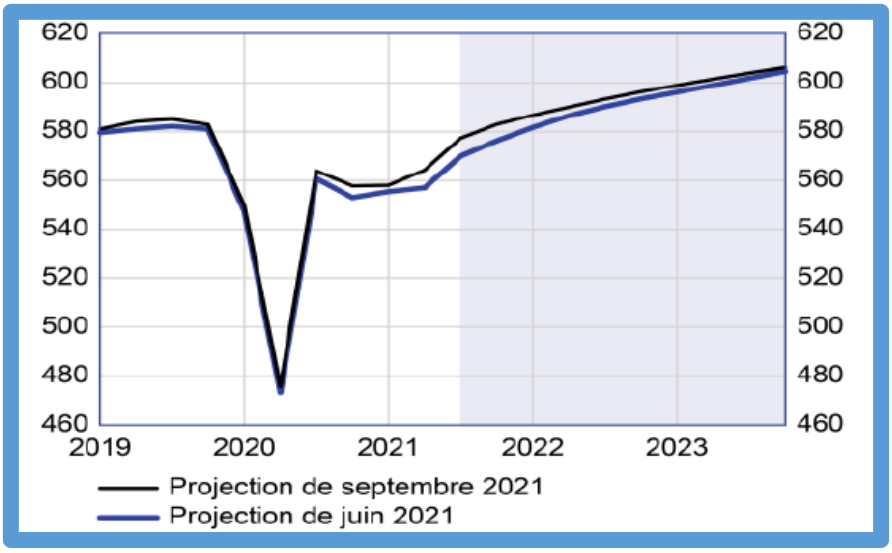


Figure 4 : Niveau du PIB français réel (en volume prix chaînés en milliards d'euros 2014) Source : Insee jusqu'au 2ème semestre 2021, prévisions Banque de France au-delà[32]

Cette tendance macroéconomique favorable pour les économies avancées ne doit cependant pas occulter les difficultés propres à certains secteurs : pour ne citer que deux exemples du domaine des transports, le trafic aérien a subi de lourdes pertes et n'a pas encore retrouvé, à l'automne 2021, son niveau de trafic de 2019. De même, le secteur automobile connaît une reprise difficile en raison d'une baisse de la demande, de la pénurie mondiale de composants – en particulier des semi-conducteurs – ainsi que de la hausse générale des coûts des matières Plus généralement, le niveau d'emploi au deuxième trimestre 2021 est encore inférieur dans beaucoup de pays du G20 à ses valeurs du quatrième trimestre 2019, sauf en Australie et en France.

[31] Voir notamment *L'économie mondiale 2022,* CEPII, septembre 2022, http://www.cepii.fr/cepii/fr/publications/economie_mondiale.asp

[32] *Projections macroéconomiques France*, 13 septembre 2021, Banque de France, https://publications.banque-france.fr/projections-macroeconomiques-septembre-2021

Dans un contexte de fragmentation du monde par blocs régionaux et de rivalité économique exacerbée entre ceux-ci, le débat public autour de ces difficultés d'approvisionnement se tient sur le terrain de l'indépendance stratégique pour les États ou de l'efficacité des stratégies de localisation des sous-traitants pour les entreprises. Il peut conduire à des évolutions plus ou moins importantes dans les flux de marchandises. Dans un rapport de 2018[33], le forum international des transports envisage ainsiun retour à une régionalisation plus marquée de la production, grâce notamment au déploiement de l'intelligence artificielle et de l'automatisation des usines, ce qui conduit à une augmentation du commerce intra-régional et à une diminution du trafic international d'environ 20 %.

[33] *Decarbonising Maritime Transport Pathways to zero-carbon shipping by 2035*, International forum transport, 2018, https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/decarbonising-maritime-transport.pdf

3 La réduction des émissions de gaz à effet de serre du secteur du transport n'est pas sur la bonne tendance

En France, le secteur des transports est le seul dont les émissions de gaz à effet de serre sont supérieures en 2019 à celles de 1990. Les efforts réalisés jusqu'à présent ont réussi à découpler la courbe des émissions de ce secteur de celle du PIB, mais ils n'ont pas réussi à l'infléchir sensiblement à la baisse. Cette situation est d'autant plus problématique qu'au décompte traditionnel des émissions de gaz à effet de serre du secteur des transports, devraient logiquement s'ajouter les émissions de l'aérien international, qui ont quasiment doublé de 1990 à 2018 ainsi que celles du maritime international. Les effets sur le climat des émissions de la vapeur d'eau du secteur aérien ainsi que des traînées de condensation et des cirrus induits, supérieurs (en termes de forçage radiatif) à ceux du carbone émis par ce secteur depuis ses débuts, ne peuvent pas non plus être négligés. Il devient donc désormais nécessaire de réduire l'ensemble de ces émissions beaucoup plus rapidement que par le passé si nous voulons être au rendez-vous de l'Accord de Paris.

3.1 Du facteur 4 à la neutralité carbone : un changement de paradigme

L'inscription dans les lois française[34] et européenne[35] de la neutralité carbone à l'horizon 2050 est loin d'être anodine. D'un point de vue purement quantitatif, il s'agit, pour la France, de remplacer la division par quatre d'ici 2050 (par rapport à 1990) de nos émissions de gaz à effet de serre par un facteur supérieur à six. Mais, en rester à cette considération purement arithmétique serait une erreur, ce changement traduit une évolution beaucoup plus fondamentale de notre manière de concevoir la lutte contre le changement climatique : compte-tenu des émissions difficilement réductibles de notre secteur agricole, il s'agit désormais d'aboutir à des émissions nulles ou quasi-nulles du secteur énergétique. Autrement dit, il convient de « sortir » dans toute la mesure du possible des hydrocarbures fossiles qui constituent le fondement de notre socle énergétique actuel. Il s'agit donc bien d'apprendre à se passer certes du charbon, mais aussi du pétrole et du gaz naturel. Certes, nous pourrons continuer à utiliser de telles sources énergétiques si elles s'inscrivent dans un processus zéro carbone de production de biocarburants ou de gaz renouvelables, mais le pétrole et le gaz d'origine renouvelable ne devraient malheureusement être disponibles qu'en quantité limitée. La loi d'orientation des mobilités a donc fixé comme objectif : « d'atteindre, d'ici à 2050, la décarbonation complète du secteur des transports terrestres, entendue comme le cycle carbone de l'énergie utilisée ».

La déclinaison du facteur 4, autrement dit de la réduction par quatre de nos émissions à 2050, faisait la part belle à l'efficacité énergétique. Dans le secteur résidentiel tertiaire[36], il

[34] Loi énergie climat de novembre 2019

[35] Loi européenne sur le climat, autrement appelée Règlement du Parlement européen et du Conseil établissant le cadre requis pour parvenir à la neutralité climatique et modifiant le règlement (UE) 2018/1999, JOUE 9 juillet 2021, https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=uriserv:OJ.L_.2021.243.01.0001.01.FRA

[36] En France le « résidentiel-tertiaire » employé dans une approche énergétique regroupe les consommations d'énergie des ménages liées à leur résidence et les consommations du secteur tertiaire hors transport. https://fr.wikipedia.org/wiki/Secteur_r%C3%A9sidentiel

« suffisait » de renforcer l'isolation du logement et de remplacer une chaudière existante par une chaudière nettement plus performante pour atteindre ce coefficient : une chaudière au fioul ou au gaz pouvait donc être remplacée par une chaudière plus performante au fioul ou au gaz. La neutralité carbone, autrement dit le chemin vers des émissions nulles de l'énergie, ne permet plus ce type de solution : elle se traduit donc naturellement par l'idée d'interdire les chaudières au fioul et de remplacer dès que possible les chaudières à gaz par d'autres installations plus proches de la neutralité carbone. Dans la mobilité, cette réflexion conduit notamment pour les véhicules particuliers à passer d'une logique de gains en consommation de carburant au kilomètre à l'utilisation de carburants « décarbonés », tout en proposant un véhicule dont la fabrication et le recyclage présentent l'empreinte carbone la plus faible possibl..

La recherche de la neutralité carbone doit conduire de plus à une nécessaire hiérarchisation des objectifs. Les politiques énergétiques reposent classiquement sur trois piliers : la sécurité d'approvisionnement, un coût aussi bas que possible (permettant l'accès à l'énergie dans des conditions acceptables) et une énergie décarbonée et dépolluée (pour lutter contre le changement climatique et la pollution locale). Le développement de l'efficacité énergétique aussi bien que le développement des énergies renouvelables ne figurent pas dans cette énumération : ce sont des moyens au service des objectifs qui précèdent.

Comme nous venons de le voir, la loi de 2005 et le Grenelle de l'environnement ont implicitement admis l'idée selon laquelle il suffisait pour atteindre le facteur 4 d'améliorer l'efficacité énergétique de chacune des énergies fossiles, fioul et gaz notamment. Dès lors que la neutralité carbone oblige au contraire à sortir du charbon, puis du fioul, puis du gaz d'origine fossile, la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la sortie des hydrocarbures d'origine fossile doivent devenir la priorité principale des politiques de réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le domaine des transports. Même si elle ne suffit pas à atteindre la neutralité carbone, l'efficacité énergétique doit être cependant poursuivie avec détermination : elle permet en particulier dans la phase de transition précédant la neutralité carbone de réduire les émissions de gaz à effet de serre. De plus, en réduisant la consommation énergétique de certains usages, elle permet de diminuer le coût nécessaire d'utilisation des technologies décarbonées correspondantes et donc de la transition énergétique.

3.2 Les émissions françaises de gaz à effet de serre du secteur des transports sont toujours en 2018 supérieures à celles de 1990

Tandis que les émissions nationales ont baissé de près de 19 % de 1995 à 2018, celles du secteur des transports ont augmenté de 10 %. Ainsi que le souligne le rapport 2019 de la Commission des Comptes des Transports de la Nation (CCTN) et le graphique ci-dessous, le transport est le plus gros contributeur avec 30 % des émissions de gaz à effet de serre nationales en 2018 (GES) alors qu'il n'en représentait que 22,7 % en 1990. Entre 1992 et 2017, les émissions de GES des transports ont augmenté de 0,4 % en moyenne annuelle, avec une stabilisation de 2010 à 2018. Elles sont dominées très largement par celles du domaine routier qui dans un format purement national représentaient 94 % des émissions des transports en 2017.

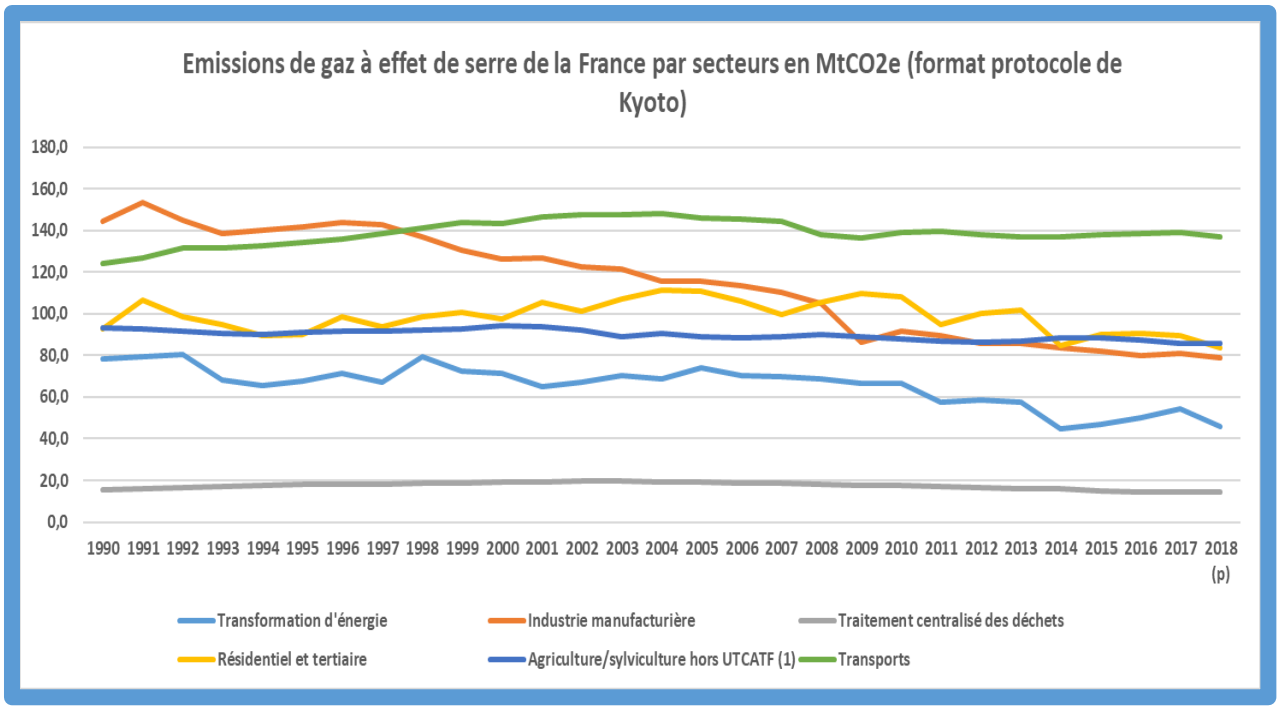


Figure 5 : Émissions de gaz à effet de serre de la France depuis 1990 dans le format dit du protocole de Kyoto. Source : données CCTN, mise en forme CGEDD

Le tableau ci-dessous montre que, si l'on ajoute l'aérien et le maritime international, comme le préconise le Haut conseil pour le climat, les émissions françaises du transport représentent, en 2017, 33,2 % des émissions de gaz à effet de serre nationales (contre 24,9 % en 1990) et ont augmenté en valeur absolue de 15 % (soit 21,3 Mt CO_2) : elles ne sont donc pas à l'évidence sur la bonne trajectoire pour atteindre la neutralité carbone.

Emissions (MtCO2)	1990	2000	2010	2017
Transports	**140,7**	**167,4**	**163,2**	**162,0**
Route	116,3	133,8	131,6	131,2
Fer	1,1	0,8	0,6	0,4
Fluvial	0,8	1,0	1,2	1,2
Maritime (y compris international)	9,6	11,2	9,1	6,7
Aérien (y compris international)	12,9	20,7	20,8	22,4
TOTAL hors UTCATF (avec aérien et maritime internationaux)	**564,4**	**576,5**	**535,9**	**487,5**
Part des transport dans le total (%)	24,9%	29,0%	30,5%	33,2%

Tableau 1 : Émissions de GES de la France incluant l'aérien et le maritime international. Source : CCTN[37], Calculs CGEDD

Dans ce tableau, les émissions de l'aérien et du maritime international correspondent aux ventes de carburants sur le territoire français d'appareils ou de navires partant de France et se rendant dans un pays étranger. Les travaux menés dans le cadre du groupe de travail

[37] Données 2018 : https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-comptes-des-transports-en-2018-56e-rapport-de-la-commission-des-comptes-des-transports-de-la

sur les marchandises ont conduit à une ré-estimation des émissions du maritime international pour tenir compte des soutages à l'étranger[38] : ils montrent ainsi que les émissions du maritime international et domestique seraient voisines de 13,8 Mt CO_2e et correspondraient ainsi quasiment au double des émissions provenant des carburants achetés en France en 2017, soit 6,7 Mt CO_2e.

Quatre raisons sont principalement à l'origine de cette augmentation :

- malgré les progrès techniques réalisés, les émissions de GES des véhicules particuliers ont connu une très légère hausse de 1990 à 2017 (+ 4,8 Mt CO_2) : outre l'augmentation de la demande (qui a augmenté de plus de 25 % de 1990 à 2018), l'une des explications de cette tendance provient de l'écart croissant entre la courbe des émissions des véhicules neufs lors de l'homologation et celle des émissions réelles, comme l'indique Nicolas Meilhan dans sa note d'analyse pour France stratégie de novembre 2019[39]. L'essentiel de la baisse constatée lors de l'homologation des véhicules de 2001 à 2017 ne s'est pas traduite dans les émissions réelles des véhicules en circulation. « Entre 2001 et 2017, les émissions de CO_2 des voitures neuves mesurées en laboratoire, lors des tests d'homologation, ont baissé de 30 %. Mais, en conditions de conduite réelle, elles n'ont diminué que de 10 % ». L'évolution, défavorable, des silhouettes des VL vers des formes de type SUV, avec une large surface frontale et un poids plus important que les compactes qu'ils remplacent[40], y concourt également : ces silhouettes représentent désormais 40 % des ventes en 2020 ;
- les émissions des poids lourds ont augmenté très légèrement de 1,8 Mt CO_2, ce qui pourrait apparaître comme un résultat en soi très positif puisque le transport de marchandises en t.km a augmenté sur la même période de près de 60 %. Un meilleur remplissage (20 %), l'adjonction de biocarburants dans le gazole (environ 7 %) et la baisse de la consommation énergétique unitaire (10 %) ont permis de limiter la hausse des émissions à 5 %. Ce chiffre ne prend cependant pas en compte une partie des émissions du transport international de marchandises, qui, profitant de la perte de compétitivité du pavillon français, représente désormais 40 % du trafic total en t.km et qui s'approvisionne pour une large part à l'étranger. L'augmentation des émissions des poids lourds, chiffrée à 0,7 Mt CO_2 sur la période, est donc probablement sous-estimée ;
- les émissions des VUL ont par contre augmenté de 7,4 Mt CO_{2e} ; de 1990 à 2017, le trafic VUL en Mt.km a connu un accroissement de près de 70 % ;
- enfin, l'aérien international a connu une forte hausse de 8,4 Mt CO_2e en 1990 à 17,4 Mt CO_2e principalement en raison de l'augmentation du trafic[41] : la diminution de 25 % des émissions unitaires (en kg de CO_2 par passagers équivalents-kilomètres-transportés[42]) observée de 2000 à 2018 n'a donc pas suffi à contenir la hausse des

[38] Qui sont alors effectués à un coût moins élevé.

[39] https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-na78-2019-emissions-voitures-meilhan-20juin-bat.pdf

[40] Même si pour certains SUV, le poids est proche du monospace qu'ils remplacent.

[41] Tandis que les émissions de l'aérien domestique restaient quasiment stables : 5 Mt CO_2e en 2017 contre 4,5 Mt CO_2e en 2010.

[42] L'unité employée est le "passager-équivalent-kilomètre-transporté" (PKTeq), avec l'équivalence 100 kg de fret ou de poste = 1 passager.

émissions. À l'inverse, la baisse des émissions du maritime international s'explique pour partie par les améliorations d'efficacité énergétique mises en place depuis le début des années 2010, réduction de vitesse notamment, mais surtout par le prix plus attractif des soutes dans certains ports étrangers, conduisant les navires à réduire leurs approvisionnements dans les ports français : de fait, si on prend en compte les soutages à l'étranger, les émissions françaises du maritime international seraient voisines de 13,8 Mt CO_2e, et seraient en hausse par rapport à 1990 (9,6 Mt CO_2e).

3.3 Les effets non-CO_2 de l'aviation sont à prendre en compte

L'influence sur le climat de l'aviation provient essentiellement de trois effets[43] : i) les émissions de CO_2, ii) les émissions d'oxydes d'azote notés NOx et iii) le forçage radiatif effectif résultant des traînées de condensation et des cirrus induits. Les particules de soufre et de suie émises par l'aérien ont un effet plus faible comme le montrent les valeurs de la figure 6.

L'indicateur des émissions de CO_2 équivalentes ne permet pas de rendre compte de tous les effets de l'aérien sur le climat. Ceux-ci nécessitent de recourir aux notions supplémentaire de bilan radiatif et de forçage radiatif effectif qui traduisent de façon plus intuitive l'effet de serre. Le bilan radiatif, exprimé en W/m^2, correspond au flux d'énergie reçu par le système terrestre mesuré au sommet de la troposphère : c'est la différence entre le flux énergétique de la lumière en provenance du soleil et celui renvoyé par le système terrestre principalement sous forme d'infrarouges. L'effet de serre résulte de l'accumulation dans l'atmosphère d'un certain nombre de gaz, dits gaz à effet de serre, qui vont laisser passer (plus ou moins) la lumière du soleil tout en renvoyant une partie du rayonnement infrarouge émis par la surface de la terre vers le sol et en contribuant ainsi au réchauffement de l'atmosphère. Cet effet peut ainsi être mesuré en termes de forçage radiatif, qui peut être défini comme l'évolution du bilan radiatif entre fin du XVIII^{ème} siècle et aujourd'hui, autrement dit au supplément d'énergie renvoyé vers la surface terrestre. Dans cette unité, les émissions du secteur aérien mondial représentaient, en 2011, un forçage radiatif effectif d'environ 88,4 mW/m^2 [27 - 149], soit 4 % du forçage radiatif anthropique effectif, dont la valeur moyenne était estimée à 2,29 W/m^2 [1,13 – 3,33 W/m^2]. Après un pic à 3 W/m^2 en milieu de siècle, le scénario du GIEC RCP 2,6[44] repose ainsi sur une valeur du forçage radiatif anthropique de la planète (au sommet de la troposphère) par rapport à 1750 qui atteindrait une valeur de 2,6 W/m^2 en 2100. En première approximation, un forçage radiatif effectif de 1 W/m^2 peut être associé sur le long terme à une augmentation de température de 0,8 °C[45].

[43] Les traînées aérodynamiques constituent des effets négligeables en comparaison des précédents.

[44] Ainsi que le souligne le rapport de l'Université de Cambrige synthétisant les travaux du premier groupe de travail du cinquième rapport du GIEC, le futur, représenté au moyen de différents scénarios, dits RCP (*Representative concentrations pathways*), dépendra des actions menées pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Dans le scénario dit RCP 2,6, la température ne dépasserait pas 1,5 °C en fin de siècle. https://www.cisl.cam.ac.uk/business-action/low-carbon-transformation/ipcc-climate-science-business-briefings/translations/pdfs/French/science-report-briefing-print-fr.pdf

[45] Cette relation est valable à l'échelle du système terrestre : elle n'est donc pas valable pour une augmentation locale du facteur radiatif.

Une publication plus récente de Lee et al.[46] actualise le bilan des effets du secteur aérien mondial sur le climat : dans ce nouveau calcul, présenté dans la figure 6, le forçage radiatif effectif du secteur aérien serait d'environ 100,9 [55 - 145] mW/m^2 pour l'année 2018, dont 57,4 [17 - 98] mW/m^2 provenant des émissions de vapeur d'eau et des cirrus induits et 34,3 [28 - 40] mW/m^2 de l'ensemble du carbone accumulé dans l'atmosphère et dû aux émissions du secteur aérien. Ces valeurs sont reprises dans le premier volume du sixième rapport scientifique du GIEC qui en souligne, conformément aux indications de l'article de Lee et al., les incertitudes : le degré de confiance accordée à la valeur du forçage radiatif effectif des émissions de vapeur d'eau et des cirrus induits est considéré comme faible.

La combustion (incomplète) des moteurs d'avions va produire de la vapeur d'eau, des oxydes de soufre et des particules. Dans une atmosphère saturée en humidité, la vapeur d'eau présente dans les émissions (mais aussi dans l'air ambiant) se transforme au contact des particules de suie et de soufre en gouttelettes d'eau, qui, dans des conditions de température (inférieure à – 40 °C) et de pression (vol à plus de 8000 mètres) spécifiques, peuvent d'abord se sublimer en particules de glace, puis donner lieu aux traînées aériennes que l'on voit dans le ciel, et enfin se transformer en cirrus présents dans la partie haute de la troposphère. Contrairement aux nuages bas présents dans le ciel qui ont un effet refroidissant, les cirrus sont beaucoup plus transparents à la lumière et conduisent à un effet réchauffant significatif. Dans un bilan énergétique sur une journée, les nuages bas vont avoir tendance généralement à réfléchir plus fortement le rayonnement du soleil vers l'espace qu'à arrêter le rayonnement infra-rouge renvoyé par la surface terrestre : ils auront donc un effet global refroidissant (même si un nuage bas dans un ciel nocturne conduit à réchauffer l'atmosphère). Au contraire, pour les cirrus aéro-induits situés dans la partie haute de la troposphère, qui sont relativement transparents à la lumière du soleil, c'est l'effet de réflexion des infrarouges qui l'emporte : ils vont donc avoir un effet global réchauffant. Au total, les traînées de condensation et les cirrus induits par l'aviation provoqueraient un facteur radiatif supplémentaire de 57 mW/m2. Comme les cirrus n'ont qu'une durée de vie de quelques heures, cet effet est essentiellement un effet de flux proportionnel au trafic aérien : si celui-ci s'arrête ou si une nouvelle technologie apparaît ne donnant pas lieu à cet effet, ce facteur disparaît.

Dans son rapport transmis au Parlement européen[47] le 1er décembre 2020 sur les effets sur le climat de l'aviation non liés au CO_2, la Commission a envisagé plusieurs mesures possibles pour les réduire. L'une d'entre elles consiste à modifier à moyen-terme (cinq à huit ans) les trajectoires des avions pour éviter les zones sursaturées en glace. Une recherche effectuée dans le cas du Japon semble montrer en effet que le déroutage vertical de quelques centaines de mètres d'une faible partie du trafic aérien (1,7 %) pourrait réduire nettement le forçage radiatif des traînées de condensation et des cirrus induits (d'environ 60 %)[48]. Une telle mesure n'est cependant envisageable que si la saturation du ciel le permet et si les émissions supplémentaires de carbone qui en résulteraient sont faibles (0,014 % dans le cas précédemment cité du ciel japonais). Une deuxième piste de solution, complémentaire

[46] *The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018,* Lee, D.S., Fahey, D.W., Skowron, A., Allen, M.R., Burkhardt, U., Chen, Q., Doherty, S.J., Freeman, S., Forster, P.M., Fuglestvedt, J., Gettelman, A., De León, R.R., Lim, L.L.,Lund, M.T., Millar, R.J., Owen, B., Penner, J.E., Pitari, G., Prather, M.J., Sausen, R., Wilcox, L.J.,// Atmospheric Environment (2020), https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834.

[47] https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-13451-2020-INIT/en/pdf

[48] *Mitigating the climate forcing of aircraft contrails by small-scale diversions and technology adoption,* Teoh, R., Schumann, U., Majumdat A., Stettler, M. E. J., Environmental Science and Technology, https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.9b05608

de la précédente et étudiée dans le rapport de l'AESA[49] relatif aux incidences de l'aviation sur le climat qui ne sont pas liées au CO_2, souligne l'intérêt d'améliorer la composition des carburants ainsi que l'efficacité des motorisations pour réduire le nombre de particules de suie sur lesquelles se forment les cristaux de glace : une réduction de 50 % des particules de suie émises pourrait ainsi réduire de 14 % le forçage radiatif des traînées de condensation et des cirrus induits[50]. Le recours à des moteurs avec un plus fort taux de dilution devrait y contribuer.

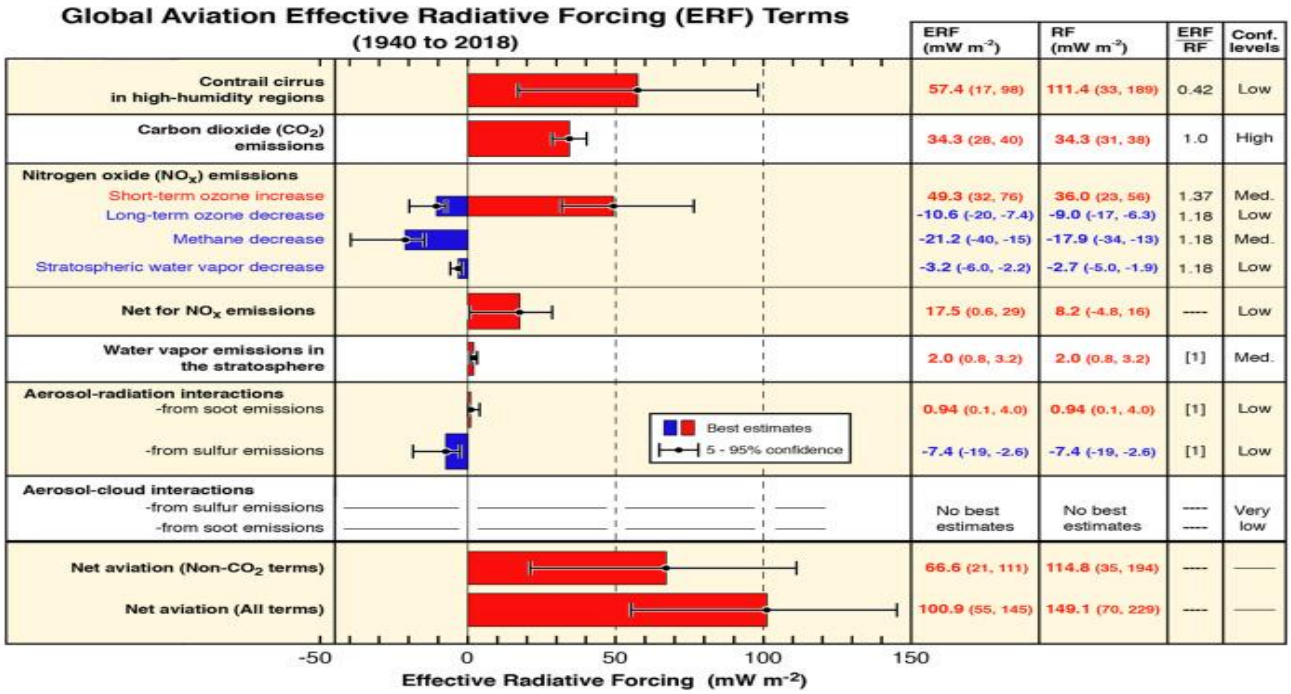


Figure 6 : Le forçage radiatif effectif du secteur aérien[51]

3.4 L'empreinte environnementale des émissions de gaz à effet de serre de la France a augmenté de 1995 à 2019 et serait d'environ 70 % supérieure aux émissions territoriales

L'introduction du véhicule électrique suppose de recourir à une métrique encore différente, celle de l'empreinte environnementale. En effet, son utilisation déplace de fait les émissions de GES de la circulation à celles de la fabrication et du recyclage de la batterie. Pour cette raison, le travail de prospective présenté ici cherche à retenir, dans toute la mesure du possible, des analyses en ACV en intégrant les émissions réalisées dans les

[49] *Updated analysis of the non-CO_2 effects of aviation*, European Union Aviation Safety Agency (EASA), https://ec.europa.eu/clima/news/updated-analysis-non-co2-effects-aviation_en

[50] L'article précise que cette réduction est moins importante dans des atmosphères déjà saturées en vapeur d'eau. *Contrail cirrus radiative forcing for future air traffic*, Lisa Bock and Ulrike Burkhardt, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen, Germany, https://acp.copernicus.org/articles/19/8163/2019/acp-19-8163-2019.html

[51] *Ibidem*

différentes phases de construction du véhicule qu'elles aient lieu, ou non, en France.

Le calcul de l'empreinte carbone d'un produit et plus généralement de la France est un exercice qui présente cependant un grand nombre d'incertitudes en raison de notre méconnaissance des processus précis de fabrication des produits dans les pays étrangers, qui oblige à recourir à des approximations. Les paragraphes ci-dessous présentent les résultats des calculs publiés par le SDES et par le Haut Conseil pour le climat.

3.4.1 Les calculs d'empreinte carbone du SDES : une approche en cours de révision

Dans cette métrique, le graphique ci-dessous réalisé par le Service de la donnée et des études statistique du ministère de la transition écologique (SDES)[52] présente les évolutions des émissions à partir du territoire et celles liées à l'empreinte carbone des Français, autrement dit à leur consommation intérieure.

Les calculs d'empreinte résultent d'un calcul détaillé pour les années 1995 à 2016 fondé notamment sur l'exploitation des tableaux entrées/sorties de la France et de l'Union européenne, et sur des estimations provisoires pour les années 2017-2019, en raison de l'indisponibilité de ces mêmes données.

Si, de 1995 à 2019, la population française a augmenté de plus de 13 % les émissions ont évolué de façon contrastée selon qu'on les mesure en émissions directes ou en empreinte carbone :

- depuis 1995, l'empreinte carbone de la France aurait augmenté de 7 % alors que les émissions nationales se sont réduites de 25 %. Cette différence s'expliquerait par une forte croissance (+ 72 %) des émissions associées aux importations ;
- dans le même temps, l'empreinte carbone par personne, qui serait légèrement inférieure à 10 t CO_2e, aurait diminué d'environ 5 %, passant de 10,4 t CO_2e/personne en 1995 à 9,9 t CO_2e/personne en 2019.

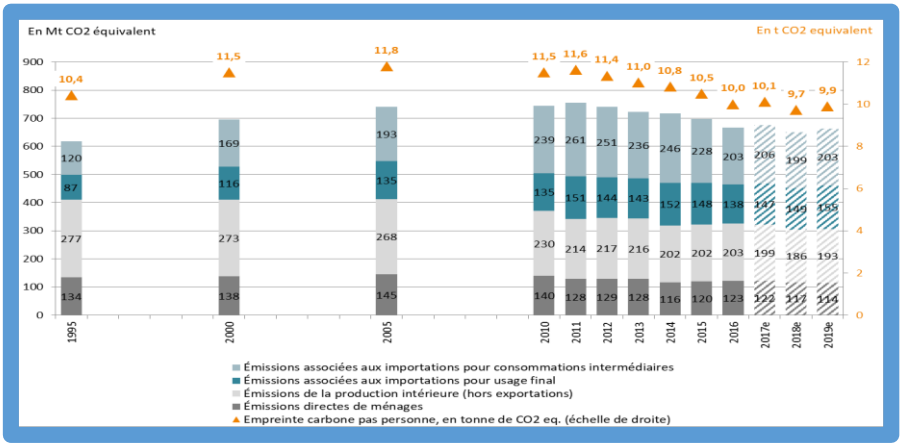


Figure 7 : L'empreinte carbone de la France, SDES, décembre 2020 [53]

52 https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lempreinte-carbone-des-francais-reste-stable?rubrique=27&dossier=1286

53 https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/estimation-de-lempreinte-carbone-de-1995-2019

Les Français ont des émissions de gaz à effet de serre inférieures à leur voisins[54], en raison notamment du développement du parc électronucléaire dans les années 80, mais aussi de la désindustrialisation de ces vingt dernières années qui explique partiellement l'écart entre les émissions de l'inventaire national et l'empreinte carbone : les émissions liées aux importations sont ainsi passées de 207 Mt CO_2e en 1995 à 356 Mt CO_2e en 2019.

3.4.2 Les calculs d'empreinte carbone du Haut-Conseil pour le climat donnent des résultats plus élevés

En octobre 2020, le Haut Conseil pour le climat a publié un rapport sur la maîtrise de l'empreinte carbone de la France [55] en demandant à l'Observatoire français de conjonctures économiques, l'OFCE, d'effectuer des calculs d'empreinte. Les résultats obtenus sont plus élevés que ceux du SDES : dans ce calcul, l'empreinte carbone de la France diminuerait depuis 2005 et se situerait actuellement autour de 745 Mt C0_2e en 2018, soit environ 11,5 tCO_2e par habitant. Avec des émissions territoriales qui s'élève à 445 Mt CO_2e en 2018 (6,7 t CO_2e par habitant), l'empreinte carbone de la France serait donc environ 70 % plus élevée que celle de ses seules émissions territoriales.

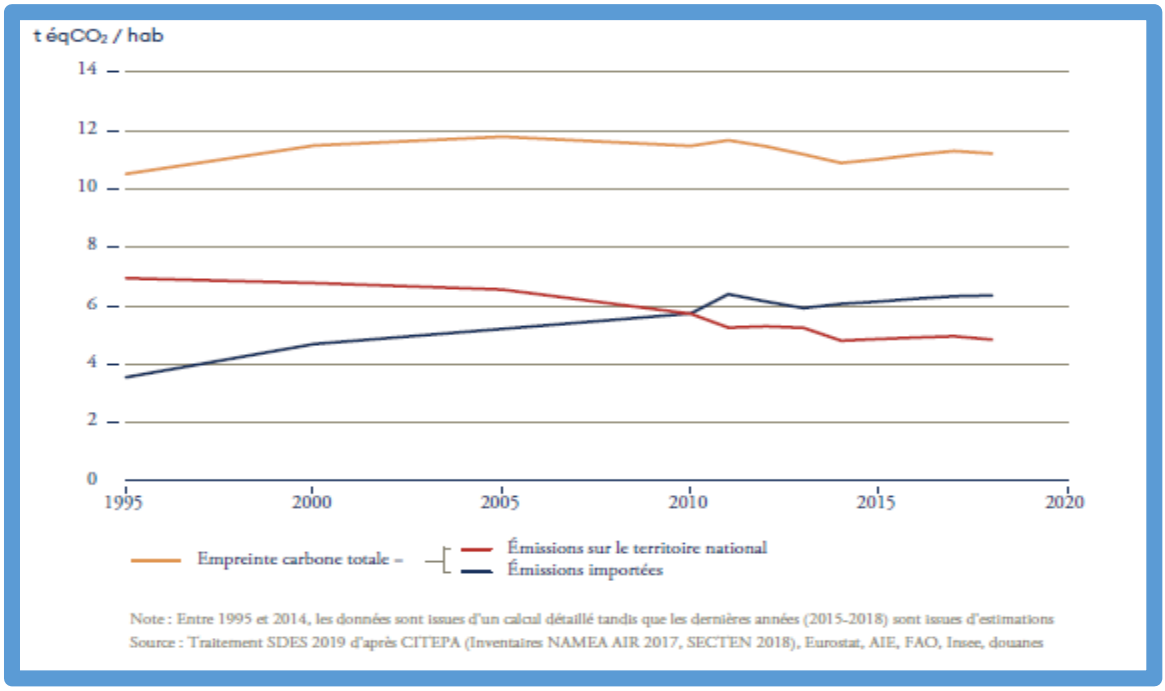


Figure 8 : L'empreinte carbone de la France, Haut Conseil pour le climat, octobre 2020

La différence principale entre les deux méthodes réside dans le choix des données utilisées pour la structure économique et les coefficients d'émissions des pays autres que la France, en particulier des pays extra-européens : l'OFCE utilise des données provenant des tableaux entrée sortie multirégionaux tandis que le SDES effectue des extrapolations à partir des données nationales ou européennes, ce qui est probablement plus éloigné de la

54 https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/les-francais-emettent-moins-de-co2-que-leurs-voisins-europeens-0?rubrique=28&dossier=1274

55 *Maîtriser l'empreinte carbone de la France*, Haut Conseil pour le climat, octobre 2020, https://www.hautconseilclimat.fr/publications/maitriser-lempreinte-carbone-de-la-france/

« réalité économique ». Le lecteur intéressé trouvera plus d'explications sur ces différentes méthodes de calcul dans le rapport du Haut Conseil pour le climat. Le SDES a annoncé qu'il procédait, dans le prolongement du rapport du Haut Conseil sur le climat d'octobre 2020, à une expertise de la méthodologie de ses calculs qui pourrait conduire à une révision de la série de l'empreinte.

Dans son rapport d'octobre 2020 sur la maîtrise de l'empreinte environnementale de la France[56], le Haut conseil pour le climat précise « qu'un objectif de réduction des émissions importées d'au moins 65 % d'ici à 2050 et de l'empreinte carbone de 80 % par rapport à 2005 permettrait de limiter le réchauffement planétaire à 1,5 °C, et permettrait à la France d'affirmer son leadership mondial ».

Il est donc souhaitable de mettre en place au niveau européen des règles de comptabilisation des émissions de gaz à effet de serre liés à la fabrication des véhicules, aéronefs, navires, bateaux, trains (et des carburants utilisés) et de rendre leur affichage obligatoire lors de la vente des véhicules neufs.

[56] *Maîtriser l'empreinte carbone de la France*, Rapport du Haut-Conseil pour le climat, 6 octobre 2020, https://www.hautconseilclimat.fr/actualites/le-hcc-presente-son-rapport-maitriser-lempreinte-carbone-de-la-france/

4 L'évolution des motorisations et des carburants peut réduire significativement les émissions, mais cette évolution nécessite la mise en place de leviers économiques adaptés et pérennes

Dans son scénario de neutralité carbone à l'horizon 2050[57], paru en mai 2021, l'Agence internationale de l'énergie envisage une baisse de la consommation pétrolière de 75 % entre aujourd'hui et 2050, l'arrêt de la vente des véhicules à combustion interne en 2035, ainsi que l'arrêt dès 2021 des décisions d'approbation des développements dans de nouveaux champs pétroliers et gaziers.

Pour atteindre cet objectif de neutralité carbone, la Commission européenne retient quant à elle un objectif de réduction des émissions à l'échappement des gaz à effet de serre du secteur des transports de 90 %. Pour autant, un tel raisonnement ne permet pas de se prononcer sur l'intérêt du remplacement des carburants d'origine fossile par des carburants neutres en carbone (électricité, hydrogène, biocarburants ...) : pour effectuer une telle comparaison, il est nécessaire de prendre en compte les émissions à l'amont du cycle pétrolier, ou à la fabrication des batteries. Le présent exercice de prospective relatif au secteur des transports retient donc également un objectif de neutralité carbone du secteur des transports, mais cette notion revêt comme nous l'avons vu dans le chapitre précédent un sens différent et correspond à une contrainte plus sévère que celle retenue dans le cadre de la loi.

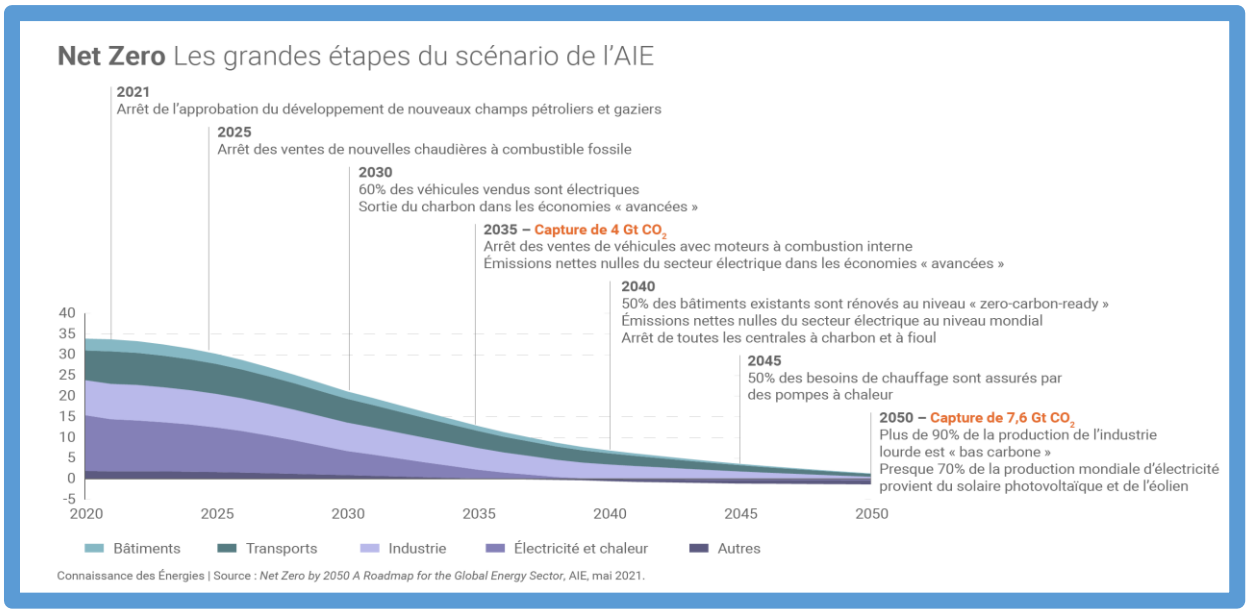


Figure 9 : Les grandes étapes du scénario de neutralité carbone à l'horizon 2050 de l'AIE. Source : Connaissance des Énergies[58] et AIE

[57] *Net Zero by 2050 A Roadmap for the Global Energy Sector,* AIE, mai 2021., https://www.iea.org/reports/net-zero-by-2050

[58] https://www.connaissancedesenergies.org/laie-detaille-les-implications-dun-scenario-de-neutralite-carbone-lhorizon-2050-210519

Le présent chapitre expose les principaux résultats des calculs d'ACV simplifiée, des différentes motorisations alternatives et des carburants associés, ceux-ci sont détaillés en annexe. Il aborde ensuite la question des leviers économiques à mettre en œuvre pour favoriser la décarbonation des motorisations et présente enfin les trois ambiances technologiques qui ont permis la construction des scénarios présentés dans les rapports de synthèse.

4.1 Le recours aux énergies alternatives devrait permettre de réduire significativement les émissions de GES en ACV du secteur des transports

Bonne nouvelle : les calculs réalisés en ACV montrent que des gains extrêmement importants sont possibles à la fois pour les véhicules légers, mais aussi pour les bus, les autocars et les poids lourds. Seconde bonne nouvelle : plusieurs technologies semblent disponibles pour atteindre des résultats comparables : hydrogène, biogaz, électricité, La mise en œuvre de chacune d'entre elles comporte cependant un certain nombre d'écueils : coût et disponibilité pour le biogaz, coût et sécurité pour l'hydrogène, pollution locale liées à la fabrication des batteries pour les véhicules électriques et naturellement disponibilités des ressources. Ces inconvénients conduisent, dans toute la mesure du possible et du raisonnable sur le plan économique à prévoir la possibilité de développer plusieurs technologies différentes.

Le tableau 2 donne une idée des gains possibles pour un véhicule neuf aux horizons 2040 ou 2060 : il suppose cependant des changements importants dans notre utilisation des technologies. Pour obtenir de tels résultats, la durée de vie des véhicules particuliers est ainsi allongée en moyenne à 300 000 km en 2060 et les émissions à la fabrication sont réduites, grâce à l'allègement du véhicule et à des procédés et des matériaux plus décarbonés, de 30 %.

Facteur de réduction par rapport à un véhicule thermique 2019	VP segment C	VUL	Bus	PL 40 t
2040	4	4,6	7	8
2060	8	8	10	10

Tableau 2 : Facteurs de réduction possibles des émissions de GES en ACV à 2040 et 2060. Source : Prospective des transports et de la mobilité. CGEDD, France stratégie

Pour les véhicules particuliers et les VUL, il semble ainsi possible de parvenir en 2040 dans une analyse en cycle de vie à des réductions des émissions de GES d'un facteur voisin de 4 non seulement pour des véhicules électriques, mais également pour des véhicules utilisant d'autres types de carburants (biogaz, biocarburants …).

Les solutions hybrides mises en avant par l'IFPEN auraient l'avantage de permettre la prolongation de vie des véhicules thermiques actuels, mais elles se heurtent à la disponibilité du biogaz ou des biocarburants, au comportement des conducteurs qui ne rechargent pas toujours la batterie de leur véhicule ainsi qu'à un coût à l'achat aujourd'hui

plus élevé. L'hydrogène devrait également avoir du mal à contester le développement du véhicule électrique en raison de son coût. Ces calculs, de même que l'état des technologies, sous-tendant ces conclusions sont présentés plus en détail dans les annexes 3 et 4 de ce rapport.

Illustration 1 : Véhicule léger électrique - Crédit : Arnaud Bouissou/Terra

À 2060, ces mêmes actions poussées encore plus loin (électricité encore plus décarbonée, durées de vie de la batterie et du véhicule portées à 300 000 km, réductions supplémentaires d'émissions à la fabrication du véhicule, meilleur recyclage de la batterie) amèneraient naturellement à des gains plus importants.

Pour que de telles évolutions puissent se produire, certains éléments sont cependant nécessaires :

- la mise à disposition de bornes de recharges (lentes et) rapides pour l'électrique en nombre suffisant est un point clef : leur absence conduirait les automobilistes à augmenter inutilement la capacité des batteries (les portant à 100 kWh, voire plus) et donc les émissions à la fabrication ;
- la recherche d'une durée de vie nettement plus importante des véhicules : dès lors que les émissions à la fabrication des véhicules représentent la part majeure, il convient, pour aller plus loin dans leur réduction, de chercher à diminuer le nombre de véhicules vendus chaque année et de prolonger fortement leur durée de vie. Cette réduction souhaitable du nombre de véhicules fabriqués, inenvisageable sur le très court terme par l'industrie automobile, doit cependant pouvoir être intégrée dans des prévisions de moyen/long terme. Dans un premier temps néanmoins, il convient, avant de chercher à prolonger la durée de vie des véhicules,

d'aller vers des motorisations utilisant des carburants alternatifs : le bonus/malus peut y contribuer largement ;

- les signaux économiques principaux doivent dès lors porter sur l'achat des véhicules et sur les émissions de carbone naturellement en circulation (pour les véhicules thermiques encore présents), mais aussi à la fabrication, ce qui conduit à mettre en avant la notion d'empreinte carbone du véhicule et à lui associer, à l'achat, le coût correspondant des externalités.

À terme, le coût et les émissions de CO_2 associés à un kilomètre supplémentaire parcouru en voiture devraient donc être nettement moins élevés qu'aujourd'hui, ce qui pourrait modifier les parts modales et entraîner un rebond du véhicule automobile.

D'un point de vue économique, le rapport de la Commission présidée par Patrick Criqui[59] sur les coûts d'abattement dans les transports montre que si le coût d'abattement associé à la mise en place d'un véhicule électrique est supérieur aujourd'hui à la valeur de l'action pour le climat, 250 €/t CO_2, ce coût devient inférieur dès 2025 pour la citadine électrique et en 2030 pour la berline électrique : « Au total, pour les véhicules particuliers, les véhicules électriques remplissent à la fois les critères de rentabilité à moyen terme et de potentiel important de décarbonation et semblent être une solution « sans regret ». [...] Cet indicateur de coût d'abattement ne permet pas vraiment de discriminer véhicules hybrides et électriques à batterie, dont la rentabilité socioéconomique advient au même horizon. Cependant, [...] dans la mesure où les véhicules hybrides induisent des émissions résiduelles incompatibles avec la décarbonation complète du transport terrestre, ils semblent appelés à ne jouer qu'un rôle transitoire dans la transformation du parc automobile. Cette considération invite notamment à limiter les efforts en faveur des motorisations hybrides afin d'éviter les effets de verrouillage ou de *lock-in.* »[60]

Les principaux poids lourds existant actuellement consomment du diesel ou du gaz naturel, biogaz ou gaz fossile. Les camions électriques, hydrogène, voire hybrides ou à caténaires sont en cours de développement. Dans ces conditions, les analyses menées ont cherché à imaginer ce que pourrait être un poids lourd, électrique ou à hydrogène, dont le poids total autorisé en charge (PTAC) serait de 40 tonnes pour pouvoir mener des calculs d'ACV. Ceux-ci ne prétendent donc pas être exacts compte tenu du grand nombre d'approximations nécessaires. Ils donnent néanmoins des ordres de grandeur suffisamment clairs et robustes pour permettre la réflexion et encourager la réalisation d'ACV parfaitement rigoureuses.

De fait si les premières réflexions en décembre 2019 du groupe de travail, et l'annexe 7 en rend compte, ont porté sur la possibilité de concevoir des poids lourds électriques de 40 tonnes en s'inspirant des annonces d'Elon Musk et de Tesla et des analyses de Transport et environnement[61], 2022 devrait voir leur matérialisation : Tesla a déployé ses premiers méga-chargeurs en 2021 et devrait livrer ses premiers exemplaires dans les prochains mois même si la production de série n'est annoncée que pour 2023 ; en Europe, la plupart des

[59] *Les coûts d'abattement, Partie 1 Méthodologie, Partie 2 Transports,* Rapport de la Commission présidée par Patrick Criqui, https://www.strategie.gouv.fr/publications/couts-dabattement

[60] https://www.strategie.gouv.fr/publications/couts-dabattement

[61] Voir en particulier : *Analysis of long haul battery electric trucks in EU : Marketplace and technology, economic, environmental, and policy perspectives.* Thomas Earl, Lucien Mathieu, Stef Cornelis, Samuel Kenny, Carlos Calvo Ambel, James Nix.

https://www.transportenvironment.org/wp-content/uploads/2021/07/20180725_T&E_Battery_Electric_Trucks_EU_FINAL.pdf

constructeurs de poids lourds ont désormais dans leur catalogue des camions électriques de 26 tonnes et des premiers poids lourds de 40 tonnes font leur apparition[62]. Hyundai, de son côté, a déjà livré plusieurs dizaines de camions hydrogène en Suisse.

Illustration 2 : Camion électrique - Crédit : Arnaud Bouissou/Terra

Une division par un facteur supérieur à quatre, voire cinq, des émissions de GES en ACV simplifiée serait envisageable dès aujourd'hui pour un PL électrique ou biogaz par rapport à un PL thermique actuel et par un facteur voisin de 2,5 à 3 pour un PL hydrogène (que le gaz soit compressé à 700 bars ou sous forme liquide). Une division par huit des émissions de GES en ACV simplifiée serait envisageable à l'horizon 2040 pour un PL électrique (avec report de 30 % des émissions de fabrication de la batterie sur sa deuxième vie et sur son recyclage) et pour un PL biogaz par rapport à un PL thermique actuel. Le facteur serait de cinq à six pour un PL hydrogène.

Une transition est ainsi possible vers une mobilité décarbonée, en particulier électrique, pour le transport de marchandises mais elle reste à venir et pose la question des stratégies industrielles (des entreprises, des territoires ou des pays). Peu de poids lourds électriques ou à hydrogène sont réellement en circulation aujourd'hui et il faudra attendre quelques années avant qu'ils ne deviennent une véritable option à l'achat. Cette transition s'appuiera d'abord vraisemblablement sur des marchés de niche, en particulier la livraison des marchandises en ville avec le passage à l'électrification des poids lourds destinés à la livraison des marchandises en ville ainsi que des poids lourds régionaux avant de concerner

[62] Voir par exemple : https://www.internationalrentalnews.com/news/avesco-uses-40t-electric-truck-for-transport/8015637.article

la longue distance : elle sera d'autant plus rapide que le prix au kWh des batteries convergera vers celui, en baisse constante, des batteries propres aux automobiles. Si les prix de l'hydrogène à la pompe sont suffisamment bas, les poids lourds hydrogène pourraient contester l'électrique, sur la longue distance, dans la période 2030-2040. Cette transition peut néanmoins peut se heurter à de nombreux obstacles : refus de l'opinion de voir se développer des batteries de grande capacité pour la mobilité électrique des poids lourds ; volonté des constructeurs actuels de continuer à vendre les modèles thermiques qu'ils ont développés ; faible déploiement des bornes de recharge rapide (80 %) d'un PL en moins d'une demi-heure ; rareté possible d'un certain nombre de matériaux en l'absence de développement de filières de recyclages ou de recours à des substituts ; choix technologiques différents entre les pays européens. À l'inverse, elle peut être accélérée par le refus des agglomérations de laisser circuler des moteurs diesel en centre-ville et par le développement des ZFE, prévu par la LOM.

Si un nombre suffisamment grand de bornes de recharge rapide pour poids lourds n'est pas déployé sur les autoroutes, les routes nationales et les principales routes interurbaines, les automobilistes et les professionnels chercheront à se prémunir contre le risque de tomber en panne et achèteront des batteries d'une taille nettement supérieure à leurs besoins : personne n'y a intérêt. Le déploiement rapide d'un réseau de recharge rapide est donc souhaitable.

Dans tous les cas, la transition sera favorisée si la Commission européenne adopte (en les annonçant suffisamment à l'avance) des standards d'émission de plus en plus rigoureux au fur et à mesure du temps, si une date pour l'arrêt de la vente des PL thermiques est annoncée (cas de la France à 2040 avec la loi portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets), si les stations ou les emplacements de recharge se développent en nombre suffisant, si les camions à énergie alternatif bénéficient de conditions économiques avantageuses (tarifs de péage adaptés (comme en Suisse), amortissement, …) et si un signal prix carbone est mis en œuvre (de préférence à l'échelle européenne).

L'autoroute électrique alimentant les véhicules par caténaires ou par le sol pourrait constituer à l'évidence une bonne solution : elle permettrait en effet de réduire la taille des batteries. Mais la technologie des caténaires n'est pas mûre pour cet usage : il ne peut donc y avoir de choix aujourd'hui d'une technique qui se déploierait dans l'Union européenne. Elle rencontre de plus un problème de financement : les transporteurs n'achèteront des PL adaptés à ce système que lorsqu'il sera déployé très largement sur les autoroutes européennes ce qui conduit, comme dans une industrie de réseau, à un financement (relativement important) à perte de l'infrastructure au départ. Par ailleurs, les caténaires peuvent être arrachées si le poids lourd quitte trop brusquement sa voie de circulation. Les solutions au sol (par induction ou par conduction), souffrent du même problème de financement et sont à un stade de maturité moins avancé, ce qui ne permet pas là encore de privilégier une technique par rapport à une autre. Sur ces deux points, le lecteur pourra consulter avec intérêt les travaux de la *Task force* mise en place par le ministère de la transition écologique sur ce sujet[63] ainsi que le rapport de *l'International*

[63] GT1 : Enjeux et stratégie, présidé par Patrick Pélata, ancien DG délégué de Renault ; GT2 : Solutions techniques, potentialités et verrous, présidé par Stéphane Levesque, directeur de l'URF ; GT3 : Expérimenter en vraie grandeur, présidé par Marc Gohlke, directeur du pôle CARA https://www.ecologie.gouv.fr/lautoroute-electrique

Council on Clean Transportation, plus connu sous la dénomination de l'ICCT[64].

Pour les bus, la situation est plus simple : les technologies sont présentes dès aujourd'hui, il est donc souhaitable de réaliser la transition dès maintenant. Les analyses en cycle de vie, notamment menées par l'IFPEN, aboutissent à des facteurs de réduction extrêmement importants à très court terme : en 2030, les bus électrique et bio-GNV représentent une diminution par un facteur supérieur à sept par rapport à leur équivalent thermique 2019. Les émissions liées à la fabrication des réservoirs et du platine pour la PAC sont notables et devraient pouvoir être réduites à l'avenir. Néanmoins, le facteur principal correspond aux émissions de l'électricité provenant du réseau.

Illustration 3 : Bus 100 % biogaz - Crédit : Arnaud Bouissou/Terra

[64] « *Roads and catenary electric-drive technologies have also been proposed as a longterm solution for the heavy-duty sector. Such projects have higher infrastructure costs and are therefore primarily considered for heavily used freight corridors (e.g., near ports or highways between major cities). Despite these high up-front investments, catenary-hybrid trucks offer low fuel and maintenance costs, and one study found them to be competitive with conventional heavy-duty Class 8 vehicles (i.e., those over 15-ton weight capacity) for near-dock drayage applications (Gladstein, Neandross & Associates, 2012). This technology, whether combined with an internal combustion engine or a limited battery system, results in lower vehicle prices compared to full electric or fuel cell heavy-duty trucks, but the primary obstacle is the construction of a catenary system (den Boer et al., 2013). Other types of "e-roads" are also under consideration, including inductive charging and conductive on-road strips. These systems could potentially lower infrastructure costs and enable use by a wider variety of vehicles and be relatively cost-effective in the future, although these technologies are generally less mature than overhead catenary systems (Connolly, 2016).* », *Transitioning to zero-emission*

Heavy-duty freight vehicles, Marissa Moultak, Nic Lutsey, Dale Hall,September 2017, *https://theicct.org/sites/default/files/publications/Zero-emission-freight-trucks_ICCT-white-paper_26092017_vF.pdf*

À 2040, la réduction des émissions devrait être encore plus importante si l'on considère la diminution progressive du contenu carbone de l'électricité, la baisse des émissions lors de la fabrication des batteries, ainsi que la prise en compte de leur recyclage et de l'allongement de leur durée de vie qui devrait permettre de n'utiliser qu'une seule batterie durant toute la durée de vie du véhicule ce qui diviserait quasiment par deux les émissions de ce poste : une division par dix des émissions de gaz à effet de serre serait alors atteignable !

Au final, il apparaît que dès aujourd'hui les gains apportés en termes d'émissions de gaz à effet de serre et de particules aboutissent à un facteur de réduction des émissions de GES supérieur à cinq, y compris pour des bus à hydrogène, ce qui devrait conduire à accélérer le déploiement de ces motorisations, même si leur coût actuel reste élevé.

La décarbonation du transport aérien nécessite de mener de front :

- les actions d'efficacité énergétique : la mise au point d'avions ultra sobres (réduction de 30 % de la consommation par rapport aux meilleurs avions d'aujourd'hui), l'amélioration des trajectoires, etc… ;
- la suppression des émissions au sol hors décollage et atterrissage ;
- le développement des carburants neutres en carbone, que ce soient la production de biocarburants durables ou les recherches sur les avions électriques (de portée régionale au plus) ou sur l'avion hydrogène.

La neutralité carbone du secteur aérien reposera à terme sur l'utilisation de carburants neutres en carbone et la mise au point d'avions zéro émission (qui bénéficieront également des recherches faites sur l'ultra sobriété) : l'utilisation de l'hydrogène liquide représente un défi passionnant et redoutable pour la recherche. Mais, si l'électrique pour des avions de petite taille régionaux, et l'hydrogène pour des avions allant jusqu'au court courrier devraient participer à la décarbonation du secteur, l'utilisation de l'hydrogène liquide pour les long-courriers nécessite un *redesign* complet de l'avion et ne sera pas disponible avant plusieurs décennies … Dans ces conditions, la seule solution actuelle pour la décarbonation de l'aviation moyen et long courrier réside dans l'utilisation de biokérosène durable.

Illustration 4 : Avion électrique E-Fan - Crédit : Arnaud Bouissou/Terra

En admettant qu'avec les améliorations technologiques prévues, il soit possible, conformément aux hypothèses de la SNBC, de limiter la consommation de kérosène à moins de neuf millions de tonnes d'ici 2050 et que la part des vols internationaux reste de l'ordre de 80 %, cela nécessiterait d'être en mesure de produire 3,6 millions de tonnes de carburants durables afin que leur proportion puisse atteindre 50 % dans le kérosène utilisé par l'ensemble des vols long-courriers. Une décarbonation totale nécessiterait le double. L'objectif est ambitieux. Il est néanmoins possible : en 2019, la France a ainsi incorporé 3,46 Mtep de biocarburants dans les véhicules terrestres. Ceci conduirait *de facto*, ainsi que l'envisage la stratégie de mobilité durable et intelligente publiée par la Commission européenne en décembre 2020, à accorder la priorité de l'usage des biocarburants au secteur l'aérien, même si, dans sa proposition de paquet *Fit for 55* de juillet 2021, la Commission exclut l'usage des biocarburants de première génération pour l'aviation.

Il est donc souhaitable de poursuivre le développement des biocarburants durables aéronautiques et d'accorder une priorité à l'usage des biocarburants dans l'aérien (y compris pour l'utilisation de la production actuelle de biocarburants de première génération en veillant à ne pas étendre leur périmètre de culture).

D'un point de vue économique, l'imposition des quotas d'incorporation de biokérosène au secteur aérien (associée à une pénalité suffisante en cas de non-respect de ces quotas) devrait permettre de mettre en œuvre cette priorité progressivement dans le temps.

Cette priorité d'usage est contestée en particulier par les constructeurs automobiles traditionnels qui voient, dans le développement massif des biocarburants avancés, un moyen de prolonger la durée de vie des véhicules thermiques actuels. Ils envisagent donc la possibilité de produire des biocarburants durables en très grande quantité afin de subvenir à la fois aux besoins des secteurs aérien et maritime, mais aussi à une demande importante du domaine routier. Le développement passé des biocarburants montre cependant que cette vision doit être considérée avec beaucoup de prudence, d'une part parce que les gisements avancés n'existent généralement que sur le papier, et, d'autre part, parce que les promesses de développement des biocarburants n'ont jusqu'ici que très rarement été tenues. Les développer en grande quantité pour répondre au besoin du transport aérien constituerait déjà une étape significative.

Cette vision de la décarbonation du secteur aérien rejoint celle du rapport publié fin 2020, *Waypoint 2050*[65] : dans celui-ci, l'industrie aéronautique envisage ainsi la possibilité d'atteindre la neutralité carbone (à l'émission) du secteur aérien en 2060 suivant différents scénarios s'appuyant soit sur un développement extrêmement important des biocarburants (cf figure 11), soit sur le développement de la technologie.

[65] https://aviationbenefits.org/environmental-efficiency/climate-action/waypoint-2050/

Figure 10 : Évolution des émissions mondiales du secteur aérien jusque 2050 dans le scénario développement des biocarburants, Source : Waypoint 2050[66]

La combustion (incomplète) des moteurs d'avions va produire de la vapeur d'eau, des oxydes de soufre et des particules. Dans une atmosphère saturée en humidité, la vapeur d'eau présente dans les émissions (mais aussi dans l'air ambiant) se transforme au contact des particules de suie et de soufre en gouttelettes d'eau, qui, dans des conditions de température (inférieure à – 40 °C) et de pression (vol à plus de 8000 mètres) spécifiques, peuvent d'abord se sublimer en particules de glace, puis donner lieu aux traînées aériennes que l'on voit dans le ciel, puis éventuellement se transformer en cirrus présents dans la partie haute de la troposphère. Au total, les traînées de condensation et les cirrus induits par l'aviation provoqueraient un facteur radiatif supplémentaire de 57 (17 - 98] mW/m^2 loin d'être négligeable, et supérieure à celle produite par le carbone émis par le secteur aérien depuis ses origines 34 [28 - 40] mW/m^2 : cette valeur est reprise par le sixième rapport scientifique du GIEC[67], paru en août 2021, en soulignant la forte incertitude qui lui est attachée. La Commission a envisagé plusieurs mesures possibles pour réduire cet effet. L'une d'entre elles consiste à modifier à moyen-terme (cinq à huit ans) les trajectoires des avions pour éviter les zones sursaturées en glace[68]. Une deuxième piste de solution,

[66] *Ibidem*

[67] *Climate Change 2021 : The Physical Science Basis,* Working group I report, Intergovernmental panel on climate change, https://www.ipcc.ch/report/sixth-assessment-report-working-group-i/

[68] Une recherche effectuée dans le cas du Japon semble montrer en effet que le déroutage vertical de quelques centaines de mètres d'une faible partie du trafic aérien (1,7 %) pourrait réduire nettement le forçage radiatif des traînées de condensation et des cirrus induits (d'environ 60 %) Une telle mesure n'est cependant envisageable que si la saturation du ciel le permet et si les émissions supplémentaires de carbone qui en résulteraient sont faibles (0,014 % dans le cas précédemment cité du ciel japonais). *Mitigating the climate forcing of aircraft contrails by small-scale diversions and technology adoption,* Teoh, R., Schumann, U., Majumdat A., Stettler, M. E. J.,. Environmental Science and Technology, doi: 10.1021/acs.est.9b05608. https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.9b05608

complémentaire de la précédente et étudiée dans le rapport de l'AESA[69] relatif aux incidences de l'aviation sur le climat qui ne sont pas liées au CO_2, souligne l'intérêt d'améliorer la composition des carburants ainsi que l'efficacité des motorisations pour réduire le nombre de particules de suie sur lesquelles se forment les cristaux de glace : une réduction de 50 % des particules de suie émises pourrait ainsi réduire de 14 % le forçage radiatif des traînées de condensation et des cirrus induits[70]. Le recours à des moteurs avec un plus fort taux de dilution devrait y contribuer.

Dans le secteur maritime, il n'existe pas aujourd'hui de solution unique et universelle qui permettrait d'atteindre à la fois la neutralité carbone et la dépollution du secteur, ce d'autant plus que la diversité des navires et de puissance des motorisations est très importante. Il apparaît cependant clairement que le design initial du navire (et dans une mesure moindre son rétrofit pour la flotte existante), ainsi qu'une combinaison de mesures opérationnelles peuvent très fortement réduire les émissions de gaz à effet de serre. De plus, des systèmes de propulsion neutres en carbone sont envisageables, mais ils sont encore dans une phase de démonstration. La Stratégie de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES) arrêtée par l'OMI en 2018 prévoit donc de réduire le volume total d'émissions de GES annuelles d'au moins 50 % d'ici à 2050, par rapport à 2008, tout en poursuivant l'action menée en vue de leur élimination progressive.

Une double priorité s'en déduit :

- il est nécessaire d'une part de mener des expérimentations, soutenues en partie par la puissance publique et par l'Union européenne, de mise en œuvre de systèmes de propulsion neutres en carbone ainsi que des technologies les plus prometteuses de décarbonation ;
- dans la période de transition jusqu'à la neutralité carbone du maritime, il est nécessaire de faire les meilleurs efforts possibles pour réduire les émissions correspondantes.

Deux technologies permettant de se rapprocher de la neutralité carbone apparaissent cependant extrêmement prometteuses et mériteraient d'être fortement encouragées :

- le recours au GNL équipé d'un dispositif de capture et de stockage du CO_2 pour les navires les plus importants. Cette technologie permettrait de conserver les motorisations existantes ainsi que les chaînes d'approvisionnement en gaz naturel. L'installation de ce dispositif à bord d'un navire utilisant le GNL comme carburant permet de bénéficier d'une source froide pour la liquéfaction du CO_2 et de la chaleur de la combustion pour la régénération du solvant ;
- le recours à l'électricité pour les bateaux et navires effectuant des courts trajets (*short sea shipping*, ferries, navires de service) ou ceux pouvant effectuer des arrêts réguliers pour se recharger. Compte tenu du faible contenu en carbone de l'électricité française, cette technologie permet en effet d'atteindre une quasi-

[69] *Updated analysis of the non-CO_2 effects of aviation*, European Union Aviation Safety Agency (EASA), https://ec.europa.eu/clima/news/updated-analysis-non-co2-effects-aviation_en

[70] L'article précise que cette réduction est moins importante dans des atmosphères déjà saturées en vapeur d'eau. *Contrail cirrus radiative forcing for future air traffic,* Lisa Bock and Ulrike Burkhardt, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen, Germany, https://acp.copernicus.org/articles/19/8163/2019/acp-19-8163-2019.html

neutralité carbone dès aujourd'hui pour les bateaux concernés.

Illustration 5 : Bateau électrique de transport de passagers - Crédit : Arnaud Bouissou/Terra

Il n'existe pas aujourd'hui de consensus sur la technologie qui pourrait permettre la décarbonation du maritime à long terme : il est donc aujourd'hui nécessaire de les expérimenter : citons ainsi sans souci d'exhaustivité, l'hydrogène, l'ammoniac, le biogaz, le gaz d'origine fossile avec CCS, le méthanol les e-fuels (en particulier le méthane de synthèse).

Comme le souligne l'exercice de prospective maritime du DNV d'août 2021[71], il peut dès lors être intéressant, sinon souhaitable, pour un armateur qui souhaite éviter le risque de *stranded asset*, de s'équiper d'un navire pouvant à terme utiliser un carburant neutre en carbone ce qui peut conduire à choisir un moteur pouvant fonctionner à moyen terme avec un tel carburant et à prévoir la possibilité de modifier les capacités de stockage et d'installer les équipements de sécurité nécessaire (en particulier pour l'ammoniac et l'hydrogène).

Le recours aux biocarburants (y compris sous forme de méthanol) peut également présenter de l'intérêt, notamment en période de transition en attendant les solutions totalement décarbonées, car ils permettent, à coût modéré pour certains, de continuer à opérer les navires existants en répondant aux objectifs de l'OMI avant le renouvellement de leurs flottes. Mais, compte-tenu de leur « relative rareté » et des compétitions d'usage

[71] *Energy Transition Outlook 2021: Maritim Forecast to 2050*, DNV , August 2021, https://eto.dnv.com/2021/maritime-forecast-2050/about

associées, il est difficile de considérer, sauf dans quelques cas particuliers, comme celui de la pêche hauturière, les biocarburants comme la solution principale à long terme pour le transport maritime (même si le Lloyd's Register et l'UMAS soulignent leur intérêt en termes de coût).

4.2 La transition énergétique ne se fera pas sans la mise en place des leviers économiques pertinents

L'existence de technologies permettant de se rapprocher de la neutralité carbone ne signifie cependant pas qu'elles vont se développer. L'exercice de prospective des transports réalisé en 2006 par ce qui s'appelait alors le Conseil général des ponts et chaussées doit nous amener à beaucoup de modestie : les pistes tracées à l'époque permettaient d'envisager une division par trois des émissions. Les travaux menés par Michel Savy et Caroline Daude en 2007 pour le Centre d'analyse stratégique [72] envisageaient également une division par trois des émissions de gaz à effet de serre des poids lourds et une réduction de 40 à 60 % de 2008 à 2025. Nous en sommes très loin : en 2020, les émissions du transport sont toujours supérieures à celles de 1990.

Cette remarque amène naturellement à s'interroger sur les leviers à mettre en œuvre pour aboutir à une telle décarbonation : ils doivent être efficaces - nettement plus efficaces que les leviers mis en œuvre dans les trente dernières années -, pérennes dans le temps et acceptés par la population.

Cinq leviers de décarbonation sont à notre disposition ; ils doivent être utilisés. Évoquer la préparation de textes réglementaires dans un exercice prospectif n'est généralement pas pertinent : les mesures proposées par la Commission européenne en juillet pour mettre en œuvre le pacte vert et les 55 % de réduction d'émissions d'ici 2030 sont cependant suffisamment significatives pour être mentionnées. Leur adoption puis leur mise en œuvre peuvent en effet concrétiser une réelle ambition de réduction des émissions dans les transports :

- le premier réclamé par nombre d'économistes consiste à déterminer une trajectoire crédible de la valeur du carbone et à la traduire dans l'économie sous forme de taxes, de marché, de taux d'incorporation de biocarburants, de normes ou de règlements. C'est ce signal qui doit permettre d'expliquer à chacun d'entre nous que ses émissions de CO_2 représentent un coût pour la société (et pour les générations futures) qu'il est logique de vouloir attribuer au pollueur et qui permettra par exemple de distinguer un véhicule roulant au gaz naturel fossile d'un véhicule roulant au biogaz. Le rapport sur les grands défis économiques de la commission présidée par Jean Tirole et Olivier Blanchard[73], qui s'appuie pour le climat sur les travaux de Christian Gollier, est sans ambiguïté. Il recommande sans réserve une « *tarification du carbone bien conçue* », en soulignant, certes son impopularité probable, mais surtout sa nécessité. Celle-ci encourage l'adoption de comportements moins émetteurs et leur diffusion à toutes les étapes de la chaîne de production des biens et des services. Elle stimule également une R&D verte de

[72] http://archives.strategie.gouv.fr/cas/system/files/rapp14_volume_2_df_complet.pdf

[73] *Les grands défis économiques, par la commission internationale Blanchard-Tirole,* https://www.strategie.gouv.fr/publications/grands-defis-economiques-commission-internationale-blanchard-tirole

façon transparente et efficace. Elle permet de faire de meilleurs choix et d'écarter les solutions trop coûteuses. Pour la mettre en œuvre, ils recommandent d'étendre l'application de cette tarification aux secteurs qui en sont aujourd'hui « abusivement » exonérés, de se préoccuper des perdants potentiels, par exemple des ménages modestes vivant en zone péri-urbaine et rurale, et de mettre en place un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières pour éviter la délocalisation des entreprises vers des pays pratiquant un dumping environnemental. Dans son paquet *Fit for 55* de juillet 2021, la Commission européenne rejoint ces propositions sur plusieurs points : elle propose en effet d'étendre le marché ETS à une partie du secteur maritime, de réduire les quotas gratuits pour l'aérien, de mettre en œuvre un mécanisme d'ajustement aux frontières et de de créer un deuxième marché de quotas d'émissions de carbone réservé au chauffage et au transports. Cette dernière mesure aurait l'avantage de mettre en place un signal prix carbone dans ces deux secteurs, moins élevé au départ que celui de l'actuel marché ETS, mais elle conduit à une volatilité des prix difficilement prévisible, ce qui diminue l'intérêt du signal prix ainsi mis en œuvre et ce qui nécessite la mise en place d'une régulation soigneusement réfléchie. La Commission prévoit enfin la mise en place d'un fonds social pour le climat qui aidera les pays à compenser l'effet de ce dispositif pour les ménages les plus vulnérables : cette mesure va incontestablement dans le bon sens, mais au-delà de la somme elle-même, c'est la forme même de l'aide qui est importante et qui reste à définir afin que l'effet des mesures mises en œuvre dans le paquet pénalisent le moins possible le pouvoir d'achat des premiers déciles.

L'augmentation de la contribution climat énergie ou la mise en place, comme la Commission européenne le propose, d'un marché de quotas propre aux transport et au chauffage, n'est probablement pas indispensable pour atteindre à terme la neutralité carbone du parc puisque les mesures suivantes devraient mener progressivement à l'interdiction de la vente des véhicules thermiques émetteurs de gaz à effet de serre d'origine fossile. Elle devrait cependant permettre de limiter les émissions durant la phase de transition et d'accélérer le passage à des véhicules décarbonés. Toutefois, une hausse substantielle de cette contribution climat énergie rencontrera un degré d'acceptation d'autant plus important que les alternatives au véhicule thermique deviendront crédibles pour une grande majorité des usages et se seront largement diffusées. Il convient donc de procéder dès maintenant aux investissements verts (recharges interurbaines, infrastructures de report modal, par exemple) nécessaires à cette crédibilité. Lorsque les alternatives seront devenues crédibles, une accélération des évolutions de cette contribution, au départ probablement assez mesurée devient envisageable, ce qui contribue également à l'équilibre économique des investissements verts dans la durée ;

- le second levier consister en la fixation par l'Union européenne de limites d'émissions (calculées en moyenne sur l'ensemble des véhicules neufs vendus) à ne pas dépasser pour chaque constructeur et d'amendes (significatives) à payer en cas de dépassement de ces seuils. Cette forme de régulation est le résultat de trente années de discussion entre la Commission et les constructeurs : c'est certainement aujourd'hui le levier le plus efficace dans la réduction des émissions (avec la nécessité de vérifier que les émissions mesurées lors des tests d'homologation correspondent aux émissions réelles des véhicules). Dans son

paquet *Fit for 55* de juillet 2021, la Commission propose ainsi de réduire les émissions de GES des véhicules particuliers neufs de 55 % de 2021 à 2030 (au lieu de 37,5 %). La Commission prévoit également de renforcer les objectifs de réduction des émissions des poids lourds en 2022 ;

- le troisième levier consiste en l'interdiction à une date donnée de la vente de véhicules thermiques utilisant des combustibles d'origine fossile. Cette interdiction a été inscrite à 2040 dans la loi d'orientation des mobilités (LOM) pour les véhicules particuliers et les VUL utilisant des énergies fossiles, et, dans la loi portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets[74], pour les véhicules lourds neufs affectés au transport de personnes ou de marchandises, utilisant majoritairement des énergies fossiles : les deux décennies qui nous séparent la date de mise en œuvre constituent un délai probablement suffisamment long - même si ce point est contesté par les constructeurs - pour que l'industrie puisse s'adapter. Cette mesure aurait cependant d'autant plus de sens si elle était adoptée à un niveau international : dans son paquet *Fit for 55* de juillet 2021, la Commission la reprend de fait à l'échelle européenne (uniquement pour les véhicules particuliers et les VUL), mais propose une échéance plus rapide, 2035, qui rendrait l'adaptation des entreprises d'autant plus difficile. Dans tous les cas, si cette évolution vers la mobilité décarbonée va certes créer des emplois, notamment dans la fabrication des batteries, elle va également entraîner la fermeture d'entreprises qui constituent la principale ressource économique de certains territoires : cette transition doit donc être accompagnée ;

- le quatrième levier consiste en des mesures d'accompagnement au déploiement des installations de recharge et à l'achat de véhicules (bonus/malus, suramortissement pour les VUL ou les PL) : elles réduisent l'écart existant aujourd'hui entre le coût complet des véhicules thermiques, notamment des poids lourds, et celui des véhicules décarbonés ;

- le cinquième levier réside enfin dans la volonté territoriale des villes de pouvoir bénéficier d'une moindre pollution locale et conduit à la mise en place des ZFE et à l'interdiction progressive des véhicules thermiques dans certaines zones.

Il est donc souhaitable :

- de mettre en place le plus rapidement possible les différents leviers de décarbonation qui permettront sur le long terme de se diriger vers la « neutralité carbone » des différents secteurs du transport (signal prix carbone, limitations d'émissions, interdiction à partir d'une certaine date de la vente de véhicules neufs émetteurs de gaz à effet de serre d'origine fossile) ;

- de mettre en place en parallèle les mesures d'accompagnement nécessaires à l'égard des industries concernées, de leurs employés, des territoires associés (lorsqu'ils sont fortement impactés), mais aussi à l'égard des Français qui devront payer, de manière directe à travers des taxes ou indirecte à travers des normes, la valeur croissante de leurs émissions de CO_2.

[74] Loi n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets https://www.legifrance.gouv.fr/dossierlegislatif/JORFDOLE000043113774/

Dans le domaine aérien, la solution la plus efficace pour la décarbonation de l'économie consiste à soumettre l'aviation intérieure de l'Union européenne à la même valeur du carbone que le reste de l'économie, en soumettant, ce qui est déjà le cas, le secteur aérien européen au système d'échange de quotas d'émissions de l'Union européenne (marché ETS) et l'aviation internationale au système CORSIA (même si son prix est faible aujourd'hui). C'est le sens de l'article 142 de la loi portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets : au terme de celui-ci[75], l'État se fixe en effet pour objectif que le transport aérien s'acquitte, à partir de 2025, d'un prix du carbone au moins équivalent au prix moyen constaté sur le marché du carbone pertinent, en privilégiant la mise en place d'un dispositif européen.

La Commission propose non seulement de renforcer le prix carbone à travers le marché ETS pour les vols intra-européens (suppression des quotas gratuits pour l'aviation à partir de 2027, réduction plus rapide que par le passé du volume de quotas disponibles, voire taxation du kérosène (ce qui ne peut être obtenu que par un vote à l'unanimité), limitation du *tankering* sur les aéroports européens…), d'utiliser le dispositif CORSIA [76] pour l'international (en espérant qu'il puisse aboutir à un prix significatif du carbone et constituer ainsi un véritable signal-prix carbone), mais surtout d'imposer un pourcentage obligatoire de biocarburants de plus en plus élevé au cours du temps pour les vols au départ des aéroports européens (5 % en 2030 dont 0,7 % de carburants synthétiques, 20 % (dont 5 %) en 2035, et 63 % (dont 28 %) en 2050). Pour le moment, la proposition exclut l'utilisation des biocarburants de première génération qui ont pourtant vocation à permettre (sans étendre leur périmètre actuel de culture) la décarbonation, aujourd'hui, du secteur routier, et, demain, très probablement, celle de l'aérien. Ces leviers vont incontestablement dans le bon sens. Ils doivent être accompagnés de la fixation au niveau international d'un objectif ambitieux de réduction des émissions de gaz à effet de serre du secteur aérien mondial, soit par l'OACI lors de sa prochaine assemblée générale prévue en

[75] Celui-ci ne remplace pas la taxe de solidarité sur les billets d'avion mentionnée au VI de l'article 302 bis K du code général des impôts. Cf article 142 de la loi n° 2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets :

https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000043956924

[76] *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation.* Comme l'externalité carbone ne doit pas être payée deux fois, la Commission envisage, dans le cadre de la révision de la directive sur le marché ETS, soit une exemption par l'OACI des vols intérieurs à l'espace européen du dispositif CORSIA ou, en cas de refus de l'OACI, un aménagement du marché ETS sur les émissions des vols aériens entre les pays européens (le marché ETS ne porterait que sur les émissions non incluses dans le système CORSIA qui ne vise que les émissions supérieures à un niveau de référence fixé) : c'est l'option dite ETS-CORSIA "mix". Une troisième option consisterait à soumettre les compagnies aériennes aux deux dispositifs CORSIA et ETS et à leur attribuer gratuitement des quotas à hauteur des montants versés dans le cadre du dispositif CORSIA afin de ne pas payer deux fois le signal prix carbone. Par ailleurs, conscientes que le dispositif CORSIA qui ne fait peser un signal prix que sur les émissions marginales du secteur par rapport à leur niveau de 2019, ne permet pas d'appliquer un signal prix du carbone pertinent aux vols extra-européens, les autorités françaises plaident, dans la suite de la mesure dite du *Stop the clock*, soit pour un renforcement du dispositif CORSIA soit pour une extension de l'ETS négociée avec nos partenaires. Cette mesure s'ajouterait à l'imposition de taux d'incorporation minimum de carburants alternatifs au départ des aéroports européens, qui permet de couvrir également les vols extra-européens et de leur appliquer un véritable signal prix du carbone.

2022, soit, à défaut, dans le cadre de l'UNFCC[77].

Dans le domaine maritime, la Commission propose là encore d'avancer selon quatre axes biens distincts :

- l'instauration d'un prix du carbone : la Commission envisage d'inclure dans le marché ETS[78] les trajets intra-européens ainsi que la moitié des trajets au départ ou à l'arrivée des ports européens. Les textes prévoient également la suppression de l'exonération de taxe sur les carburants des navires et la mise en place d'une taxation minimale : cette mesure ne peut cependant être prise qu'à l'unanimité des États-membres ;
- la mise en place en parallèle d'un mécanisme d'ajustement carbone aux frontières (MACF) qui ne porterait que sur six secteurs dans un premier temps l'électricité (produite en dehors de l'Union européenne), du ciment, des engrais, de l'aluminium, du fer et de l'acier : le maritime pourrait être concerné dès lors que les émissions liées au transport des produits seraient prises en compte dans le mécanisme ;
- la suppression des émissions des navires aux ports ;
- la réduction progressive de l'intensité des émissions de gaz à effet de serre par rapport à l'énergie consommée à bord.

Si ces mesures vont dans le bon sens, le passage au navire neutre en carbone qui suppose la mise en place d'aides pour les expérimentations et l'adoption d'une date à partir de laquelle tous les navires neufs devront être neutres en carbone est absente des propositions : elles ne figurent pas non plus dans les mesures arrêtées par l'OMI en juin 2021.

Comme l'a suggéré le Royaume-Uni[79], une proposition plus simple consisterait dans un premier temps à fixer une date à partir de laquelle tout nouveau navire neuf devrait pouvoir utiliser un carburant neutre en carbone[80]. La réduction progressive de l'intensité des émissions de gaz à effet de serre des navires existants par rapport à l'énergie consommée à bord peut conduire au même résultat si elle est suffisamment ambitieuse et si elle est considérée comme crédible par l'ensemble des acteurs.

Il est donc souhaitable de mettre en place dans le secteur maritime des incitations au développement des systèmes de propulsion et des carburants neutres en carbone.

---

[77] L'article 2-2 du Protocole de Kyoto prévoyait que : « Les Parties visées à l'annexe I cherchent à limiter ou réduire les émissions de gaz à effet de serre non réglementées par le Protocole de Montréal provenant des combustibles de soute utilisés dans les transports aériens et maritimes, en passant par l'intermédiaire de l'Organisation de l'aviation civile internationale et de l'Organisation maritime internationale, respectivement ». L'Accord de Paris ne reprend pas cette disposition.

[78] Système d'échange de quotas d'émission de l'UE (SEQE-UE)

[79] *Cl*« By 2025 we expect that all new vessels being ordered for use in UK waters are being designed with zero emission propulsion capability ». *Clean maritime plan*, page 1, *juillet 2019,*

https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/815664/clean-maritime-plan.pdf

[80] La proposition britannique envisage ainsi l'hydrogène ou l'ammoniac. Cette définition ne comprend pas les biocarburants ou le biogaz dont les ressources semblent limitées.

C'est dans ce secteur que le paquet *Fit for 55*, proposé par la Commission, est probablement le moins audacieux (hormis la suppression des émissions au port) :

- l'indicateur d'efficacité énergétique retenu est différent de celui mis en avant par l'OMC ;
- la mise en place d'un signal prix carbone permet de déclencher la mise en œuvre d'un certain nombre de mesures de réduction des émissions de GES et de réduire l'écart de coût entre solutions carbonées et solutions décarbonées ou neutres en carbone.

  En reprenant le tableau 76 du quatrième rapport de l'OMI, qui donne des ordres de grandeur possibles du coût des carburants aux horizons 2030 et 2050, on s'aperçoit d'une part que la mise en place progressive d'un signal prix carbone croissant dans le temps permet de déclencher la mise en œuvre d'un nombre de plus en plus grand de mesures de réduction des émissions et que, d'autre part, la solution carbonée actuelle désulfurée HFO (LSFDO) reste la moins coûteuse. Introduire un signal prix permettrait de réduire l'écart de coût entre cette solution et plus généralement entre les solutions carbonées (qui comprennent le GNL) et les solutions décarbonées ou neutres en carbone (qui comprennent le GNL avec capture et stockage du CO_2 et le biogaz).

  Le système européen d'échange de quotas d'émission (SEQE) existe depuis 2005 : il couvre plusieurs secteurs industriels, dont le secteur aérien depuis 2012 pour les vols dans l'espace économique européen (EEE). L'extension de ce dispositif au transport maritime international, comme le propose le *Fit for 55*, pose la question de la compétitivité des navires concernés et mériterait d'être discutée avec les principaux partenaires commerciaux de l'Union européenne, la Chine et les États-Unis notamment, mais aussi le Royaume-Uni, afin de trouver le meilleur moyen de conserver un *level playing field* entre tous les acteurs : la prise en compte du transport maritime dans un mécanisme d'ajustement à la frontière ou des accords sur la manière d'appliquer le signal prix carbone à des navires transitant d'une zone économique à une autre mériterait ainsi d'être étudiée. Armateurs de France (AdF), en liaison avec l'association des armateurs européens, l'ECSA[81], plaide pour l'utilisation de mesures alternatives fondées sur le marché (MBM ou *Market Based Measures*) plutôt que sur le recours à l'ETS et insiste également sur le champ d'application géographique de ce dispositif qui devrait, selon lui, être limité afin d'éviter des tensions politiques, qui pourraient entraîner des différends commerciaux et des mesures discriminatoires à l'encontre des navires de l'UE par d'autres juridictions. Il suggère enfin d'en « aligner » le fonctionnement sur le mécanisme de l'OMI une fois celui-ci mis en place.

  Armateurs de France préconise, si des recettes sont issues de ce mécanisme, qu'elles puissent être réaffectées au secteur maritime : le Parlement européen a

[81] L'ECSA a adopté lors de son conseil d'administration du 8 octobre 2020 des *framework conditions* qu'AdF a complétées en recommandant des mesures alternatives fondées sur le marché (MBM ou *Market Based Measures*) plutôt que le SEQE.

ainsi proposé en septembre 2020 qu'une partie des recettes soit utilisée pour créer un fonds pour les océans pour la période 2021-2030 afin :

- d'améliorer l'efficacité énergétique des navires ;
- de soutenir les investissements dans les technologies et les infrastructures innovantes permettant de décarboner le secteur du transport maritime, y compris dans le transport maritime à courte distance et dans les ports ;
- de favoriser le déploiement de carburants de substitution durables, tels que l'hydrogène et l'ammoniac, produits à partir de sources d'énergie renouvelables, et de technologies de propulsion à émissions nulles, y compris les technologies éoliennes.

De manière générale à l'ensemble du secteur du transport, c'est probablement là que se situe l'un des principaux enjeux de politique publique des prochaines années dans le domaine de la lutte contre le climat : mettre en œuvre cette palette de mesures, non seulement au niveau européen, mais aussi au niveau national, de façon à atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre tout en mettant en place les instruments de redistribution nécessaires à la préservation du pouvoir d'achat des premiers déciles et à l'acceptation de ces mesures, ainsi qu'à l'accompagnement des entreprises, de leurs salariés et des territoires dans lesquelles elles sont implantées.

4.3 Trois scénarios possibles à 2040-2060

Pour prendre en compte des hypothèses de développement plus ou moins important des technologies bas carbone, de mise en place d'une coopération mondiale plus ou moins renforcée et d'adoption en Europe et en France d'une régulation plus ou moins forte destinée à réduire les émissions de gaz à effet de serre, trois scénarios possibles de réduction des émissions de gaz à effet de serre du transport ont été envisagés dans ces travaux :

- une ambiance technologique « basse » qui serait marquée par l'absence de développement de nouvelles technologies bas carbone, par une faible diffusion du progrès technologique liée à la défiance de la population à l'égard de la technologie et par un délitement progressif de l'accord de Paris (sous l'impulsion par exemple d'un gouvernement républicain aux États-Unis). Les mesures de régulation nécessaires à la lutte contre le réchauffement climatique ne sont pas acceptées par la population et ne sont donc mises en œuvre que de manière extrêmement modérée, ce qui en limite fortement l'efficacité. Dans ce scénario, les ventes de véhicules neufs décarbonés (électrique à batterie ou à hydrogène, biogaz, biocarburants, hybrides avec biocarburants ou biogaz…) ne représentent que 30 % des véhicules neufs à 2040, l'incorporation de biocarburants durables reste faible, voisin de 5 % à 10 % dans l'aérien à 2040 tandis que le maritime n'adopte pas de carburants neutres en carbone … La disponibilité des biocarburants durables et des carburants de synthèse est faible : ce scénario peut correspondre à un refus par la population de tout signal prix carbone (et des objectifs de décarbonation), conduisant de fait à un moindre développement technologique. Dans une variante de ce scénario, encore plus pessimiste sur le développement des technologies, les objectifs de réduction sont malgré tout maintenus, ce qui provoque des difficultés économiques de plus en plus importantes au cours du temps : l'absence de signal prix carbone dans l'économie conduit le gouvernement à devoir imposer des

mesures de plus en plus drastiques (et de plus en plus mal acceptées par la population), ce qui entraîne la fermeture ou la délocalisation d'une partie de l'appareil industriel, une forte augmentation des importations et un ralentissement marqué de la croissance économique ;

- une ambiance technologique « moyenne » qui serait marquée par la mise en œuvre de l'accord de Paris actuel, l'adoption par l'OACI d'un objectif de réduction de 50 % des émissions de CO_2 de l'aérien à 2050 (malgré l'augmentation du trafic), l'apparition vers 2035-2040 des premiers avions neutres en carbone à l'émission, l'atteinte de l'objectif de réduction d'au moins 50 % des émissions maritimes mondiales. Les objectifs de la loi d'orientation sur les mobilités seraient atteints, en particulier la neutralité carbone directe des transports terrestres dès 2050 et l'interdiction de la vente de voitures utilisant des énergies fossiles carbonées d'ici 2040 (électricité à batteries ou hydrogène, biogaz, biocarburants, hybrides avec biogaz ou biocarburants), la disponibilité des biocarburants durables et des e-fuels pour l'aérien est en nette progression. Le signal prix carbone n'est pas explicitement traduit dans l'économie : la contribution climat énergie de la TICPE subsiste à son niveau actuel compte tenu du refus d'une augmentation du prix des carburants provenant du gouvernement, le marché ETS est étendu, CORSIA évolue comme prévu. Mais, les décisions internes de l'État et des entreprises sont prises en référence à une trajectoire de la valeur du carbone permettant la mise en œuvre de l'Accord de Paris et voisine de celle préconisée par la Commission Quinet dans le cadre des travaux menés pour France stratégie[82] ;
- une ambiance technologique «haute» marquée par un très net renforcement de la coopération mondiale dans la lutte contre le changement climatique, la mise au point de nouvelles technologies bas carbone et une diffusion rapide du progrès technologique. L'OMI adopte ainsi un objectif de neutralité carbone pour les nouveaux navires à partir de 2030 et de neutralité carbone à 2050, l'OACI adopte en 2022 des objectifs similaires de neutralité carbone pour les nouveaux avions à partir de 2040 et de neutralité carbone directe (correspondant à l'utilisation de l'électricité, de l'hydrogène et des biocarburants durable suivant les segments) pour 2060, hors empreinte des véhicules et des infrastructures. Dans le domaine routier, les premiers PL neutres en carbone font leur apparition dans la décennie 2020-2030 si bien que les poids lourds neufs sont neutres à l'émission à partir de 2040 (conformément à la loi de lutte contre le dérèglement climatique) et la neutralité carbone « directe » (hors empreinte) des VP et des PL est obtenue en 2050 ; un basculement vers les véhicules professionnels neutres en carbone est constaté dès 2030 ; le *sourcing* le plus décarboné possible des matériaux pour les véhicules (batteries, caisse,…) ainsi que leur recyclage ou leur réutilisation dans une deuxième vie après la mobilité deviennent la règle générale notamment au-delà de 2040 ; la disponibilité de biocarburants avancés et de carburants de synthèse décarbonés à destination principalement de l'aérien est assurée grâce à une bonne mobilisation de l'appareil industriel et à une répercussion des coût sur les voyageurs ; en raison du développement technologique, le coût des technologies bas carbone est relativement faible les coûts d'évitement des GES par les technologies sont plutôt faibles : dans l'automobile par exemple, l'électrique est ainsi moins cher que le

[82] Correspondant à 250 €/tCO_2e, et environ 500 et 750 €/tCO_2e : il s'agit d'euros courants 2019 (autrement dits d'une valeur courante sans tenir compte de l'inflation à partir de 2019)
https://www.strategie.gouv.fr/publications/de-laction-climat

thermique classique ; des dispositifs de CCS se généralisent à partir de 2030 dans l'industrie et dans le maritime. Le signal prix carbone est explicitement traduit dans l'économie : la contribution climat énergie de la TICPE augmente à un rythme supérieur à celui préconisé par la Commission Quinet dans le cadre des travaux menés pour France stratégie, en raison de la volonté d'atteindre, dans le domaine des transports, une neutralité carbone de notre empreinte, autrement dit une neutralité carbone tenant compte des émissions produites pour la fabrication des biens importés (et exportés). Le marché ETS est étendu au maritime international (avec la participation de la Chine et des États-Unis), Corsia se rapproche des prix de l'ETS. Une taxe carbone aux frontières est instaurée.

La réalisation de cette transition est confrontée à au moins deux types de risques qui sont loin d'être indépendants :

- les risques d'échec dans l'atteinte des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre : les premiers bien illustrés par le scénario « du pire » résident dans l'échec de l'atteinte des objectifs fixés notamment dans le cadre de la politique climatique et peuvent résulter du contexte international, d'un manque d'innovations technologiques ou de leur rejet, du refus de l'augmentation des prix liée aux émissions de carbone ou de l'absence de mise en place soit des leviers économiques suffisants pour assurer cette transition, soit des mesures d'accompagnement nécessaires à l'égard des industries et de leurs employés, des territoires associés ainsi que des ménages ;
- les seconds sont d'ordre économiques et sociaux. Une transition énergétique mal préparée et/ou trop rapide, une volonté de développer toutes les technologies en même temps ou, à l'inverse, d'en privilégier une qui ne sera finalement retenue au niveau international peuvent conduire à des coûts économiques trop importants pour l'industrie, pour les ménages ou pour les dépenses publiques, conduisant, dans un second temps à son échec. Ils peuvent être illustrés par un scénario qui pourrait être qualifié « d' hypercontraint » dans lequel le développement technologique n'est pas au rendez-vous tandis que les contraintes sont maintenues ce qui amène à des dépenses élevées, voire, en cas d'absence de politique redistributive, à une aggravation des inégalités sociales ou au refus des mesures envisagées. Ainsi que Jean Pisani Ferry [83] le souligne, les conséquences macroéconomiques d'une transition énergétique - trop longtemps différée et devenue urgente- seront probablement notables sur notre croissance et nos emplois ; il faut en prendre conscience et les étudier de façon à en minimiser les effets.

[83] *Climate Policy is Macroeconomic Policy, and the Implications Will Be Significant*, Jean Pisani-Ferry, August 2021, Policy Brief, Peterson institue for International economics https://www.piie.com/system/files/documents/pb21-20.pdf

Conclusion

La technologie ne peut pas à elle seule conduire à la neutralité carbone dans le domaine du transport. Néanmoins, les calculs effectués dans les chapitres précédents montrent qu'elle peut conduire à une réduction notable des émissions de gaz à effet de serre : c'est d'ailleurs le sens de la Stratégie de mobilité durable et intelligente publiée par la Commission en décembre dernier qui insiste sur l'idée que les carburants destinés aux transports doivent devenir neutres en carbone[84]. Le développement des technologies neutres en carbone doit donc être résolument mis en œuvre.

L'électricité à batteries constitue une technologie de référence (hormis pour le maritime et la plupart des segments de l'aviation), mais elle ne pourra se développer que si l'opinion publique l'accepte et que si des bornes de recharges lentes et rapides sont déployées en suffisamment grand nombre. Ce déploiement est un choix gagnant pour le climat : si l'utilisateur est certain de trouver lorsque sa batterie est quasiment déchargée une borne de recharge rapide, il aura tendance à choisir pour celle-ci une capacité raisonnable (60 ou 80 kWh pour un véhicule particulier, 500 ou 600 kWh pour un PL). À l'inverse, un réseau défaillant mènera à la course à une autonomie de plus en plus grande avec des batteries atteignant 100 kWh, voire plus pour les VP et de 1 000 kWh, sinon plus pour les PL, comme l'a envisagé Tesla dans les premières annonces relatives à son « semi ».

D'autres technologies sont néanmoins possibles : le biogaz pour les PL et l'hydrogène liquide ou gazeux à 700 bars pour les VP et les PL, voire à 350 bars pour les bus et les PL : les ressources sont néanmoins limitées pour le biogaz et l'hydrogène ne se développera que si les coûts sont suffisamment bas.

L'une des conséquences les plus notables de cette évolution résulte dans la baisse des émissions associée à un kilomètre supplémentaire parcouru : dans le futur, elles risquent d'être faibles, voire très faibles. Ce seront désormais les émissions à la fabrication des véhicules qui seront les plus importantes. Il faut donc dès à présent chercher à définir des méthodologies de calcul des émissions d'un véhicule en empreinte carbone, prévoir l'affichage de leurs résultats pour les véhicules neufs et inciter ensuite à l'achat des véhicules dont l'empreinte sera la moins élevée. En parallèle, il faut s'engager dans une politique de prolongation de la durée de vie des véhicules lorsqu'ils seront décarbonés et soutenir le développement des filières de recyclage, notamment des batteries.

Les résultats exposés dans ce rapport pourraient conduire à envisager de manière optimiste la transition vers la neutralité carbone des transports. L'exercice de prospective des transports réalisé en 2006 par ce qui s'appelait alors le Conseil général des ponts et chaussées doit cependant nous amener à beaucoup de modestie : les pistes tracées à l'époque permettaient d'envisager une division par trois des émissions. Or, en 2020, les émissions du transport sont toujours supérieures à celles de 1990.

Cette remarque amène à s'interroger sur les leviers à mettre en œuvre pour aboutir à une telle décarbonation : ils doivent être efficaces – plus efficaces que les outils utilisés jusqu'à présent - pérennes dans le temps et acceptés par la population. La mise en place d'une trajectoire crédible de la valeur du carbone est probablement indispensable : sa traduction dans l'économie peut se faire sous forme de taxes, de marchés, de taux d'incorporation de biocarburants, de normes ou de règlements, et devra s'accompagner

[84] Paragraphe 10 de la communication de la Commission

dans tous les cas de mesures redistributives.

En parallèle, d'autres leviers, plus contraignants, mais annoncés longtemps à l'avance, doivent également être mis en œuvre, de préférence à l'échelle européenne, ainsi que la Commission le propose dans son paquet *Fit for 55* de juillet 2021 : valeurs limites d'émissions de carbone imposées aux constructeurs sur la moyenne des émissions de carbone des véhicules neufs vendus (avec amende significative en cas de dépassement) et mise en place d'une date d'interdiction pour la vente des véhicules neufs utilisant des énergies d'origine fossile d'abord pour les véhicules légers, puis pour les véhicules lourds. De plus, des aides au déploiement des installations de recharge et à l'achat des véhicules neufs (bonus/malus pour les particuliers et suramortissement pour les professionnels) permettront de favoriser le développement des technologies tant qu'elles ne seront pas compétitives avec le diesel.

Pour être acceptables, et acceptées, les mesures redistributives vont devoir accompagner les industries dans leur transformation vers une production bas carbone, leurs employés, les territoires associés, mais aussi les consommateurs qui seront confrontés à des prix tenant compte de la valeur carbone des émissions qui en auront accompagné la fabrication : comme Jean Pisani Ferry[85] le souligne, et contrairement à l'idée reçue, le produit d'une éventuelle fiscalité carbone risque donc d'être faible d'autant plus qu'il devra couvrir également les dépenses d'adaptation au changement climatique.

Il indique de plus, en prenant l'exemple du secteur automobile dont les investissements, les brevets et le savoir-faire dans la fabrication des véhicules thermiques seront en grande partie perdus dès 2035, que si le paquet *Fit for 55* de la Commission européenne qui prévoit la fin de la vente des véhicules neufs émetteurs de gaz à effet de serre à cette date est adopté, les conséquences macroéconomiques d'une transition énergétique - trop longtemps différée et devenue urgente - seront probablement notables sur notre croissance et nos emplois ; il faut en prendre conscience et les étudier de façon à en minimiser les effets.

[85] *Climate Policy is Macroeconomic Policy, and the Implications Will Be Significant*, Jean Pisani-Ferry, August 2021, Policy Brief, Peterson institute for International economics https://www.piie.com/system/files/documents/pb21-20.pdf

Annexes

Annexe 1 : Lettre de mission

Liberté • Égalité • Fraternité
RÉPUBLIQUE FRANÇAISE

MINISTÈRE DE LA TRANSITION ÉCOLOGIQUE ET SOLIDAIRE

Conseil général de l'environnement et du développement durable

Paris, le 11 FEV. 2020

La vice-présidente

à

Voir liste des destinataires en annexe

Objet : Prospective des mobilités 2040 2060 – Désignation des membres

Dans le cadre de son programme de travail 2018, renouvelé en 2019, le CGEDD, en partenariat avec France Stratégie, a décidé de lancer une nouvelle démarche de prospective des mobilités, avec un niveau d'ambition comparable à celle conduite par Claude Gressier en 2006.

Il s'agit bien entendu de tenir compte des importantes évolutions apparues depuis. C'est aussi l'occasion d'en revisiter la méthodologie. Trois points-clé orientent la démarche proposée, l'incertitude, la temporalité des décisions et de leurs effets, la déclinaison sociale et territoriale.

Cette démarche, mobilisatrice de nombreux acteurs sera réalisée sur une période de 18 à 24 mois.

Vous avez commencé à structurer le travail avec notamment l'organisation d'un séminaire d'initialisation qui s'est tenu le 15 novembre dans les locaux de France Stratégie. Plusieurs groupes thématiques ont commencé à réfléchir ou vont le faire très prochainement.

Compte tenu de votre implication particulière dans ce chantier, je vous désigne membre de cette mission qui sera référencée sous Notix.

Vous veillerez à impliquer les collèges du CGEDD et notamment l'animateur transversal des réflexions prospectives ; vous prévoirez l'organisation d'un séminaire transverse élargi à mi-parcours. Je vous demande par ailleurs de tenir le bureau du CGEDD régulièrement informé de l'avancement de vos travaux sous la forme d'une fiche trimestrielle.

Anne-Marie LEVRAUT

Copies : les membres du bureau

CGEDD
CONSEIL GÉNÉRAL DE L'ENVIRONNEMENT ET DU DÉVELOPPEMENT DURABLE

CGEDD - Tour Séquoia - 92055 La Défense cedex - tél. +33 (0)1 40 81 21 22 - www.cgedd.developpement-durable.gouv.fr

Liste des destinataires :

Pierre-Alain Roche

Alain Sauvant

Dominique Auverlot

Geoffroy Caude

Pascal Hornung

Nadine Asconchilo

Annexe 2 : Composition du groupe de travail et liste des intervenants

Nom	Organisme
Membres du groupe de travail motorisation	
ASCONCHILO Nadine	CGEDD
BERETTA Joseph	AVERE
BORMAND Victor	DGEC
CABANNE Isabelle	DGEC
CAUDE Geoffroy	CGEDD
COLARD Jean	France stratégie
DASSA François	EDF
GERARDIN Maxime	France stratégie
GIRARD Catherine	Renault
GOUBET Cécile	AVERE
GREFFET Pierre	CGDD
GRIMAL Richard	CEREMA
HAUET Jean-Pierre	Equilibre des Energies
HORNUNG Pascal	CGEDD
HUNEAU Denis	CGEDD
KALAYDJIAN François	IFPEN
KONING Martin	Université Gustave Eiffel
LAGARDE Dominique	ENEDIS
LAVERGNE Richard	CGE
LAVAYSSIERE Céline	DGE
LE BIGOT Nicolas	CCFA
LEHMANN Frédéric	DGE
LE-NAIRE Marie-Laure	Renault
MASSONI Michel	CGEDD
MEILHAN Nicolas	France stratégie
MESQUI Bérengère	France stratégie
MEYER Jonas	ENEDIS
MOULINIER Jean-Marc	CGDD
NI Jincheng	France stratégie
PAUL-DUBOIS-TAINE Olivier	ISF

Nom	Organisme
PENG-CASAVECCHIA Sophie	DGITM
POCHEZ Rémi	DGITM
SABATHIER Jérome	IFPEN
SAUVANT Alain	CGEDD/
TAMOKOUE KAMGA Paul-Hervé	Haut conseil pour le climat
TARRIER Franck	DGE
TERNEL Cyprien	IFPEN
TREMEAC Yann	ADEME
TRIGUI Rochdi	Université Gustave Eiffel
VIEILLEFOSSE Alice	DGEC
Personnes invitées à participer lors des séances du groupe motorisation des 6 janvier, 3 février, 10 mars, 8 juin, 6 juillet, 7 septembre et 5 octobre	
6 janvier 2020	
MORTUREUX MARC	PFA
SAUVANT Alain	CGEDD
3 Février 2020	
Le BIGOT Nicolas	CCFA
PIOT François	Arval Mobility Observatory France
TREMEAC Yann	ADEME
3 mars 3020	
TRIGUI Rochdi	Université Gustave Eiffel
TORCHEUX Laurent	EDF
TRICAUD Sophie	Forsee Power
BOUTER Anne	IFPEN
HENRIOT Stéphane	IFPEN
8 Juin	
Le BIGOT Nicolas	CCFA
CASTELLI Marie	TESLA
6 Juillet	
BOUCLY Philippe	AFHYPAC, France Hydrogène
PATUREL Olivier	CharIN e. V.
CHAPUIS Thierry	AFG
DURAND Gilles	AFGNV

Nom	Organisme
7 septembre	
CHANDON Clément	IVECO France
5 octobre	
GAGNEPAIN Bruno	ADEME

Annexe 3 : L'état des technologies

Avant de tenter de dresser un panorama de l'état des technologies et de leur devenir, un *caveat* majeur s'impose : dans une transition énergétique d'une telle ampleur, nul ne peut prédire avec certitude ce que seront les technologies qui s'imposeront sur le long terme. Des ruptures technologiques peuvent rebattre les cartes. De plus, la géopolitique de l'énergie et les évolutions sociétales nous ont montré par le passé l'intérêt de ne pas s'en remettre à une seule technologie.

Dans ces conditions, le gouvernement ne doit pas choisir une technologie en particulier, mais doit veiller à la mise en place d'objectifs de résultats (éventuellement à un niveau international) et de dispositifs d'accompagnement permettant d'une part de favoriser le recours à des technologies et à des mesures opérationnelles de moins en moins émettrices, et d'autre part d'encourager l'innovation.

Cette stratégie doit cependant limiter les solutions qui pourraient conduire à des *stranded assets*[86], autrement dit à des technologies qui devraient être arrêtées avant que l'investissement ne soit rentable, pour atteindre les objectifs de réduction d'émissions envisagées.

Il convient de plus de garder en tête que l'industrie française ne peut développer en même temps toutes les technologies et sera donc obligée de faire des choix et de privilégier certaines d'entre elles ou, sans choisir une technologie en particulier, d'écarter celles qui semblent les moins efficaces.

3.1 Les progrès considérables des batteries en dix ans devraient permettre un développement significatif de l'électricité dans les mobilités

3.1.1 Les progrès considérables des batteries en dix ans

Trois raisons permettent d'expliquer le développement de la mobilité électrique depuis une dizaine d'années :

- la baisse des coûts des batteries que BNEF chiffre à environ 90 % de 2010 à 2020 : en 2010, un élément de batterie (cellule nue) valait 1000 €/kWh (usine Saft à Poitiers), en 2018, selon BNEF, le même élément ne vaut plus que 102 $/kWh (soit une division par un facteur supérieur à dix). Toujours selon BNEF, le prix moyen en 2019 de la batterie entière était de 137 $/kWh en dollars 2019 (et de 132 $/kWh en 2021), et pouvait même se situer en-dessous de 100 $/kWh pour certains bus chinois ;
- l'amélioration des densités énergétiques massiques et volumiques est tout aussi impressionnante : pour parcourir 200 km à 100 km/h (ce qui demande environ 40 kWh de batterie), il fallait une tonne de batteries (au plomb) au milieu des années 90 ; il suffisait de 500 kg de batterie nickel métal hydrure

[86] Littéralement des actifs irrécupérables parce qu'obsolètes et non transformables, autrement dit à des actifs dont le fonctionnement, compte tenu des objectifs renforcés de réduction des émissions de GES, devrait être arrêté avant que la rentabilité ne soit atteinte.

au début des années 2000 avec l'apparition des premières Toyota Prius ; il ne faut plus désormais que 160 kg de batteries (cellules nues) avec une composition de l'électrode en NMC 811 ;

- enfin, les durées de vie des principales batteries en service sont de 1 500 à 2 000 cycles, ce qui pour un professionnel de la route automobiliste rechargeant sa batterie 200 fois par an lui assure une durée de vie d'environ 8 ans : Elon Musk évoquait même en 2020 la fabrication à court terme de batteries capables de fournir de l'énergie sur un million de miles.

Le risque d'incendie qui était important sur certains types de batteries (lithium métal en particulier)[87] semble avoir été considérablement réduit même si les départs d'incendie survenus sur des batteries LG Chem montrent qu'il est toujours présent[88]. General Motors a ainsi été contraint en août 2021 de rappeler environ 100 000 Chevrolet Bolt électriques à la suite des départs de feu constatés sur ses véhicules (munis de batteries LG Chem).

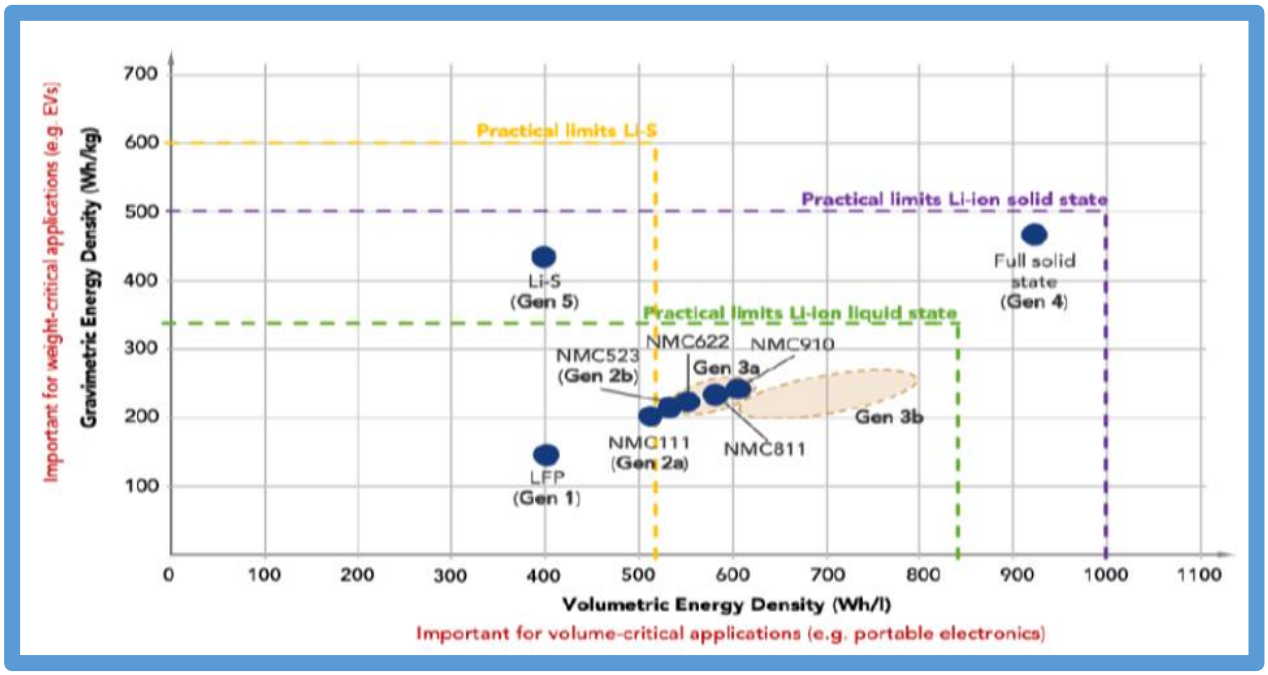


Figure 11 : Caractéristiques et limites potentielles des technologies lithium ion[89]

[87] Voir notamment *La voiture de demain, carburants et électricité*, rapport de la mission présidée par Jean Syrota, Centre analyse stratégique, CGIET, 2011
http://archives.strategie.gouv.fr/cas/system/files/cas_rapp37_voiture_de_demain_web_0.pdf

[88] https://www.automobile-propre.com/voiture-electrique-vers-un-changement-massif-de-batteries-chez-hyundai/

[89] Source : *Advanced Materials for Clean and Sustainable Energy and Mobility EMIRI key R&I priorities,* Energy Materials Industrial Research Initiative
https://emiri.eu/uploads/content_files/65/value__file/EMIRI%20Technology%20Roadmap%20-%20September%202019%20(cond).pdf

Il existe de nombreux types de batteries, qui peuvent être regroupés en quelques catégories :

- les batteries actuelles de première génération (dites batteries à électrolyte liquide) devraient pouvoir arriver avant 2030 à des densités de cellule de 300 à 350 Wh/kg (soit environ 250 Wh/kg pour le *pack*) ce qui représente environ 360 kg pour une capacité de 90 kWh et une autonomie d'environ 400 à 450 km. Compte-tenu de la baisse du coût des batteries, il est possible que de telles batteries subsistent pendant plusieurs années et dominent le marché par rapport aux premières batteries à électrolyte solide ;
- les batteries dites solides devraient en effet présenter moins de risque incendie et être plus légères, avec des densités possibles de 400 à 500 Wh/kg (ce qui est probablement suffisant pour le secteur automobile) et donc un poids d'environ 250 kg pour une batterie de 100 kWh, mais leur coût de production reste incertain. Leur développement commercial n'est donc pas assuré à moins qu'elles ne présentent un avantage supplémentaire justifiant cette différence de prix : ce serait le cas si elles pouvaient se recharger par exemple en moins d'un quart d'heure. Ceci rejoint le propos de Jean-Marie Tarascon selon lequel : « les batteries tout solide sont prometteuses, mais la route sera longue que ce soit au niveau fondamental ou appliqué avant la commercialisation »[90] ;
- des batteries de densité énergétique massique encore plus importante, jusque 700 ou 800 Wh/kg (nécessaires pour l'aéronautique) sont possibles mais nécessitent un travail de recherche et développement important que le secteur automobile ne réalisera peut-être, voire probablement, pas. Dans ces conditions, il devient nécessaire de consacrer des crédits spécifiques pour la recherche et le développement à long terme de batteries pour les usages spécifiques de l'aérien.

On pourrait ainsi distinguer trois grandes périodes dans l'avenir des batteries :

- de 2021 à 2025 : il n'y aura pas de rupture technologique sur le marché mais des améliorations incrémentales, liées à l'évolution des compositions des anodes et des cathodes avec, notamment, la réduction de l'appel aux matériaux stratégiques ;
- de 2025 à 2030/2035 : on pourrait assister à l'émergence de batteries dites « tout solide » qui se caractérisent par l'usage d'électrolytes solides. Un électrolyte solide permet de revenir à des anodes métal (en lithium) plus réactives et d'accroître ainsi la capacité massique des batteries : il devrait en effet empêcher le développement de dentrites entre les électrodes, pouvant entraîner des courts-circuits et des débuts d'incendie. Fin novembre 2021, Nissan annonçait[91] qu'il allait ouvrir une usine pilote de batteries solides en 2024 à Yokohama et commencer une production en série en 2028 ;

[90] *Les batteries sont-elles la bonne option pour un développement durable ?* Jean-Marie Tarascon. Comptes rendus académie des Sciences Géosciences, Janvier 2020. https://comptes-rendus.academie-sciences.fr/geoscience/articles/10.5802/crgeos.27/

[91] https://www.lefigaro.fr/societes/voiture-electrique-nissan-investit-dans-la-batterie-du-futur-20211129

- après 2030/2035, on pourrait voir apparaître des batteries sans métal autre que le lithium, c'est-à-dire des batteries Li-S ou Li-air. Ce serait là un véritable saut technologique qui ne saurait être considéré aujourd'hui comme acquis, compte tenu des avancées scientifiques qu'il nécessite.

Le tableau ci-dessous résume l'évolution possible des technologies.

Maturité	Technologie	Capacité (Wh/kg)	Commentaire
Disponible	**Li-ion**	200	La référence actuelle
	Redox-flow	30	Stationnaire uniquement
Niveau start-up	**Na-ion (sodium-ion)**	100	Moins d'énergie, plus de puissance
	Li-ion : anode Si	–	Grande capacité mais gonflement
	Zn-air (zinc-air)	50	Métal-air accessible
En R&D proche	**Li-ion : électrolyte solide**	–	Renforce les autres technologies
	Li-S	500	Grande densité mais autodécharge
En R&D lointaine	**Li-Ion : cathode riche en lithium**	400	Oxydation de l'oxygène : instable
	Li-Air	12 000 (?)	Idéal mais très lointain

Tableau 3 : Caractéristiques principales et horizons temporels des technologies présentées dans cet article. Vert : Li-ion avancé – Rouge : technologies de rupture – Bleu : technologies pour le stationnaire. Tableau fourni par Jean-Pierre Hauet, Source : Jean Vergnet (Collège de France).

Ainsi, il n'existera pas une batterie universelle, mais différents types de batteries en fonction de l'usage retenu. On pourrait ainsi envisager :

- des batteries à bas coût et à densité raisonnable pour l'automobile (ce sont les batteries NCA ou NMC) ;
- des batteries à encore plus bas coût et avec une densité énergétique un peu plus faible pour les bus (ce sont les batteries lithium phosphate de fer dont le coût actuel est plus bas, tout au moins en Chine) ;
- des batteries plus coûteuses avec une plus grande densité énergétique massique, une très grande sécurité, et une fiabilité renforcée pour l'aéronautique (Nb : les satellites emportent dès aujourd'hui des batteries extrêmement fiables) ;
- des batteries, notamment à base de titanate de lithium, également plus coûteuses mais, se rechargeant rapidement, par exemple pour le transport routier longue distance avec deux chauffeurs se relayant en permanence : le transport routier longue distance à un chauffeur pourrait, quant à lui, reposer sur des batteries NMC actuelles se rechargeant à 80 % en 30 minutes.

Un certain nombre de technologies de batteries pourraient enfin se révéler être de véritables *game changers* :

- Sion power[92] et ses batteries 450 à 500 Wh/kg pour le transport routier ;
- Enebatt (batterie classique avec électrode entièrement en silicium) qui permettrait une recharge en cinq minutes ;
- les batteries lithium soufre (notamment *Oxys energy*) dans l'aéronautique ;
- les batteries à circulation (batteries redox-flow) pourraient se développer dans le maritime, la masse et le volume des réservoirs soulevant moins de problèmes que dans d'autres secteurs applicatifs ;
- l'entreprise israélienne StoreDot, distinguée comme l'une des entreprises pionnières en 2020 par BNEF[93], a produit des batteries de téléphone portable, de drones et de scooters, rechargeables en cinq minutes en remplaçant le graphite de l'anode par des « nanoparticules semi-conductrices de germanium ». Au-delà d'un marché de niche, correspondant à des batteries de petite taille, coûteuses, mais rechargeables rapidement, l'entreprise est désormais confrontée à un double défi : produire, d'une part, des batteries de plus grande taille (notamment pour l'automobile) en conservant la très faible résistance qui caractérise ses batteries et qui permet les recharges rapides constatées ; remplacer, d'autre part, le germanium par du silicium moins coûteux ;
- sans oublier les batteries dites tout solides, Prologium notamment, mais aussi Toyota qui devrait mettre sur le marché dès 2021 ses premiers véhicules avec de telles batteries[94] ;
- ni, à nettement plus long terme, les batteries organiques qui permettraient de réduire très fortement les émissions de gaz à effet de serre associées à leur fabrication : dans leur article de 2008 sur le futur des batteries[95], Michel Armand et Jean-Marie Tarascon s'interrogent sur la possibilité d'employer des molécules organiques, $Li_xC_6O_6$, issues de sucres naturels que l'on trouve dans les organismes vivants, en particulier dans le maïs, et de transformer par polycondensation l'acide malique contenu dans les pommes en un matériau appelé polyquinone, actif vis-à-vis du lithium. Ils soulignent cependant que les matériaux organiques présentent de sérieux inconvénients en termes de stabilité thermique et de solubilité dans les électrolytes et qu'ils correspondent à une faible densité d'énergie, ce qui limite leur utilisation dans les transports[96]. C'est un des axes de recherche

[92] https://sionpower.com/

[93] https://about.bnef.com/bnefpioneers/ ainsi que https://vimeo.com/451898398

[94] https://www.youtube.com/watch?v=G01xv1RyRVw&feature=emb_rel_end

[95] *Building better batteries*, M. Armand & J.-M. Tarascon, revue Nature, février 2008, https://www.nature.com/articles/451652a#citeas

[96] Voir également *La voiture de demain, carburants et électricité*, rapport de la mission présidée par Jean Syrota, Centre analyse stratégique, CGIET, 2011
http://archives.strategie.gouv.fr/cas/system/files/cas_rapp37_voiture_de_demain_web_0.pdf

de Mercedes pour la batterie du futur[97].

Le coût d'usage des batteries et leurs émissions de GES en ACV pourraient de plus décroître si des circuits économiques se mettaient en place pour leur assurer une seconde vie (usage stationnaire dès lors que leur puissance tombe en dessous de 75 % de la puissance initiale) voire une troisième vie en les recyclant (réutilisation de 60 à 80 % des matériaux).

Ainsi, **les progrès technologiques déjà réalisés sur les batteries conduisent à envisager une très forte progression de l'électricité non seulement pour les véhicules particuliers, mais aussi pour les véhicules industriels**. Le livre blanc de la filière pour les véhicules industriels électriques[98] montre, en s'appuyant sur une étude de McKinsey, que :

- « sur l'ensemble des segments, hormis pour les poids lourds longue distance, les véhicules électriques deviendront l'option la moins coûteuse dans les 5 à 10 prochaines années. Bénéficiant de technologies développées pour les bus notamment, dont l'industrialisation est lancée en 2018 sur le marché européen, les camions électriques vont progressivement montrer un coût total de possession équivalent voire moins élevé que les camions à motorisation thermique ; dans un premier temps pour la logistique de dernier kilomètre, puis pour du transport régional et intercités » ;
- « les coûts des véhicules électriques diminueront rapidement, principalement en raison d'une diminution des coûts des batteries ».

Même si les trajets du quotidien peuvent être parcourus grâce à des recharges la nuit ou au travail, le véritable déploiement du véhicule électrique pour les particuliers et les VUL n'est cependant envisageable que si un nombre suffisant de stations de recharge rapide est installé le long des principaux axes routiers, et sur les stations d'autoroutes en particulier. Il ne sera de plus possible que si la mobilité électrique reçoit l'adhésion de la société française.

Le développement de la mobilité électrique des poids lourds longue distance, dont le prototype est le « semi » de Tesla[99], ne se réalisera que si un standard de recharge se développe (l'association *CharIn* est en train de développer un nouveau standard de recharge pour des puissances supérieures au MW) et que si des stations de recharge se mettent effectivement en place le long des principaux axes européens).

3.1.2 Les autres progrès dans la conception du véhicule électrique, et en particulier dans les moteurs, ne doivent pas être négligés

Le développement des véhicules électriques bénéficie également d'une conception entièrement repensée du véhicule par rapport à un véhicule thermique, d'une chaine de traction qui s'améliore progressivement, de moteurs plus performants et d'un

[97] https://www.largus.fr/actualite-automobile/voitures-electriques-mercedes-travaille-sur-la-batterie-organique-10277396.html

[98] *L'électricité pour la filière des véhicules industriels*, Novembre 2019 FFC, AVERE-France et URF dans le cadre des travaux de la PFA. https://www.unionroutiere.fr/actualite/livre-blanc-lelectricite-pour-la-filiere-des-vehicules-industriels-et-urbains/

[99] https://www.tesla.com/semi

aérodynamisme amélioré[100].

Les performances en termes de consommation énergétique de la Tesla modèle 3 s'expliquent en partie par sa motorisation qui constitue une réelle avancée technologique : utilisation de deux moteurs électriques couplés (le premier à induction qui présente un très bon rendement à faible vitesse en milieu urbain, le second avec aimants permanents dont les performances sont meilleurs sur autoroute), un positionnement des aimants permanents dans le rotor (et non dans le stator, innovation également présente sur la Toyota Prius et les BMW i3 et i8[101]), réglage électronique optimal du moteur à reluctance variable, utilisation d'isolants pour segmenter chaque aimant permanent en quatre sections pour diminuer les courants de Foucault et l'échauffement.

3.1.3 Les progrès effectués sur les batteries sont aujourd'hui insuffisants pour un réel développement de l'aérien électrique

Les progrès technologiques effectués jusqu'à présent et envisagés jusque 2020 ne permettent pas d'envisager un déploiement généralisé de la mobilité électrique dans l'aérien. Dans le très court terme, le développement de l'aviation électrique, favorisé par les progrès technologiques des batteries va se concentrer sur des secteurs très précis tels que les avions de quelques places ou les engins à décollage vertical. Safran envisage ainsi, dans sa vision du futur de l'aviation électrique présentée lors du salon du Bourget 2019, le développement d'abord de taxis volants, puis, après 2025 d'un *commuter* de dix places (pour des énergies transmises en interne de 500 kW) et d'un avion régional de 40 places après 2030. Pour aller plus loin et envisager des avions régionaux de plus grande capacité, il faut aboutir à une plus grande densité énergétique massique des batteries ainsi qu'à des moteurs et des réseaux électriques adaptés à des puissances supérieures au MW[102]. De telles technologies de moteurs et de réseaux existent déjà dans les TGV ou dans certains paquebots, mais sont malheureusement très lourdes et ne sont pas adaptées à l'aéronautique.

3.1.4 Un développement de l'électrique limité dans le maritime, mais important pour le fluvial et le maritime à courte distance

Dans le maritime, l'électrique est envisageable (sinon nécessaire) pour le ravitaillement à l'escale des navires et des bateaux et ne peut être envisagé, pour le moment, que pour des bateaux pouvant se recharger au bout de quelques heures de navigation, tels que les ferries. Là encore, des motorisations hybrides sont possibles notamment pour les navires de pêche, avec une utilisation du moteur électrique une fois la zone de pêche atteinte.

---

[100] La Mercedes EQS détient aujourd'hui le record avec une valeur de son coefficient aérodynamique de 0,20 contre 0,23 pour la Tesla Model 3 qui était jusqu'alors la voiture la plus performante. « A la forme générale en arc de la Mercedes EQS, s'ajoute un travail sur le capot plongeant, des portes à faux avant et arrière très courts, des poignées de portes rétractables ou encore les joints de portes et de fenêtres censé réduire les prises d'air et également réduire les nuisances aéroacoustiques ». https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/voiture-electrique-mercedes-eqs-voiture-serie-plus-aerodynamique-monde-86876/

[101] Voir notamment : *Présentation moteur : Tesla Model 3,* Guillaume Darding - 18 mars 2020, https://www.guillaumedarding.fr/presentation-moteur-tesla-model-3-8025367.html ainsi que la vidéo intitulée *Le moteur de Tesla Model 3 – Une ingénierie de génie à son service* https://www.youtube.com/watch?v=UQ9Cfk-ovXs

[102] Une thèse du MIT envisage la faisabilité d'avions de 180 passagers sur 500 mni, mais il suppose pour une densité énergétique massique des cellules de 800 Wh/kg qui n'existe pas pour le moment

Si, dans le fluvial, l'électricité a été jusqu'à présent essentiellement considérée comme une énergie permettant l'approvisionnement à quai des bateaux, les progrès techniques permettent désormais de l'envisager également comme système de propulsion. 70 bateaux électriques de passagers et de marchandises, existent déjà en France pour la navigation fluviale, côtière ainsi que sur des lacs. La Commission centrale pour la navigation du Rhin (CCNR) et le port de Rotterdam évoquent ainsi la mise en service de porte-conteneurs électriques à batteries.

3.1.5 Des recherches nécessaires

Les principaux axes de recherche et développement concernent donc l'amélioration de la densité énergétique massique des batteries, l'économie de matériaux stratégiques, la mise au point de nouveaux formats de recharges pour les camions (à des puissances de plus de 1 MWe) et la gestion des fortes puissances.

3.1.6 Le développement nécessaire du recyclage des batteries

L'un des reproches souvent effectué à l'égard de la mobilité électrique concerne la disponibilité des ressources minières. Celle-ci semble cependant assurée à un horizon industriel de dix ou vingt ans (sauf peut-être pour le cuivre) : les réserves et ressources de lithium ont été multipliées par 4 de 2005 à 2018[103]. Les inquiétudes fortes qui étaient apparues sur la disponibilité du cobalt pour le développement de la mobilité électrique sont retombées en raison de la découverte de nouveaux gisements et de la réduction très importante du cobalt employé dans la composition des électrodes les plus récentes (le NMC 811[104] contient une proportion de cobalt beaucoup plus faible que le NMC 111. La proportion serait encore plus faible dans les NCA, Tesla annonçant même la possibilité de fabriquer des batteries quasiment sans cobalt). Ceci ne veut pas dire pour autant que le cours de certaines d'entre elles ne connaîtra pas des envolées importantes, conformément à la loi de l'offre et de la demande des matières premières, ni que celles-ci ne donneront pas lieu à des tensions géopolitiques : l'évolution du cours du pétrole en donne un bon exemple. Dans tous les cas, le développement du recyclage participe d'une bonne gestion des ressources de la planète : la mise en place d'une obligation réglementaire de recyclage des batteries, conformément au projet européen de règlement sur les batteries[105], proposé en 2020 par la Commission, devrait conduire à la création d'une filière du recyclage. Sa montée en puissance s'effectuera cependant avec un décalage de dix à quinze ans par

---

[103] *The penetration of electric vehicle (EV) at the global level would push the demand of cumulated lithium but the results show us an absence of geological criticality. Nevertheless, they have clearly highlighted other different forms of vulnerabilities, whether economic, industrial, geopolitical or environmental.* CRITICAL RAW MATERIALS AND TRANSPORTATION SECTOR ELECTRIFICATION / February 2019. NB 1 : étude E4T Ademe : à long terme, le risque d'approvisionnement d'un point de vue géologique paraît donc limité

[104] « *NMC 811 is a cathode composition with 80% nickel, 10% manganese, and 10% cobalt. It's basically an improvement of what's on the market already, rather than a distinct, novel chemistry. NMC (Ni-Mn-Co) cathodes with different Ni-Mn-Co compositions have been around for almost 20 years now, with many of the key publications and patents emerging already in the mid-2000s(1). Following the initial commercial success of NMC 111 (⅓ Ni, ⅓ Mn, ⅓ Co – also abbreviated as NMC 333), NMC cathodes have become mainstream, being used in the BMW i3, Chevy Bolt, or new Nissan Leaf (on the grid side, it's the Tesla Powerwall)* ». https://researchinterfaces.com/know-next-generation-nmc-811-cathode/

[105]Ce règlement comprend des obligations fortes de recyclage pour les métaux stratégiques : Li, Co et Ni. https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/batteries/Proposal_for_a_Regulation_on_batteries_and_waste_batteries.pdf

rapport à la courbe des ventes des véhicules électriques neufs.

3.1.7 Attention : la puissance disponible des batteries lithium ion diminue lors du cycle de décharge

Point enfin à garder en mémoire : alors que la tension d'une batterie au plomb est quasiment constante durant la décharge, elle baisse beaucoup plus fortement pour une batterie au lithium si bien qu'une batterie au lithium quasiment déchargée n'aura qu'une puissance disponible faible. Cette diminution de la puissance n'est quasiment pas ressentie par l'utilisateur d'un véhicule électrique qui dispose d'une puissance encore importante même en fin de décharge. Elle peut par contre être critique sur un avion électrique : le pilote doit vérifier non seulement que la charge de la batterie est suffisante pour le parcours, mais que la puissance l'est également, notamment lors des phases de décollage.

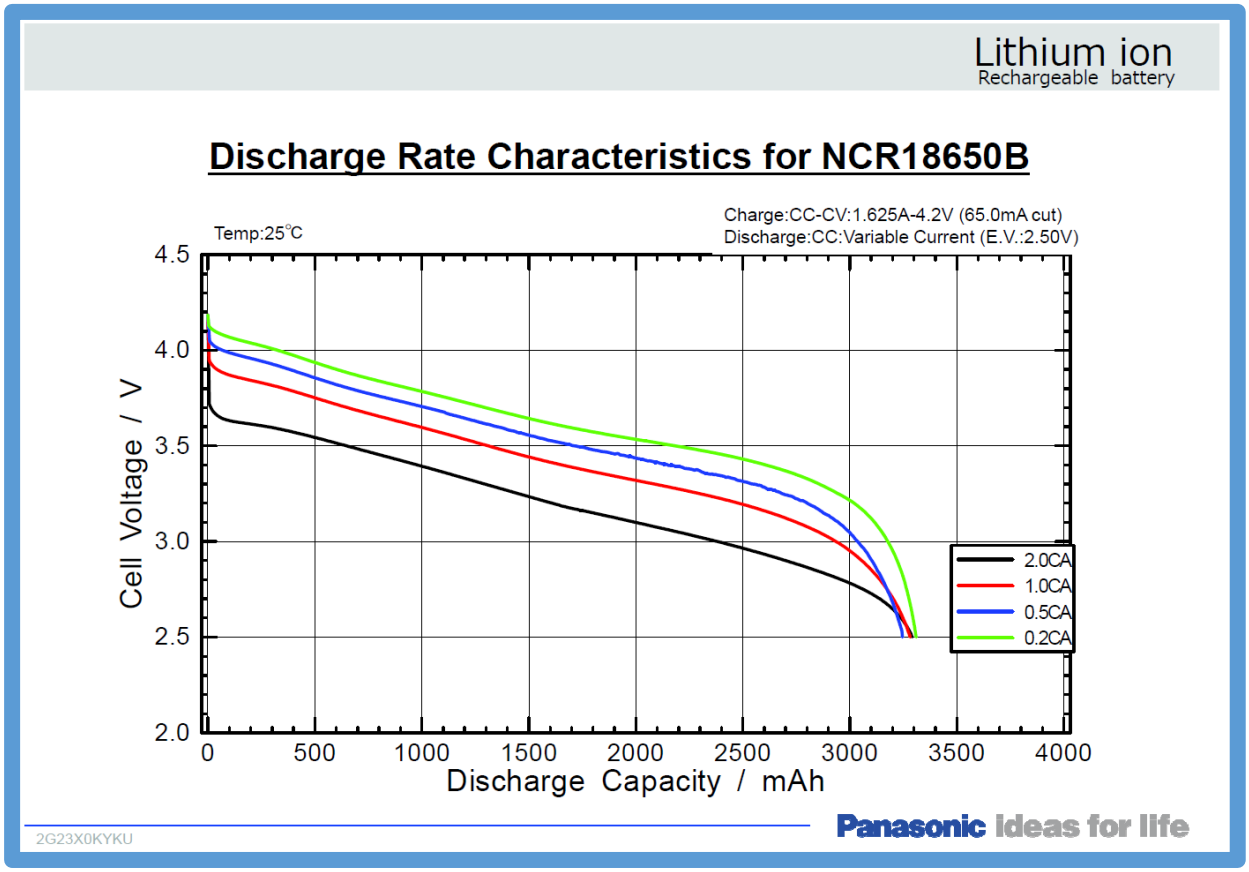


Figure 12 : Évolution de la tension d'un accumulateur lithium ion NCR18650 B lors d'une décharge (à intensité constante)

3.2 Le moteur à combustion interne et ses évolutions possibles

Les véhicules que nous utilisons sont issus de l'optimisation poussée de technologies apparues au début du siècle dernier : après un foisonnement de recherches (le premier véhicule à franchir la barrière des 100 km/h , en 1899, « *La jamais contente* », était propulsée par un moteur électrique), deux grandes filières se sont imposées : le moteur à allumage commandé (dit encore à essence, à cycle Beau de Rochas ou encore à cycle de Otto) et le moteur à auto allumage (diesel) ; tous deux utilisent principalement des carburants liquides issus du pétrole, mais des carburants de synthèse ont été utilisés pendant la seconde

guerre mondiale ou plus récemment par l'Afrique du Sud qui ne pouvait accéder aux ressources pétrolières en raison des sanctions internationales contre sa politique d'*apartheid* et qui a produit des carburants de synthèse à partir du charbon présent sur son territoire. Depuis 2004, et l'arrivée du gaz du Mozambique, l'Afrique du sud produit des carburants de synthèse à partir du méthane.

Ces filières n'ont cessé d'évoluer vers :

- une hausse des rendements énergétiques ;
- une baisse des pollutions locales ;
- une diversification toujours plus grande des carburants (notamment le GPL, le gaz naturel, le biogaz, les bio-carburants liquides, plus récemment l'ammoniac ou l'hydrogène).

3.2.1 Les rendements énergétiques des moteurs thermiques actuels des véhicules particuliers

On demande aux moteurs d'automobiles d'être de petite taille, rapides, peu coûteux et de travailler dans une plage extrêmement étendue de performances avec des niveaux de pollution très faibles. Les rendements des moteurs des véhicules particuliers (VP) et des VUL, sont faibles en parcours urbain et maximum (par construction) à la vitesse de 130 km/h.

Parcours	Moyen	Extra urbain	urbain
Moteur à essence	**19 %**	**27 %**	**12 %**
Moteur diesel	**24 %**	**32 %**	**16 %**

Tableau 4 : Rendements énergétiques des moteurs essence et diesel non hybridés. Source : IFPEN, décembre 2020[106]

Les diesels ont des taux de compression plus élevés, ce qui favorise une efficacité énergétique meilleure d'environ 20 % par rapport aux moteurs à essence offrant les mêmes performances.

Toutefois comme le carburant utilisé dans les moteur diesel (le gazole) est plus carboné que l'essence, l'écart des émissions de CO_2 est moindre. Par ailleurs, un des procédés de dépollution des oxydes d'azotes émis par le diesel provoque des émissions de N_2O et de CH_4 (polluants non réglementés) qui réduisent d'un facteur 2 les écarts entre ces types de motorisation.

L'hybridation des moteurs permet d'utiliser le moteur thermique, dans une plage où son rendement est bon, pour recharger une batterie et d'utiliser une chaine de propulsion électrique dans les plages où le rendement du moteur thermique est faible. L'IFPEN a analysé les gains permis par l'hybridation.

Le véhicule hybride présente des émissions de CO_2 inférieures en moyenne de 14 % sur le

[106] https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/sites/ifpen.fr/files/inline-images/Innovation%20et%20industrie/Motorisations%20thermiques/Etude-emissions-Euro-6d-TEMP_IFPEN-DGEC_Rapport-de-synthese_dec2020.pdf

périmètre évalué. Ce gain est en effet de 33 % sur les parties urbaines, alors qu'il est nul (+0,6 %) sur les tronçons autoroutiers. Du fait de la faiblesse du rendement des moteurs à essence en cycle urbain, les gains de l'hybridation sont plus élevés pour un moteur à essence que pour un moteur diesel, ce qui explique que peu de moteurs diesels sont hybridés.

3.2.2 Les rendements énergétiques des moteurs thermiques actuels des poids lourds

Les moteurs de PL ont un meilleur rendement énergétique que les moteurs de voiture. Ils sont optimisés pour une vitesse de 80 ou 90 km/h sur autoroute. Le tableau suivant retrace les rendements des moteurs de PL donnés par les constructeurs :

	2010	2020	Objectif 2030
Allumage commandé		**39 %**	**45 %**
			Introduction d'un cycle supplémentaire à l'échappement (WHR)
Diesel	**38 %**	**42 %**	**51 %**

Tableau 5 : Rendements des moteurs PL données par les constructeurs

Les moteurs utilisant le gaz naturel sont (sauf exception du VOLVO à double injection) des moteurs à allumage commandé ; le contenu en CO_2 plus faible du gaz naturel compense le différentiel de rendement et au final les émissions de CO_2 sont légèrement inférieures.

Le CNR constate effectivement une baisse réelle des consommations : La consommation moyenne des ensembles articulés (tracteur + remorque d'un PTAC de 40 ou 44 t) est de 31,4 l/100 km (source CNR enquête longue distance 2018) en baisse par rapport à 2010, année où la consommation était de 34 l/100 km.

L'Union européenne impose par rapport à 2019 une baisse des émissions à l'échappement de 25 % à 2025 et de 30 % d'ici à 2030 en moyenne sur les Pl neufs vendus : celle-ci devrait être essentiellement atteinte par l'hybridation des véhicules, et complétée par la vente de plus en plus importante de poids lourds électriques.

3.3 L'utilisation du gaz naturel d'origine fossile devrait diminuer considérablement mais pourrait donner lieu, pour les PL et les navires, au développement du biogaz et du méthane de synthèse ainsi que, dans le maritime, à son utilisation associée à la capture du CO_2.

La combustion du gaz naturel conduit à des émissions de CO_2, certes moins importantes que pour le lignite (4,2 t CO_2/tep), le charbon (4,0 t CO_2/tep) ou l'essence (2,9 t CO_2/tep), mais néanmoins encore notables (2,3 t CO_2/tep). La programmation pluriannuelle de l'énergie, publiée au premier semestre 2020, prévoit donc une réduction de la consommation de gaz naturel (fossile) de 13 % d'ici 2023 et de 25 % d'ici 2028 par rapport au niveau de consommation de 2017 : ces réductions devraient intervenir essentiellement dans le résidentiel-tertiaire. La Stratégie nationale bas carbone (SNBC) prévoit d'aboutir à 2050 à des émissions nulles ou quasi-nulles du secteur énergétique.

Les véhicules au gaz ont des consommations plus basses : deux technologies sont en concurrence. Les modèle gaz Iveco (LNG= gaz liquéfié) avec moteur à allumage commandé consomment 28 kg de méthane /100km à 79 km/h en moyenne. Et le Volvo FH 460 utilisant du galliquéfié, mais aussi du gasoil, de manière simultanée[107] : 23 kg/100 km de gaz + 2l/100 de gazole pour de meilleurs performances de vitesse (82 km/h).

Dans une période de transition, le recours au gaz naturel permet pour un surcoût modéré de diminuer les émissions de particules[108]. Il conduit également à une réduction des émissions des gaz à effet de serre[109] plus ou moins importante suivant la motorisation considérée en référence[110]. Elle constitue donc une solution de transition à la fois dans le routier[111] et le maritime où, moyennant une légère augmentation du *Total cost of ownership*, elle permet aux navires de circuler dans les zones réglementées en matière de pollution.

3.3.1 L'utilisation du gaz naturel pour le maritime

Dans le domaine maritime, l'utilisation du gaz naturel va cependant donner lieu, pour les moteurs *dual fuel,* à des émissions de méthane imbrûlé, correspondant au phénomène dit de *méthane slip,* qui pénalise la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Cette pénalisation peut être néanmoins fortement réduite suivant le type de moteur retenu. La réduction des émissions de gaz à effet de serre peut atteindre 21 %, si les phénomènes de *méthane slip* sont pris en compte dès le choix du type de moteur[112] (ou si les navires ont été équipés de dispositifs permettant de les réduire[113]) : il pourrait donc être logique

---

[107] Volvo a fait le choix avec son FH d'une technologie qui utilise du GNL et du diesel : « Il ne s'agit pas d'un moteur à explosion avec des bougies pour l'allumage, mais d'un bloc à cycle diesel monté avec 2 rampes d'injection communes et un injecteur de gazole par cylindre » résumait en 2018 Rémi Lemoine, Responsable Produit pour les véhicules à énergies alternatives chez Volvo Trucks. Attention ! On ne parle ici de motorisation « dual fuel » où chaque carburant peut intervenir de façon indépendante. https://www.gaz-mobilite.fr/actus/volvo-fh-gnl-notre-test-consommation-reelle-2770.html

[108] Le gain de NOx apporté par une motorisation gaz face à une motorisation diesel Euro VI est un sujet controversé. Les résultats obtenus ne vont pas tous dans le même sens. Les émissions de particules d'une motorisation gaz sont en revanche plus faibles : il faut toutefois garder à l'esprit que, d'après le CITEPA, les émissions de particules à l'échappement d'un camion diesel Euro VI représentent moins de 5% des émissions totales du camion (les 95% restant sont les freins, les pneus et la route).

[109] « *For passenger cars, on a WtW basis, natural gas reduces GHG emissions by 23 % compared with petrol and by 7 % compared with diesel. In heavy-duty applications, benefits compared to diesel amount to 16% for CNG up to 15 % for LNG. In maritime applications, the use of LNG provides an overall Well-to-Wake benefit up to 21 % compared with conventional HFO (Heavy-Fuel Oil) fuels* ». *Greenhouse Gas Intensity from Natural Gas in Transport*, Thinkstep on behalf on NGVA Europe,

[110] Deux technologies sont en concurrence. Les modèle gaz Iveco (LNG= gaz liquéfié) avec moteur à allumage commandé consomment 28 kg de méthane /100km à 79 km/h en moyenne. Et le Volvo FH 460 : 23 kg/100 km de gaz + 2l/100 de gazole pour de meilleurs performances de vitesse (82 km/h).

[111] Les véhicules au gaz ont des consommations plus basses : deux technologies sont en concurrence. Les modèle gaz Iveco (LNG= gaz liquéfié) avec moteur à allumage commandé consomment 28 kg de méthane /100km à 79 km/h en moyenne. Et le Volvo FH 460 : 23 kg/100 km de gaz + 2l/100 de gazole pour de meilleurs performances de vitesse (82 km/h).

[112] « *Considering maritime applications, Well-to-Wake GHG emissions for an LNG powered ship are lower than those determined for a ship powered by either heavy fuel oil or marine diesel oil: LNG fuelled 2-stroke engines with high pressure injection show a benefit of 21 % compared with HFO vessels, while 4-stroke engines emissions are 11 % lower than HFO* ». *Ibidem*

[113] Alfa Laval et WINGD ont récemment communiqué sur la mise au point d'un dispositif de recirculation des gaz de combustion réduisant de moitié ces émissions. MAN a annoncé un dispositif similaire. https://www.alfalaval.com/contentassets/fa6a219e48214213ae966df529b33a2b/wkr0006.pdf

d'imposer lors de la conception (voire en exploitation) aux navires utilisant le gaz naturel de recourir à des motorisations permettant de réduire ce phénomène.

Illustration 6 : Le Salamanca - Navire propulsé au gaz naturel liquéfié (GNL). Source : Adeline Adelsky - Site : gaz-mobilite.fr

À moyen terme, l'utilisation du gaz naturel d'origine fossile ne permettra pas d'atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre : dans son *World energy outlook* de 2019, l'Agence internationale de l'énergie considère que le recours au gaz naturel dans le secteur maritime risque de conduire à des *stranded assets* (actifs irrécupérables : autrement dit à des navires qui, compte tenu des objectifs renforcés de réduction des émissions de GES, pourraient, ne plus être utilisables avant d'être parvenus à la rentabilité). À cet horizon, le recours au gaz naturel n'est donc valable que dans la mesure où il permet de réduire très fortement les émissions de gaz à effet de serre sous peine pour les armateurs de se retrouver avec des navires qui ne répondraient pas aux normes d'émissions futures.

Quatre solutions sont possibles :

- le recours au biogaz : comme le souligne France stratégie, la production de biogaz peut être considérée comme un recyclage du dioxyde de carbone contenu dans l'atmosphère ou du carbone contenu dans les végétaux, qui ne conduit donc pas à de nouvelles émissions de CO_2. Le biogaz peut ainsi être obtenu à partir de la décomposition de la matière organique contenue notamment dans les déjections

animales, dans les résidus d'origine agricole ou dans les cultures intermédiaires (et éventuellement dédiées) sous l'action de micro-organismes et en l'absence d'oxygène. Il doit ensuite être épuré — et transformé en biométhane — avant d'être injecté dans le réseau. Ces opérations de méthanisation, bien connues des agriculteurs, sont en forte croissance et ont fourni au réseau 2,2 TWh fin 2020, contre 1,2 TWh fin 2019 et 406 GWh de gaz en 2017, soit 0,5 % de la consommation française de gaz en 2020 [114]. Le biogaz peut également être produit par pyrogazéification du bois, autrement dit par transformation du bois en gaz sous l'effet de la chaleur et en l'absence d'oxygène. Cette technique au stade de l'expérimentation devrait permettre d'augmenter la production de biogaz possible, même si son coût paraît aujourd'hui élevé. Dans les deux cas, le biogaz ainsi produit pourrait soit être comprimé et acheminé par le réseau de distribution vers une station de distribution[115], soit, moyennant un coût supplémentaire, être liquéfié[116] et transporté par camion. La disponibilité du biogaz devrait toutefois rester limitée[117] et il sera d'abord utilisé dans les secteurs où le gaz est indispensable (industrie, production d'électricité, voire chauffage pour certaines installations dans le résidentiel tertiaire). Son coût de production à partir de la biomasse dans des méthaniseurs (aux environs de 95 €/MWh) est trois à six fois plus élevé que le coût d'importation du gaz naturel fossile[118] (suivant l'évolution des cours) et sa production n'est pour le moment développée que dans quelques pays. Son utilisation dans le domaine du transport peut donc intervenir mais plutôt sous forme de niche ;

- le méthane de synthèse : le méthane peut également être produit sous forme de gaz naturel de synthèse, en fabriquant de l'hydrogène par électrolyse de l'eau puis, dans un second temps, en lui adjoignant du CO_2 (capté, de préférence, dans l'air pour se rapprocher d'une chaîne neutre en carbone[119]). Cette technique est cependant *a priori* plus coûteuse que la méthanisation ;
- l'utilisation de moteurs flexibles permettant dans le futur de basculer vers des carburants plus proches de la neutralité carbone, notamment l'ammoniac, qui est

[114] La consommation de gaz en France en 2020 s'est élevée à 445 TWh.

[115] Moyennant une compression supplémentaire, le biogaz pourrait également être injecté dans le réseau de transport (ce qui est appelé le « rebours »); il aurait accès alors à des capacités de stockage importantes (130TWh en France).

[116] Un démonstrateur industriel de liquéfaction de biogaz de la société Cryopur a fonctionné quelques mois sur le site de Valenton, exploité par Suez. Ce démonstrateur a été un succès et a permis à la société française Cryopur d'exporter deux usines de liquéfaction du biogaz : une en Irlande en fonctionnement depuis 2018, la seconde en Norvège, en cours de construction. Air Liquide produit et exporte des installations de liquéfaction en Europe. On peut également citer plusieurs start-up françaises comme Azzola ou Sublime Energie qui développent des solutions originales et innovantes de liquéfaction du biogaz.

[117] Voir notamment *le verdissement du gaz*, rapport rédigé sour la présidence d'Olivier APPERT, membre de l'Académie des technologies et de Philippe MAUGUIN, Pdg de l'INRA, https://www.eclairerlavenir.fr/rapports/rapport-2019-gt1/ L'article 71 de la loi d'orientation des mobilités, en prévoyant un complément de rémunération adapté à la production de gaz à l'écart des réseaux actuels de distribution, devrait contribuer au développement de cette ressource.

[118] Le coût du biogaz obtenu par pyrogazéification devrait être plus élevé.

[119] Le méthane de synthèse n'est vraiment vertueux que si la source de CO_2 est elle-même verte : le recyclage du CO_2 issu des cimenteries permet de lui faire faire un cycle supplémentaire mais à la fin cela conduit bien à une augmentation du CO_2 dans l'atmosphère. Le recyclage du CO_2 issu de la méthanisation (50 % CH_4 et 50 % CO_2) serait lui plus vertueux mais les quantités sont limitées.

produit industriellement à partir d'hydrogène[120] et qui est déjà largement utilisé pour réfrigération ou pour la fabrication d'engrais, mais qui présente des risques de sécurité pour l'homme et de toxicité pour le milieu marin. Des études sont en cours en 2021 pour valider la compatibilité des cuves de gaz naturel liquide (GNL), type C (entièrement pressurisées [121]) ou à membrane [122] , pour l'ammoniac. La transformation d'un moteur à gaz en moteur à ammoniac devrait être possible : son intérêt économique dépendra du prix des carburants. Elle présente un gain énergétique : l'ammoniac devient liquide à la pression atmosphérique à - 33,5 °C tandis que le gaz naturel doit être refroidi à - 162 °C. Le réemploi des cuves pour l'ammoniac conduit cependant à une réduction de l'autonomie du navire, la densité énergétique de l'ammoniac étant 1,8 fois moindre que celle du GNL. En revanche, elle évite l'installation de nouvelles cuves, qui seraient nécessaires pour stocker le CO_2 dans la mise en œuvre d'une solution de capture à bord ;

- **le recours au GNL équipé d'un dispositif de capture et de stockage du CO_2** pour les navires les plus importants. Cette technologie permettrait de conserver les motorisations existantes ainsi que les chaînes d'approvisionnement en gaz naturel. Elle est envisagée notamment dans la stratégie japonaise et devrait être expérimentée par une compagnie maritime japonaise[123]. De plus, réunis au sein de l'*Oil and Gas Climate Initiative* (OGCI), douze géants pétroliers et gaziers, dont Saudi Aramco, ExxonMobil, Chevron et Total, ont annoncé en juillet 2020 leur intention de réduire collectivement « l'intensité carbone » de leurs activités de production : ce qui se traduit dans le domaine du maritime par une expérimentation de capture et stockage du carbone sur un navire. Les études menées dans le cadre du projet CO_2ASTS[124] et portant sur trois types de navires (un bateau de navigation intérieure, une drague de 7600 kW, un paquebot de croisière de 36 MW) conduisent à un coût de la tonne de CO_2 évitée[125] compris entre 100 et 300 €/tCO_2 et montrent que cette technologie pourrait être envisagée pour de nombreux navires sans être limitée aux seuls navires de très grande taille. L'installation de ce dispositif à bord d'un navire utilisant le GNL comme carburant permet de bénéficier d'une source froide pour la liquéfaction du CO_2 et de la chaleur de la combustion pour la régénération du solvant Cette technique n'est cependant pas encore dans une phase de déploiement industriel :le **CCS (*Carbon Capture and Storage*), déjà expérimenté dans l'industrie, doit être adapté aux navires** et pourrait, si son intérêt économique est confirmé, équiper non seulement les navires neufs, mais également les navires existants à travers des opérations de *rétrofit*. Le CO_2 ainsi obtenu à bord des navires pourrait être soit transporté et stocké dans des couches géologiques, notamment au large de la Norvège pour

[120] Procédé Haber-Bosch

[121] « Les citernes de type "C" sont normalement des réservoirs pressurisés, sphériques ou cylindriques, avec des pressions de conception supérieures à 4 bars ».

https://www.isgintt.org/files/documents/Chapter_33fr_isgintt_062010.pdf

[122] Voir notamment https://www.gtt.fr/fr/applications/lng-brick

[123] https://www.journalmarinemarchande.eu/filinfo/k-line-va-deployer-a-bord-un-demonstrateur-de-captage-de-co2

[124] *CO2ASTS – carbon capture, storage and transfer in shipping : A technical and economic feasibility study, Public Concise Report*, Juliana Monteiro, Research Scientist at TNO, https://www.conoship.com/wp-content/uploads/2020/06/200513-CO2ASTS-Public-Concise-Report.pdf

[125] Ce coût correspond à la capture et stockage à bord du navire mais ne comprend pas de coût soit pour le stockage en couche géologique, soit pour sa réutilisation.

l'Union européenne[126], soit réutilisé, notamment dans la fabrication de carburants synthétiques (à condition de trouver le modèle économique correspondant). Un navire équipé d'un dispositif de capture et stockage de CO_2 et utilisant du biogaz pourrait conduire à des émissions négatives, mais devrait probablement bénéficier d'un prix élevé du CO_2 pour se développer.

Les avantages et les inconvénients de ces quatre solutions doivent être comparés et leurs coûts doivent être précisés à travers un certain nombre d'expérimentations : leurs conséquences sur le design des navires sont différentes. Dans la mesure où l'une de ces solutions pourrait être effectivement mise en place dès la conception des nouveaux navires et à des conditions raisonnables de coût, le gaz pourrait donc constituer une solution se rapprochant de la neutralité carbone. L'article 6 du décret approuvant la programmation pluriannuelle de l'énergie (PPE)[127] a d'ailleurs retenu comme objectif le déploiement dans tous les grands ports [128] d'infrastructures de recharge ou de ravitaillement ouvertes aux professionnels pour le GNL maritime avant le 31 décembre 2023. En parallèle, si la capture à bord du CO_2 se développait, l'étude du stockage de CO_2 liquide dans les ports devrait être menée.

3.3.2 L'utilisation du gaz naturel pour les poids lourds

L'utilisation du gaz naturel pour les poids lourds peut constituer une solution de transition. Si les émissions d'un poids lourd fonctionnant au gaz naturel peuvent être plus faibles que celles d'un diesel d'environ 20 %, en revanche, celles d'un poids lourd fonctionnant au gaz naturel vert sont nettement réduites. Une solution consisterait donc à généraliser le déploiement des poids lourds fonctionnant d'abord au gaz naturel puis progressivement au biogaz en s'appuyant d'abord sur le déploiement d'un réseau de bornes de recharge puis sur la production croissante de gaz vert. À 2050, l'exercice 100 % gaz renouvelable de l'Ademe envisage ainsi un basculement du transport routier de marchandises vers le gaz naturel : la consommation de gaz représenterait ainsi 90 TWh à l'horizon 2050. Le principal avantage de cette solution réside dans le gain qu'elle représente en termes d'émissions de gaz à effet de serre : les émissions associées à la production du gaz vert représenteraient 20 % des émissions actuelles d'un PL diesel et seraient donc comparables (sinon légèrement supérieures à celles d'un PL électrique : ce calcul est à préciser en tenant compte notamment des émissions de méthane produites ou évitées). Deuxième avantage, le méthane ainsi produit pourrait donner lieu à une filière de production essentiellement française depuis la production de la plante, celle du méthane jusqu'à la fabrication des moteurs correspondants avec des usines situées en France.

[126] Voir notamment le projet Northern lights mené par Equinor https://www.equinor.com/en/what-we-do/northern-lights.html

[127] Décret n° 2020-456 du 21 avril 2020 relatif à la programmation pluriannuelle de l'énergie https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000041814432/

[128] Certains ports comme Bordeaux ou Nantes Saint-Nazaire offrent déjà un service de ce type à partir de citernes routières (truck-to-ship) tandis que le GPM de Marseille accueillera fin 2021 un navire avitailleur pour des opérations en bord à bord. Les terminaux méthaniers existants sur les trois façades maritimes (Fos, Montoir de Bretagne et Dunkerque) offrent à cette fin de grandes capacités de stockage.

Illustration 7 : Véhicule au GNL - Crédit : Laurent Mignaux/Terra

Pour que cette solution puisse se développer, les questions de coût et de disponibilité de la matière première devront être résolues dans le futur. Le rapport de la CRE de juillet 2019 sur le gaz d'origine renouvelable souligne qu'au terme de l'analyse de ses différentes technologies de production, la méthanisation apparaît comme la technologie la plus mature de production du biométhane et présente le modèle économique le plus crédible pour assurer la production de biométhane de première génération, à condition de bénéficier d'une intervention publique dont une partie peut correspondre à ses externalités positives. Il précise de plus qu'au regard des ressources disponibles sur le territoire, l'objectif d'une production représentant 10 % de la consommation de gaz en 2030 est réaliste, soit une production de 39 à 42 TWh de biométhane pour des coûts qui ne devraient pas excéder deux ou trois fois le prix du gaz aujourd'hui importé et qui peuvent être réduits si l'on intègre les externalités associées à la méthanisation.

Au-delà de cette date, le rapport souligne que d'autres sources de production sont possibles (production de biométhane à l'aide de cultures intermédiaires à vocation énergétique (CIVE) sur l'ensemble du territoire) et que d'autres technologies de gaz vert (pyrogazéification et power-to-gas) sont également susceptibles de prouver leur maturité à cet horizon. Mais elles restent hypothétiques et ont un coût aujourd'hui élevé. Dans un monde neutre en carbone, ce gaz renouvelable sera d'abord utilisé pour l'industrie et la production d'électricité en pointe ou en semi-base (de l'ordre de 100TWh pour ces deux usages), ainsi que pour les installations de chauffage au gaz qui subsisteraient. La prochaine décennie devrait nous permettre de mieux cerner les quantités de gaz renouvelables disponibles et leurs coûts de production.

Le graphique ci-dessous exprimé en t.km montre ainsi que si un poids lourd au gaz présente aujourd'hui un meilleur *total cost of ownership* (TCO) à la tonne kilomètre que ses équivalents diesel et électrique, ce résultat s'inverse si l'on prend en compte le coût de production réel (ne tenant pas compte d'autres externalités) du biogaz : les prix de

fourniture du gaz à la pompe retenus pour ce calcul sont de 0,85 €/kg pour le gaz naturel d'origine fossile et de 1,60 €/kg pour le biogaz (en incluant dans ce prix le coût actuel de production du biogaz voisin de 95 €/MWh).

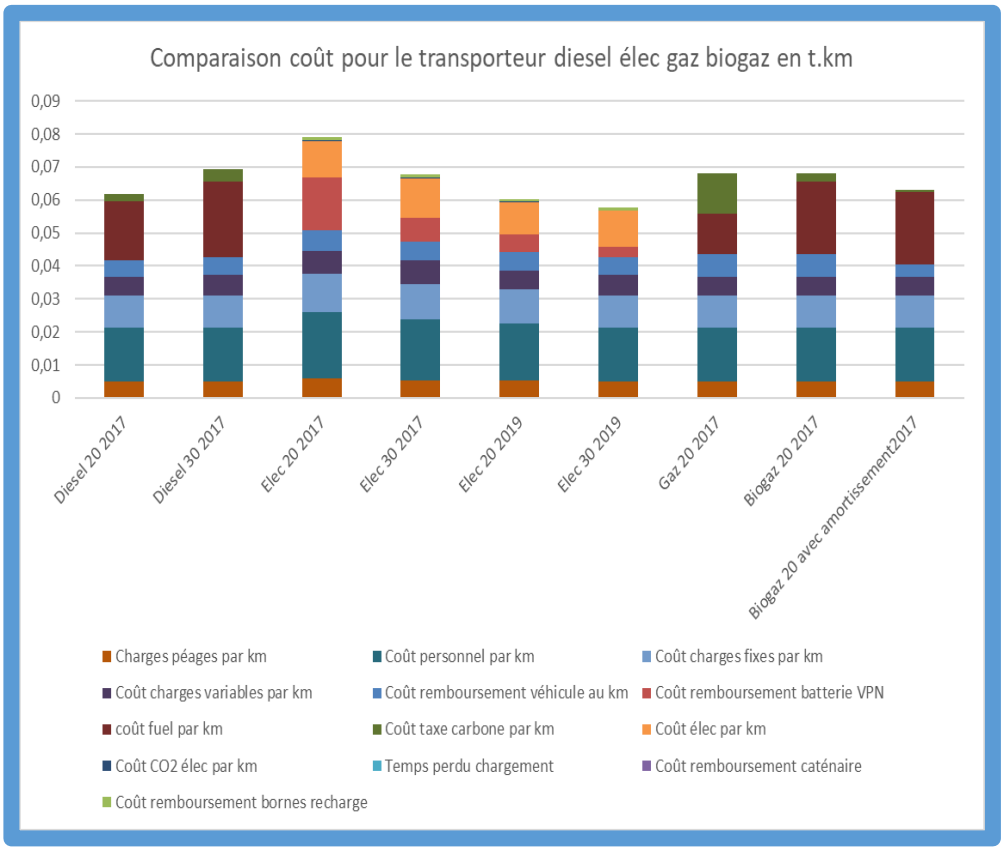


Figure 13 : Coût complet pour un transporteur en fonction de l'énergie utilisée source CGDD[129] pour les quatre colonnes de gauche, et CGEDD[130] pour les quatre colonnes de droite

Plusieurs éléments pourraient cependant modifier la donne :

- le premier consisterait à valoriser le coût de la tonne carbone : il permettrait vraisemblablement pour une valeur voisine de 300 €/t CO_2 d'aboutir à un TCO comparable entre le poids lourd au gaz naturel d'origine fossile et celui au biométhane. Par contre, il ne permettrait pas de diminuer le différentiel de coût vis-à-vis du PL électrique ;

[129] Concept d'autoroute électrique : Évaluation socioéconomique, Janvier 2017, https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9ma%20-%20Concept%20autoroute%20%C3%A9lectrique.pdf

[130] Source CGDD. Prix diesel professionnel : 1,05 €/l en 2020, 1,5 €/l en 2030. Prix gaz hors TVA : 0,85€/kg, Prix Biogaz : 1,53 €/kg. Valeur taxe carbone 56€/tCO_2 en 2020. Prix batteries : 400 €/kWh pour Elec 20 2017, 200 €/kWh pour Elec 30 2017, 160 €/kWh pour Elec 30 2019, et 100 €/kWh pour Elec 30 2019. Ce graphique reprend pour les quatre première colonnes le coût complet à la tonne.kilomètre du rapport du CGDD de 2017 pour des poids lourds diesel et électriques (à 2020 et 2030) et donne pour les colonnes coinq et six les mêmes calculs pour les poids lourds électriques à 2020 et 2030 avec les coûts et poids à fin 2018 des batteries pour les véhicules automobiles (160 €/kWh au lieu de 400 et une tonne de charge utile en moins au lieu de 3,45 : le chiffre « pénalisant » de consommation de 1,53 kWh/km est gardé alors que Tesla annonce une valeur plus proche de 1,15 kWh/km).

- le second consisterait à massifier la production de biométhane d'origine agricole et à en diminuer fortement les coûts ;
- le troisième enfin consisterait à valoriser les externalités associées à la production de biométhane ce qui permettrait d'en diminuer le coût.

Par ailleurs, les constructeurs de poids lourds au gaz doivent, s'ils veulent pouvoir pérenniser leur fabrication, montrer que les émissions de NO_X, de particules et de GES des poids lourds au gaz amènent un réel plus par rapport à un équivalent diesel, contrairement aux mesures effectuées par TNO pour le gouvernement néerlandais[131].

3.3.3 L'utilisation de biocarburants liquides pour les poids lourds

La production de biocarburants liquides à partir d'huile ou de sucres, conduit à une moindre production énergétique que la méthanisation, mais les co-produits (des tourteaux) peuvent être utilisés dans l'élevage, améliorant les coûts de cette filière. Le transport routier de marchandises, bénéficiant d'autres sources d'énergie décarbonée, ne sera cependant vraisemblablement pas prioritaire pour leur usage dans un monde neutre en carbone (au contraire de l'aviation longue distance qui ne bénéficie pas d'autre source d'énergie décarbonée).

3.4 Le développement de l'hydrogène dans les transports ou le pari de la baisse des coûts rendant possible la création d'un marché de l'hydrogène

Illustration 8 : Station de distribution d'hydrogène - Crédit : Arnaud Bouissou/Terra

[131] Voir sur ce point le rapport de T&E https://www.transportenvironment.org/publications/do-gas-trucks-reduce-emissions , la critique de l'Association européenne des véhicules au gaz naturel et fossile https://www.ngva.eu/medias/comments-on-the-te-report-do-gas-trucks-reduce-emissions/ , celle de l'AFGNV https://www.afgnv.org/wp-content/uploads/2019/09/2019.09.19-R%C3%A9action-AFGNV-a-l%C3%A9tude-Transport-and-Environment.pdf et la réponse de T&E : https://www.transportenvironment.org/publications/do-gas-trucks-reduce-emissions-your-questions-answered

L'hydrogène possède deux caractéristiques extraordinaires, sa légèreté : comme le montre le graphique ci-dessous, sa densité énergétique massique est en effet près de trois fois supérieure à celle de l'essence, du gazole ou du kérosène[132] et l'absence de carbone conduit à ce que sa combustion dans une pile à combustible ne produise que de la vapeur d'eau. Dans un monde neutre en carbone, l'hydrogène va donc constituer un très bon candidat pour toutes les applications mobiles pour lesquelles le poids va jouer un rôle déterminant.

Même si cet avantage est modéré par le poids du réservoir, qui, pour 5 kg d'hydrogène, représente une masse additionnelle d'une centaine de kilo, embarquer un plein de 500 km pour un véhicule électrique conduit à un poids de la batterie[133] cinq fois supérieur à celui du réservoir hydrogène.

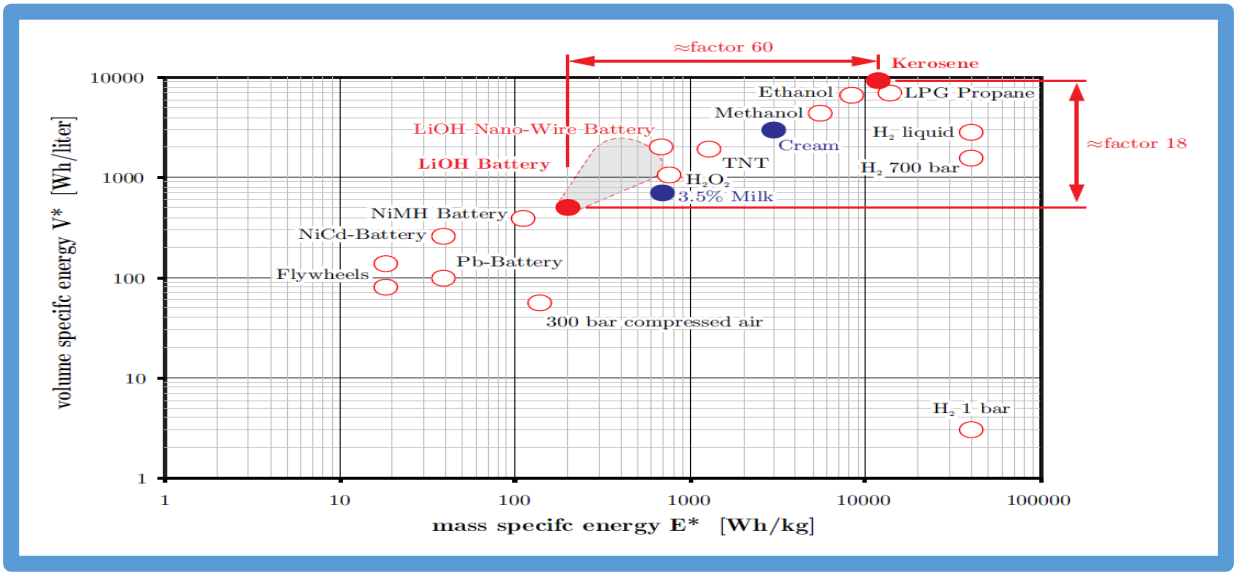


Figure 14 : Densités volumiques et massiques d'un certain nombre de combustibles[134]

Mais, revers de la médaille, pour une même quantité d'énergie fournie à la roue, le recours à l'hydrogène nécessitera une quantité d'électricité 2,5 à 3 fois plus importante qu'un moteur électrique associé à une batterie (voir paragraphe suivant) et, pour une même quantité d'énergie, l'hydrogène sous forme gazeuse va occuper à la pression atmosphérique un volume environ 3 000 fois supérieur à celui de l'essence, du gazole ou du kérosène : un véhicule hydrogène avec un réservoir de 5 kg lui permettant de parcourir une distance de 500 km aurait ainsi besoin d'un réservoir d'environ 55 m^3. La solution consiste, dès lors, soit à compresser l'hydrogène (à 350 ou 700 bars), soit à le liquéfier, pour obtenir des volumes acceptables. Dans de telles conditions, l'hydrogène à 700 bars va encore représenter un volume sept fois supérieur à celui de l'essence ou du gazole (et 6,9 fois supérieur pour le kérosène), tandis que, pour l'hydrogène liquide, le facteur sera de

[132] PCI 1kg d'hydrogène : 33 kWh/kg ; PCI 1 kg d'essence : 11,9 kWh/kg ; PCI 1 kg de gazole : 11,83 kWh/kg ; PCI 1 kg kérosène : 12kWh/kg ; PCI 1 kg gaz naturel : 13,2 kWh/kg.

[133] Pour un véhicule électrique présentant une autonomie de 500 km, le poids de la batterie de 100 kWh (avec une densité voisine de 200 Wh/kg) est d'environ 500 kg.

[134] *Electric Flight – Potential and Limitations*, Martin Hepperle, German Aerospace Center Institute of Aerodynamics and Flow Technology, Lilienthalplatz 7, D-38108 Braunschweig, Germany, https://elib.dlr.de/78726/1/MP-AVT-209-09.pdf

3,8 par rapport à l'essence et de 4 par rapport au kérosène[135]. La taille du réservoir d'un véhicule particulier devant parcourir 500 km revient alors à des proportions plus compatibles avec le dimensionnement d'un tel véhicule : 70 litres pour l'hydrogène liquide et 118 litres pour l'hydrogène à 700 bars. Ces densités volumiques, et c'est un avantage pour l'hydrogène, sont de plus supérieures à celles des batteries électriques (voisines de 500 Wh/l) : un véhicule électrique devant parcourir 500 km (75 kWh) aurait ainsi une batterie d'une taille voisine de 1,50 m^3.

Dans les applications où le volume est particulièrement contraint, ce qui est le cas de l'aviation, le choix se portera dès lors (sauf peut-être pour quelques *commuters*) sur l'hydrogène liquide. Mais, même dans ce cas, un réservoir quatre fois plus volumineux que les réservoirs actuels va conduire, pour les longs courriers, à devoir envisager un *design* révolutionnaire de l'appareil, qui pourrait prendre la forme d'une aile volante. Dès lors, si la conception d'un avion régional ou court-courrier peut être envisagée à l'horizon 2035, pour un long courrier, il faudra compter quelques décennies supplémentaires.

Cette réduction de volume a cependant un coût : l'énergie nécessaire pour compresser l'hydrogène respectivement à 200 ou à 700 bars ou pour le liquéfier correspond en effet à 7, 15 et 35 % de l'énergie « contenue dans le réservoir ».

Dans ces conditions, lorsque la contrainte de volume est moins forte en particulier pour certains bus, le choix pourra se porter sur de l'hydrogène compressé simplement à 200 ou 350 bars.

Son coût de production et d'utilisation est relativement élevé, et son utilisation demande enfin une gestion irréprochable afin de prévenir tout risque de fuite et d'explosion. En effet, la molécule d'hydrogène est la plus petite qui soit et l'hydrogène a des propriétés corrosives. Le risque de fuite par perméation[136] dans les métaux ou au travers de joints insuffisamment étanches est réel. Le stockage d'hydrogène liquide suppose de plus la gestion de la faible quantité d'hydrogène qui vient à ébullition et qui se dégage sous forme de gaz.

C'est la prise en compte de l'ensemble de ses avantages et de ses inconvénients qui va conduire à le retenir ou non comme combustible principal dans les différents secteurs de la mobilité avec des choix qui évoluent au cours du temps : les premiers moteurs à explosion fonctionnent au début du XVIIIème siècle à l'hydrogène, les premiers bateaux à hydrogène naviguent sur la Seine en 1860, l'automobile utilise vers les années 1860 l'hydrogène dans des moteurs à explosion à quatre temps, un siècle plus tard, à la fin des années 1980, un prototype de Tupolev 155, fonctionnera également à l'hydrogène, BMW en 2006 produit un véhicule utilisant l'hydrogène liquide. Autrement dit, nous sommes capables de faire fonctionner des véhicules à l'hydrogène. Il reste cependant dans l'économie actuelle à trouver les segments sur lesquels l'hydrogène constitue le carburant le plus efficace.

---

[135] PCI 1 l d'hydrogène à 1 bar : 0,003 kWh/l ; PCI 1 l d'hydrogène à 200 bars : 33 kWh/l ; PCI 1 l d'hydrogène à 700 bars : 1,4 kWh/l ; PCI 1 l d'hydrogène liquide à – 253 °C : 2,358 kWh/l ; PCI 1 kg d'essence : 8,94 kWh/l ; PCI 1 l de gazole : 9,83 kWh/l ; PCI 1 l kérosène : 9,61 kWh/l ; PCI 1 l de GNV à 1 bar : 0,00989 kWh/l.

[136] En physique, la perméation est la pénétration d'un perméat (liquide, gaz ou vapeur) à travers un solide. Elle est directement liée au gradient de concentration du perméat, à la perméabilité intrinsèque du matériau, et à sa diffusivité massique. La perméation est modélisée par des équations telles que les lois de Fick de diffusion. Source Wikipédia : https://fr.wikipedia.org/wiki/Perméation

3.4.1 L'utilisation de l'hydrogène pour les véhicules particuliers suppose des baisses de coûts extrêmement importantes

Le premier enseignement nous vient des performances des chaînes énergétiques. Ainsi que le souligne l'Adème[137] : « Les références bibliographiques disponibles nous permettent ainsi d'estimer le rendement de la chaîne hydrogène à 25 % environ, valeur qui peut varier selon la nécessité ou non de comprimer pour son usage. L'efficacité du stockage par batterie, qui présente un rendement de conversion de l'ordre de 70 % doit ainsi conduire à privilégier ce type de stockage, lorsque cela est techniquement et économiquement envisageable, c'est-à-dire ajusté aux conditions d'usage souhaité (durée de stockage, dimensionnement, temps de recharge…) ». Autrement dit pour des applications de mobilité à parcours donné parfaitement connu, où une solution reposant sur des batteries existe, le recours à l'électrique à batterie conduira à une consommation d'électricité de 2,5 à 3 fois moindre que le recours à l'hydrogène. C'est typiquement le cas, dans la mobilité, des bus où, hormis le cas de quelques *double-decker* où l'emplacement pour le carburant, situé sous le plancher, est particulièrement contraint et hormis des opérations de démonstration, l'électrique à batteries sera généralement préféré à l'hydrogène.

L'utilisation de l'hydrogène pour les véhicules particuliers est techniquement faisable mais se heurte à un triple défi économique :

- un surcoût à l'achat : le prix des véhicules à hydrogène reste aujourd'hui très élevé, voisin de 70 à 80 k€ pour la Toyota Mirai ou pour le Hyundai Nexo. La fabrication en plus grande série de véhicules à hydrogène devrait permettre d'en abaisser le coût. Les efforts de réduction des coûts doivent porter en particulier sur la pile à combustible (PAC) sur le réservoir à hydrogène et sur la baisse d'utilisation du platine. Cette baisse des coûts est déjà en cours : une PAC qui valait 500 €/kW ne vaut désormais plus que 200 €/kW (ce qui pour une PAC de 80 kW représente 16 000 €) : l'objectif de la filière, cité par la Plateforme filière automobiles et mobilités (PFA)[138], serait d'atteindre un coût de la PAC de 57 à 84 €/kW à l'horizon 2035 pour une production comprise entre 100 000 et 500 000 unités par an pour la PFA .75 000 unités suffiraient à atteindre cet objectif pour France Hydrogène. Dans le même temps, le coût du réservoir pourrait baisser de 700 à 400 €/kg H_2 pour une production du même ordre. France Hydrogène utilise là encore des données plus optimistes (à partir de l'étude de Roland Berger sur les poids lourds H_2 et des commentaires des fournisseurs de réservoirs) : il retient ainsi 321 €/kgH_2 pour les réservoirs 350 bar et 351 €/kg pour les réservoirs 700 bar (pour une production annuelle de 25 000 réservoirs) ;
- un surcoût en exploitation : aujourd'hui, pour faire cent kilomètres, un véhicule hydrogène a besoin d'un kg d'hydrogène ce qui représente un coût d'environ (sous forme gazeuse à 700 bars) 12 à 15 euros/kg[139]. Les appels à projets de l'ADEME, notamment l'appel à projet Ecosystèmes hydrogène

[137] *Rendement De La Chaine Hydrogene Cas Du « Power-To-H2-To-Power »*, ADEME, janvier 2020, fiche technique, https://www.ademe.fr/rendement-chaine-hydrogene

[138] *Hydrogène et piles à combustible*, Plateforme filière automobile et mobilités, Février 2020, Position technique de filière, https://pfa-auto.fr/wp-content/uploads/2020/02/CRA1-PTF-HYDROGENE-ET-PILES-A-COMBUSTIBLE-VF2.pdf

[139] Prix de l'hydrogène distribué sous forme gazeuse à 700 bars à la station d'Orly.

territoriaux, visent un prix cible à la pompe inférieur ou égal à 9 euros/kg. Dans le même temps, et à fourniture d'énergie égale aux roues[140], il en coûterait pour un véhicule électrique environ 3 euros/100 km pour une recharge lente[141], et 7 €/100 km pour une recharge rapide[142]. En prenant un kilométrage annuel de 15 000 km, le surcoût annuel du véhicule hydrogène en exploitation (hors coût d'entretien de la PAC) varie ainsi aujourd'hui entre 750 et 1 500 euros. De plus comme le rapport [143] sur le développement de l'électromobilité publié en mai 2019 par le Réseau de transport d'électricité (RTE) et l'Association nationale pour le développement de la mobilité électrique, l'Avere, l'a montré, le coût de l'électricité peut encore être abaissé de plusieurs dizaines de pourcents si le conducteur utilise un pilotage de la recharge, voire une fonction de recharge réversible. La PFA [144] envisage à horizon 2035 un coût de l'hydrogène décarboné possible de 7,3 €/kg H_2 (TVA incluse, hors marge). Toutefois, les investissements d'avenir ont pour ambition de conduire, sur un site industriel, et hors surcoût lié aux taxes et à l'installation de distribution du carburant, à des prix de l'ordre de 5 € HT/kg par électrolyse de l'eau[145].

Une autre solution parfois évoquée pourrait consister à fabriquer l'hydrogène à bas coût dans des pays fortement ensoleillés et à le rapatrier ensuite en France : les conditions dans lesquels l'hydrogène serait transporté sur plusieurs milliers de kilomètres restent toutefois à préciser ;

- et un surcoût lié à la mise en place des infrastructures (de production et) de distribution d'hydrogène liquide. Le coût d'une station-service est variable selon le dimensionnement (capacités de ravitaillement en kgH_2/jour) mais les chiffres cités vont de 300 k€ pour du 350 bar privatif de faible capacité à environ 1 M€ pour des stations 700 bars ouvertes au public. Il est clair que plus il y aura de clients, plus les coûts fixes répercutés sur chacun d'entre eux seront faibles. De fait, la production d'hydrogène conduit à rechercher la massification, alors que ce n'est pas le cas pour les solutions à batteries.

[140] Une consommation de 1 kg d'hydrogène pour 100 km avec un rendement de 55 % de la PAC, de 80 % du moteur électrique, et de 90 % du reste de la chaîne de traction correspond à une énergie fournie aux roues de 13,2 kWh, soit l'équivalent de 19 kWh fournis par une batterie avec un rendement de 70 %.

[141] 1,5 €/kWh en heures pleines * 19kWh.

[142] Fastned facture le kWh sur une borne de recharge rapide à 0,35 €/kWh (avec abonnement; la CNR propose un forfait de de 5 euros pour une recharge de 45 minutes sur des bornes rapides tri-standard 50 kW.

[143] « *Un automobiliste parcourant entre 14 000 et 15 300 kilomètres par an au volant d'une voiture électrique de catégorie moyenne dépense entre 365 à 400 euros sans pilotage et en heures pleines à domicile. Avec pilotage, les économies supplémentaires seraient de 60 et 170 euros par an grâce à du pilotage simple auxquelles peuvent s'ajouter jusqu'à 100 euros supplémentaires grâce à du pilotage plus évolué et de la recharge réversible* ». « Les enjeux du développement de l'électromobilité pour le système électrique, rapport publiée par RTE et l'Avere-France, mai 2019, http://www.avere-france.org/Site/Article/?article_id=7622

[144] Hydrogène et piles à combustible, Plateforme filière automobile et mobilités, Février 2020, Position technique de filière, https://pfa-auto.fr/wp-content/uploads/2020/02/CRA1-PTF-HYDROGENE-ET-PILES-A-COMBUSTIBLE-VF2.pdf

[145] Pour mémoire, dans une raffinerie, le prix est actuellement de l'ordre de 1,5€/kg.

Pour que l'hydrogène puisse devenir compétitif avec l'électrique sur le segment des véhicules particuliers, il est donc nécessaire d'obtenir une forte baisse à la fois du coût des piles à combustible, du coût de production de l'hydrogène ainsi que des infrastructures de distribution.

Ainsi que le souligne le rapport[146] du Commissariat à l'énergie atomique et de la Direction générale de l'énergie et du climat du ministère de la transition écologique (CEA-DGEC) sur le plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique, la multiplication des véhicules grand public paraît difficilement envisageable avant 2030. La principale amélioration porte dans la réduction des coûts à la fois du véhicule, mais aussi de l'hydrogène embarqué : une division par quatre du prix des PAC (associée à un prix élevé de la tonne carbone) serait nécessaire pour que le TCO du véhicule hydrogène soit comparable à celui du véhicule thermique alors qu'au même moment la baisse du coût des batteries et celle du prix de vente des véhicules électriques, devrait conduire à des TCO des véhicules électriques sensiblement comparables, sinon inférieurs à ceux de leurs équivalents thermiques (dans les conditions actuelles de taxation des carburants).

À court terme, la mise en place en région Auvergne-Rhône-Alpes d'une filière hydrogène, soutenue par l'Union européenne, la Banque des territoires et la région et associant de nombreux partenaires privés, devrait permettre le déploiement à venir de 1 000 véhicules particuliers et véhicules utilitaires légers (appartenant à des flottes captives) hydrogène et de 20 stations, alimentées par 3 électrolyseurs d'ici fin 2023 et de préciser les enjeux économiques de ce développement. De plus, les courbes de décroissance des coûts sont déjà engagées.

Les deux explosions survenues en 2019 en Californie[147] et en Norvège[148] dans une installation de production d'hydrogène (apparemment lors du remplissage d'un camion-citerne en hydrogène) et dans une station de distribution soulignent l'existence d'un risque résiduel malgré les précautions prises, même dans des pays qui maîtrisent ces technologies, et incitent à garder une certaine distance entre de telles installations et les bâtiments qui les entourent. En France, la distribution d'hydrogène en station fait l'objet d'une réglementation ICPE spécifique[149]. Le guide d'information de l'Ademe sur la sécurité des véhicules à hydrogène et des stations-service de distribution d'hydrogène[150] fait le point des connaissances sur le sujet et rappelle qu'à ce jour, il n'y a pas de réglementation nationale pour les parkings et les tunnels, seuls les arrêtés préfectoraux permettent d'interdire le stockage. Des travaux sont en cours[151] sur les conséquences d'un incendie d'un véhicule hydrogène dans un tunnel ils permettront d'élaborer les réglementations correspondantes.

---

[146] https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Rapport%20H2%20MTES%20CEA%200106.pdf

[147] Voir notamment https://www.hydrogenfuelnews.com/chemical-plant-explosion-in-california-leaves-hydrogen-car-drivers-without-fuel/8537653/

[148] Voir notamment https://www.h2-international.com/2019/10/13/fire-at-an-h2-station-in-norway/ et https://www.electrive.com/2019/06/11/norway-explosion-at-fuel-cell-filling-station/

[149] Arrêté du 22 octobre 2018 relatif aux prescriptions générales applicables aux installations classées pour la protection de l'environnement soumises à déclaration sous la rubrique n° 1416 (station de distribution d'hydrogène gazeux) : https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000037519292

[150] https://www.afhypac.org/documents/publications/colloques/JourneeH2territoires2015/ademe_guide_securite_h2_ok_juin_2015.pdf

[151] Voir notamment : *Hydrogen Fuel Cell Vehicles in Tunnels*, Austin M. Glover, Austin R. Baird, Chris B. LaFleur, Sandi National laboratories, April 2020, https://energy.sandia.gov/wp-content/uploads/2020/05/Hydrogen-Fuel-Cell-Vehicles-in-Tunnels_SAND2020-204507r.pdf ainsi que les travaux européens sur le sujet : https://hytunnel.net/?p=1086

3.4.2 L'utilisation de l'hydrogène pour les poids lourds et dans les bus

De la même façon que dans le paragraphe précédent, là où l'usage des poids lourds peut correspondre à des batteries de taille raisonnable rechargeables la nuit, le recours à l'électricité à batteries devrait être nettement moins consommateur d'électricité que l'usage de l'hydrogène : ainsi en est-il des poids lourds à vocation locale ou régionale, dont les parcours sont limités en termes de kilomètres et qui bien souvent peuvent se recharger la nuit. L'avenir paraît plus favorable pour l'hydrogène pour les poids lourds nationaux ou internationaux.

Si, sur ce segment, l'hydrogène faisait figure de favori incontestable il y a encore quelques années, il n'en est plus tout à fait de même aujourd'hui, en raison de la concurrence des poids lourds au biogaz ou à l'électricité. Si des camions électriques à batteries avec des autonomies de 400 à 800 km font effectivement leur apparition (Tesla pourrait lancer la fabrication industrielle de ses poids lourds fin 2021[152]) et si des recharges rapides de 1 à 2 MW se développent effectivement, alors l'hydrogène sera concurrencé par une énergie qui consomme nettement moins. Tout dépendra des prix relatifs du biogaz, de l'électricité fournie par des bornes de recharge de plus d'un MW, et de l'hydrogène. Aujourd'hui, les incitations mises en place conduisent au développement de la demande et à l'intérêt de certains constructeurs pour le développement des poids lourds H_2, en raison de leurs émissions non polluantes (contrairement au biogaz) et de leur autonomie comparable aux solutions fossiles (contrairement aux poids lourds électriques à batterie).

Illustration 9 : Bus à hydrogène - Crédit : Arnaud Bouissou/Terra

Hormis, trois éléments vont être déterminants pour le déploiement de l'hydrogène sur ce segment :

- la mise au point de piles à combustible de forte puissance, durables dans le

[152] https://www.generation-nt.com/tesla-semi-poids-lourd-electrique-production-actualite-1984700.html

temps, et peu coûteuses ;

- dans le TCO d'un poids lourd parcourant 100 000 km par an, les coûts du carburant vont jouer un rôle important : comme le montre le rapport de l'Agence internationale de l'énergie (AIE)[153], préparé pour le G20 au Japon en 2019, l'hydrogène ne pourra se rapprocher de la compétitivité que dans la mesure où son prix de livraison au camion (taxes comprises) sera fortement réduit (de 7,3 $/kg en 2019 à 5 $/kg à long terme). En France, le prix de l'hydrogène distribué varie aujourd'hui entre 12 à 15€/kg et les projets déployés avec le soutien de l'ADEME visent un prix cible inférieur ou égal à 9 €/kg. Dans une perspective très optimiste, le consortium H_2 Bus, qui vise à déployer 1000 bus en Europe, vise des prix de l'hydrogène de 5 €/kg dès 2025 pour les bus ;
- l'Agence internationale de l'énergie insiste également sur la quantité d'hydrogène vendue pour les seuls poids lourds qui peut être insuffisante pour couvrir suffisamment les investissements des stations de distribution et obtenir de telles baisses de prix. Elle insiste donc sur la notion de *hub*, voire de *hub-and-spoke*, qui pourrait s'adresser à un marché plus large que celui du seul transport routier et évoque en particulier l'implantation de stations de distribution auprès des installations portuaires dans lesquelles l'hydrogène pourrait être également vendu à des industriels ou à des engins de manutention.

Dans le segment du transport routier de marchandises, plus peut-être que dans tout autre, ce seront finalement les questions de coût (au sens du *Total cost of ownership*) qui conduiront ou non les professionnels à se tourner vers l'hydrogène.

Il est difficile de lister toutes les initiatives qui ont lieu actuellement dans le développement des poids lourds hydrogène. Citons, sans souci d'exhaustivité, les quelques exemples suivants :

- s'il est difficile de déterminer où en sont les camions hydrogène annoncés depuis longtemps par l'entreprise Nikola, si Scania vient d'abandonner fin janvier 2020 le développement du PL hydrogène[154] pour se consacrer aux PL à batteries ou au gaz, en revanche, l'entreprise Hyundai a livré ses premiers camions hydrogène à la Suisse en octobre 2020[155] : le modèle Xcient correspond à un tracteur 4x2 (avec 4 roues dont deux motrices), il utilise deux piles à combustible de 95 kW, présente une autonomie de 400 km avec une charge de 34 tonnes (dont 18 dans la remorque), et se recharge en 8 à 20 minutes ;
- d'autres modèles PL sont actuellement en conception, du côté de Toyota avec le modèle Hino d'une autonomie de 600 km, une charge utile de 25 t, et un pilote envisagé en 2022, ou deux modèles HyMax de chez Hyzon

[153] *The future of hydrogen*, report prepared by the IEA for the G20 Japan, June 2019, https://www.capenergies.fr/wp-content/uploads/2019/07/the_future_of_hydrogen.pdf

[154] *Pourquoi Scania abandonne les camions à hydrogène ?*, février 2021, https://www.h2-mobile.fr/actus/pourquoi-scania-abandonne-camions-hydrogene/

[155] *Hyundai dévoile son premier camion à hydrogène*, juillet 2020 https://www.auto-moto.com/nouveautes/nouveautes-auto-2020-2021/hyundai-devoile-premier-camion-a-hydrogene-245236.html

Motors avec des chassis de 16 ou 25 tonnes, une autonomie de 600 km, et une commercialisation annoncée en 2021 pour un prix compris entre 425 000 et 495 000 € ;

- Volvo prépare également un modèle de 40 tonnes d'une autonomie de 800 km avec deux projets démonstrateurs en 2022. Daimler, avec son modèle Mercedes-Benz GenH2, ambitionne la production en série à partir de 2025 d'un véhicule de 25 tonnes à l'autonomie visée à hauteur de 1000 km. Man compte produire des véhicules d'ici 2024 ;
- GreenGT et Iveco vont déployer à Fos-sur-Mer respectivement deux camions 44 tonnes pour l'été 2021 et six camions à partir de 2022 avec une série industrielle prévue en 2023.

Les études économiques[156] menées par l'association Équilibre des énergies montrent que :

- pour les transports locaux régionaux (moins de 500 km), la filière électrique batteries est plus économique quel que soit l'horizon de temps, sauf pour des cas d'usage pour lesquels l'hydrogène aurait un avantage concurrentiel marqué, tel qu'une utilisation 24h/24 (qui ne laisse donc pas de temps pour la recharge électrique). Cette filière bénéficiera de la baisse du coût des batteries et de la mise en place d'infrastructures de recharge associées au développement de la mobilité électrique pour les véhicules légers ;
- pour les longues distances, le camion à hydrogène peut s'imposer par rapport à l'électrique à partir de 2030-2040 mais l'écart ne sera pas forcément décisif : filière batteries et filière hydrogène ont des avantages et des inconvénients et il est possible qu'en fonction des politiques publiques et des percées technologiques, l'une ou l'autre des deux solutions parvienne à s'imposer ;
- l'hydrogène a encore de nombreuses marches à franchir avant de devenir une solution mature pour la motorisation des poids lourds dédiés au transport de marchandises. Beaucoup relèvent de la responsabilité des industriels qui devront mettre sur le marché des équipements plus performants qu'aujourd'hui pour la production électrolytique de l'hydrogène, les piles à combustible, le stockage, la compression, le transport et la distribution de l'hydrogène. Mais d'autres responsabilités incombent aux pouvoirs publics : absence de taxe supplémentaires, subventions aux investissements de production et de distribution de l'hydrogène (à hauteur de 50 % d'abord puis de 30 % ensuite). La distribution d'hydrogène s'appuiera sur les hubs de grande capacité qui seront les plus compétitifs en prix de revient et pourront en conséquence assurer, selon le trafic considéré, 30 à 40 % du ravitaillement des poids lourds, des stations décentralisées, à l'initiative des collectivités locales ou le long (voire à proximité) des autoroutes et voies rapides, et enfin des installations dans les locaux des entreprises.

[156] *L'hydrogène dans le secteur du transport routier de marchandises (octobre 2021).* Jean-Pierre Hauet, Servan Lacire et Dominique Auverlot. https://www.equilibredesenergies.org/15-10-2021-equilibre-des-energies-publie-son-etude-sur-la-place-de-lhydrogene-dans-la-decarbonation-des-poids-lourds/

Citons enfin le développement de l'hydrogène dans les bus[157] : compte tenu du plus grand volume disponible, la pression de l'hydrogène généralement utilisée est de 350 bars ce qui économise de l'énergie (par rapport à l'hydrogène liquide ou à l'hydrogène gazeux à 750 bars). Une vingtaine de bus hydrogène sont déjà en circulation à Pau, Le Mans, Versailles et l'agglomération d'Artois-Gohelle. Des commandes sont en cours dans une douzaine d'agglomérations. Les constructeurs français Safra et Symbio, filiale de Michelin et Faurecia, ont annoncé leur volonté de s'engager dans l'industrialisation de la fabrication des bus à hydrogène, avec l'objectif de produire 1500 bus Businova H_2 de 12 m.

3.4.3 L'utilisation de l'hydrogène et de l'ammoniac pour le maritime et le fluvial : le temps des expérimentations

L'hydrogène (fabriqué à partir de l'électrolyse de l'eau ou par vaporeformage en liaison avec la capture et le stockage du CO_2) est souvent considéré comme la solution idéale pour le maritime. Le récent rapport du Conseil supérieur de la marine marchande sur la contribution de l'industrie du transport maritime à la transition écologique, après avoir souligné que le modèle hydrogène apparaissait comme très prometteur, souligne cependant qu'il fait encore l'objet de réserves dans le milieu maritime, où cette technologie n'apparaît pas mature. En 2021, seuls quelques petits navires de taille modeste sont en cours d'expérimentation sur des distances limitées (ce qui les met *de facto* en concurrence avec des technologies de propulsion électrique à batterie) à l'instar de la navette fluviale Jules Verne 2 qui transporte, d'une rive de l'Erdre à l'autre, une dizaine de passagers.

Son volume, son utilisation sous forme d'hydrogène liquide, les conditions de sécurité à respecter, la réglementation associée et son coût expliquent ces réticences. De plus, la technologie des piles à combustible doit encore progresser pour qu'elle puisse être utilisée dans des navires de grande taille (puissance limitée, durée de vie de quelques milliers d'heures …). L'utilisation de l'hydrogène pourrait également reposer sur le développement de motorisations thermiques : cette combustion entraînera cependant le rejet de NOx qui devront être captés ou réduits[158] (autant une PAC ne rejette que de l'eau, autant un moteur thermique à hydrogène ou ammoniac va conduire à la formation de NOx. De plus, l'ammoniac est également un précurseur de la formation de particules fines dites secondaires[159]).

Dès lors que son coût de production sera compétitif, l'hydrogène pourrait cependant trouver sa place d'abord pour des navires de service ou pour les navires effectuant de courts trajets. Le développement en France de solutions à hydrogène liquide suppose cependant le développement en parallèle d'infrastructures d'avitaillement, la maîtrise parfaite de l'hydrogène à bord, et la mise au point de moteurs adaptés et/ou de PAC.

Le *Lloyd's Register* et *l'University Maritime Advisory Services*, l'UMAS, soulignent l'intérêt de l'ammoniac (produit de façon neutre en carbone notamment à partir de l'hydrogène) : l'UMAS envisage ainsi que l'ammoniac puisse représenter 75 % à 99 % de la part du marché de l'énergie dans le transport maritime à 2050 suivant le scénario considéré (objectifs de l'OMI à 2050 ou scénario 1,5 °C) : la solution de l'ammoniac est cependant très peu explorée en France, alors que la Grande Bretagne semble beaucoup miser sur cette solution

[157] Le lecteur trouvera plus de détails sur les sites suivants : https://www.transbus.org/dossiers/pac.html et https://www.h2-mobile.fr/actus/bus-hydrogene

[158] Comme c'est le cas dans les moteurs diesels avec l'utilisation d'AdBlue.

[159] https://www.citepa.org/fr/pm/

à partir de 2030. L'ammoniac liquide occupe un volume nettement moins important que l'hydrogène liquide et, surtout, sa température de liquéfaction n'est que de – 33,5 °C. Il est cependant toxique à la fois pour l'homme et le milieu marin, ce qui demande une gestion particulière (déjà à l'œuvre pour le froid dans certains navires). Dans leurs calculs économiques, présentés dans la figure ci-dessous, l'ammoniac est nettement moins coûteux : parmi les carburants se rapprochant de la neutralité carbone, seuls les biocarburants seraient plus économiques.

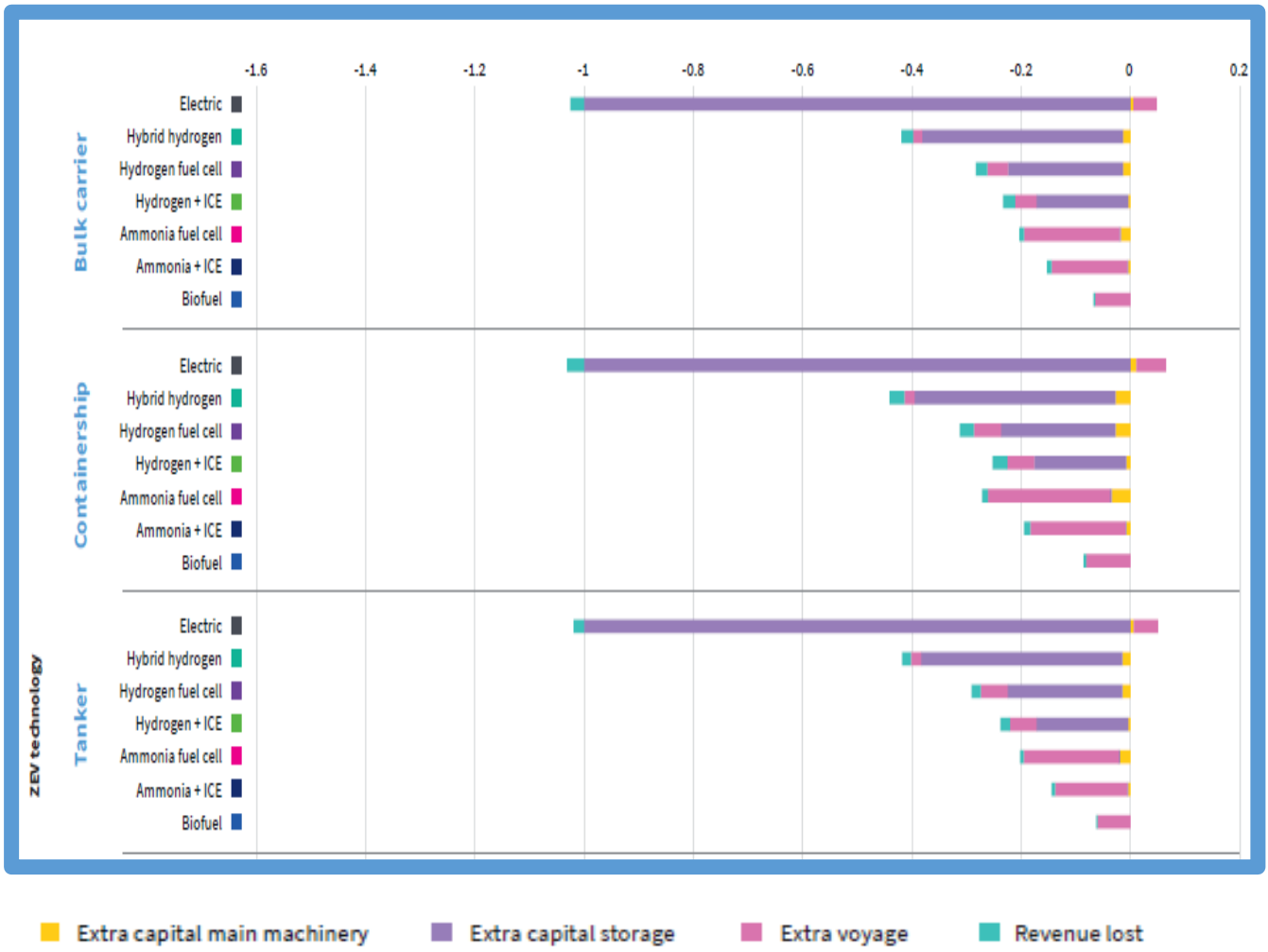


Figure 15 : Coût relatifs (par rapport à un navire à fuel lourd) de différents navires en fonction de l'énergie retenue pour sa propulsion[160]

3.4.4 L'utilisation de l'hydrogène pour l'aérien : le temps de la recherche

C'est probablement dans l'aérien que l'utilisation de l'hydrogène présente les plus grands espoirs et en même temps les plus grands défis : le poids des batteries électriques limite l'autonomie possible des avions électriques si bien qu'à part les biocarburants et les *e-fuels*, l'hydrogène sous forme liquide (à une température de – 253 °C) pourrait représenter l'avion

[160] Source : *Zero-emissions vessels 2030, how do we get there ?* Lloyd's register - UMAS, https://www.lr.org/en/insights/articles/zev-report-article/

du futur, ainsi que l'a annoncé la ministre de la transition écologique en avril 2020.

Un avion hydrogène peut prendre de multiples formes suivant le type de motorisation envisagée : propulsion provenant d'une PAC et d'un moteur électrique, d'une turbine à hydrogène, ou encore d'un système hybride associant une PAC et une turbine. Ceci conduira, suivant les cas, soit à un *design* relativement classique, soit à un *design* de l'avion en rupture plus ou moins forte (position et forme des ailes, voire aile volante, moteur éventuellement dépourvu de carénage …). En septembre 2020, Airbus a ainsi annoncé qu'il travaillait sur trois configurations possibles dans le cadre de son programme ZEROe, pour zéro émissions[161] :

- un court-courrier utilisant des turbopropulseurs hybrides à hydrogène, entraînant des hélices à huit pales et pouvant embarquer environ 100 passagers, mais pour des trajets courts d'environ 1500 km. En décembre, Airbus a déposé un brevet envisageant ainsi un appareil à plus court rayon d'action muni de six *pods*, autrement dit de nacelles de forme ovoïde, placés sous les ailes, changeables à chaque escale et comprenant un réservoir hydrogène, une pile à combustible, et un moteur électrique avec son hélice ;

Figure 16 : Concept d'avion hydrogène imaginé par Airbus équipé de 6 pods rechargeables placés sous les ailes[162] - Souce Airbus reproduit par le Figaro

- un moyen-courrier de configuration classique avec 120 à 200 places capable d'effectuer des vols de plus de 3 500 km grâce à deux moteurs à turbine à gaz modifiées fonctionnant à l'hydrogène, l'hydrogène liquide étant stocké à l'arrière de l'avion ;

- une aile volante d'environ 200 places. Cette configuration présente un intérieur particulièrement large, ouvrant ainsi de multiples options pour le stockage et la distribution d'hydrogène. Dans cet exemple, les réservoirs de stockage d'hydrogène liquide sont situés sous les ailes. Deux turboréacteurs hybrides à hydrogène fournissent la poussée.

Dans quasiment tous les cas, le recours à l'hydrogène liquide plutôt qu'à l'hydrogène gazeux s'impose pour gagner du volume, ce qui va se traduire par un certain nombre de

[161] https://translate.google.com/translate?hl=fr&sl=en&u=https://www.airbus.com/&prev=search&pto=aue

[162] Source : Airbus reproduit par le Figaro : https://www.lefigaro.fr/societes/aile-volante-avion-electrique-rechargeable-comment-airbus-prepare-l-avion-du-futur-20201211

défis technologiques à relever, portant notamment sur le choix des matériaux, sur le remplissage du réservoir, sur l'amélioration des performances des piles à combustible et de l'évacuation de la chaleur qu'elles dégagent, sur la gestion des fuites d'hydrogène. Certains programmes de recherche font déjà l'objet de financements dans le cadre du plan de relance et du CORAC (*Conseil pour la recherche aéronautique civile*).

L'un des principaux défis réside dans la gestion de l'hydrogène sous forme diphasique (liquide/gaz) depuis le réservoir jusqu'à la turbine ou la PAC. Dans ce cadre, le plan de soutien à l'aéronautique prévoit le financement du projet HYPERION qui permettra d'identifier et de faire une évaluation préalable des risques d'un moteur à hydrogène et de son circuit d'alimentation cryogénique, en associant les compétences de l'industrie aéronautique et de l'industrie spatiale (Ariane Group).

Une évaluation des travaux menés durant cette phase de faisabilité, sera réalisée dans les deux années qui viennent afin d'identifier les principaux obstacles restant à franchir ainsi que les configurations envisageables : les progrès réalisés sur la gestion diphasique, sur les effets de la vapeur d'eau en termes de forçage radiatif et sur la maîtrise de la sécurité seront au cœur de cette évaluation.

En parallèle, des travaux économiques doivent être menés pour vérifier l'intérêt de ce projet par rapport à la production, toujours à partir de l'électrolyse de l'eau, d'un kérosène synthétique. Le rapport sur l'aviation hydrogène préparé par Mc Kinsey pour CleanSky 2[163] montre ainsi qu'un avion *short range* serait environ 25 % plus coûteux qu'un avion à kérosène et d'un prix sensiblement équivalent à un avion utilisant des carburants synthétiques.

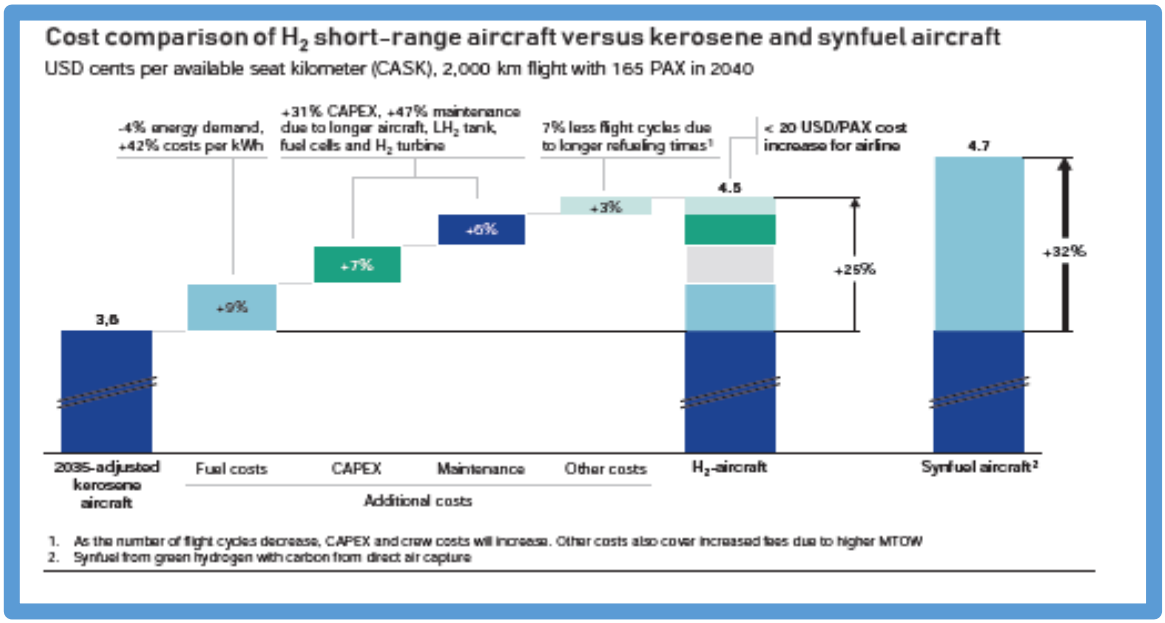


Figure 17 : Coût comparé d'un avion court-courrier utilisant l'hydrogène ou un carburant synthétique

D'un point de vue environnemental, l'avion utilisant des carburants de synthèse (ce qui suppose cependant une source de CO_2 renouvelable) présenterait les mêmes émissions que celles d'un avion habituel (avec probablement une moindre formation de cirrus),

[163] *Hydrogen-powered aviation*, https://www.cleansky.eu/news/hydrogen-powered-aviation-preparing-for-take-off

tandis qu'un avion à moteur hydrogène ou PAC rejetterait plus de vapeur d'eau (avec un effet à déterminer sur la formation de cirrus).

3.4.5 L'utilisation de l'hydrogène dans le ferroviaire : une question de coût

En France, un peu moins de 20 % des circulations ferroviaires en train.km s'appuient sur une motorisation diesel (dont le quart est en zone urbaine). Au sein de la SNCF, la part thermique des tonnes-kilomètres bruts a chuté de 21 à 7 % entre 1980 et 2016 et le parc de locomotives diesel a diminué de 40 % depuis dix ans. À l'inverse, en France, le nombre de locomotives diesel n'a cessé d'augmenter depuis 2007 passant de 1 381 à 1 900 en 2016 en raison de la montée en puissance des opérateurs de fret concurrents de la SNCF. La principale amélioration actuelle remonte à la mise en place à partir de 2004 de locomotives bimode permettant de fonctionner à l'électricité sur les parties de ligne électrifiée et en diesel sur le reste de la ligne.

L'objectif énoncé par le président de la SNCF fin août 2019 était le suivant : « *L'objectif c'est qu'il n'y ait plus un seul diesel sur les rails français dans 15 ans, c'est très ambitieux* », alors qu'« *aujourd'hui, il y a encore 20 % des trains ou des locomotives qui sont diesel* ».

La solution la plus simple consisterait à électrifier les 43 % du réseau qui ne l'est pas totalement ; cependant, cette solution serait particulièrement onéreuse et les lignes où l'électrification serait socio-économiquement rentable (0,35 à 1,5 M€ par km pour une voie simple, deux fois plus pour une voie double) sont fort peu nombreuses. Dans certains cas néanmoins, une électrification partielle (en pointillé et ne comprenant pas les tunnels, dans lesquels l'électrification est particulièrement coûteuse) pourrait néanmoins être envisagée pour des trains électriques utilisant des batteries sur les portions non approvisionnées.

Une deuxième solution consisterait à utiliser du gaz d'origine renouvelable (biogaz) : son coût de production à partir de la biomasse dans des méthaniseurs (aux environs de 95 €/MWh) est cependant trois à six fois plus élevé que le coût d'importation du gaz naturel fossile (suivant l'évolution des cours) et sa production n'est présente, pour le moment, que dans quelques pays.

Trois autres solutions sont alors possibles qui vont avoir chacun leur domaine de pertinence :

- les trains à hydrogène : c'est la solution développée par Alstom et présentée dans le rapport parlementaire sur le verdissement des matériels roulants du transport ferroviaire en France[164] : deux trains hydrogène (Coradia iLint) fonctionnent ainsi en Allemagne depuis 2018 et ont parcouru plus de 200 000km. Cette solution permet d'éviter l'émission des polluants traditionnels, mais elle ne permet pas de réduire les émissions de

[164] *Le verdissement des matériels roulants du transport ferroviaire en France*, rapport établi par Benoît Simian, novembre 2018, https://www.ecologie.gouv.fr/communique-presse-remise-du-rapport-benoit-simian-sur-verdissement-du-parc-ferroviaire

CO_2 si l'hydrogène est produit à partir du gaz naturel par vaporeformage[165] ou si l'hydrogène est produit par électrolyse à partir d'une électricité provenant d'un cycle combiné gaz[166]. Une solution possible consiste donc à produire de l'hydrogène dans une réaction d'électrolyse de l'eau alimenté par de l'électricité décarbonée[167]. Cette solution sera pertinente dans le cas de locomotives fret qui traversent la France et qui sont confrontés à des tronçons importants non électrifiés, mais aussi dans le cas des TER lorsque ceux-ci doivent parcourir des distances supérieures à 120 km ou sur des trajets plus courts, lorsqu'ils doivent enchaîner des trajets sans avoir le temps nécessaire à une recharge (environ une heure) ;

- les trains avec batteries : cette solution est actuellement développée par l'Autriche ou par le Land du Bade-Wurtemberg. La chute des prix des batteries explique en grande partie ce développement. En Autriche, il est associé à l'utilisation de batteries à recharge rapide (batteries dites au titanate de lithium par Toyota, ce qui permet de limiter la masse de batteries au prix de recharges fréquentes ; les batteries sont néanmoins capables d'assurer une autonomie de 80 km. En Allemagne, le Land du Bade-Wurtemberg a passé commande en 2020 de 20 automotrices Siemens Mireo munies de batteries pour circulation en mode électrique sur des lignes non électrifiées[168]. Cette solution peut être combinée avec la mise en place de caténaires sur une partie de la ligne. Cette solution sera pertinente pour des TER qui ne doivent pas couvrir une distance de plus de 80 à 120 km et qui ne doivent pas repartir immédiatement ;

- une troisième solution soulignée en août 2019 par l'ex-Président de la SNCF consiste, dans une période de transition, à utiliser des locomotives hybrides combinant à la place des quatre moteurs traditionnels d'un autorail : deux moteurs diesel et deux batteries de haute puissance, qui récupèrent l'énergie du freinage et qui se rechargent ainsi au fur et à mesure que le train avance, ce qui permet dans les agglomérations, de supprimer les émissions polluantes[169]. Inconvénient, cette solution conduit encore à des émissions de CO_2.

La principale difficulté du train hydrogène réside dans son coût aussi bien à l'acquisition qu'en exploitation :

- à l'achat, un train à batteries nécessitera 1200 kWh de batteries (6x200 kWh) pour une autonomie d'environ 200 km, ce qui correspond à un surcoût, en

[165] À moins bien sûr que cette production ne soit associée à un dispositif de capture et de stockage (ou d'utilisation) du CO_2.

[166] Typiquement, un train à locomotive diesel consommera un litre au km et émettra ainsi 2,6 kg CO_2/km, le même train à hydrogène consommera 0,33 kgH_2/km et émettra ainsi 2,63 kg CO_2/km si l'hydrogène est issu du vaporeformage, et 5,2 kgH_2/km si l'électricité utilisée pour l'électrolyse provient d'un cycle combiné au gaz naturel (CGGt)). Référence ibidem page 41.

[167] Par électricité décarbonée, on entend de l'électricité produite par des énergies renouvelables (Enr) ou du nucléaire.

[168] Autour de l'axe Offenburg – Freudenstadt / Hornberg: Appenweier – Bad Griesbach, Achern – Ottenhöfen et Biberach – Oberharmersbach-Riersbach

[169] https://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/la-sncf-vise-une-quinzaine-de-ter-a-hydrogene-dici-deux-ans-69926/

se référant au prix des batteries dans l'automobile, de 1200 *160 € = *192 000€* en 2021 et, à un surcoût de 1200*100 euros = 120 000 euros aux environs de 2025. L'augmentation du nombre de fabricants de batteries dans les prochaines années dans l'Union européenne devrait amener un client à bénéficier de prix comparables même sur un nombre restreint de batteries. A l'inverse, si on reste sur des prix de « petite série », le surcoût actuel pourrait être, de manière approximative, en 2021 de 1200 *300 € = 480 000€ en 2021 et, en 2025, de 1200*200 euros = 240 000 euros ;

- à l'achat, un train hydrogène va nécessiter un réservoir qui pour 200 kg d'hydrogène va coûter entre 100 000 et 200 000 euros[170] et une pile à combustible qui pour un Citadis avec une PAC de 720 kW représenterait un surcoût de 223 200 à 1 080 000 euros (suivant que l'on prend le coût du kW de PAC à 310 ou à 1500 €[171]). Si on se réfère au prix possibles des PAC pour les poids lourds, on obtiendrait aujourd'hui un surcoût de 720 * 230 = 165 600 € ;

- en exploitation, et sans tenir compte de la durée de vie des batteries et de la PAC et de leur remplacement nécessaire après une certaine durée d'utilisation, le surcoût au kilomètre d'un train hydrogène par rapport à un train à batteries peut être estimé de manière extrêmement simple en considérant que pour fournir 1 kWh d'énergie à la roue du véhicule, il faudra consommer (dans de bonnes conditions) deux fois plus d'énergie fournie au véhicule pour le train à hydrogène (rendement de la PAC puis de la chaîne de traction électrique) que pour le train électrique. Ainsi, pour un kilomètre parcouru, le train électrique à hydrogène représenterait par rapport au train électrique à batteries un surcoût d'environ 1,7 €/km pour un coût de production de l'hydrogène de 7 €/kg et de 0,7 €/m si le prix de production de l'hydrogène était abaissé, dans le futur, à 4 €/kg.

Solution	Train électrique	Train électrique à batteries	Diesel	Hybride diesel	Hydrogène
Consommation d'énergie	5,0 kWh/km	5,7 kWh/km	1l/km	0 ,85l/km	0 ,33kg/km
Prix de l'énergie	0,1 €/kWh	0,1 €/kWh	1,3 €/l	1,3 €/l	4 (vaporeformage) - 10 €/kg (électrolyse actuelle)
Coût énergétique de la solution	0,5 €/km	0,57 €/km	1,3 €/km	1,1 €/km	1,3 à 3,3 €/km

Tableau 6 : Coût énergétique au km des différentes solutions[172]. Source Bombardier et rapport Simian

[170] Voir page 59 du rapport *Le verdissement des matériels roulants du transport ferroviaire en France*, rapport établi par Benoît Simian, novembre 2018, https://www.ecologie.gouv.fr/communique-presse-remise-du-rapport-benoit-simian-sur-verdissement-du-parc-ferroviaire

[171] Voir page 68 du même rapport.

[172] Tableau provenant du même page 41 et 42 (Aujourd'hui, le coût de l'hydrogène issu du vaporeformage est de 1,5 à 3,5 €/kgH2 (soit en moyenne de 2 €/kgH2), et celui issu des électrolyseurs actuels est voisin de 10€/kg. Dans les meilleures simulations de RTE, le coût de l'hydrogène produit pourrait baisser à un peu moins de 3 euros à 2035. https://assets.rte-france.com/prod/public/2020-07/rapport%20hydrogene.pdf

On retrouve dans ce tableau le résultat figurant dans l'étude Ademe –SNCF sur les perspectives du train hydrogène en France selon laquelle, pour atteindre une parité au km parcouru avec le tarif actuel du gazole ferroviaire, le prix de l'hydrogène produit doit viser les 4 à 5 €/kg.

Les calculs effectués par Alstom, qui prennent probablement en compte l'énergie récupérée au freinage, sont un peu plus optimistes : ils montrent que le TCO (calculé sur 30 ans) d'un train hydrogène serait de 5 à 15 % meilleur que celui d'un diesel avec un prix de production de l'hydrogène de 3€/kg, et de 0 à 10 % avec un prix de l'hydrogène de 5 €/kg.

L'amélioration de la performance économique de la solution hydrogène passe dès lors par une baisse des coûts de fabrication de la pile à combustible (dont la durée de vie doit être suffisamment longue) et du coût de l'hydrogène à la pompe ce qui suppose la création d'électrolyseurs fonctionnant dans des conditions optimales et, dans toute la mesure du possible, la mise en place d'un écosystème local consommateur d'une quantité suffisante d'hydrogène pour pouvoir répartir entre les utilisateurs les CAPEX de l'électrolyseur et des stations de distribution et ainsi faire baisser les prix. L'expérimentation annoncée pour septembre 2021 par le conseil régional Centre-Val de Loire d'un train hydrogène sur la ligne Tours-Loches devrait permettre de lieux cerner les conditions de développement de cette technologie en France : des rames de ce type circulent déjà en Allemagne. Quatre régions (Auvergne-Rhône-Alpes, Bourgogne-Franche-Comté, Grand Est et Occitanie) se sont déjà engagées à acheter 14 rames au côté de la SNCF et de l'État. D'autres, notamment la Normandie et les Pays de la Loire, y réfléchissent. Première en lice, la région Bourgogne-Franche-Comté qui a officialisé, le 5 mars 2021, une commande de trois TER Coradia d'Alstom pour un investissement de 51,9 M€. Les rames seront livrées à partir de 2023 pour une mise en exploitation commerciale dès 2024.

Ainsi, pour une ligne entièrement électrifiée ou pour un parcours partiellement électrifié, mais accessible à un train électrique à batteries, la solution électrique devrait être la moins onéreuse (à condition de pouvoir bénéficier de prix des batteries se rapprochant de ceux des automobiles, ce qui n'est pas le cas aujourd'hui). A l'inverse, si dans ses trajets le train est amené à devoir effectuer un long parcours non électrifié, la solution hydrogène va permettre de décarboner la ligne : son TCO sera alors supérieur à celui d'un train bénéficiant du gazole ferroviaire si le prix de fourniture de l'hydrogène est supérieur à 6 €/kg, et inférieur si le prix de l'hydrogène est de l'ordre de 4 à 5 €/kg, ce qui suppose une répartition d'une partie des coûts fixes de l'électrolyseur et de la station de distribution sur d'autres usages conformément au paragraphe ci-dessous sur le développement d'un marché de l'hydrogène.

3.4.6 L'utilisation de l'hydrogène permet d'accroître le gisement de biocarburants

Une autre utilisation possible de l'hydrogène dans les transports consiste à accroître, dans une installation de production de biocarburants, la teneur en hydrogène des chaînes carbonées issues de la biomasse et ainsi, comme nous allons le voir ci-après, à augmenter la production de biocarburants, en particulier de biokérosène qui restera pendant encore plusieurs dizaines d'années le principal moyen de décarboner l'aviation long courrier.

Ainsi, et de manière extrêmement simplifiée, l'utilisation d'hydrogène pourrait permettre de quasiment doubler la quantité de biocarburants pour une même quantité de biomasse.

Les données transmises par l'IFPEN montrent en effet qu'en partant d'un hectare de terre cultivée avec du miscanthus, avec une production favorable de 15 t/ha, on obtient :

- 2,5 t de carburant (gazole + jet) par le procédé actuel, dit de Fischer Tropsch, avec un rendement de 6 tonnes de biomasse par tonne de distillats moyens (gazole + jet) ;
- 4,3 t de carburant (gazole + jet) par un procédé avec apport externe d'hydrogène, procédé envisagé dans le futur qui ne nécessiterait plus que 3,5 tonnes de biomasse par tonne de distillats moyens (gazole + jet).

À titre de comparaison, la filière biojet HVO produit une tonne de carburant à partir d'un hectare de colza.

3.4.7 Le pari du développement d'un marché de l'hydrogène

Aujourd'hui, le coût de l'hydrogène dans les transports est trop élevé pour qu'il puisse se déployer. La *Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France*[173], consiste à agir à la fois sur l'offre et la demande pour créer un véritable marché de l'hydrogène en France. Elle cherche dès lors à :

- financer des actions de R&D afin de baisser les coûts de production ou d'usage de l'hydrogène ;
- accorder des aides au déploiement d'installations de production de l'hydrogène afin de baisser le coût de l'hydrogène ;
- accorder des aides à l'usage de l'hydrogène afin de développer la demande.

De manière concrète, cette stratégie, va consister notamment :

- à mettre en place en 2021 un Projet Important d'Intérêt Européen Commun (PIIEC/IPCEI) sur l'hydrogène, à l'instar du projet européen sur les batteries : « celui-ci pourrait par exemple soutenir la R&D et l'industrialisation d'électrolyseurs pour produire de l'hydrogène décarboné et déployer ces solutions dans l'industrie. Il s'agit notamment de faire émerger en France des projets de « gigafactory » d'électrolyseurs, selon un schéma similaire au plan batterie qui prévoit le développement des usines de Nersac puis de Douvrin par ACC, entreprise commune de PSA et Total/Saft »[174]. Une dotation financière exceptionnelle de 1,5 milliards d'euros devrait être réservée dans le cadre de cette action ;
- à lancer un appel à projets (AAP) intitulé « Briques technologiques et démonstrateurs » : il vise à développer ou améliorer les composants et systèmes liés à la production et au transport d'hydrogène, et à ses usages tels que les applications de transport ou de fourniture d'énergie. Cet AAP est doté de 350 M€ jusqu'en 2023 ;
- à lancer, sous l'égide de l'Ademe, un appel à projets (AAP), intitulé « Hub territoriaux d'hydrogène » pour le déploiement, par des consortiums réunissant des

[173] https://www.economie.gouv.fr/plan-de-relance/profils/collectivites/strategie-nationale-developpement-hydrogene

[174] Stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France, septembre 2020, https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/DP%20-%20Strat%C3%A9gie%20nationale%20pour%20le%20d%C3%A9veloppement%20de%20l%27hydrog%C3%A8ne%20d%C3%A9carbon%C3%A9%20en%20France.pdf

collectivités et des industriels fournisseurs de solutions, d'écosystèmes territoriaux de grande envergure regroupant différents usages (industrie et mobilité), pour favoriser au maximum des économies d'échelle. Cet appel à projet sera doté de 275 M€ d'ici 2023.

Au cœur de cette stratégie, figure le pari d'un développement suffisant de la consommation d'hydrogène grâce au plan de relance pour que la massification de la production conduise à des prix attractifs non seulement de l'hydrogène produit mais aussi de ses usages. Dès lors, l'hydrogène dans les transports pourrait continuer à se déployer sans aide supplémentaire de l'État.

La mise en place d'un signal-prix carbone favoriserait naturellement également le développement des véhicules à hydrogène par rapport à leurs homologues thermiques.

3.5 Les biocarburants durables peuvent être utilisés sur certaines niches et constituent aujourd'hui la solution principale pour l'aérien longue distance

En théorie, la biomasse constitue une solution idéale pour les transports : la combustion de la biomasse, à condition de veiller à ce que le changement d'affectation des sols n'ait pas des effets négatifs, permet de recycler le carbone de l'atmosphère sans en ajouter, et se rapproche donc de la neutralité carbone. En pratique, cette solution va se heurter à la disponibilité de la biomasse et à son coût :

- la biomasse ainsi cultivée ne doit pas entrer en concurrence avec des cultures alimentaires ;
- le changement d'affectation des sols ne doit pas conduire à un bilan négatif, en termes d'émissions de CO_2, ce qui est parfois le cas des plantes de première génération ;
- le gisement de biomasse doit être suffisamment proche de l'installation de production des biocarburants pour que le coût en soit attractif.

Le gisement de biomasse réellement utilisable sera donc très probablement limité. Dès lors, la disponibilité de la biomasse devrait guider l'évolution d'un certain nombre de secteurs. Ceux qui ne disposent pas d'autres solutions de décarbonation devraient être prioritaires dans l'usage de la biomasse : ainsi en est-il du secteur de l'aviation. Sur ce marché, l'utilisation de l'hydrogène ne peut au mieux s'envisager qu'à partir de 2035. À l'inverse, le transport terrestre qui bénéficie d'autres solutions risque de ne pas être prioritaire.

C'est d'ailleurs ce qu'indique la *Stratégie de mobilité durable et intelligente*, publiée par la Commission européenne en décembre 2020, lorsqu'elle indique que « les émissions internationales de l'UE provenant de la navigation et de l'aviation ont augmenté de plus de 50 % depuis 1990 » et « qu'il est urgent d'agir dans ces secteurs, notamment au sortir de la crise actuelle. Ces modes doivent avoir un accès prioritaire à d'autres carburants

liquides et gazeux renouvelables et à faible teneur en carbone[175], faute de systèmes de propulsion alternatifs appropriés à court terme »[176].

3.5.1 La production actuelle de biocarburants comparée aux besoins de l'aérien

Ainsi que l'indique le Panorama 2019 des biocarburants incorporés en France[177], rédigé par la Direction générale de l'énergie et du climat (DGEC), environ 4,8 milliards de litres de biocarburants ont été incorporés en 2019 dans le gazole et l'essence dont principalement des esters méthyliques d'acides gras (61,5 %), du bioéthanol (8 % d'ETBE et 16 % d'éthanol), ainsi que des huiles végétales hydrotraitées (14 %), ce qui représente, en contenu énergétique, 3,46 Mtep, dont 2,3 Mtep d'EMAG, 0,39 Mtep d'éthanol, 0,2 Mtep d'ETBE et 0,5 Mtep d'huiles hydrotraitées.

Type de biocarburant	Volume (ML)	Energie (tep)
Esters Méthyliques d'Huiles Animales (EMHA)	17.6	13 882
Esters Méthyliques d'Huiles Usagées (EMHU)	195	154 008
Esters Méthyliques d'Huiles Végétales (EMHV)	2 742	2 160 924
Ethyl Tert Butyl Ether (ETBE)[3]	394.5	200 288
Éthanol	773.5	387 785
Huiles Végétales Hydrotraitées Essence (HVHTE)	94	67 431
Huiles Végétales Hydrotraitées Gazole (HVHTG)	586	475 760
Total	**4 803**	**3 460 079**

Tableau 7 : Biocarburants incorporés en 2019 dans l'essence ou le gazole[178]

540 millions de litres de biocarburants (2,8 Mtep) ont ainsi été incorporés en France en 2019 dans la filière gazole, soit 7,9 % du volume de gazole mis à la consommation en 2019. Plus généralement, le volume de biocarburants incorporé en 2019 représentait 8,6 % du volume de carburants mis à la consommation (essence et gazole) et a augmenté de 8,4 % par rapport au volume incorporé en 2018.

À l'échelle nationale, l'aviation commerciale décollant depuis le territoire français

[175] Il peut s'agir, par exemple, de l'hydrogène, des carburants de synthèse à base d'hydrogène et des biocarburants avancés. Des normes de sécurité pour le transport par voie d'eau fonctionnant à l'hydrogène, par exemple, doivent être élaborées à un stade précoce afin d'encourager les précurseurs, et les procédures de certification devraient être aussi simples que possible, sans compromettre les niveaux de sécurité globaux.

[176] *Stratégie de mobilité durable et intelligente – mettre les transports européens sur la voie de l'avenir,* Communication de la Commission au Parlement Européen, au Conseil, au Comité Économique et Social Européen et au Comité des Régions, décembre 2020, https://ec.europa.eu/transparency/reg-doc/rep/1/2020/FR/COM-2020-789-F1-FR-MAIN-PART-1.PDF

[177] https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Panorama%202019%20des%20biocarburants%20incorpor%C3%A9s%20en%20France.pdf

[178] Ibidem

consomme de l'ordre de huit millions de tonnes de kérosène et représente environ 4,6 % des émissions françaises tous secteurs confondus (lorsque sont prises en compte les émissions internationales de ce secteur). En admettant qu'avec les améliorations technologiques prévues, il soit possible, conformément aux hypothèses de la SNBC, de limiter cette consommation à moins de neuf millions de tonnes de kérosène d'ici 2050 et que la part des vols internationaux reste de l'ordre de 80 %, cela nécessiterait d'être en mesure de produire 3,6 millions de tonnes de carburants durables afin que leur proportion puisse atteindre 50 % dans le kérosène utilisé par l'ensemble des vols long-courriers. Une décarbonation totale nécessiterait le double. L'objectif est ambitieux. Il est néanmoins possible : en 2019, la France a ainsi incorporé 3,46 Mtep de biocarburants dans les véhicules terrestres. Cela montre tout l'enjeu de la création d'une filière française que la DGAC encourage, d'autant plus que, pour le moment, dans son paquet *Fit for 55* de juillet 2021[179], la Commission exclut l'usage des biocarburants de première génération pour l'aviation. Cela pose aussi tout particulièrement la question de savoir si la France peut être en mesure d'être autonome pour assurer son besoin, sans faire appel à l'importation d'un carburant qui risque d'être rare et cher, et si, à terme, ainsi que l'envisage la stratégie de mobilité durable et intelligente publiée par la Commission européenne en décembre 2020, elle peut accorder une priorité à l'usage des biocarburants dans l'aérien. L'avion court courrier de demain, électrique ou à hydrogène, s'il participe aux 20 % d'économie de kérosène fossile, est nécessaire mais ne suffira pas à décarboner le secteur de l'aviation d'ici 2050. Tout doit donc être fait pour que cette filière française du biokérosène durable voie le jour[180].

3.5.2 Les biocarburants durables pour l'aéronautique

Conformément au tableau ci-dessous, neuf filières avaient été agréées fin 2020 par l'ASTM : comme le précise l'Ifpen, « chaque filière de production de biokérosènes se différencie entre autres par la nature de la charge d'entrée : lipides (huiles et graisses), saccharose et amidons, lignocellulose, avec en corollaire la problématique de l'approvisionnement des usines. La canne à sucre et la betterave sucrière sont d'excellentes sources de saccharose, avec des performances agronomiques et environnementales excellentes. L'huile de palme, malgré des caractéristiques équivalentes, souffre des effets de la déforestation en Malaisie et en Indonésie, au profit de l'extension des palmeraies, suscitant de multiples controverses. La lignocellulose ne présente aucun conflit d'usage avec l'alimentation avec un faible risque de changement d'usage des sols. La variabilité compositionnelle et structurale de la biomasse a nécessité des essais technologiques sur les unités de démonstration présentes en France pour s'assurer de l'adéquation des procédés à chaque type de biomasse : contenus en matières minérales, structure des polysaccharides constitutifs. Son principal facteur limitant aujourd'hui est sa mobilisation à raisonner aux échelles territoriales ».

[179] Voir en particulier l'initiative *RefuelEU Aviation* :
https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52021PC0561

[180] Il est à noter qu'au terme de la directive RED 2, les biocarburants avancés bénéficient d'un principe de double comptage pour le calcul du taux d'incorporation des biocarburants dans les carburants, principe qui vise à encourager leur développement. L'annexe IX de la directive 2009/28/ CE du Parlement européen et du Conseil du 23 avril 2009 donne la liste complète des produits éligibles au double comptage parmi lesquels figurent : a) les algues si cultivées à terre dans des bassins ou des photobioréacteurs ; b) la fraction de la biomasse correspondant aux déchets municipaux en mélange, mais pas aux déchets ménagers triés relevant des objectifs de recyclage fixés à l'article 11 de la directive 2008/98/CE ; c) les biodéchets provenant de ménages privés et faisant l'objet d'une collecte séparée ; d) la fraction de la biomasse correspondant aux déchets industriels impropres à un usage dans la chaîne alimentaire humaine ou animale ; e) la paille ; j) la bagasse, k) les marcs de raisins et lies de vin.

Fuel	Blend level	Typical feedstocks	Status
Hydroprocessed Esters and Fatty Acids Synthetic Paraffinic Kerosene (HEFA-SPK)	50%	Vegetable oils, waste fats, oils & greases	Approved in 2011
Hydroprocessed Fermented Sugars to Synthetic Isoparaffins (HFS-SIP)	10%	Sugar crops	Approved in 2014
Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene with Aromatics (FT-SPK/A)	50%	Lignocellulosic crops, residues & wastes	Approved in 2015
Alcohol to Jet Synthetic Paraffinic Kerosene (ATJ-SPK)	50%	Starchy & sugary crops, lignocellulosic crops, residues & wastes, industrial flue gases	Approved in 2016
Co-Processing Bio-Oils in Petroleum Refinery	N/A[a]	Vegetable oils, waste fats, oils & greases	Approved in 2018
Fischer-Tropsch Synthetic Paraffinic Kerosene (FT-SPK)	50%	Lignocellulosic crops, residues & wastes	Approved 2019
Catalytic Hydrothermolysis Synthesized Kerosene (CH-SK, or CHJ)	50%	Vegetable oils, waste fats, oils & greases	Approved in 2020
Integrated Hydropyrolysis and Hydroconversion (HC-HEFA-SPK)	10%	Lignocellulosic crops, residues & wastes	Approved in 2020
Co-Processing Synthetic Crude Oil in Petroleum Refinery	N/A	Lignocellulosic crops, residues & wastes	Approved in 2020
High Freeze Point Hydroprocessed Esters and Fatty Acids Synthetic Kerosene (HFP HEFA-SK or HEFA+)	10%	Vegetable oils, waste fats, oils & greases	In Progress
Hydro-Deoxygenation Synthetic Aromatic Kerosene (HDO-SAK)	N/A	Starchy & sugary crops, lignocellulosic crops, residues & wastes	In Progress
Alcohol-to-Jet Synthetic Kerosene with Aromatics (ATJ-SKA)	N/A	Starchy & sugary crops, lignocellulosic crops, residues & wastes	In Progress

Tableau 8 : les biocarburants certifiés pour l'aéronautique fin 2020[181]

Note: Pathways marked with a blend level "N/A" are either not applicable (in the case of co-processed bio-oils) or are not available as testing is ongoing. A Separately, the co-processing of small quantities of vegetable oils, waste fats, and bio-crudes has been approvedby ASTM via a separate certification for standard D1655; if fats are processed in a refinery at less than 5% of its processing volume, the resulting jet product can meet the specifications for conventional jet fuel.

Le rapport du Ministère de la transition écologique et solidaire sur la mise en place d'une filière de biocarburants aéronautiques durables en France[182] précise le développement de ces différentes filières :

- « à court terme, l'hydrotraitement des huiles est une technologie mature, développée au niveau industriel et en cours de déploiement sur le territoire national. Cependant, le développement de cette technologie trouve ses limites dans les faibles quantités disponibles de matières premières. Cette technologie ne devrait, sur le plus long terme, ne fournir qu'une faible proportion des volumes nationaux de biocarburant aéronautique durable » ;

[181] *Fueling flight: Assessing the sustainability implications of alternative aviation fuels*, March 2021, Working paper, Authors: Nikita Pavlenko, Stephanie Searle, https://theicct.org/sites/default/files/publications/Alternative-aviation-fuel-sustainability-mar2021.pdf

[182] *Mise en place mise en place d'une filière de biocarburants aéronautiques durables en France*, rapport MTES, novembre 2019, https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/ECV%20-%20Mise%20en%20place%20d%27une%20fili%C3%A8re%20de%20biocarburants%20a%C3%A9ronautiques%20en%20France.pdf

- « à moyen-terme, les technologies de gazéification de la matière première (voie FT-SPK) ou *Alcohol-To-Jet* (ATJ-Ethanol) permettraient quant à elles de valoriser de plus larges volumes par la mobilisation d'autres types de ressources » ;
- « à plus long terme, d'autres filières utilisant des procédés de fermentation de la biomasse par voies microbiennes pour la production de biocarburants d'aviation pourraient également venir à maturité en Europe ».

Un des enjeux pour la France du développement des biocarburants durables consiste à se doter d'installations permettant le traitement des biocarburants avancés : si la raffinerie de Total La Mède permet l'hydrotraitement des huiles, si le procédé Futurol (qui a donné lieu mi 2020 à un accord de licence pour la vente de cette technologie à la société croate INA) existe et est breveté pour le traitement des sucres suivant la filière ATJ, en revanche, nous ne disposons pas aujourd'hui en France d'installations industrielles permettant la gazéification de la biomasse et la réaction de Fischer Tropsch alors que cette technologie est démontrée dans le cadre du projet BioTfuel.

Il convient par ailleurs de souligner qu'en termes d'émissions de gaz à effet de serre, le bilan des différentes filières de production de biocarburant peut varier énormément, ce qui doit conduire à privilégier des filières qui permettent de réduire réellement les émissions par rapport à l'utilisation du kérosène d'origine fossile.

La France a adopté deux objectifs d'incorporation de biocarburants durables dans le kérosène : 2 % à 2025, 5 % à 2030, en recourant principalement à la collecte et au traitement des huiles usagées (ainsi qu'à l'incorporation de biocarburants en provenance de la raffinerie de La Mède). La figure suivants, réalisé par Carbone 4, montre qu'en effet l'utilisation des huiles usagées constitue une filière économique et efficace du point de vue environnemental.

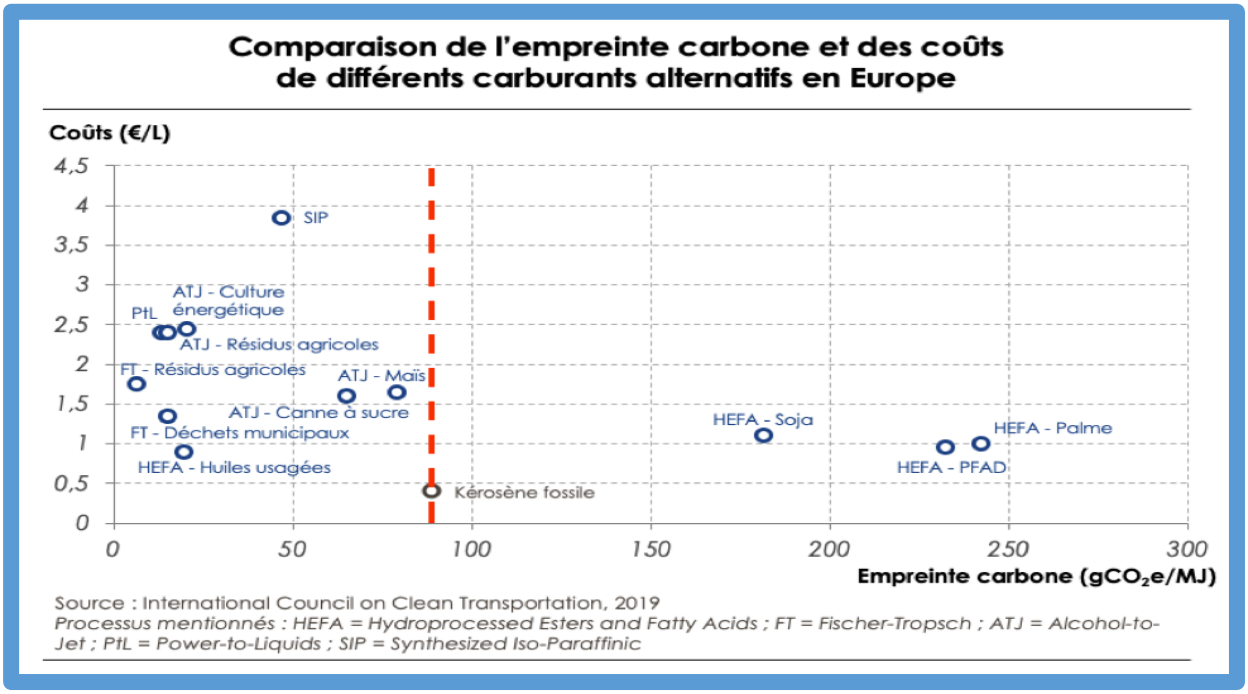


Figure 18 : Coûts et empreintes carbone de différents biocarburants aéronautiques durables[183]. Source Carbone 4[184]

Malheureusement, ainsi que le souligne le rapport sur l'environnement de l'aviation européenne[185], son gisement est limité : l'ensemble des huiles usagées notamment issues de la restauration de l'UE28 ne satisferait que 2 % de la demande communautaire en carburants aériens.

Cette figure montre également que l'empreinte carbone des biocarburants durables est très différente suivant les procédés retenus et les gisements de biomasse utilisés[186].

Le développement à grande échelle des biocarburants durables nécessitera à un moment le recours à la biomasse ligno-cellulosique pour lequel un premier ordre de grandeur peut être envisagé. Aujourd'hui, la production française de biocarburants mobilise une ressource d'environ 11 600 km2 : avec un rendement énergétique 100 GJ/ha, il serait nécessaire d'utiliser 10 000 à 20 000 km2 supplémentaires pour produire l'ensemble du biokérosène français à 2050.

Besoin aéronautique 2050 Surface optimisée pour 8,84 Mtep	Energie produite	Surface pour des rendements faibles		Surface pour des rendements forts	
		Rendement t/km2	Surface nécessaire	Rendement t/km2	Surface nécessaire
a) reconversion Biocarburants 1G 2014 : environ 3 Mtep	3 Mtep	259	11600	259	11600 km2
b) Huiles usagées : segment envisagé 2050 : 16 % 1t/ha : rendement HVO	1,2 Mtep				
c) Biomasse lignocellulosique rendement à terme miscan 4,3t/ha	4,64 Mtep	250	18560	450	10311 km2
Total	8,84 Mtep		30160 km2		21911 km2
Pourcentage SAU (290 000km2)			10,40%		7,56%

Tableau 9 : Surface de cultures nécessaire en 2050 pour une production de biocarburants aéronautiques durables correspondant à l'ensemble de la consommation de l'aérien domestique et international

Il convient néanmoins de garder en tête la rareté du gisement qui pourrait conduire à établir un ordre de priorité dans les usages de la biomasse (dans lequel l'aérien, en l'absence d'autres solutions serait prioritaire), à envisager d'importer dans le futur la matière première pour la production de biocarburants durables, et à accroître la surface des terres utilisées en France pour la production d'un tel carburant. L'IFPEN souligne que ce tableau pourrait également prendre en compte la disponibilité en bois à l'échelle de la France (17Mha) et dont le volume a augmenté de 50 % en 30 ans (source IGN).

Dans son paquet *Fit for 5,* proposé en juillet 2021, la Commission exclut la première ligne du tableau ci-dessus puisqu'elle ne retient pas la possibilité d'utiliser des carburants de première génération dans l'aérien.

[183] https://www.carbone4.com/carburants-alternatifs-de-laerien-ne-se-valent

[184] *Carburants alternatifs de l'aérien : tous ne se valent pas !* Nicolas Meunier, Consultant, Carbone 4, http://www.carbone4.com/carburants-alternatifs-de-laerien-ne-se-valent/

[185] *European aviation environnemental Report 2019*, EEA, EASA, Eurocontrol, https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/2019-aviation-environmental-report.pdf

[186] Le lecteur pourra également consulter la référence suivante : Fueling flight : assessing the sustanainability implications of alternative aviation fuels

3.5.3 Pour une priorité dans l'utilisation des biocarburants

Les biocarburants peuvent intervenir pour trois usages différents (ce paragraphe ne reviendra pas sur le biogaz qui déjà été traité dans le paragraphe sur le gaz) :

- l'usage routier qui repose principalement sur la première génération de biocarburants avec un bilan légèrement favorable en matière d'émissions de GES quand on prend en compte la captation du CO_2 dans le sol, mais le changement l'usage de sols (qui conduit généralement à un relâchement de CO_2) ne conduit pas la Commission européenne à en accroître le développement. À 2030, l'Union européenne a donc retenu un objectif d'énergie renouvelable de 14 % dans les transports, avec un plafond de 7 % pour les biocarburants de première génération[187]. La Commission favorise ainsi l'incorporation de biocarburants avancés dont le bilan en terme de réduction d'émissions de gaz à effet de serre est très performant (dans une approche d'empreinte environnementale ils peuvent même devancer les véhicules électriques utilisant le mix électrique français) qui devront représenter au moins 3.5 % des transports à 2030. L'avantage d'un usage massif des biocarburants est de décarboner le transport avec un effet immédiat. Les véhicules actuellement en circulation dont plus de 50 % seront encore en circulation en 2030 peuvent bénéficier de cet effet de décarbonation immédiat sans entraîner un changement d'usage de la part du consommateur ;
- l'usage maritime : le recours aux biocarburants peut également présenter de l'intérêt dans ce secteur, notamment en période de transition en attendant les solutions totalement décarbonées, car ils permettent de continuer à opérer les navires existants en répondant aux objectifs de l'OMI avant le renouvellement de leurs flottes. Mais, compte-tenu de leur « relative rareté » et des compétitions d'usage associées, il est difficile de considérer, sauf dans quelques cas particuliers, les biocarburants (comme le biométhanol) comme la solution principale à long terme pour le transport maritime (même si la Lloyd's Register et l'UMAS soulignent leur intérêt en termes de coût). Les *e-fuels* peuvent être produits en grande quantité, mais leur coût est pour le moment élevé et leur production peut demander une grande quantité d'électricité. L'utilisation du méthanol n'a guère d'intérêt s'il est produit à partir du gaz naturel : son pouvoir calorifique est en effet plus faible que celui du méthane et son coût plus élevé. Certains segments peuvent cependant trouver une solution spécifique dans le recours aux biocarburants : ainsi en est-il probablement de la pêche hauturière (qui pose aussi des questions de limitation de jauge) avec l'utilisation du biodiesel (moins volumineux que le biogaz). La Commission favorise par ailleurs l'incorporation de biocarburants avancés dont le bilan en terme de réduction d'émissions de gaz à effet de serre est très performant (dans une approche d'empreinte environnementale, l'IFPEN précise qu'ils devancent même les véhicules électriques utilisant le mix électrique français) qui devront représenter au moins 3.5 % des transports à 2030. Les biocarburants présentent l'avantage de pouvoir décarboner le transport dès qu'ils sont mis en œuvre : les véhicules actuellement en circulation dont plus de 50 % seront encore en circulation en 2030 peuvent bénéficier de cet effet de décarbonation ;
- l'usage aérien enfin. Si les gisements de biocarburants peuvent être les mêmes, la production d'un biocarburant durable pour l'aérien nécessite un traitement particulier (qui produira d'ailleurs une proportion plus ou moins grande de

[187] L'IFPEN précise que les industriels du secteur souhaiteraient que ce plafond soit relevé en focalisant sur de la biomasse EU.

biocarburants pour le routier). La viabilité économique des filières de biocarburants aéronautiques constitue un frein majeur à leur développement, du fait du différentiel de prix important avec le carburant fossile et pose la question du modèle économique permettant le développement. Faire porter ce surcoût sur le passager ne permet que d'envisager un développement limité de quelques pourcents d'incorporation si on souhaite préserver la compétitivité des compagnies aériennes françaises À titre d'exemple, sur la base d'une incorporation de 5 % de biocarburant en 2030, le surcoût total en France du bio jet représenterait entre 300 et 500 millions d'euros par an[188] pour un coût total du carburant de l'ordre de 6 milliards d'euros.

En l'état actuel des technologies, le développement d'un long-courrier électrique n'est pas possible et celui d'un long-courrier hydrogène demande une révolution du *design* de l'appareil qui ne pourra pas se généraliser dans l'ensemble de la flotte avant au mieux 2050-2060. Durant toute cette période, le recours à des avions ultras sobres utilisant des carburants aéronautiques durables (y compris des e-carburants) s'impose donc dans le chemin vers la neutralité carbone.

En janvier 2020, le gouvernement français a publié une feuille de route[189] afin de préciser l'ambition et la stratégie que la France pourrait développer en matière de biocarburants aéronautiques durables dès 2025. Cette ambition et cette stratégie s'appuient sur cinq principes fondamentaux que sont le maintien d'un niveau optimal de sécurité des vols, l'assurance de la durabilité des carburants d'aviation produits en France, la viabilité économique de la filière, la mise en place de chaînes logistiques économes, la cohérence avec les initiatives supranationales.

Cette feuille de route envisage une trajectoire réaliste d'incorporation à court et moyen terme, de 2 % de biokérosène en 2025 et de 5 % en 2030. À long terme, conformément à la Stratégie nationale bas carbone, elle considère un objectif de substitution de 50 % du carburant conventionnel d'origine fossile par des carburants aéronautiques durables en 2050, cohérent avec l'atteinte de la neutralité carbone en France à cet horizon.

À terme, les carburants aéronautiques durables devraient permettre une réduction des émissions de GES jusqu'à 90 % pour les biocarburants avancés, et leur proportion dans le kérosène, limitée aujourd'hui à 50 %, devrait pouvoir augmenter significativement. Des kérosènes entièrement composés de biocarburants ont déjà été testés.

À cette fin, le gouvernement a lancé fin janvier 2020 un appel à manifestation d'intérêt (AMI) pour des projets de création d'unités de production de biocarburants avancés pouvant être utilisés dans l'aéronautique. Sa clôture a été repoussée de quelques semaines à fin juillet 2020 pour tenir compte de la COVID-19. Cet AMI, en cours de dépouillement, a pour objectif d'identifier les projets d'investissement dans des unités de production de carburants de biocarburants avancés et de carburants de synthèse durables, actuellement envisagés par les acteurs économiques, et en particulier les projets d'investissement dans des unités de production de carburants durables à destination de l'aéronautique. Les projets retenus, après examen du dossier, feront l'objet d'un accompagnement afin de favoriser la réalisation de l'investissement. Les réponses recueillies permettront d'évaluer les conditions nécessaires à la création de ces unités de production et le cas échéant de

[188] En prenant comme hypothèse une consommation totale de 9 Mtep à 2030 et un surcoût de 0,5 à 1 € par litre de biocarburant.

[189] https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Feuille%20de%20route%20fran%C3%A7aise%20pour%20le%20d%C3%A9ploiement%20des%20biocarburants%20a%C3%A9ronautiques%20durables.pdf

définir des mécanismes de soutien à même d'assurer l'émergence d'un marché pérenne. Les suites de l'AMI s'inscrivent désormais dans les travaux relatifs à la stratégie pour l'innovation *Produits biosourcés et carburants durables*.

Le choix des projets retenus puis des mécanismes de soutien financier aura un double but : il devra d'une part favoriser l'émergence d'installations capables de répondre, au moindre coût, aux objectifs d'incorporation retenus par le gouvernement en 2025 et 2030, mais, d'autre part et dans une perspective plus lointaine, permettre de recourir à des ressources différentes de celles qui seront utilisées à court terme. Cette démarche devra également favoriser le déploiement de filières éventuellement plus coûteuses afin d'en apprécier la faisabilité et le potentiel. Elle pourra également prendre en compte l'intérêt de l'adjonction d'hydrogène dans le traitement de la biomasse afin d'en accroître le contenu énergétique.

Cet AMI permettra enfin de se prononcer sur l'utilisation possible de produits agricoles, notamment de résidus de cultures et de cultures intermédiaires, dans une chaîne de production de biocarburants aéronautiques durables (à condition naturellement que la législation européenne permette l'utilisation de ce type de biocarburants dans l'aérien).

Dans sa *Stratégie de mobilité durable et intelligente*[190], publiée début décembre, la Commission européenne a d'ores et déjà souligné la nécessité d'accorder à l'aérien un accès prioritaire aux carburants liquides et gazeux renouvelables et à faible teneur en carbone, faute de systèmes de propulsion alternatifs appropriés à court terme. L'initiative *RefuelUE Aviation*, incluse dans le paquet *Fit for 55* publié par la Commission en juillet 2021, propose de fixer un pourcentage obligatoire de biocarburants de plus en plus élevé au cours du temps pour les vols au départ des aéroports européens (5 % en 2030 dont 0,7 % de carburants synthétiques, 20 % (dont 5 %) en 2035, et 63 % (dont 28 %) en 2050).

3.6 Les carburants de synthèse : une question de coût et de disponibilité du CO_2 !

Les *e-fuels*, élaborés à partir de molécules de carbone d'origine non fossile et actuellement moins matures que les biocarburants sur les plans technologique et commercial, pourraient se développer dans les années à venir. Ce type de carburant suppose cependant la capture du CO_2 nécessaire en sortie d'installations brûlant de la biomasse (ce qui ne réduit que partiellement les émissions de CO_2) ou le prélèvement du CO_2 présent dans l'air (ce qui assure une véritable neutralité carbone) ainsi que la mise au point d'un modèle économique.

Plutôt que d'être rejeté à l'atmosphère, le CO_2 émis à l'intérieur du méthaniseur dans la transformation de la biomasse en gaz naturel de même que celui issu du processus de fermentation dans la production de bioéthanol pourraient être récupérés et associés à de l'hydrogène produit par électrolyse de l'eau. Un tel schéma présenterait deux avantages : il conduirait à récupérer le CO_2 rejeté et il permettrait de produire des biocarburants. Son modèle économique reste cependant à établir.

Le paquet *Fit for 55* publié par la Commission en juillet 2021, propose cependant de fixer un pourcentage obligatoire de carburants de synthèse de plus en plus élevé au cours du temps pour les vols au départ des aéroports européens 0,7 % en 2030, de carburants synthétiques, 5 % en 2035, et 28 % en 2050.

[190] https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/fr/ip_20_2329

3.7 Conclusion

Pour mieux cerner les évolutions possibles des carburants dans les transports, un certain nombre de travaux et d'expérimentations sont à mener pour :

- préciser la faisabilité et le coût des recharges rapides pour l'électrique non seulement pour les VL mais aussi pour les PL (avec des puissances de recharge dépassant le MW) ;
- préciser l'impact environnemental et économique du recyclage des batteries pour le véhicule électrique ;
- préciser le coût possible de la production d'hydrogène et de sa distribution sous ses différentes formes possibles : hydrogène gazeux à 350 ou à 700 bars, hydrogène liquide ;
- préciser la part de la production de gaz renouvelable qui servira à décarboner les usages du gaz dans l'industrie, la production d'électricité et le chauffage[191] et celle qui pourrait être utilisée pour le transport ;
- préciser la faisabilité de la capture du CO_2 à bord des navires et le coût associé ;
- préciser la possibilité d'utiliser, dans la mesure où la législation européenne ne l'interdirait pas, les biocarburants, aujourd'hui incorporés dans l'essence et le gazole, pour la production de kérosène ainsi que les coûts associés.

[191] Il sera cependant bien plus intéressant sur le plan énergétique de brûler directement la biomasse que de brûler le biogaz qui en serait issue.

Annexe 4 : Les réductions possibles d'émissions de gaz à effet de serre dans les différents secteurs du transport

Dans la perspective d'un monde neutre en carbone, il est nécessaire de recourir à des véhicules dont la circulation n'émette pas de GES (ou le moins possible dans une analyse en cycle de vie). La loi d'orientation des mobilités fixe ainsi l'objectif : « d'atteindre, d'ici à 2050, la décarbonation complète du secteur des transports terrestres, entendue comme le cycle carbone de l'énergie utilisée ».

La recherche d'une neutralité carbone modifie profondément les actions de décarbonation. Jusqu'à présent, le facteur 4 aavit surtout conduit à chercher à agir sur le report modal, l'efficacité énergétique, le développement des biocarburants ou l'utilisation du GNL fossile en remplacement du gazole donnant au mieux des réductions de 25 %. À terme, la SNBC envisage encore des efforts importants et nécessaires d'efficacité énergétique :

- pour les véhicules particuliers, viser un niveau de consommation réelle de :
    - 4 l/100 km environ pour les véhicules thermiques neufs vendus à partir de 2030[192] contre 5,6 l/100km à l'heure actuelle pour les véhicules neufs ;
    - de 12,5 kWh/100 km pour les véhicules électriques neufs à l'horizon 2050 ;
    - et un niveau de 2 l/100 km pour les consommations réelles des véhicules thermiques neufs vendus à partir de 2050 ;
- pour les poids lourds, viser à l'horizon 2040 une consommation réelle de :
    - 21 l/100 km pour les véhicules neufs roulant au diesel ;
    - 15 kg/100 km pour les véhicules neufs roulant au gaz naturel véhicule (GNV) ;
    - 129 kWh/100 km pour les véhicules roulant à l'électricité.

Dans la logique de l'efficacité énergétique, l'UE impose par exemple aux constructeurs de poids-lourds une réduction de leurs émissions de CO_2 de 15 % d'ici à 2025 et de 30 % d'ici à 2030 par rapport aux niveaux de 2019. Cependant, seule l'utilisation de motorisations et de carburants propres va permettre des réductions d'émissions des véhicules neufs (en ACV) par des facteurs de trois, quatre, voire plus. L'UE esquisse donc déjà l'étape suivante de la neutralité carbone en imposant aux constructeurs de poids lourds une part d'au moins 2 %, dans leurs ventes de véhicules neufs d'ici 2025, de véhicules à faibles émissions[193] ou à zéro émission. Les constructeurs qui ne respecteraient pas ces objectifs devront payer une pénalité financière pour leurs émissions excédentaires. En décembre 2020, l'UE a porté son objectif de réduction de ses émissions gaz à effet de serre de – 40 % à – 55 % par rapport à 1990 : dans son paquet *Fit for 55*, publié en juillet 2021, la Commission propose donc d'accélérer la réduction des émissions des VP et des VUL en imposant aux constructeurs de véhicules particuliers de réduire les émissions en moyenne

[192] Comme le précise la SNBC, cet objectif couvre une grande diversité de situations, y compris un fort développement du véhicule électrique qui ne consomme pas de carburant.

[193] La méthodologie permettant de préciser si les poids lourds au gaz naturel font ou non partie des véhicules à faible émissions devrait être précisée par la Commission.

des véhicules neufs de 55 % au lieu de 37,5 % de 2021 à 2030. Pour les VUL, l'objectif passe de 31 à 50 %. Elle propose de plus la fin de la vente des véhicules thermiques, VP ou VUL, émetteurs de gaz à effet de serre, en 2035. Les objectifs de réduction des émissions des poids lourds, qui sont mentionnés en début de paragraphe, viennent d'entrer en vigueur et ne feront donc l'objet de propositions de la Commission qu'en 2022.

Cette approche a le mérite d'être neutre sur le plan technologique. De fait, différentes solutions sont possibles pour la neutralité des véhicules du réservoir à la roue :

- l'électricité à batteries ;
- les biocarburants : biogaz (si la commission les retient dans le cadre des véhicules à très faibles émissions) ou bio*fuels* ;
- toutes les solutions à base d'hydrogène : électricité avec pile à combustible et hydrogène (liquide ou gazeux 700 bars) (dès lors que l'hydrogène est produit par électrolyse de l'eau ou par un processus de vaporeformage muni d'un dispositif de CCS), motorisation hydrogène (pour les navires ou l'aérien, mais aussi pour les poids lourds), *e-fuels* ;
- solutions hybrides principalement à base d'électricité couplée avec du biogaz, des biocarburants, de l'hydrogène, des caténaires.

L'économie de ces différentes solutions ainsi que la réduction des GES permettra de faire émerger au cours du temps la ou les meilleures solutions.

Le premier paragraphe ci-dessous traite de la réduction des émissions du secteur routier avec une approche en analyse de cycle de vie simplifiée afin de mettre en évidence les ordres de grandeur possibles. Les trois suivants examinent, de manière plus succincte l'aérien, le maritime et le fluvial. Le lecteur intéressé trouvera plus d'informations dans le rapport, à paraître, du Gouvernement au Parlement sur la décarbonation des secteurs aérien et maritime, rapport prévu par l'article 81 de la loi d'orientation des mobilités.

4.1 Le mode routier : une division par quatre possible

Compte tenu des progrès technologiques observés durant ces dernières années, Ce paragraphe prend comme référence la solution électrique à batteries. Il montre que le gain en GES dans une analyse en cycle de vie est supérieur à trois ou quatre non seulement pour cette technologie, mais également pour d'autres, réduisant ainsi probablement très fortement l'usage du moteur thermique utilisant des carburants fossiles. Le développement des biocarburants et du biogaz pour le transport pourrait cependant, si leur production était suffisante, permettre la prolongation de l'utilisation du moteur thermique.

Hormis pour les PL 40 tonnes, il s'appuie sur les données utilisées par l'IFPEN dans son étude ACV de véhicules roulant au GNV ou au bioGNV[194].

La méthodologie retenue dans ce chapitre pour les VP, les VUL les bus et les PL 12 tonnes part des résultats de l'ACV de l'IFPEN à l'horizon 2030, réalise, au moyen d'hypothèses complémentaire, une projection de ces résultats à 2040, et cherche à voir comment il est possible d'aller encore plus loin dans une vision qui pourrait être qualifiée de volontariste

[194] *Étude ACV de véhicules roulant au GNV et bioGNV,* Anne Bouter, Joris Melgar, Cyprien Ternel, septembre 2020, IFPEN, https://www.afgaz.fr/wp-content/uploads/rapport_afg_versionfinale-1.pdf

de la décarbonation. Les résultats sont complétés par un certain nombre de remarques sur les véhicules hydrogène : celles-ci s'appuient, autant que possible, sur le rapport sur l'analyse du cycle de vie de l'hydrogène[195], publié par l'Adème fin décembre 2020. Comme certaines des données nécessaires à cet ACV hydrogène sont confidentielles, des approximations ont été utilisées dans le cadre de ce chapitre.

Enfin, en l'absence d'une ACV de référence pour les PL 40 tonnes, le rapport cherche à estimer des ordres de grandeur d'une ACV simplifiée pour différents types de PL 40 tonnes en partant de la résistance à l'avancement du véhicule et des rendements des différentes motorisations possibles.

4.1.1 Les véhicules particuliers du segment C : une division par quatre est possible

Le véhicule particulier du segment C considéré par l'IFPEN correspond à une voiture compacte, de type Mégane, Peugeot 308 ou Golf : les émissions considérées sont celles correspondant à l'ensemble de la durée de vie du véhicule (hors opérations de recyclage) à la date d'achat du véhicule.

Illustration 10 : Véhicule segment C - Crédit Pixabay

[195] *Analyse du cycle de vie relative à l'hydrogène – Production d'hydrogène et usage en mobilité légère,* Publication Ademe, Prestataires : SPHERA : Cécile Querleu, Alexander Stoffregen, GINGKO 21, Hélène Teulon, 2020, https://www.ademe.fr/analyse-cycle-vie-relative-a-lhydrogene

4.1.1.1 D'aujourd'hui à 2030, une division par 2,5 des émissions en ACV des véhicules neufs du segment C est possible

L'étude ACV réalisé par l'IFPEN[196] montre qu'un véhicule électrique du segment C (voiture compacte, type Mégane, Peugeot 308 ou Golf), équipé d'une batterie de 80 kWh, émettrait en 2030 59,9 g CO_2e/personne.km (se décomposant en 29,6 pour la batterie, 23 pour la fabrication du véhicule lui-même, 5,8 pour l'électricité en amont du véhicule et 1,5 g CO_2 pour les pneus) ce qui représenterait par rapport à un véhicule thermique essence 2019 (149 g CO_2e/personne.km) une division par un facteur 2,5.

Une batterie de 80 kWh permet à utilisateur de faire de la longue distance dans la mesure où le cycle WLTC de l'IFPEN envisage une consommation de 11 à 13 kWh/100km, ce qui sur autoroute devrait correspondre à une consommation (minimale) de 15 à 20 kWh/100km. Une condition nécessaire pour la diffusion de ce type de véhicule est que se développe un réseau de bornes de recharges rapides, en particulier sur autoroutes, en nombre suffisamment important pour que l'automobiliste soit assuré de pouvoir accéder facilement à une borne. Le cas contraire serait défavorable aux émissions de gaz à effet de serre : il conduirait en effet l'automobiliste à acheter des batteries de 100 kWh, voire plus (et donc à des émissions de gaz à effet de serre plus importantes). Dans la réalité, il est probable que le parc automobile sera composé de véhicules avec des batteries de capacités variables (40 kWh, 60 kWh, 80 kWh) : ce choix dépendra des préférences des consommateurs, des taxations mises en place ainsi que du déploiement plus ou moins important de bornes de recharge rapide : plus ce réseau sera déployé, plus l'automobiliste aura confiance dans la possibilité de trouver quand il en aura besoin une borne de recharge rapide et moins il aura tendance à acheter des batteries de très grande capacité.

[196] *Etude ACV de véhicules roulant au GNV et bioGNV,* Anne Bouter, Joris Melgar, Cyprien Ternel, septembre 2020, IFPEN, https://www.afgaz.fr/wp-content/uploads/rapport_afg_versionfinale-1.pdf

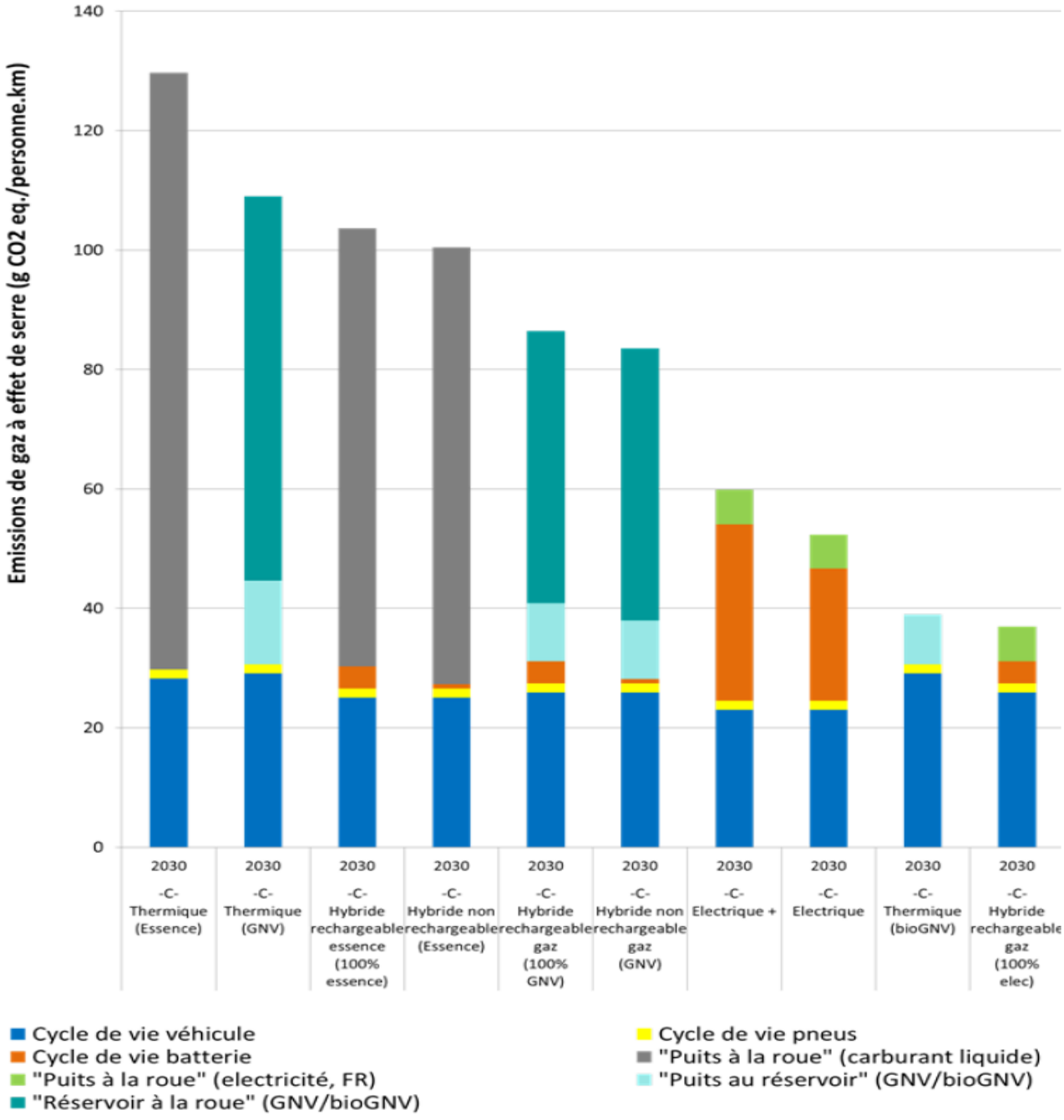


Figure 19 : Impact potentiel sur le changement climatique pour les véhicules du segment C en 2030. Source : IFPEN[197]

Ce même graphique montre que deux types de véhicules pourraient avoir des émissions de gaz à effet de serre encore plus basses à 2030 :

- dans une hypothèse où les véhicules hybrides électriques rechargeables fonctionneraient en permanence à l'électricité, leurs émissions seraient encore plus

[197] Source : *Etude ACV de véhicules roulant au GNV et bioGNV*, Anne Bouter, Joris Melgar, Cyprien Ternel, septembre 2020, IFPEN, https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/article/analyse-du-cycle-vie-acv-des-vehicules-fonctionnant-au-gnv-et-biognv

faibles compte-tenu d'une capacité moins importante de la batterie. Un tel fonctionnement (probablement conforme au cycle WLTP) reste, ainsi que le mentionne le rapport de l'IFPEN, cependant théorique dans la mesure où un véhicule hybride rechargeable, dont l'autonomie en tout électrique sera tout au plus de 60 km, ne fonctionnera qu'une partie de son temps avec de l'électricité ;

- les véhicules au biogaz, bioGNV, ont également « des résultats très favorables : environ 40 g CO_2 eq. /personne.km, soit 3,5 fois moins que le véhicule équivalent diesel »[198]. Il est à noter que dans les hypothèses prises par IFPEN le biogaz provient majoritairement de déchets agricoles, ce qui permet dans un calcul en ACV d'avoir des émissions GES plus faibles que si ce biogaz avait été produit à partir de déchets ménagers par exemple[199].

L'IFPEN ajoute que les véhicules au biocarburants avancés, type BTL, correspondant par exemple au procédé BioTfueL présenteraient également de très bons résultat : le gazole moteur de synthèse a des résultats très favorables, il émettrait, en 2030, 42 g CO_2eq/personne.km (se décomposant en 17 pour le carburant, 23 pour la fabrication du véhicule lui-même, et 1,5 g CO_2 pour les pneus) ce qui représenterait par rapport à un véhicule thermique essence 2019 (149 g CO_2e/personne.km) une division par un facteur 3,7 permettant d'envisager sans difficulté la division par 4 à l'horizon 2040.

4.1.1.2 À 2040, une division par 4, voire plus, semble possible pour les véhicules neufs

Comme on l'a vu, les biocarburants avancés, pourraient permettre dès leur utilisation en 2030 d'atteindre pratiquement le facteur 4 visé à 2040.

Pour les véhicules électriques, si on cherche à projeter ce même calcul en 2040, trois évolutions qui ont des chances « raisonnables » d'intervenir devraient pouvoir aboutir à des gains supplémentaires :

- la décarbonation du contenu de l'électricité : le contenu carbone de l'électricité devrait encore décroître. En reprenant le scénario Volt de RTE, un contenu carbone de l'électricité de 30 g CO_2e/kWh en 2040 (le scénario Volt raisonne à 2035) peut ainsi être estimé contre 55,7 en 2019, ce qui se traduirait pour un véhicule électrique avec une batterie de 80 kWh (parcourant 150 000 km) par un gain total d'environ 1,3 g CO_2e/km ;
- la fabrication de plus en plus décarbonée des batteries de première génération : l'empreinte carbone de la batterie à la fabrication (avec une fourniture à quasiment 100 % d'énergie décarbonée) pourrait atteindre 62 kg CO_2e/kWh (en 2040) au lieu de 76 kg CO_2e/kWh (en 2030, ce qui se traduirait par un gain d'un peu moins de 20 %, plus précisément de 4,2 g CO_2e/km. Ce gain semble raisonnable sur les batteries actuelles. L'empreinte carbone des batteries dites solides ainsi que d'autres compositions éventuelles peut modifier ces valeurs, sans qu'il soit possible à ce stade de donner un ordre de grandeur, ni même la tendance à la hausse ou à

[198] Les émissions de GES du bioGNV sont basées sur les résultats de l'étude « Evaluation des impacts GES de l'injection du biométhane dans le réseau de gaz naturel, ENEA Quantis , 2017 » (Quantis 2017

[199] Il est à noter que l'IFPEN utilise une valeur de 7,5 g CO_2/MJ pour le bio-méthane, alors que la base de données du JEC en 2020 donne certes 9,5 g CO_2/MJ pour les décharges urbaines, mais entre 20 et 25 g CO_2/MJ pour les méthaniseurs agricoles, qui sont très majoritaires. En prenant 1/3 de décharge et 2/3 d'agricole, l'utilisation des données du JEC donnerait donc plutôt 17 g CO_2/MJ. Cette remarque ne modifie cependant pas les conclusions de l'IFPEN sur l'intérêt du biogaz.

la baisse : l'IFPEN indique cependant qu'en 2050 des publications récentes[200] montreraient que les émissions tendraient vers une valeur de 60-70 kg CO_2e/kWh avec la technologie Lithium-ion, et qu'elles pourrait basculer vers 20 kg CO_2e/kWh de batterie en cas de rupture technologique ;

- la mise en place de circuits de réutilisation en usage stationnaire de la batterie et de son recyclage de la batterie : en tenant compte des deuxième et troisième vies de la batterie, leur empreinte carbone pourrait vraisemblablement être réduite d'un facteur supplémentaire que l'on pourrait estimer à 25 % (estimation grossière en première approximation qui paraît cependant raisonnable si on arrive à donner à la batterie une seconde vie dans un usage stationnaire pour le bâtiment et une troisième vie à travers un recyclage important) : le gain serait cette fois de 6,3 g CO_2e/km. La mise en place d'une obligation réglementaire de recyclage des batteries, conformément au projet européen de règlement sur les batteries[201], proposé en 2020 par la Commission, devrait conduire à la création d'une filière du recyclage et ainsi au gain évoqué ci-dessus de 25 %. Par contre, une baisse trop rapide des prix des batteries pourrait inciter à ne pas chercher à reconditionner (en raison du coût) d'anciennes batteries pour un usage stationnaire et à en utiliser des neuves pour cet usage.

Au total, un véhicule électrique à batterie à 2040 pourrait avoir ainsi une empreinte carbone de 48,1 g CO_2/km, ce qui représenterait une division par un facteur 3,1.

Le tableau ci-dessous donne ce que pourraient être les émissions d'un tel véhicule :

En g CO_2/p.km	2019 Thermique Essence	2030 Electrique 80 kWh 150 000 km	2040 Electrique 80 kWh 150 000km Première vie batterie : 75 %	2040 Electrique 80 kWh 200 000km Première vie batterie : 75 %
Pneus	1,5	1,5	1,5	1,5
Véhicule	23,7	23,0	23,0	17,3
Batterie		29,6	19,1	14,3
Amont pétrole	123,8			
Amont élec		5,8	4,5	4,5
Total	149	59,9	48,1	37,6
Facteur de réduction par rapport à un véhicule essence 2019		2,5	3,1	4,0

Tableau 10 : Émissions à 2040 en ACV d'un véhicule du segment C

[200] *Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA, Final report,* 2020-07-01, Corporate author(s): Directorate-General for Climate Action (European Commission) , Ricardo Energy & Environment, Personal author(s): Morgan-Price, Samantha ; Jöhrens, Julius ; Haye, Sebastien ; Helms, Hinrich ; Amaral, Sofia ; https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/1f494180-bc0e-11ea-811c-01aa75ed71a1

[201] Ce règlement comprend des obligations fortes de recyclage pour les métaux stratégiques : Li, Co et Ni. https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/batteries/Proposal_for_a_Regulation_on_batteries_and_waste_batteries.pdf

Le carbone émis à la fabrication du véhicule lui-même devient un élément prépondérant, voisin de 50 %, dans le calcul de l'empreinte carbone. Pour atteindre le facteur 4, il faut dès lors chercher à prolonger la durée de vie du véhicule, ce qui constitue un facteur probablement plus difficile à obtenir. L'extension de la durée de vie du véhicule et de la batterie de 150 000 km à 200 000 km permettrait de gagner un facteur supplémentaire de 25 % sur les émissions à la fabrication du véhicule et de la batterie. Le facteur de réduction serait alors de 4. C'est cependant la philosophie annoncée par Tesla[202] lorsqu'il indique que ses batteries vont permettre de parcourir un million de miles, et pourront ainsi être utilisées cinq fois plus longtemps que pour un véhicule habituel aux États-Unis et huit fois plus qu'un véhicule européen. Tesla indique explicitement que cette stratégie va permettre de réduire drastiquement l'empreinte carbone des véhicules : ce raisonnement illustre bien l'idée qu'avec de tels véhicules les émissions en circulation seraient faibles et que, hors batterie, les principaux facteurs de gain résideraient dans la réduction des émissions liées à la fabrication du véhicule, autrement dit à la masse du véhicule et aux matériaux utilisés, mais aussi dans le prolongement de la durée de vie du véhicule (ce qui représenterait également une diminution du nombre de véhicules vendus par an). Du point de vue des pouvoirs publics, ceci inciterait d'abord à développer et à mettre en avant la notion d'empreinte carbone du véhicule, puis à renforcer les taxes à l'achat des véhicules en tenant compte dans toute la mesure du possible de l'empreinte carbone de la fabrication du véhicule.

Les résultats présentés par l'IFPEN montrent que d'autres technologies pourraient amener, dès leur entrée en production, à des résultats similaires, probablement légèrement meilleurs pour le bioGNV (sous réserve de la disponibilité du gisement, de la vérification des émissions à l'amont et du coût du carburant) et l'Xtl[203] (sous réserve du coût du carburant ainsi fabriqué), probablement légèrement moins bons pour des biocarburants liquides (100 % biocarburants, ou E85 seconde génération, sous réserve là encore du prix et de la disponibilité de la matière première).

En appliquant ce même jeu d'hypothèses à un véhicule hydrogène de la catégorie C (avec une pile à combustible, PAC, de 80 kWh, un réservoir de 5,3 kg d'hydrogène et une batterie de 2 kWh), la réduction obtenue est légèrement inférieure à celle du véhicule électrique : à 2040, le facteur de réduction serait tout de même de 3,4. Si les émissions à la fabrication du réservoir de la PAC, du platine (et de la batterie de faible capacité associée) sont sensiblement les mêmes que celles de la batterie du véhicule électrique, en revanche, le véhicule hydrogène nécessite une quantité d'électricité supérieure d'au moins 2,6 fois à celle du véhicule à batteries, ce qui conduit à des émissions de GES légèrement supérieures (en supposant que l'électricité utilisée pour produire l'hydrogène ou pour le compresser provient du réseau).

---

[202] https://www.tesla.com/ns_videos/2019-tesla-impact-report.pdf, voir notamment page 13.

[203] Le diesel XTL est un carburant diesel dérivé du pétrole, réalisé à partir de plusieurs matières premières et autres biocomposants. Il peut avoir été réalisé à partir de gaz naturel (on liquéfie le gaz), de biomasse (par thermochimie), ou de l'hydrogénation d'huiles végétales. Le diesel XTL est donc du gazole paraffinique de synthèse dont une partie de la composition provient d'huile et de gaz. https://www.linternaute.com/auto/magazine/1746787-les-carburants-changent-de-nom-lequel-allez-vous-devoir-choisir/1746877-le-diesel-xtl

4.1.1.3 À 2060, une division par 8 serait atteignable, mais au prix de grands efforts

En prenant comme point de départ un véhicule avec une batterie de 80 kWh, prolongé à 200 000 km (tant pour le véhicule que pour la batterie) et une première vie de la batterie représentant 75 % des émissions, ce qui conduit à des émissions de 37,6 g CO_2e/personne.km et un facteur 4 par rapport à un véhicule essence 2019 (cf tableau ci-dessus), quatre leviers, illustrés sur la figure ci-dessous, permettraient d'aller plus loin dans la réduction des émissions à 2040 :

- un premier levier consisterait à jouer sur le comportement et à rechercher un remplissage de 1,5 personne par kilomètre en moyenne contre 1,3 p.km aujourd'hui ce qui conduirait à un gain de 4,2 g CO_2e/personne.km et facteur 4,45 ;
- un deuxième paramètre consisterait (en suivant la philosophie de Tesla) à rechercher un doublement de la durée de vie de la caisse et de la batterie (ce qui sera probablement plus facile à obtenir) de 150 à 300 000 km, ce qui représenterait une durée de vie moyenne du véhicule de 20 ans. Le gain serait de 10,5 g CO_2e/personne.km et une réduction des émissions par un facteur 5,5. Ce gain devrait cependant être réduit par l'intégration dans l'ACV du bilan des pièces détachées, ce qui n'a pas été fait (hormis pour les pneus) ; l'augmentation de la durée de vie se traduira aussi par un ralentissement du renouvellement du parc donc de la pénétration des véhicules avec un meilleur ACV ;
- un troisième levier consisterait à réutiliser puis à recycler une plus grande proportion de batteries ce qui permettrait de n'attribuer que 50 % des émissions de la batterie à leur première vie et conduirait à un gain de 4,8 g CO_2e/personne.km et une réduction des émissions par un facteur 4,55;
- un quatrième levier enfin jouerait sur la conception du véhicule et rechercherait une baisse des émissions à la fabrication de 1/3 provenant en même temps de l'allègement du véhicule et de l'emploi de matériaux moins émetteurs. Le gain serait cette fois de 5,8 g CO_2e/personne.km et la réduction par un facteur voisin de 4,7.

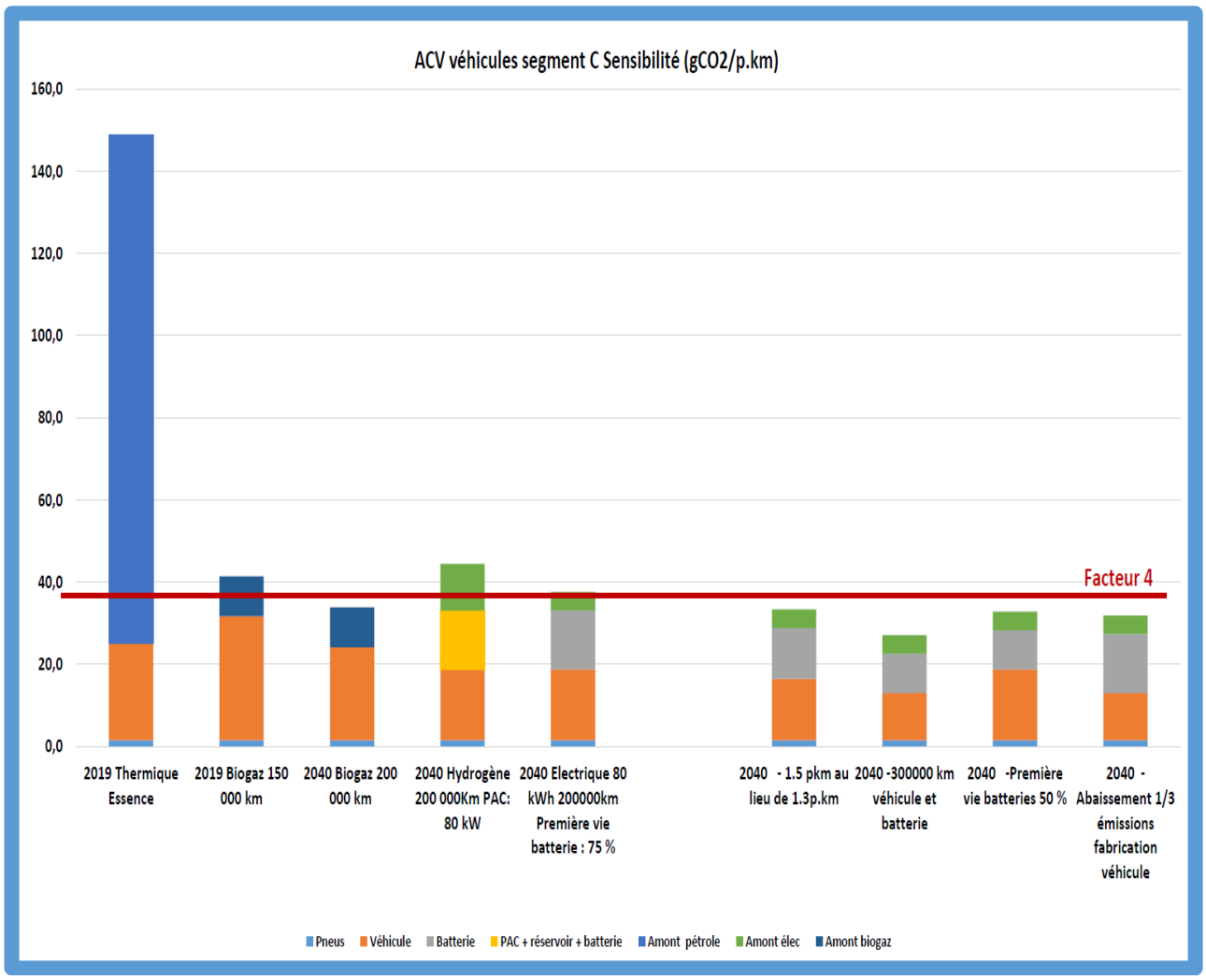


Figure 20 : Émissions en ACV à 2040 d'un véhicule du segment C

Un cumul de ces quatre leviers amènerait à une réduction des émissions par un facteur voisin de 8 par rapport à un véhicule thermique essence 2019 (149 g CO_2e/personne.km). Les émissions globales seraient alors de l'ordre de 18,2 g CO_2eq/personne.km (se décomposant en 5,5 pour la batterie, 6,6 pour la fabrication du véhicule lui-même, 4,5 pour l'électricité en amont du véhicule et 1,5 g CO_2 pour les pneus). Si la commercialisation de ce type de véhicules pouvait intervenir à l'horizon 2050, il constituerait alors l'essentiel du parc en 2060.

À 2060, une réduction des émissions par un facteur voisin de 8 est également possible, en prenant en compte un courant électrique encore plus décarboné (15 g CO_2/kWh contre 30 g CO_2/kWh à 2040) ainsi que le cumul des autres facteurs mais sans retenir un taux de remplissage plus élevé du véhicule, - ce qui relève des modifications de comportement et des efforts de sobriété.

4.1.1.4 Conclusion sur la réduction des émissions des véhicules du segment C

Si les études IFPEN montrent une réduction possible des émissions de gaz à effet de serre par un facteur 2,5 à 2030 pour un véhicule électrique à batterie, il semble possible d'aboutir à 2040 à une division par 4, voire plus au-delà.

Cette réduction peut être obtenue non seulement par des véhicules électriques longue distance, mais aussi par des véhicules utilisant des biocarburants avancés ou du biogaz et, dans une moindre mesure, par des véhicules consommant de l'hydrogène. Pour ces derniers, ainsi que l'a montré l'Ademe, l'un des principaux facteurs de réduction des émissions de gaz à effet de serre réside dans la diminution de la teneur en platine des piles à combustible et dans leur recyclage.

Pour qu'une telle évolution puisse se produire, certains éléments sont cependant nécessaires :

- la mise à disposition de bornes de recharges (rapides pour l'électrique) en nombre suffisant est un point clef : ne pas le faire conduirait soit à augmenter la capacité des batteries à 100 kWh, voire plus, (et donc les émissions à la fabrication) soit à augmenter la taille des réservoirs à gaz et à hydrogène ;
- la recherche d'une durée de vie nettement plus importante des véhicules : dès lors que les émissions à la fabrication des véhicules représentent la part majeure, il convient de chercher à diminuer le nombre de véhicules vendus chaque année et de prolonger fortement leur durée de vie. Cette réduction souhaitable du nombre de véhicules fabriqués, inenvisageable sur le très court terme par l'industrie automobile, doit cependant pourvoir être intégrée dans des prévisions de moyen/long terme ;
- les signaux économiques principaux doivent dès lors porter sur l'achat des véhicules et sur les émissions de carbone naturellement en circulation, mais aussi à la fabrication, ce qui conduit à mettre en avant la notion d'empreinte carbone du véhicule et à lui associer, à l'achat, le coût correspondant des externalités.

D'un point de vue économique, le rapport de la Commission présidée par Patrick Criqui sur les coûts d'abattement dans les transports montre que si le coût d'abattement associé à la mise en place d'un véhicule électrique est supérieur aujourd'hui à la valeur de l'action pour le climat, 250 €/t CO_2, ce coût devient inférieur dès 2025 pour la citadine électrique et en 2030 pour la berline électrique : « Au total, pour les véhicules particuliers, les véhicules électriques remplissent à la fois les critères de rentabilité à moyen terme et de potentiel important de décarbonation et semblent être une solution « sans regret ». […] Cet indicateur de coût d'abattement ne permet pas vraiment de discriminer véhicules hybrides et électriques à batterie, dont la rentabilité socioéconomique advient au même horizon. Cependant, […] dans la mesure où les véhicules hybrides induisent des émissions résiduelles incompatibles avec la décarbonation complète du transport terrestre, ils semblent appelés à ne jouer qu'un rôle transitoire dans la transformation du parc automobile. Cette considération invite notamment à limiter les efforts en faveur des motorisations hybrides afin d'éviter les effets de verrouillage ou de *lock-in* »[204].

4.1.2 Les véhicules utilitaires légers : une division par quatre est envisageable

L'IFPEN a retenu pour cette catégorie un Véhicule Utilitaire Léger (VUL) de type Renault Master avec un PTAC de 3, 5 t, une charge utile maximale de 1,615 t et un coefficient de

[204] https://www.strategie.gouv.fr/publications/couts-dabattement

remplissage de 0,28 : ce véhicule est supposé parcourir 194 400 km à raison de 16 200 km par an pendant douze ans.

Pour la version électrique, la capacité des batteries est de 80 et 100 kWh avec une durée de vie prise, de manière pessimiste, à six ans ce qui conduit à utiliser deux batteries.

Illustration 11 : Véhicules utilitaires légers – Crédit : Arnaud Bouissou / Terra

Avec une consommation voisine de 21 kWh aux 100 km (pour un coefficient de remplissage de 0,28), l'autonomie du véhicule est un peu inférieure à 400 km pour une batterie de 80 kWh. L'Ifpen prend à 2030 une batterie de 100 kWh ce qui devrait donner au véhicule une autonomie proche des 500 km.

Il est à noter que certains constructeurs choisissent des capacités de batteries plus faibles améliorant ainsi le contenu carbone du véhicule : le groupe PSA a ainsi retenu des capacités de 50 et 75 kWh pour le Citroën ë-Jumpy 100 % ëlectric et l'e-Expert. Là encore, comme pour les véhicules de catégorie C, il est probable qu'une diversité de modèles se mettra en place avec des batteries dont la capacité sera proche des 40 kWh pour des usages adaptés à des circuits courts, et d'autres à 100 kWh voire plus pour les VUL effectuant de longues distances : le déploiement de bornes de recharge, lentes et rapides, est une condition nécessaire pour limiter la taille des batteries.

4.1.2.1 Dès 2030, une division par 3 est envisageable

De la même façon que pour les véhicules de catégorie C, les calculs effectués par l'IFPEN montrent que dès 2030 :

- le recours aux biocarburants avancés ou au biogaz permettrait une réduction plus importante atteignant un facteur 6,4, toujours à condition que ce biogaz soit majoritairement issu de déchets agricoles ;
- une division par un facteur 3 peut être obtenue pour un VUL emportant une batterie de 100 kWh.

Comme précédemment, les véhicules hybrides rechargeables obtiennent de très bons résultats quand ils fonctionnent principalement sur l'électricité de la batterie. Force est cependant de constater que bien souvent le véhicule hybride est utilisé en mode thermique.

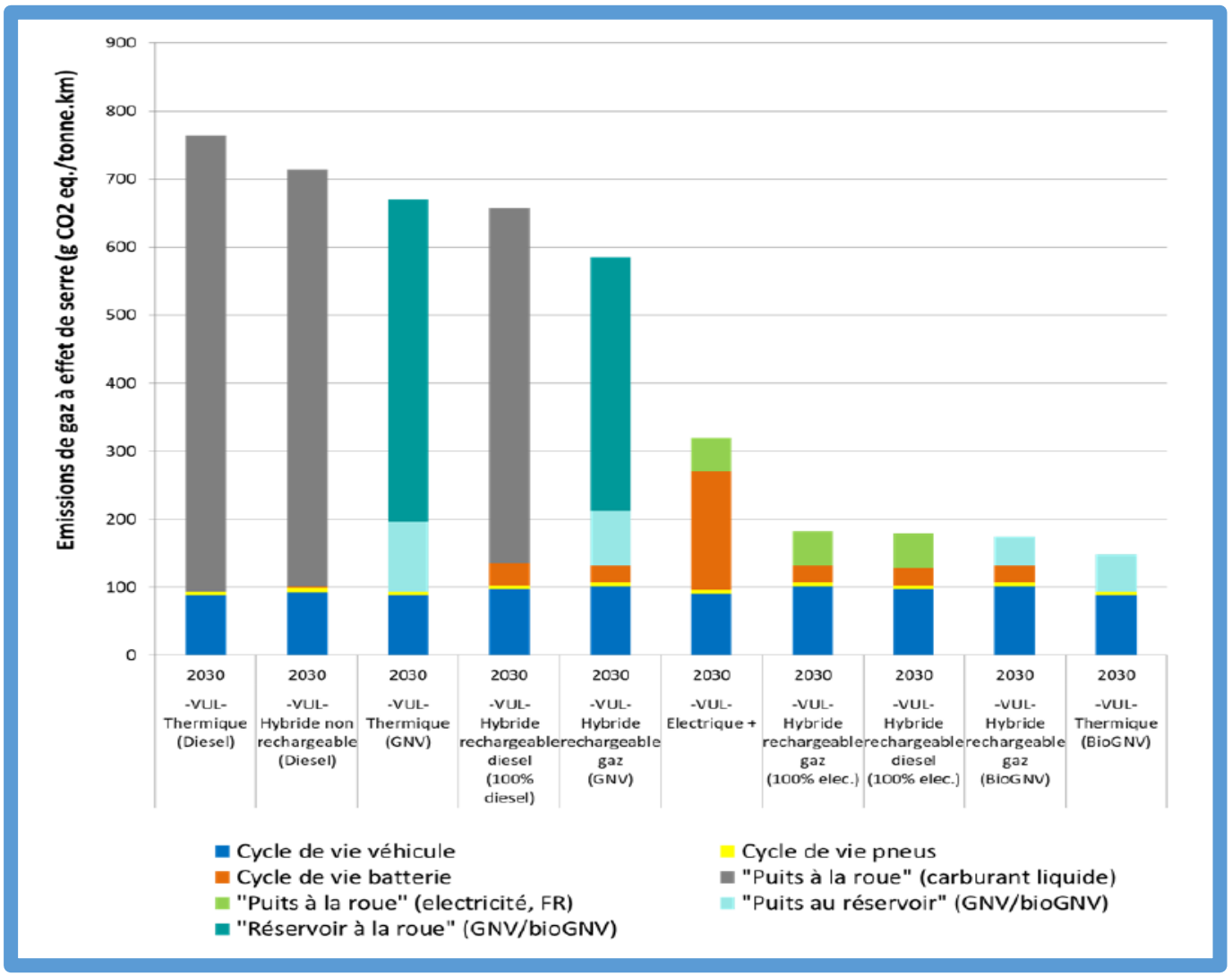


Figure 21 : Émissions GES en ACV des VUL : horizon temporel 2030. Source : IFPEN

4.1.2.2 Un VUL à hydrogène amènerait également à une réduction des émissions par un facteur supérieur à 2

Les caractéristiques retenues pour le VUL hydrogène s'appuient sur les travaux menés par

l'Ademe sur l'analyse du cycle de vie de l'hydrogène[205]. Ce véhicule comprendrait ainsi une PAC de 40 kW, une masse d'hydrogène de 5,3 kg et une batterie de 20 kWh. Certaines données relatives aux émissions des composants des véhicules à hydrogène étant confidentielles, le calcul effectué repose sur un certain nombre d'approximations.

Il montre que dès aujourd'hui, une réduction par un facteur proche de 2,4 pourrait être obtenue.

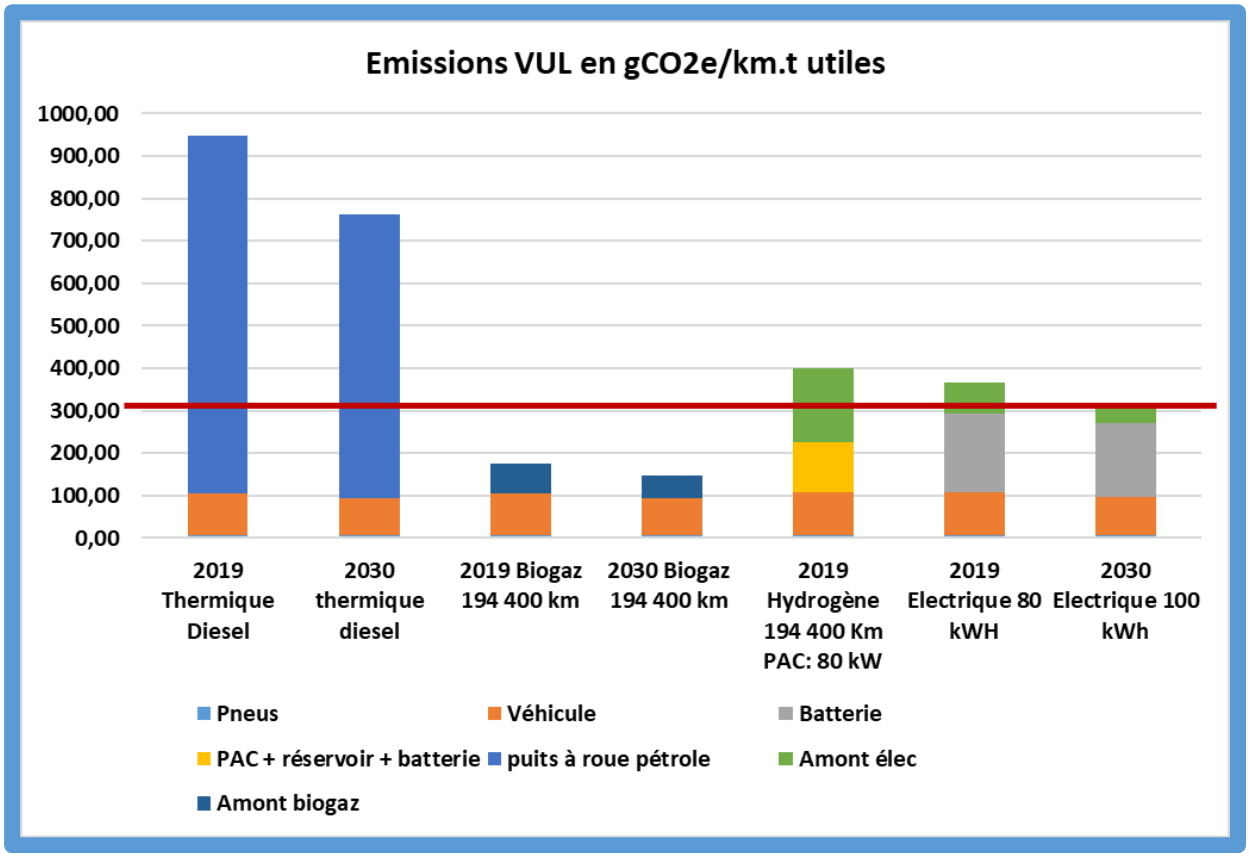


Figure 22 : Émissions VUL (y compris hydrogène) à 2019 et 2030 en ACV. Source : CGEDD

Les sources d'amélioration pour ce véhicule reposent sur une efficacité plus importante de la PAC à terme (0,65 contre 0,6 aujourd'hui), sur un contenu de l'électricité moins décarboné, sur l'amélioration des émissions à la fabrication du platine et des fibres du réservoir.

4.1.2.3 Dès 2040, une division par plus de 6 possible pour les VUL neufs

Pour les VUL électriques, quatre facteurs devraient permettre d'aller encore plus loin à 2040 :

- l'allongement de la durée de vie des batteries : celui-ci devrait permettre de n'utiliser qu'une seule batterie durant toute la durée de vie du véhicule ce qui diviserait quasiment par deux les émissions de ce poste : c'est la principal facteur de réduction qui permet de baisser de quasiment un tiers

[205] *Analyse du cycle de vie relative à l'hydrogène : Production d'hydrogène et usage en mobilité* légère ; ADEME, décembre 2020 ; https://www.ademe.fr/analyse-cycle-vie-relative-a-lhydrogene

les émission au km. Une batterie de 100 kWh (correspondant à un parcours d'environ 500 km) devrait effectuerait une quarantaine de cycles par an[206] pour parcourir 16 000 km, soit cinq cent cycles sur la durée de vie du véhicule : les performances, même actuelles, des batteries le permettent ;

- la décarbonation du contenu de l'électricité : comme précédemment, le contenu carbone de l'électricité devrait encore décroître. En reprenant le scénario Volt de RTE, un contenu carbone de l'électricité de 30 g CO_2e/kWh en 2040 (le scénario Volt raisonne à 2035) peut ainsi être estimé contre 55,7 en 2019 ;
- la fabrication de plus en plus décarbonée des batteries de première génération : l'empreinte carbone de la batterie à la fabrication (avec une fourniture à quasiment 100 % d'énergie décarbonée) pourrait atteindre 62 kg CO_2e/kWh (à 2040) au lieu de 76 kg CO_2e/kWh (en 2030) ;
- la mise en place du recyclage de la batterie : la mise en place du recyclage semble crédible : la réutilisation des batteries pour un usage stationnaire semble plus difficile dans la mesure où la pratique pourra conduire à les faire fonctionner dans le VUL le plus longtemps possible. Un gain de 25 % est ainsi envisageable.

L'utilisation d'une seule batterie permettrait d'obtenir une réduction par 4,6 des émissions par rapport à un VUL diesel 2019. Leur cumul permettrait d'envisager une division des émissions par un facteur proche de 6.

À 2060, le cumul de ces hypothèses, l'allongement de la durée de vie de la batterie et du véhicule à 15 ans, et la prise en compte d'un courant électrique encore plus décarboné (15 g CO_2/kWh) amènerait à une réduction des émissions par un facteur supérieur à 8.

4.1.2.4 Conclusion sur la réduction des émissions des VUL

L'évolution des VUL vers des motorisations neutres en carbone et exempts de polluants atmosphériques[207] devrait être accélérée dans les prochaines années par la mise en place des ZFE. Même s'il existe déjà plusieurs modèles de VUL électriques, l'arrivée sur le marché d'autres marques ainsi que la baisse du prix des batteries devrait également conduire à une réduction des coûts et à l'essor de ce type de véhicules.

4.1.3 Les bus : une réduction par un facteur supérieur à sept possible

Le bus considéré par l'IFPEN a une longueur de 12 mètres et parcourt 40 000 km chaque année pendant douze ans (avec un remplissage moyen de 17,4 personnes), ce qui va conduire à retenir une utilisation de deux batteries (et les émissions associées) sur la durée de vie du véhicule. Deux tailles de capacité différentes ont été retenues pour les batteries : 170 et 340 kWh, correspondant aux deux dénominations dans les figures ci-dessous : bus électrique ou bus électrique +.

[206] En supposant qu'il reste toujours une charge minimale de 10 à 20 % dans la batterie.

[207] L'usure des pneus amène cependant à des émissions de particules.

Illustration 12 : Bus électrique - Crédit : Arnaud Bouissou/Terra

4.1.3.1 Dès 2030, une division par plus de 7 possible pour les véhicules neufs

Les travaux réalisés par l'IFPEN aboutissent, pour un bus électrique, à une division par un facteur d'environ 7,4 par rapport à son équivalent thermique 2019.

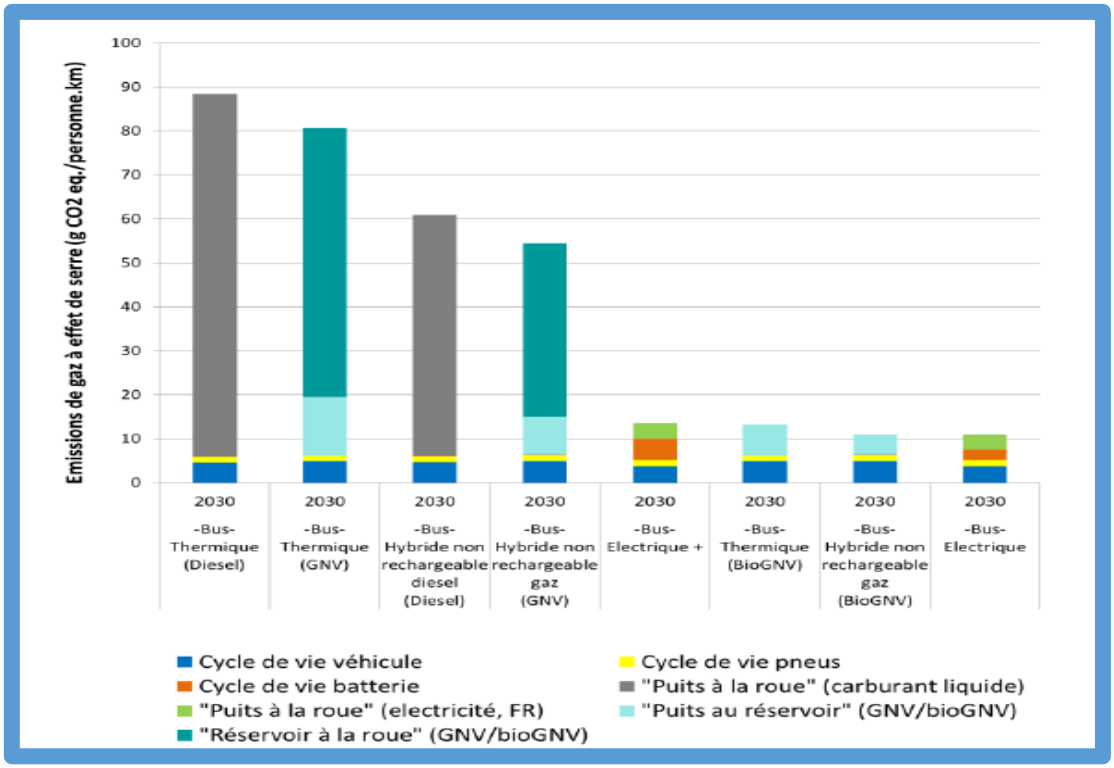


Figure 23 : Émissions de gaz à effet de serre d'un bus à 2030. Source : IFPEN

L'IFPEN ajoute que, pour un bus diesel ou GNV classique, les émissions du puits à la roue (émissions à la combustion et en amont) représentent plus de 90 % du total. Le passage à l'électrique ou au biogaz va donc supprimer ce facteur et aboutir à cette réduction particulièrement importante, et d'un ordre de grandeur supérieur à celui obtenu pour les véhicules particuliers.

4.1.3.2 Un bus à hydrogène permet également une réduction notable des émissions

Les effets d'un bus à l'hydrogène peuvent être estimés en prenant en compte un bus de 12 mètres type, proche des bus de la marque Van Hool qui circulent à Oslo et Cologne[208]. Les caractéristiques retenues pour le calcul sont les suivantes : une pile à combustible de 85 kW, des batteries de 36 kWh, une masse d'hydrogène emporté de 35,8 kg (répartie en sept réservoirs à 350 bars), pour une autonomie d'environ 300 à 350 km, ainsi qu'une alimentation par le réseau électrique pour l'électrolyseur et la compression.

Comme l'illustre le graphique ci-après, le calcul des émissions montre qu'en 2019, le bus à hydrogène pourrait amener à une réduction des émissions d'un facteur supérieur à cinq. Les émissions liées à la fabrication des réservoirs et du platine pour la PAC sont notables. Néanmoins, le facteur principal correspond aux émissions de l'électricité provenant du réseau.

[208] *Comment déployer des bus électriques à hydrogène en France ?* Le livre blanc de l'AFHYPAC. Juillet 2020. https://www.h2-mobile.fr/actus/guide-faciliter-deploiement-bus-hydrogene/

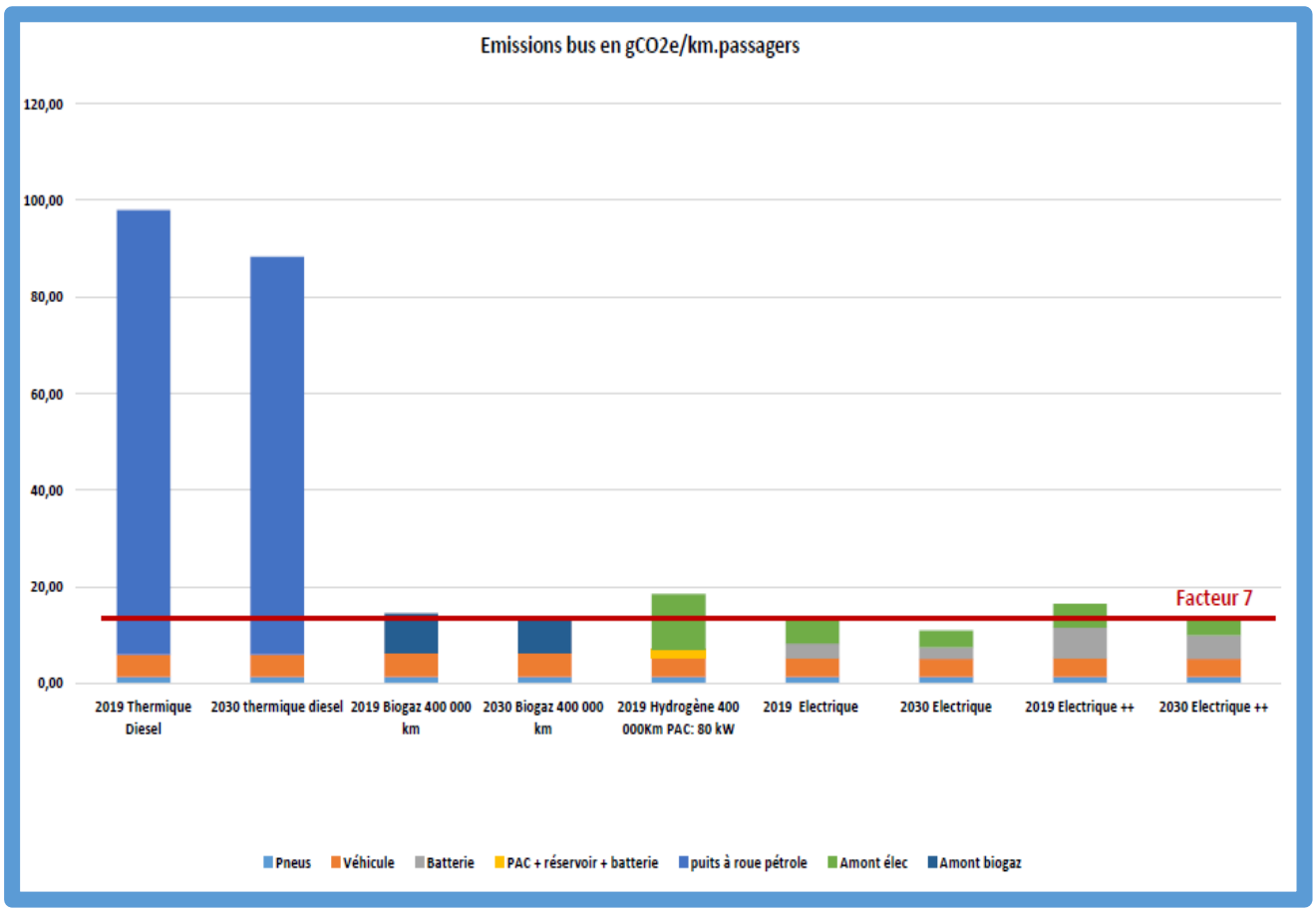


Figure 24 : Émissions de gaz à effet de serre d'un bus (y compris hydrogène) à 2019 et 2030

Le calcul ci-dessus prend en compte les émissions à la fabrication de batteries NMC : d'autres compositions de batteries (beaucoup de bus utilisent des batteries dites LFP) modifieraient les résultats obtenus, même s'il est vraisemblable que les ordres de grandeurs resteraient les mêmes. Le calcul devrait toutefois être repris pour des batteries à électrolyte solide.

4.1.3.3 À 2040, une division par 10 serait même possible

Pour les bus électriques, les quatre mêmes facteurs devraient permettre d'aller encore plus loin à 2040 :

- la décarbonation du contenu de l'électricité : le contenu carbone de l'électricité devrait encore décroître ;
- la décarbonation la fabrication des batteries de première génération devrait être de plus en plus décarbonée. L'empreinte carbone de la batterie à la fabrication (avec une fourniture à quasiment 100 % d'énergie décarbonée) pourrait atteindre 62 kg CO_2e/kWh (en 2040) au lieu de 76 kg CO_2e/kWh (en 2030) ;
- la mise en place du recyclage de la batterie ;
- l'allongement enfin de la durée de vie des batteries qui devrait permettre de n'utiliser qu'une seule batterie durant toute la durée de vie du véhicule

ce qui diviserait quasiment par deux les émissions de ce poste.

Le cumul de ces améliorations conduit à des divisions des émissions par un facteur supérieur à 10 pour les deux bus électriques à batteries considérées (130 ou 270 kWh) par rapport à un bus diesel actuel.

4.1.3.4 Un déploiement nécessaire dès aujourd'hui

Au final, il apparaît que dès aujourd'hui les gains apportés en termes d'émissions de gaz à effet de serre et de particules sont extrêmement importants ce qui devrait conduire à accélérer le déploiement de ces motorisations.

De plus, les résultats de la réduction des émissions de gaz à effet de serre, très voisins pour les deux types de batteries considérées, 170 ou 340 kWh, montre que la taille de la batterie peut être adaptée à l'autonomie recherchée sans modifier notablement la réduction des émissions obtenues.

4.1.4 PL12 tonnes : une réduction par un facteur supérieur à 4 possible dès 2030

Comme pour les bus, les émissions provenant de la circulation et de l'amont du cycle pétrolier d'un PL 12 tonnes sont nettement plus importantes que celles associées à la fabrication, si bien que l'utilisation de carburants alternatifs va conduire à une réduction très importante de ces émissions. Les PL électriques sont supposés emporter 130 ou 240 kWh de batteries qu'ils changent au bout de six ans.

Les résultats pour un PL 12 tonnes (dont la durée de vie est de 12 ans à raison de 31 000 km/an) sont les suivants :

- en 2030, le PL 12 tonnes électrique représente une diminution par un facteur d'environ 4,2 par rapport à son équivalent thermique 2019 ;
- en 2030, le poids lourd 12 tonnes bioGNV représente une diminution par un facteur d'environ 5,5 par rapport à son équivalent thermique 2019 et devance les autres motorisations.

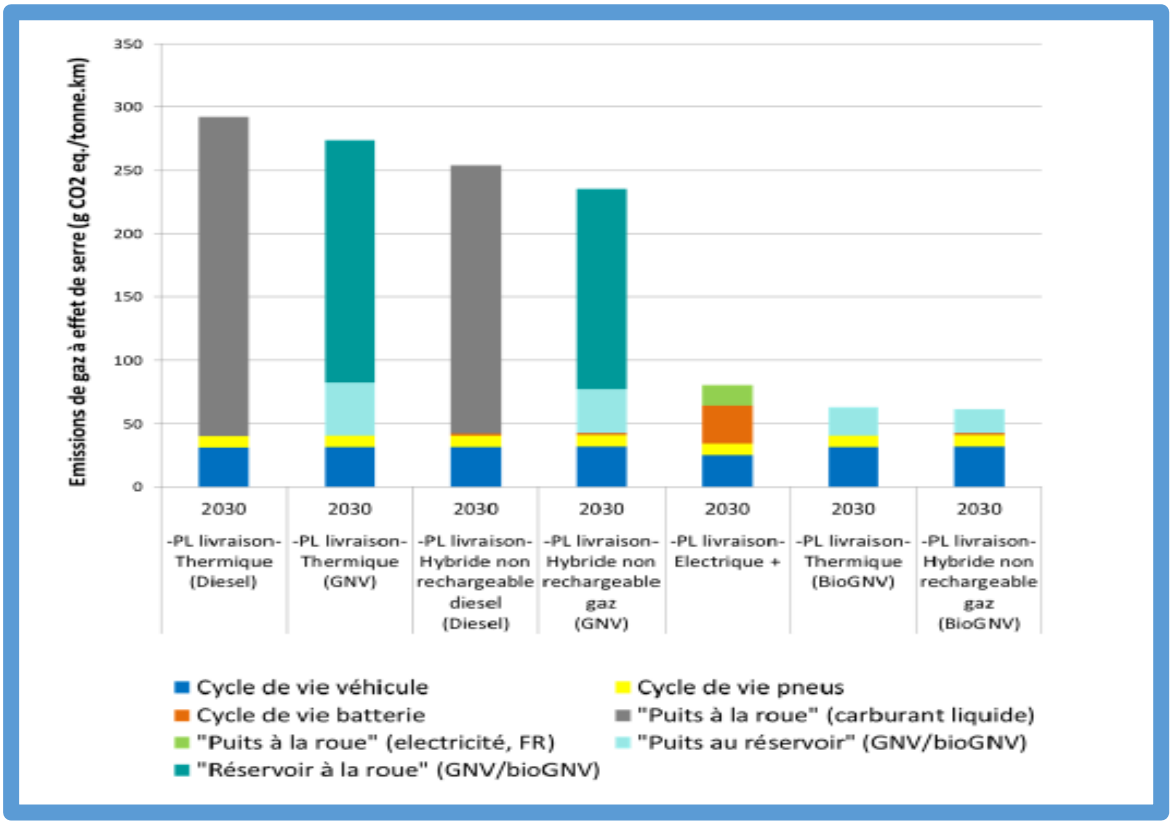


Figure 25 : Émissions de CO_2 d'un PL 12 tonnes en ACV. Source : IFPEN

4.1.5 Les PL de 40 tonnes : une division par huit possible

Les seuls poids lourds existant actuellement consomment du diesel, du biodiesel, de l'ED95[209] ou du gaz naturel, biogaz ou gaz fossile. Les camions électriques, hydrogène, voire hybrides ou à caténaires sont en cours de développement. Néanmoins, dans un exercice de prospective, il est raisonnable de penser qu'il puisse exister de tels camions à l'horizon 2040.

Dans ces conditions, les analyses menées dans ce paragraphe ont cherché à imaginer ce que pourrait être un poids lourd dont le poids total serait de 40 tonnes pour pouvoir mener des calculs d'ACV[210]. Ceux-ci ne prétendent donc pas être exacts compte tenu du grand nombre d'approximations nécessaires. Ils donnent néanmoins des ordres de grandeur suffisamment clairs et robustes pour permettre la réflexion et encourager la réalisation d'ACV parfaitement rigoureuses.

Le premier paragraphe ci-dessous évoque d'abord la faisabilité d'un PL électrique

[209] L'ED95 est un carburant composé à plus de 90% d'éthanol et utilisable par les poids lourds, les cars et les bus.

[210] Ce chiffre est donc inférieur à celui du poids total roulant autorisé (PTRA) maxi d'un camion qui est de 44 tonnes en France depuis 2013. Le poids total roulant autorisé, fixé par la DREAL à partir des informations fournies par le constructeur, est la limite de poids que ne doit pas dépasser un véhicule tracteur avec son attelage et leur chargement respectif. Le poids total autorisé en charge (PTAC), défini par le constructeur ou l'importateur du véhicule, est le poids que ne doit pas dépasser un véhicule pour pouvoir rouler. Il inclut le chargement ainsi que le conducteur et les passagers du véhicule. https://www.paruvendu.fr/auto-moto/l/ptac-ptra-quelles-sont-les-regles-pour-un-ensemble-attele-i37826

40 tonnes, le deuxième décrit succinctement les caractéristiques de poids lourds ainsi envisagés ; les troisième et quatrième présentent le résultat de ces ACV simplifiées à 2019 et 2040 tandis que le dernier paragraphe cherche à tirer quelques enseignements de ces calculs.

4.1.5.1 Un poids lourd électrique de 40 tonnes est-il envisageable ?

L'étude du CGDD de janvier 2017[211] considère des poids lourds électriques de 40 tonnes avec des batteries de 400 kWh. Elle montre que des PL hybrides (thermiques + caténaires sur autoroutes) seraient envisageables à l'horizon 2030 : le rapport i) écarte l'utilisation de PL faisant la navette sur des autoroutes munies de caténaires, ii) souligne que le tout électrique semble difficilement rivaliser avec le diesel dans les prochaines années, sa pertinence économique restant conditionnée à une évolution favorable de la technologie de la batterie à la fois en termes de coûts et de poids ; iii) et envisage enfin la solution autoroute électrique qui semble être en mesure de rivaliser avec le PL thermique, en indiquant que cette possibilité dépendra très fortement du trafic qui pourra basculer en mode électrique.

Les évolutions intervenues depuis cette étude tant en termes de prix des batteries que de densité énergétique massique en modifient cependant assez sensiblement les résultats : celle-ci avait envisagé des batteries à 400€/kWh en 2020 avec une densité énergétique (massique) de 110Wh/kg (soit des batteries de 5,5 tonnes pour 600 kWh). Fin 2018, le prix des batteries était déjà de 175 dollars[212] le kWh (cellule et son pack) et les densités massiques atteignaient (dans le cas du modèle 3 de la Tesla) 280 Wh/kg pour la cellule et 168 Wh/kg pour le pack, conduisant pour 600 kWh de batteries à un poids de d'environ 3,6 tonnes (poids qui se réduirait à 2,5 tonnes si on utilise le dimensionnement du Tesla roadster). Dans ces conditions, à la tonne.km, le coût pour le transporteur d'un camion électrique 40 tonnes est dès aujourd'hui proche (sinon légèrement inférieur) d'un camion diesel (alors que le même calcul effectué en 2017 montrait un très net désavantage du poids lourd électrique) et devrait être nettement plus faible dans la prochaine décennie comme le montre la figure ci-dessous. Celle-ci reprend pour les quatre première colonnes le coût complet à la tonne.kilomètre du rapport du CGDD de 2017 pour des poids lourds diesel et électriques (à 2020 et 2030) et donne pour les deux colonnes de droite les mêmes calculs pour les poids lourds électriques à 2020 et 2030 avec les coûts et poids à fin 2018 des batteries utilisées pour les véhicules particuliers (160 €/kWh au lieu de 400 et une tonne de charge utile en moins au lieu de 3,45t : le chiffre « pénalisant » de consommation de 1,53 kWh/km est gardé alors que Tesla annonce une valeur plus proche de 1,15 kWh/km). Le principal résultat de ce calcul conduit à penser que, dès 2021, le camion électrique en coût complet ramené à la tonne kilomètre peut être moins onéreux que son équivalent diesel si le prix des batteries était le même pour les poids lourds que pour les véhicules particuliers. Et qu'il pourrait l'être encore plus en 2030 avec la poursuite de la baisse du coût des

[211] *Concept d'autoroute électrique : Évaluation socioéconomique*, CGDD, janvier 2017, https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Th%C3%A9ma%20-%20Concept%20autoroute%20%C3%A9lectrique.pdf

[212] 156 $/kWh en 2019 selon BNEF. *Battery pack prices fall as market ramps up with market average at $156/kWh in 2019*: https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-as-market-ramps-up-with-market-average-at-156-kwh-in-2019/

batteries[213], l'amélioration de l'aérodynamisme et le renforcement des contraintes sur les émissions des poids lourds diesel). Cette hypothèse, fausse aujourd'hui, d'égalité entre le coût des batteries pour les poids lourds et les automobiles devrait néanmoins se confirmer à court moyen terme avec la multiplication des usines de fabrication de batteries en Europe.
De fait, la baisse du prix des batteries se poursuit : selon BNEF, le prix moyen en 2019 de la batterie (entière) était de 137 $/kWh, et pouvait même se situer en-dessous de 100 $/kWh pour certains bus chinois.

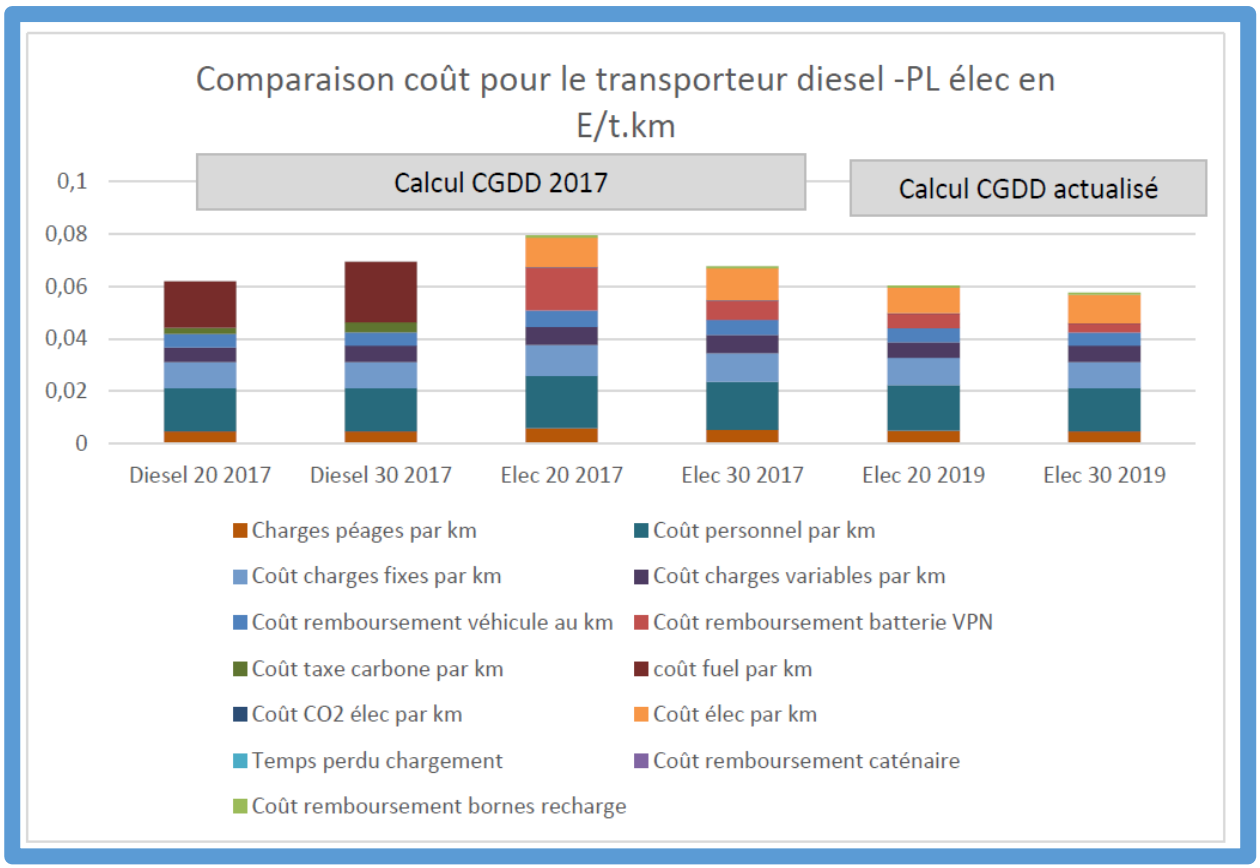


Figure 26 : Coût complets de PL électriques et diesel (en supposant, dans les deux colonnes de droite, que le coût des batteries des PL sont les mêmes que ceux des véhicules particuliers)

Ce même résultat est mis en avant :

- par l'Agence internationale de l'énergie dans son *Global EV Outlook 2018*[214] : celui-ci précise que, pour une durée de possession de dix ans, les poids lourds électriques

[213] Dans ce calcul, le PL garde la même batterie pour les dix années de vie envisagées, le nombre de cycles réalisé étant inférieur au nombre de cycles correspondant à la durée de vie moyenne d'une batterie. Ce point mérite attention : en charge/décharge complète, une cellule Panasonic 18650 B aura une durée de vie d'environ 500 cycles. Par contre, si on reste dans la plage 8 à 92 %, on pourrait atteindre un nombre de cycles bien plus important : un chiffre de 15 000 est cité) http://blog.evandmore.com/lets-talk-about-the-panasonic-ncr18650b/ La référence suivante donne cependant des chiffres beaucoup plus faibles : https://batteryuniversity.com/learn/article/how_to_prolong_lithium_based_batteries

[214] https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2018

de plus de 15 tonnes bénéficiant d'une autonomie pouvant aller jusqu'à 500 km pourraient devenir compétitifs en Europe par rapport au diesel dès lors que le coût des batteries serait inférieure à 120 US$/kWh ;

- par l'European transitions Commission qui dans son rapport de 2018 sur la neutralité carbone à 2050 indique que « *ETC estimates, supported by other studies, suggest that the total cost of operation of electric drivetrain vehicles will fall below those of ICE vehicles during the course of the 2020s, even if there were no carbon price applied to road transport fuels, thanks to cost reductions in the price of batteries and availability of low-cost electricity. The cost advantage would arise first for city buses and lighter, shorter-distance trucks, extending eventually to very long-distance trucks by the end of the decade. This would leave no need for the long-term use of biofuels while CNG is unlikely to play a major transitional role, given the pace at which electric vehicles could become cost-competitive and the need to develop dedicated infrastructure that could rapidly be stranded* ».

L'innovation supplémentaire vient de Tesla qui repense le *design* du poids lourd électrique en : a) envisageant quatre batteries de 250 kWh, rechargeables en environ une demi-heure (à 80 % de leur capacité) à des puissances de 400 kW (qui devraient se décomposer en 800 V* 500A) , b) intégrant les moteurs électriques dans les axes des roues ce qui permet, en enlevant le moteur thermique, l'échappement mais aussi la transmission au sens habituel du terme, de regagner une grande partie du surpoids de la batterie, et c) en améliorant notablement l'aérodynamisme du véhicule afin d'économiser à la fois l'énergie consommée mais aussi le poids nécessaire de la batterie. Cette innovation va avoir un double effet : elle va non seulement permettre d'envisager le développement du poids lourd électrique sur de la longue distance, mais elle va également conduire à une rentabilité accrue du poids lourd électrique sur les segments à plus court rayon d'action ce qui pourrait en accélérer le déploiement. Tesla envisage ainsi des poids lourds de 80 000 pounds (36 t) d'une autonomie de 500 miles (800 km). [NB : en première approximation, la perte de volume utile est négligée dans ce texte. Pour un PL de 40 t et de 90 m^3, 700 kWh de batteries avec une densité énergétique volumique des cellules de 670 Wh/l[215], représenteraient un volume des cellules d'un peu plus de un m^3, voire de deux m^3 (en considérant la batterie dans son ensemble). Le volume utile perdu (auquel il faudrait soustraire le volume du moteur diesel) serait donc de 1 à 2 %].

Reprenant les données fournies par Tesla, l'association *Transport and Environment* montre ainsi que le camion électrique, même muni d'une autonomie de 800 km, peut être rentable par rapport à son homologue thermique (à noter cependant que T&E retient la mesure allemande consistant à faire payer un péage deux fois moins important aux PL électriques qu'aux PL thermiques, case en bleu clair dans le graphique ci-dessous et ne raisonne qu'en €/km et non en €/t.km. Néanmoins, dans ce calcul, il n'y a plus de différences entre €/km et €/t.km dans la mesure où les gains en poids apportés par le Pl électrique de Tesla lui font considérer que la charge utile est sensiblement la même entre un PL électrique et un PL thermique).

[215] Cf rapport Roland Berger, *Aircraft Electrical Propulsion*, page 6

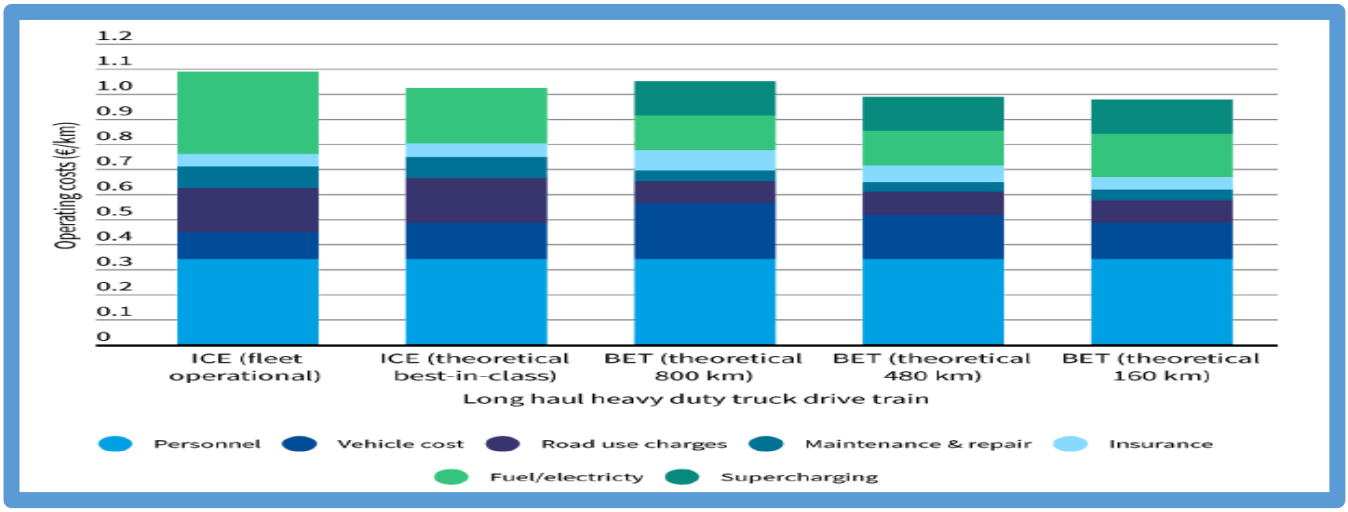


Figure 27 : Coût total de possession sur cinq ans d'un poids lourd diesel ou électrique. Source TE[216]

Dans ces conditions, il existe une forte présomption selon laquelle un poids lourd électrique muni d'une autonomie de 400 à 500 km pourrait devenir rentable par rapport à son concurrent thermique d'ici 2030.

L'objection selon laquelle la fabrication des batteries de tels poids lourds émettrait des quantités de gaz à effet de serre importantes est réelle. Mais, comme le souligne le rapport du CGDD déjà cité, ces émissions sont très nettement inférieures à celles de l'amont du cycle pétrolier pour un PL thermique. En ordre de grandeur, un camion diesel de 40 tonnes va émettre 1 000 tonnes de CO_2 en circulation sur ses dix années d'existence et plus de 240 tonnes pour l'amont du cycle pétrolier. En comparaison, un poids lourd électrique muni d'une batterie de 600 kWh émettra environ 80 t de CO_2 en circulation (pour un contenu carbone de l'électricité utilisée pour la recharge de 45 g CO_2/kWh) et 50 tonnes pour la fabrication de sa batterie. Remplacer un diesel par des camions électriques permettrait donc de gagner, dès aujourd'hui, un facteur que l'on pourrait estimer à plus de quatre (cf. paragraphes ci-dessous) dans les émissions à l'échelle de la planète (en ne considérant que les émissions à la circulation et dans l'amont du cycle pétrolier ou dans la fabrication de la batterie). Un poids lourd hydrogène consommant trois plus d'électricité à l'avancement qu'un poids lourd électrique émettrait également plus de CO_2 qu'un poids lourd électrique, même si l'on prend en compte les émissions à la fabrication de la batterie.

L'interrogation porte ensuite sur le transport longue distance ou sur l'international pour lequel un poids lourd électrique muni de batteries encore plus importantes serait pénalisé par son coût. Dans une étude particulièrement bien documentée[217] portant à la fois sur le coût pour le transporteur et sur les conséquences macroéconomiques du développement de la mobilité électrique, *Cambridge econometrics* (en lien avec *the European climate*

[216] *Analysis of long haul battery electric trucks in EU Marketplace and technology, economic, environmental, and policy perspectives.* Thomas Earl , Lucien Mathieu, Stef Cornelis, Samuel Kenny, Carlos Calvo Ambel, James Nix, European Federation for Transport and Environment (T&E), https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/20180725_T%26E_Battery_Electric_Trucks_EU_FINAL.pdf

[217] *Trucking into a Greener Future : the economic impact of decarbonizing goods vehicles in Europe,* Cambridge Econometrics, 2018

foundation) envisage cinq solutions différentes à 2030 et 2050 : a) un diesel à l'efficacité améliorée, b) un camion électrique à batteries (700 kWh dont 80 % utilisables) avec une autonomie de 580 km , c) un camion hybride diesel- caténaire, d) un camion hydrogène, e) un camion hybride électrique à batteries avec caténaire.

Son étude porte sur le coût total (en capital et en exploitation) d'un premier propriétaire d'un poids lourd qui le garde sur une durée de cinq ans et le revend ensuite (avec un coût de dépréciation). Ses principaux résultats montrent que le coût global d'un poids lourd électrique, à batteries, hybride diesel avec caténaire ou hybride batteries caténaire, est moins élevé que celui d'un poids lourd thermique. Le poids lourd hydrogène est quant à lui pénalisé par les prix du carburant : la quantité d'électricité nécessaire à la production de l'hydrogène est en effet environ trois fois plus importante pour le même parcours que celle consommée directement par un poids lourd électrique à batteries. *Cambridge Econometrics* souligne cependant que le développement des poids lourds électriques peut être handicapé par : a) les clauses contractuelles qui reportent les dépenses de carburants sur les chargeurs ce qui n'incite pas le transporteur à réduire ces coûts (mais qui rend compétitif le véhicule électrique auprès des chargeurs), b) l'existence au sein des transporteurs d'une multitude de PME qui n'auront pas forcément les moyens d'acheter un PL nettement plus coûteux à l'achat.

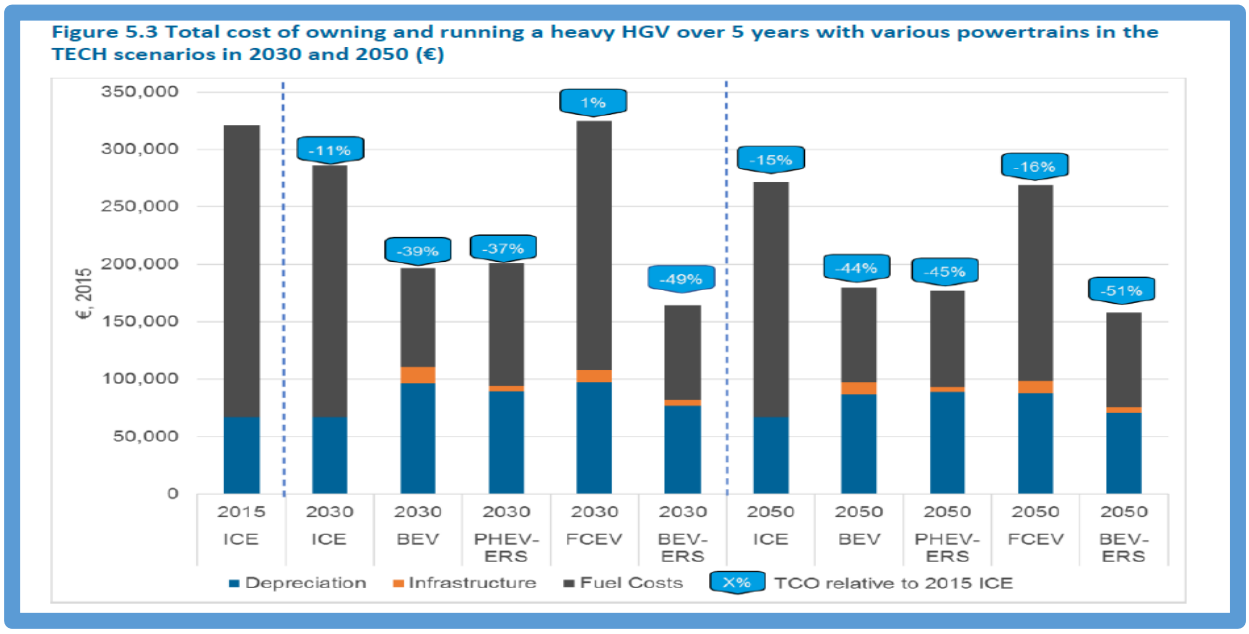


Figure 28 : coût total de possession d'un poids lourd sur cinq ans[218]

4.1.5.2 Les caractéristiques des poids lourds retenus

L'annexe 5 présente le détail de ces caractéristiques. Le présent paragraphe ne cherche à en présenter que les principales.

Le poids lourd considéré est un tracteur de 40 tonnes parcourant 750 000 km en sept ans, soit environ 107 000 km par an.

[218] Source : Ibidem

a) Le poids lourd électrique

Cinq rubriques vont permettre de caractériser le poids lourd ainsi considéré :

- **la capacité de la batterie.** Pour la longue distance, deux stratégies opposées existent dès lors que l'on veut employer un poids lourd électrique : la première, bien illustrée par les annonces de Tesla, conduit à munir le poids lourd de batteries de très grandes tailles (1000 kWh), la seconde consiste à limiter cette taille à la durée maximale de conduite d'un chauffeur prévue par la réglementation de 4h30[219], ce qui amène à une autonomie de 405 km (pour une vitesse maximale sur autoroute de 90 km/h) et à une capacité de batteries à 2019 de 600 kWh (pour une consommation électrique de 1,44 kWh/km et une réserve de 10 % de la batterie à ne pas utiliser pour préserver sa durée de vie) et à 2040 de 506 kWh (pour une consommation électrique de 1,15 kWh/km, ce qui suppose l'amélioration de l'aérodynamisme). Il est nécessaire, en contrepartie, de déployer, un réseau de bornes de recharge rapide (permettant de recharger 80 % de la batterie en 24 mn, (recharge dite à 2C), donc de 3x400 kW pour 3 batteries de 200kWh ou de 4x150 kW pour 4 batteries de 150 kWh) suffisamment dense. En février 2021, Tesla a cependant annoncé[220] que s'il continuait d'envisager un PL d'une autonomie de 600 miles (soit 960 km), il envisageait désormais la fabrication d'un poids lourd avec une batterie de 500 kWh et une autonomie de 480 km. La consommation énergétique au kilomètre qui en résulte paraissant un peu trop optimiste, la suite du texte retiendra une capacité de batterie de 600 kWh ;
- **la puissance de la recharge :** là encore deux solutions existent. La première consiste à utiliser quatre packs de batteries de 150 kWh et quatre chargeurs (qui existent aujourd'hui) de 300 ou 350 kW, ce qui permet de recharger 80 % de la batterie en 24 minutes. La seconde solution, développée par CharIN, réside dans la mise au point d'un chargeur unique d'une puissance comprise entre 1 et 1,5 MW, ce qui conduit à des courants de recharge supérieurs à 1 000 ampères et probablement à un rendement plus faible de la recharge. Tesla travaille ainsi sur un projet de méga-chargeur (1 à 2 MW) au sein d'un consortium mené par CharIN group (qui développe le standard européen et américain de recharge dit Combo). Ce sujet a donné lieu à un groupe de travail piloté par Daimler Trucks ;
- **le volume utile.** En première approximation, la perte de volume utile est négligée dans ce texte. Pour un PL de 40 t et de 90 m^3, 600 kWh de batteries avec une densité énergétique volumique des cellules de 670 Wh/L[221], représenteraient un volume des cellules d'un peu plus de un m^3, voire de deux m^3 (en considérant la batterie dans son ensemble). Le volume utile

[219] Le règlement social européen 561/2006 (appliqué à compter du 11 avril 2007) prévoit qu'une durée de conduite ininterrompue de 4 h 30 doit être suivie d'une pause de 45 minutes (qui peut être décomposée en deux pauses successives de 30 et 15 minutes). Dans la plupart des cas, lorsqu'il n'y a qu'un seul chauffeur, ce règlement peut permettre de définir le dimensionnement de la batterie et des bornes de recharge : en prenant une vitesse maximale sur autoroute de 90 km/h, un poids lourd peut couvrir une distance maximale de 400 km.

[220] Voir notamment https://electrek.co/2021/02/12/elon-musk-reveals-tesla-semi-battery-pack-electric-truck/

[221] Cf rapport Roland Berger, *Aircraft Electrical Propulsion*, page 6

perdu (auquel il faudrait soustraire le volume du moteur diesel) serait donc de 1 à 2 % ;

- **la masse utile.** En termes de poids dans ce calcul, malgré la masse de la batterie, les gains apportés par le PL électrique de Tesla lui font considérer que la charge utile est sensiblement la même entre un PL électrique et un PL thermique. En effet, une batterie Tesla de 600 kWh pèse environ 3,6 tonnes quand on prend en compte les caractéristiques de la batterie de la Tesla modèle 3[222] (et 2,5 tonnes pour un Tesla roadster). Or, les masses d'un moteur diesel 12/13l équipé (soit 1000/1200kg), de la transmission (900 kg), du différentiel et du cardan (200 kg) ainsi que du réservoir de gasoil de 1 à 1,5 m^3 (soit environ 830 à 1250 kg) et *d'ad blue* sont également voisines de trois tonnes. De plus, la réglementation permet à un poids lourd utilisant des énergies alternatives d'emporter une charge supplémentaire d'une tonne ;

- **le nombre de batteries nécessaire à la durée de vie du poids lourd.** Les batteries atteignent désormais régulièrement des durées de vie de 2 500 cycles (soit environ 7 à 8 ans) et des durées de 3 000 cycles devraient constituer le référentiel des années à venir. Si la longueur parcourue par le PL durant sa durée de vie est de 750 000 km, ceci représente « 1875 cycles[223] » de 400 km, et plus probablement. Une seule batterie devrait donc pouvoir accompagner le PL sur toute sa durée de vie. Néanmoins, un certain nombre de recharges auront lieu en 2C, ce qui peut conduire à un vieillissement plus rapide. Une hypothèse plus pessimiste conduirait donc à retenir deux batteries pour la durée de vie du PL.

b) Le poids lourd hydrogène

En s'inspirant des poids lourds hydrogène de Hyundai, les caractéristiques d'un poids lourd 40 tonnes pourraient être les suivantes :

- puissance de la PAC : 190 kW ;
- capacité de la batterie : 73 kWh ;
- masse de l'hydrogène embarquée : 32,1 kg H_2 correspondant à six réservoirs d'un peu plus de 100 kg chacun.

Le gaz est stocké sous forme gazeuse à 700 bars : avec une consommation d'environ 7 kg H_2/100 km, l'autonomie serait voisine de 450 km. Selon les premières estimations de Hyundai, le poids-lourd ainsi équipé (en configuration porteur 19 tonnes) serait capable de

[222] Les densités massiques atteignaient (dans le cas du modèle 3 de la Tesla) 280 Wh/kg pour la cellule et 168 Wh/kg pour le pack, conduisant à un poids de 600 kWh de batteries d'environ 3,6 tonnes (poids qui se réduirait à 2,5 tonnes si on utilise le dimensionnement du Tesla roadster).

[223] Cette valeur n'est qu'une approximation : dans la comptabilité habituelle des cycles d'une batterie, on serait vraisemblablement plus proches de 1 500 cycles. De fait, le nombre de cycles d'une batterie est défini comme l'énergie totale fournie par la batterie au cours de sa vie, divisée par sa capacité initiale totale (i.e. 100 %, pas 90 %). De plus, cette valeur inclut l'énergie récupérée lors des phases de freinage, donc est supérieure de 15 à 30 % à l'énergie reçue lors de la recharge au dépôt. Cette valeur considère souvent que la batterie peut aller jusqu'à un *State of Health* (= énergie maxi batterie / énergie maxi batterie neuve) de 70 %. Or, comme le risque de mort subite augmente sous 80 % de SOH, les constructeurs peuvent limiter la vie batterie à un SOH de 80 % ou 75 %, ce qui fait moins de cycles.

parcourir jusqu'à 400 km avec un plein.[224]

Daimler Trucks, la division camion de Mercedes Benz, envisage, pour sa part, un camion embarquant 2 x 40 kg d'hydrogène liquide pour une autonomie supérieure à 1000 km[225]. Il embarquerait également deux moteurs électriques de 230 kW, une pile à combustible de 2x150 kilowatts de puissance ainsi qu'une batterie de 70 kWh. Le choix de l'hydrogène liquide permet de gagner du volume utile pour le chargement puisque l'hydrogène à 700 bars occupe un espace supérieur d'environ 1,8 à celui de l'hydrogène liquide, au prix toutefois d'une consommation d'énergie plus importante à l'amont (pour liquéfier l'hydrogène).

c) Les rendements des différentes motorisations

Avec les hypothèses rappelées en annexe, on obtient pour 2019 :

	PL élec 19	Pl diesel 19	PL GNV 19	Pl GNV bio 19	Hydrogène 700 bars	Hydrogène liquide
Énergie avancement 2019 kWh/km	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22	1,22
Rendement	0,85	0,37	0,323	0,323	0,56	0,56
Énergie nécessaire à fournir au moteur kWh/km	1,44	3,30	3,79	3,79	2,28	2,28
Énergie nécessaire à fournir par le réservoir	144 kWh/100km	33 l/100km	28,7 kg/100km	28,7 kg/100km	6,92 kgH_2/100km	6,92 kgH_2/100km
Émissions à la circulation gCO_2e/km		868 g CO_2e/km	771 g CO_2e/km			
Émissions à l'amont	80 g CO_2e/km	145 g CO_2e/km	171 g CO_2e/km	107 g CO_2e/km	230 g CO_2e/km	301 g CO_2e/km

Tableau 11 : Émissions en circulation et à l'amont de différents PL en 2019. Source : CGEDD

[224] https://www.autonews.fr/pro/actualite/hyundai-xcient-fuel-cell-les-premiers-camions-a-hydrogene-vont-prendre-la-route-91386

[225] https://www.futura-sciences.com/tech/actualites/camion-electrique-mercedes-benz-devoile-son-camion-electrique-longue-distance-concept-camion-hydrogene-liquide-83038/

Et pour 2040 :

	PL élec 40	Pl GNV bio 40	Hydrogène 700 bars 40	Hydrogène liquide 40
Énergie avancement 2019 kWh/km	0,97	0,97	0,97	0,97
Rendement	0,85	0,43	0,61	0,61
Énergie nécessaire à fournir au moteur kWh/km	1,15	2,28	1,68	1,68
Énergie nécessaire à fournir par le réservoir	115 kWh/100km	17,3 kg/100km	5,1 kgH_2/100km	5,1 kgH_2/100km
Émissions en circulation	0	0	0	0
Émissions à l'amont	80 g CO_2e/km	64,5 g CO_2e/km	91 g CO_2e/km	119 g CO_2e/km

Tableau 12 : Émissions en circulation et à l'amont de différents PL en 2040. Source : CGEDD

À noter que ce calcul désavantage probablement les poids lourds électriques et à hydrogène qui récupèrent de l'énergie au freinage et dans les descentes (plutôt que de la perdre dans le freinage) : la récupération d'énergie de freinage peut être estimée aux environs de 10 à 20 % (suivant les parcours) pour un poids lourd de 40 tonnes. Le rendement apparent de la chaîne de traction électrique serait donc plus proche de 1 pour le PL électrique, et de 0,85 pour un Pl hydrogène.

4.1.5.3 Une division par quatre possible dès aujourd'hui

Une division par un facteur supérieur à quatre à cinq des émissions de GES en ACV simplifiée serait envisageable dès aujourd'hui pour un PL électrique, utilisant des biocarburants avancés ou du biogaz par rapport à un PL thermique actuel et par un facteur voisin de 2,5 à 3 pour un PL hydrogène (que le gaz soit compressé à 700 bars ou sous forme liquide).

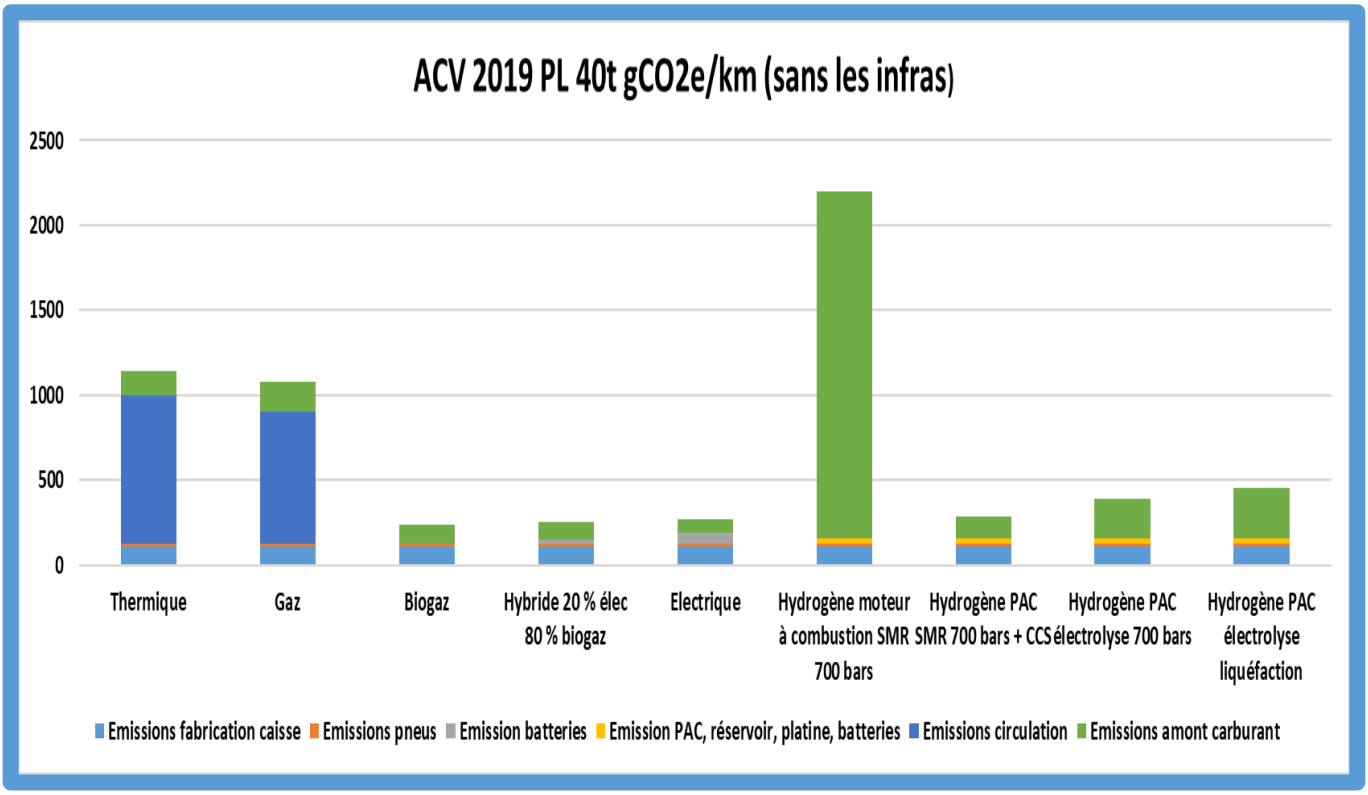


Figure 29 : Émissions de gaz à effet de serre d'un PL 40t (y compris hydrogène) en 2019. Source : CGEDD

4.1.5.4 Une réduction possible des émissions par un facteur 8 possible à 2040 et 10 à 2060

Une division par huit des émissions de GES en ACV simplifiée serait envisageable à l'horizon 2040 pour un PL électrique (avec report de 30 % des émissions de fabrication de la batterie sur sa deuxième vie et sur son recyclage) et pour un PL utilisant des biocarburants avancés ou du biogaz par rapport à un PL thermique actuel. Le facteur serait de 5 à 6 pour un PL hydrogène.

Ce résultat suppose :

- un allongement de la durée de vie du camion et de sa batterie à dix ans (avec une distance annuelle toujours prise égale à 107 000 km) ;
- un report de 30 % des émissions de fabrication de la batterie sur son recyclage ;
- une amélioration de la résistance à l'avancement ;
- une amélioration du rendement des piles à combustible de 60 à 65 % (ce qui constitue une hypothèse envisageable lorsque la pile est neuve, mais particulièrement optimiste lorsqu'elle arrive en fin de vie).

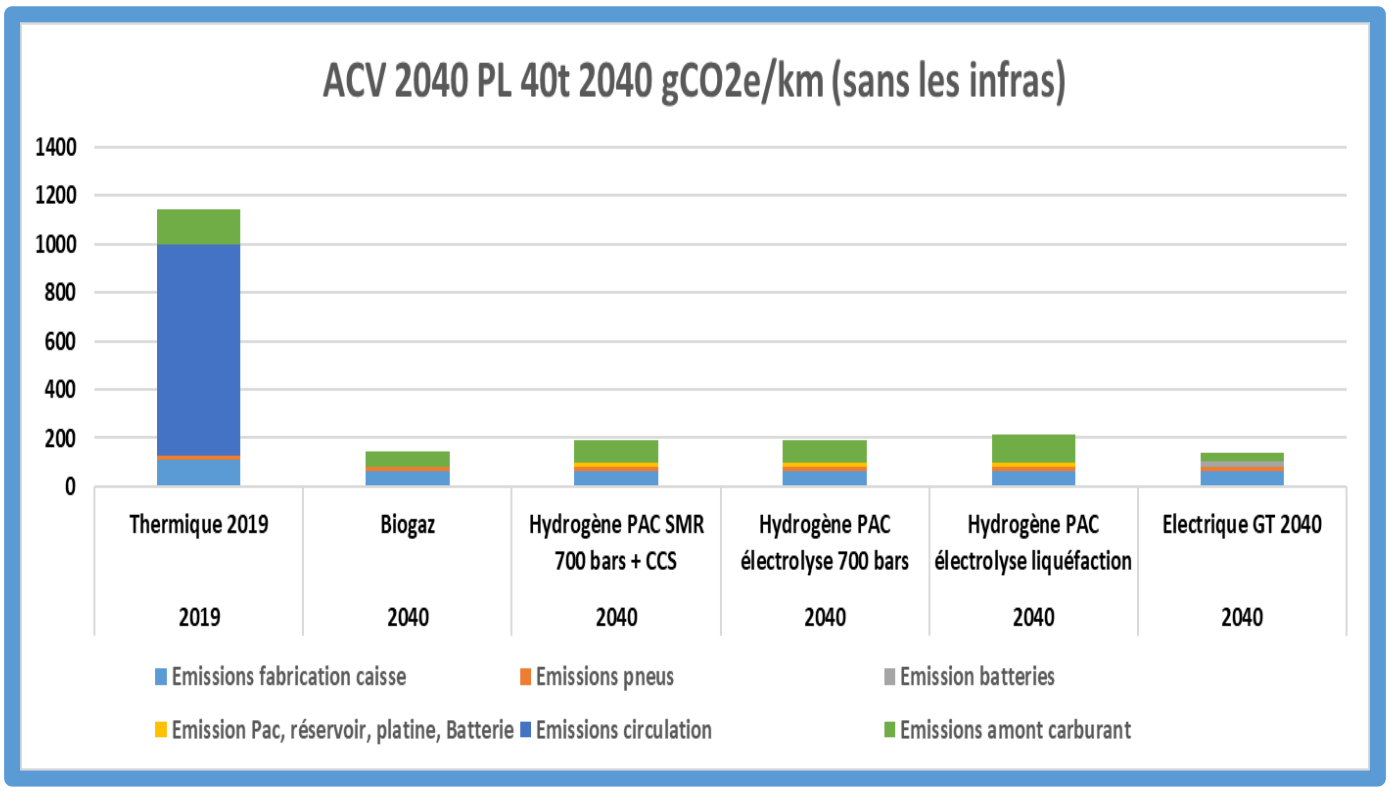


Figure 30 : Émissions de gaz à effet de serre d'un bus (y compris hydrogène) à 2040. Source : CGEDD

À 2060, deux améliorations supplémentaires semblent raisonnablement possibles :

- une décarbonation supplémentaire du réseau électrique avec un contenu carbone du kWh qui ne serait plus que de 15 g CO_2/kWh ;
- une réduction d'un tiers des émissions de CO_2 à la fabrication du camion, passant ainsi de 5,5 t CO_2/t.

Dès lors, la réduction obtenue atteindrait un facteur supérieur à 10.

4.1.5.5 Plusieurs scénarios de réduction importante sont donc possibles

Dans ces conditions, un certain nombre de scénarios peuvent être envisagés à 2060 :

- un premier scénario tendanciel reposant sur les motorisations actuelles (même améliorées) conduirait à une augmentation importante des tonnes.kilomètres et des émissions de gaz à effet de serre (de l'ordre de 80 % d'ici 2050) du transport routier de marchandises ;
- un second scénario pourrait envisager la généralisation de poids lourds électriques non seulement sur la courte/moyenne distance mais aussi sur la longue distance avec des poids lourds munis de 600 kWh (3x200 kWh ou 4x150 kWh)) de batteries (ce qui leur donnerait une autonomie voisine de 400 km) en parallèle du déploiement de bornes de recharge de 400 kW (3X400 kW ou 4x300 kW permettant de recharger 80 % de l'autonomie en

environ 24 minutes[226]). Ce scénario conduirait à une division probablement supérieure à cinq des émissions de gaz à effet de serre (fabrication de la batterie comprise). Là encore, le travail effectué par *Cambridge econometrics* permet de retrouver cet ordre de grandeur (pour les seules émissions à l'échappement). Par rapport au scénario actuel, des scénarios de PL électriques (à batteries, à hydrogène ou avec caténaire) entraîneraient une division des émissions par un facteur voisin de 7 d'ici 2050.

Plusieurs alternatives sont néanmoins envisageables :

- un troisième scénario reposerait sur l'utilisation de poids lourds au gaz naturel, à terme sur du gaz naturel d'origine renouvelable. Ce scénario se heurte néanmoins à une quadruple difficulté : i) tant que le gaz utilisé est du gaz d'origine fossile, il conduit à des émissions de gaz à effet de serre moindres que celles d'un PL thermique, mais encore très importantes, au mieux 80 % de celles d'un PL thermique (en ne tenant pas compte des émissions de méthane tout au long de la chaîne) ; ii) l'utilisation de gaz d'origine renouvelable ne représenterait plus que 20 % de ces émissions mais conduirait à un coût (externalités non comprises) nettement plus important puisque son coût de production à partir de la biomasse dans des méthaniseurs (aux environs de 95 €/MWh) est trois à six fois plus élevé que le coût d'importation du gaz naturel fossile[227] (suivant l'évolution des cours); iii) les constructeurs de poids lourds au gaz doivent, s'ils veulent pouvoir pérenniser leur fabrication, montrer que les émissions de NOx, de particules et de GES des poids lourds au gaz amènent un réel plus par rapport à un équivalent diesel (contrairement aux mesures effectuées par TNO pour le gouvernement néerlandais) ; iv) enfin, dans un monde neutre en carbone, la production de gaz d'origine renouvelable devrait être affectée prioritairement à l'industrie, à la production d'électricité et au chauffage[228] en remplacement du gaz fossile ;
- un quatrième scénario reposerait sur des poids lourds hydrogène munis d'une PAC, avec des émissions de gaz à effet de serre légèrement supérieures à celles d'un scénario avec des PL à batteries. Le coût de l'hydrogène distribué, le déploiement des stations de recharge et l'autonomie des véhicules en seront des éléments déterminants[229] ;
- un cinquième scénario garderait les motorisations actuelles (ou améliorées)

[226] Le règlement social européen 561/2006 (appliqué à compter du 11 avril 2007) prévoit qu'une durée de conduite ininterrompue de 4 h 30 doit être suivie d'une pause de 45 minutes (qui peut être décomposée en deux pauses successives de 30 et 15 minutes). Dans la plupart des cas, lorsqu'il n'y a qu'un seul chauffeur, ce règlement peut permettre de définir le dimensionnement de la batterie et des bornes de recharge : en prenant une vitesse maximale sur autoroute de 90 km/h, un poids lourd peut couvrir une distance maximale de 400 km. Associée à une consommation d'énergie de 1,5 kWh/km, voire de 1,15 kWh/km, ceci représente une batterie de 500 à 600 kWh qui peut être décomposée en deux batterie de 250 kWh, 3 batteries de 200kWh ou 4 batteries de 150 kWh, rechargeables à 80 % en 24 minutes avec des bornes de recharge de 300, 400 ou 500 kWh.

[227] Le coût du biogaz obtenu par pyrogazéification devrait être plus élevé.

[228] Il sera cependant bien plus intéressant sur le plan énergétique de brûler directement la biomasse que de brûler le biogaz qui en serait issue.

[229] Voir notamment : *L'hydrogène dans le secteur du transport routier de marchandises* (septembre 2021). Jean-Pierre Hauet, Servan Lacire et Dominique Auverlot. Etude à paraître

mais utiliserait des biocarburants et des biocarburants avancés, il conduirait à une division probablement supérieure de cinq à dix des émissions de gaz à effet de serre ; cette solution permettrait de décarboner le parc de véhicules existants sans se heurter au frein à l'achat des exploitants de flottes de PL : inconvénient, il est contraire à l'idée d'utiliser les biocarburants en priorité dans le secteur aérien qui n'a pas d'autre solution possible ;

- des scénarios mixtes associant des poids lourds électriques sur des courtes distances et des poids lourds hybrides (éventuellement à caténaires) pour la longue distance, qui risquent cependant d'être soit plus coûteux soit plus émetteurs de GES.

Une transition possible vers une mobilité électrique pour le transport de marchandises reste à venir et pose la question des stratégies industrielles (des entreprises, des territoires ou des pays). Peu de poids lourds électriques sont réellement en circulation aujourd'hui et il faudra attendre quelques années avant que le poids lourd électrique ne devienne une véritable option à l'achat. Cette transition s'appuiera d'abord vraisemblablement sur des marchés de niche, en particulier la livraison des marchandises en ville avec le passage à l'électrification des PL légers (et des VUL), et sur le transport régional avant de concerner la longue distance. Elle peut de plus se heurter à de nombreux obstacles :

- le refus d'une certaine partie de l'opinion de voir se développer des batteries de grande capacité et la mobilité électrique des poids lourds en ignorant les gains d'émissions de GES et en considérant qu'elles vont accroître les pollutions locales sur les sites d'extraction des matériaux liés à la fabrication des batteries : l'exploitation de certains gisements peut en effet s'effectuer, sur certaines exploitations, dans des conditions incompatibles avec l'environnement et les règles normales de la RSE ;

- la difficulté des petites entreprises de transport à acheter des poids lourds électriques plus coûteux à l'achat, qui peut néanmoins être résolue par des formules de *leasing* ;

- le faible développement de l'offre de poids lourds électriques à l'achat, les constructeurs en place préférant continuer à vendre les modèles thermiques qu'ils ont développés ; une telle attitude irait cependant à l'encontre des objectifs de plus en plus sévères fixés par les textes européens, ainsi qu'à l'encontre des engagements volontaires pris par un certain nombre de constructeurs dans le cadre de l'initiative *Science Based Targets* ;

- le faible déploiement de bornes permettant la recharge rapide (80 %) d'un poids lourd en moins d'une demi-heure et, plus généralement, l'absence de coordination dans le temps entre le développement d'une motorisation particulière de poids lourds et le déploiement du réseau de stations de recharge correspondant ;

- la limitation possible d'un certain nombre de matériaux : si le développement du véhicule électrique ne devrait pas souffrir d'un épuisement des ressources en matériaux stratégiques à un horizon industriel de 10 à 20 ans, en revanche la mise en service de nouveaux gisements miniers demande du temps et peut conduire à des déséquilibres

momentanés entre l'offre et la demande[230], l'exploitation de certains gisements peut s'effectuer dans des conditions incompatibles avec l'environnement et les règles normales de la RSE. Enfin, une généralisation possible de la mobilité électrique mérite un réexamen des ressources disponibles à court et moyen termes. Dans tous les cas, la production d'une batterie respectueuse du développement durable et le recyclage des matériaux paraît être à encourager en essayant de tenir compte de l'évolution probablement forte de la chimie des batteries (cf. la réduction du cobalt) ;

- le manque de coordination européenne conduisant les pays européens à ne pas développer un réseau commun de bornes de recharge le long des autoroutes européennes (en particulier du RTE-T) : les initiatives de la Commission cherchent cependant à y remédier.

À l'inverse, elle peut être favorisée par le refus des agglomérations de laisser circuler des moteurs diesel en centre-ville et par le développement des ZFE, prévu par la LOM.

Dans tous les cas, la transition sera favorisée si la Commission européenne adopte (en les annonçant suffisamment à l'avance) des standards d'émission de plus en plus rigoureux au fur et à mesure du temps – le texte correspondant est annoncé pour 2022 -, si une date pour l'arrêt de la vente des PL thermiques est annoncée (cas de la France avec la LOM), si les camions à énergie alternatif bénéficient de conditions économiques avantageuses (tarifs de péage, amortissement, ...) et si un signal prix carbone est mis en œuvre (de préférence à l'échelle européenne).

Plusieurs annonces enfin vont dans le sens d'un développement des poids lourds électriques :

- Amazon a commandé, en septembre 2019, 100 000 fourgonnettes électriques à une nouvelle entreprise qui vient de se créer à Plymouth (Michigan), Rivian ;
- Volvo a annoncé le 10 novembre 2019 la mise en vente de poids lourds électriques de 16 tonnes (avec une batterie de 100 à 300 kWh pour une autonomie annoncée pouvant aller jusqu'à 300 km).

4.1.6 Conclusions sur le mode routier

Ainsi, pour les véhicules neufs, les facteurs de réduction suivants (avec un certain optimisme à 2060) pourraient être envisagés :

Facteur de réduction par rapport à un véhicule thermique 2019	VP segment C	VUL	Bus	PL 40 t
2040	4	4,6	7	8

[230] Certains envisagent ainsi une offre insuffisante de nickel d'une qualité suffisante pour les batteries.

2060	8	8	10	10

Tableau 13 : Facteurs de réduction possibles des émissions

La technologie ne peut pas à elle seule conduire à la neutralité carbone dans le domaine du transport. Néanmoins, les calculs effectués ci-dessus montrent qu'elle peut conduire à une réduction notable des émissions de gaz à effet de serre : c'est d'ailleurs le sens de la *Stratégie de mobilité durable et intelligente* publiée par la Commission en décembre dernier qui insiste sur l'idée que les carburants destinés aux transports doivent devenir neutres en carbone[231].

Ces réductions appellent cependant un certain nombre de constats et de remarques :

- l'électricité à batteries constitue une technologie de référence, mais elle ne pourra se développer que si l'opinion publique l'accepte et que si des bornes de recharges lentes et rapides sont déployées en suffisamment grand nombre. Ce développement est un choix gagnant pour le climat : si l'utilisateur est certain de trouver lorsque sa batterie est quasiment déchargée une borne de recharge rapide, il aura tendance à choisir pour celle-ci une de capacité raisonnable (60 ou 80 kWh pour un particulier, 500 ou 600 kWh pour un PL). À l'inverse, un réseau défaillant amènera à la course à une autonomie de plus en plus grande avec des batteries atteignant 100 kWh, voire plus pour les VP et de 1 000 kWh, sinon plus pour les PL, comme l'a envisagé Tesla dans les premières annonces relatives à son semi ;
- d'autres technologies sont possibles : le biogaz pour les PL et l'hydrogène à 700 bars pour les VP et les PL, ou à 350 bars pour les bus : les ressources sont néanmoins limitées pour le biogaz et l'hydrogène ne se développera que si les coûts sont suffisamment bas ;
- les biocarburants, de préférence avancés, constituent aux yeux de certains constructeurs une option de choix pour la décarbonation puisqu'ils sont utilisables sans changer les véhicules en service. De plus, ils ne nécessitent pas de déploiement d'infrastructures et sont aisément acceptables par les utilisateurs qui ne changent pas leurs modes d'usages des véhicules, mais ce choix se heurte à la priorité qu'il convient d'accorder à l'aérien dans l'utilisation des biocarburants avancés ;
- d'un point de vue industriel, la préservation de la chaîne de la valeur sur le territoire français conduit à envisager la construction d'usines de batteries et la contrainte de rareté des matériaux au développement du recyclage des batteries et des piles à combustible (notamment pour le platine).

[231] Paragraphes 10 et 11 de la communication de la Commission : « Le pacte vert pour l'Europe appelle à une réduction de 90 % des émissions de gaz à effet de serre [… ;). Cela nécessite d'activer tous les leviers d'action: 1) des mesures visant à réduire sensiblement la dépendance actuelle à l'égard des combustibles fossiles (en remplaçant les flottes existantes par des véhicules à émissions faibles ou à zéro émission et en encourageant l'utilisation de carburants renouvelables et à faible teneur en carbone); … ». https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:5e601657-3b06-11eb-b27b-01aa75ed71a1.0002.02/DOC_1&format=PDF

4.2 L'aérien : une réduction par un facteur égal ou supérieur à deux des émissions de l'aviation à 2050 pour les vols au départs de la France est un objectif réaliste

Si dans le domaine routier, les solutions technologiques permettant de ne plus rejeter d'émissions de gaz à effet de serre en circulation existent déjà ou donnent lieu au déploiement de prototypes (poids lourds électriques de Tesla ou poids lourds hydrogène de Hyundai), il n'existe pas aujourd'hui de solution de combustibles neutres en carbone pour l'aérien.

Dès lors, la réflexion va porter, au-delà de la motorisation, sur l'ensemble des mesures possibles de la décarbonation et cherchera à estimer les gains de manière globale.

Dans une première approche, et contrairement au reste de ce rapport, ce paragraphe ne retiendra pas les émissions à la fabrication et se concentrera simplement sur les émissions des appareils au sol ou en vol. Il aborde cependant la question des émissions de vapeur d'eau.

4.2.1 Les déterminants de la stratégie française de réduction des émissions de gaz à effet de serre du secteur aérien

Cette stratégie s'inscrit dans le cadre de l'accord de Paris et l'atteinte de la neutralité carbone à terme :

- même si la quasi-totalité des membres de l'OACI ont ratifié l'Accord de Paris[232] qui prévoit d'atteindre la neutralité carbone au cours de la deuxième moitié de ce siècle, et si l'ATAG a publié en septembre 2020 un rapport[233] conduisant à une réduction de 50 % des émissions de l'aérien à 2050 en envisageant la neutralité carbone vers 2060-2065, l'OACI et ses États membres n'ont pas encore adopté d'objectif de réduction des émissions de GES du secteur aérien à 2050 ;
- l'OACI et ses États membres ont, pour le moment, identifié un panier de mesures (progrès technologiques, optimisations opérationnelles, carburants aéronautiques durables et mesures de marché) permettant de limiter l'impact du secteur sur le climat. Un objectif de croissance neutre en carbone à partir de 2021 a été adopté et le CORSIA, (*Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*), mécanisme mondial de compensation carbone, a été défini par l'OACI en octobre 2016 comme moyen transitoire permettant d'atteindre cet objectif en plus des autres leviers[234]. Par ailleurs, depuis 2009, le secteur aéronautique, à travers l'IATA (*International Air Transport Association*), s'est engagé à ne plus augmenter ses

[232] L'Accord de Paris n'a pas été ratifié notamment par l'Érythrée, l'Irak, l'Iran, la Lybie, le Soudan du sud et la Turquie, le Yémen. Après avoir attendu le délai imposé à tous les pays pour pouvoir en sortir, délai de trois ans suivant la ratification officielle intervenue le 4 novembre 2016, les États-Unis ont enclenché la procédure de retrait de l'Accord de Paris le 4 novembre 2019. Celui-ci est devenu officiel le 4 novembre 2020. La présidence américaine a demandé la réintégration des États-Unis le premier jour de la nouvelle investiture le 20 janvier 2021 : celle-ci est devenue officielle 30 jours après, soit le 20 février 2021.

[233] *WAYPOINT 2050*, ATAG, https://aviationbenefits.org/media/167187/w2050_full.pdf

[234] Voir notamment *https://www.icao.int/Newsroom/Pages/FR/ICAO-Assembly-achieves-historic-consensus-on-sustainable-future-for-global-civil-aviation.aspx* et *https://www.icao.int/Meetings/a39/Documents/Action_Sheets/action_07_fr.pdf*, *https://www.icao.int/Meetings/a39/Documents/WP/wp_530_fr.pdf*

émissions à partir de 2020 et à les réduire de 50 % d'ici 2050 (par rapport à 2005) ;

- le secteur aérien est également à l'origine d'un supplément de forçage radiatif provenant des émissions de vapeur d'eau en altitude au travers de l'apparition de traînées de condensation et des cirrus supplémentaires qu'elles induisent. Conformément au principe de précaution, cet effet doit être réduit dans toute la mesure du possible tout en donnant lieu à des travaux de recherche complémentaire permettant d'en préciser l'ampleur ;
- les aéroports français sont engagés dans une action de réduction de leurs émissions, notamment par le biais d'une démarche européenne d'accréditation carbone qui les incite graduellement à aller plus loin dans la décarbonation des émissions de l'aviation au sol et à communiquer leurs données environnementales en toute transparence.

En l'absence d'une technologie éprouvée permettant d'atteindre à coup sûr la neutralité carbone, la stratégie consiste à explorer les différentes pistes possibles de solutions.

S'il est crédible d'ici 2040, en étant certes optimiste, d'envisager des vols commerciaux tout électrique avec un nombre réduit de passagers sur quelques centaines de kilomètres ainsi que des avions court ou moyen-courrier à hydrogène liquide, à l'état de prototypes, les connaissances actuelles ne permettent pas d'espérer à cet horizon des avions long-courriers reposant entièrement sur l'électricité ou l'hydrogène liquide : le poids des batteries, actuel et à moyen-terme, serait trop important et le volume d'hydrogène nécessaire à un vol long-courrier, même sous forme liquide, serait supérieur à la capacité d'emport d'un Boeing 747[235].

La neutralité carbone de l'aviation de demain passe inévitablement par la recherche de l'hyper sobriété des propulseurs et par des innovations en rupture avec la technologie actuelle. **Il est de plus probable que l'avion du futur fera appel à des technologies ou à des combinaisons de technologies différentes selon les différents segments d'exploitation.** Cela conduit à explorer de manière systématique et parallèle de nouvelles voies en substitution du kérosène fossile, alors que la recherche s'attachait surtout à optimiser les systèmes existants. Cela induit une double priorité :

- d'une part, mener des recherches à long terme, financées en partie par la puissance publique et par l'Union européenne, pour favoriser la mise au point accélérée de solutions technologiques permettant le développement d'une aviation neutre en carbone compatible avec le haut niveau de fiabilité et de sécurité exigé pour le transport aérien ;
- d'autre part, faire les meilleurs efforts possibles pendant la période transitoire nécessaire vers la neutralité carbone pour réduire les émissions de gaz à effet de serre correspondantes, en accompagnant ces efforts par des incitations économiques se référant au coût général de la tonne de CO_2 évitée.

En outre, le report modal de l'aérien vers des modes de transport moins émetteurs et, si possible, neutres en carbone doit être étudié. Il convient que ce report se fasse sur les parcours qui le permettent, sans remettre en question la libre concurrence entre les modes de transport et sans condamner le hub parisien, indispensable au rayonnement de la France et au tourisme international. Le prix du carbone pourrait être dans ce contexte un

[235] *Mission Possible: Reaching net-zero carbon emissions from harder-to-abate sectors by mid-century : sectoral focus Aviation*, Energy Transitions Commission, Nov 2018, https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2020/08/ETC-sectoral-focus-Aviation_final.pdf

paramètre d'ajustement dans les tarifs pratiqués par les différents modes de déplacement intérieurs.

4.2.2 Les leviers de la réduction

Abstraction faite du report modal, la réduction des émissions repose sur trois axes complémentaires : 1) la mise au point d'avions ultra sobres (consommant de moins en moins de carburant) ; 2) l'amélioration de la gestion du ciel aérien et la réduction des émissions des avions au sol ; 3) l'utilisation de plus en plus importante de carburants neutres en carbone.

4.2.2.1 La mise au point d'avions ultra-sobres

L'un des buts du plan de soutien à l'aéronautique est d'accélérer la mise au point d'un avion ultra sobre : le successeur de l'A320 pourrait ainsi consommer 30 % d'énergie en moins. Ceci implique des avions plus légers, utilisant des moteurs plus efficaces et bénéficiant d'un design repensé.

Cela suppose :

- un usage renforcé des matériaux composites, plus légers, appliqué aux moteurs, aux trains d'atterrissage et à de nombreux équipements, voire à des pièces à géométrie très complexe comme les panneaux recouvrant la pointe avant de l'appareil ;
- une utilisation accrue de la fabrication additive, qui permet de fabriquer des pièces en trois dimensions par addition de couches successives sous contrôle d'un ordinateur. Cette technologie devrait permettre d'obtenir des gains significatifs sur le poids des pièces ainsi fabriquées, y compris de celles composant les moteurs ;
- de travailler à un successeur du moteur Leap[236] qui équipe les avions actuellement mis en service et qui permet déjà par rapport à la précédente génération, notamment le CFM 56, une réduction des émissions de CO_2 de 16 %, de NOx de 50 % ainsi qu'une diminution sensible du niveau sonore du moteur. Ces performances s'expliquent notamment par un fort taux de dilution, de 12 (taux qui caractérise le rapport entre la poussée générée par l'air extérieur comprimé et celle générée par les gaz de kérosène brûlés) nettement plus important que celui du CFM-56. Ainsi la majorité de la poussée provient d'air frais comprimé (sans pollution ni gaz à effet de serre). L'objectif visé est d'obtenir des taux de dilution de l'ordre de 20 à 25 pour la nouvelle génération de moteurs. Dès 2020, des crédits permettront de financer cinq projets relatifs sur le « module fan » (autrement dit la soufflante) de ce futur moteur : ils porteront sur l'amélioration du taux de dilution ainsi que sur la recherche d'une plus grande compacité. De telles valeurs des taux de dilution nécessiteront des allègements importants, une architecture innovante, l'utilisation de matériaux avancés, ainsi que, vraisemblablement, le recours à des ensembles propulsifs sans carénage (nacelle)[237] ;
- des travaux sur le *design* de l'appareil. Le projet MAJESTIC, financé dans le cadre du

[236] *Leading Edge Aviation Propulsion* : le moteur Leap correspond à la génération actuelle de turboréacteurs conçue par le consortium CFM International détenu à 50/50 par Safran Aircraft Engine et GE.

[237] L'Onera précise qu'au-delà d'un facteur de dilution de l'ordre de 15, la meilleure solution n'est plus le turbofan (à cause de contraintes de masse) mais un ensemble propulsif sans carénage.

plan de soutien à l'aéronautique, est ainsi dédié à la conception d'une voilure à fort allongement et à la masse optimisée, pouvant apporter jusqu'à 5 % de gain d'émissions. Cette voilure nécessite de concevoir les systèmes et surfaces adaptés (ailerons, becs) permettant d'en garder le contrôle (une aile à fort allongement se déformant beaucoup au cours du vol).

4.2.2.2 L'amélioration de la gestion des vols au sol et en l'air

La poursuite des améliorations des systèmes de gestion du trafic aérien devrait permettre de réduire à moyen terme les émissions de GES de l'aviation européenne dans des proportions évaluées de 6 à 10 % par rapport à la gestion du trafic aérien au début des années 2010.

Depuis 2016, les onze principaux aéroports français sont engagés dans une démarche de réduction de leurs émissions de gaz à effet de serre et de polluants. L'objectif, issu de la Loi relative à la transition énergétique pour une croissance verte de 2015, est de réduire, par rapport à l'année 2010, de 10 % au moins en 2020 et de 20 % au moins en 2025, l'intensité[238] en gaz à effet de serre et en polluants atmosphériques.

4.2.2.3 Des carburants neutres en carbone

L'avion du futur, quel qu'il soit aura besoin d'une énergie pour se déplacer. Les contraintes sont dans ce domaine nombreuses, considérant que seuls des carburants dits « décarbonés » pourront permettre d'aller vers une aviation véritablement neutre en carbone.

- En l'état actuel des connaissances, l'aéronef tout électrique (à batteries) a un potentiel de développement dans l'aviation générale (vols locaux de formation dans les aéroclubs) et, au cours de la prochaine décennie, dans le segment des VTOL (*Vertical Take-off and Landing*)/drones taxis ainsi que dans le segment des *commuters*. Cependant son domaine d'utilisation est limité par la densité énergétique massique des batteries, la gestion des courants forts, la mise au points de moteurs électriques de plusieurs MWe (énergie nécessaire au décollage d'avions d'une certaine taille). L'avenir des VTOL/drones taxis aériens dépendra essentiellement de la capacité d'instaurer dans les zones urbanisées des couloirs aériens assurant la sécurité des personnes et des biens survolés, un niveau de sécurité des VTOL équivalent à celui de l'aviation commerciale et une réglementation spécifique innovante.
- L'utilisation de l'hydrogène est quant à elle subordonnée à la mise au point de PAC (piles à combustible) de forte puissance et de longue durée de vie[239] et de technologies de stockage et de distribution permettant l'emport à bord en toute sécurité d'une quantité importante d'hydrogène cryogénique et son acheminement jusqu'à la chambre de combustion. Sa gestion sous forme liquide (- 253°C) nécessite de maîtriser la phase de remplissage du réservoir sur un aéroport et son transfert depuis le réservoir jusqu'à son entrée dans la PAC ou dans le réacteur. Il s'agit également de qualifier les dispositifs d'évacuation de la chaleur dégagée par la ou les PAC, de concevoir des matériaux légers et résistants compte

[238] Définie comme le rapport entre les quantités émises et le nombre d'unités de trafic (UdT) (mesurée en passager équivalent-kilomètre transporté (PKTeq) avec l'équivalence entre 100kg de fret (ou de poste) et 1 passager).

[239] Sauf si l'avion est propulsé par des réacteurs à hydrogène et n'utilise pas de PAC.

tenu du caractère particulièrement corrosif de l'hydrogène[240] (réservoirs, tuyaux, vannes, pompes, …) et de quantifier l'impact de ce carburant sur l'environnement (dégagement accru de vapeur d'eau). L'hydrogène suppose également le déploiement d'infrastructures pour sa production, sa liquéfaction et sa distribution jusqu'à l'aéronef dans l'ensemble des pays desservis.

- Si les biocarburants durables sont une très bonne solution à même de se substituer aux carburants fossiles et de réduire fortement les émissions de gaz à effet de serre sans fondamentalement modifier la technologie des avions actuels, le développement de leur gisement nécessite une organisation industrielle de la gestion de la biomasse (comme en EU du nord, au Canada ou aux USA). La priorité actuelle consiste à développer en France des procédés de fabrication des carburants de « deuxième génération » (sans concurrence avec les cultures alimentaires) ou biocarburants avancés tout en structurant en parallèle la filière biomasse.

  Les biocarburants et la réduction de consommation (ultrasobriété) constitueront les solutions principales jusqu'à 2040 – 2050 pour la décarbonation de l'aviation long courrier : ils seront mélangés en plus ou moins grande quantité au carburant fossile (*drop-in*) selon leur disponibilité. Cette utilisation est vouée à durer suffisamment pour rentabiliser la création de filières de carburants durables pour l'aviation.

- Les *e-fuels*, élaborés à partir de molécules de carbone d'origine non fossile et actuellement moins matures que les biocarburants sur les plans technologique et commercial, pourraient se développer dans les années à venir. Ce type de carburant suppose cependant la capture du CO_2 nécessaire en sortie d'installations brûlant de la biomasse ou, de manière plus incertaine, le prélèvement du CO_2 présent dans l'air ainsi que la mise au point d'un modèle économique.

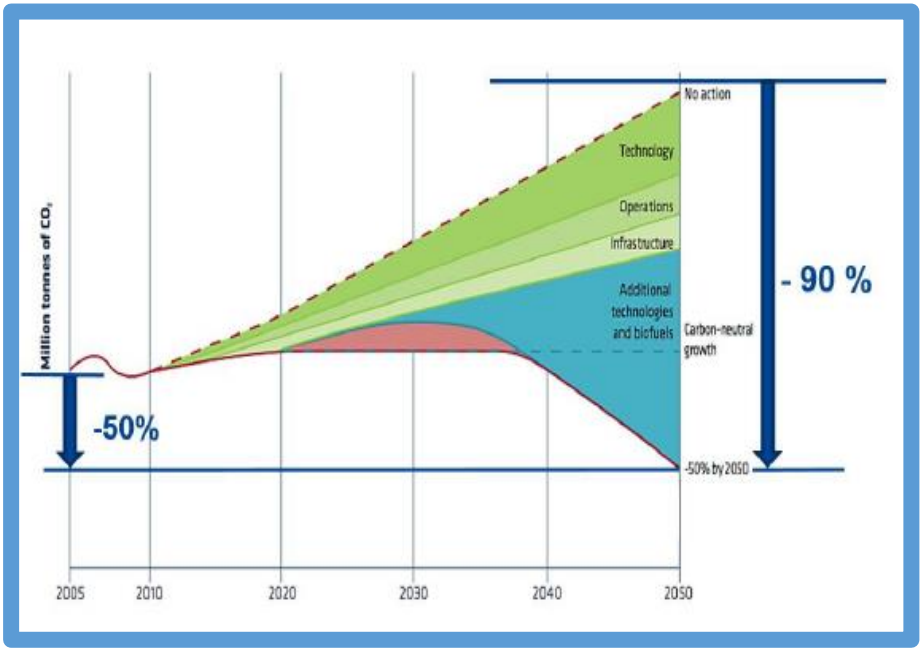
- L'hybridation des sources d'énergie dans l'aéronef pourrait permettre de diminuer les émissions : cette technologie sera probablement la première à se développer, mais elle ne permettra pas d'atteindre la neutralité carbone, que ce soit dans une version hybride kérosène/électricité (l'électricité alimentant par exemple l'APU (*Auxiliary power unit*) et venant en complément de la propulsion thermique classique dans certaines phases du vol) ou dans une version hybride kérosène/hydrogène utilisant des turbopropulseurs entraînés soit par de l'hydrogène, soit par de l'électricité provenant de piles à combustible.

4.2.3 À 2050, une division par deux des émissions mondiales représente une baisse unitaire de près de 90 % des émissions

En 2019, lors de la 40ème assemblée générale, les 193 pays membres de l'OACI ont demandé « *au Conseil [de l'OACI] de continuer à explorer la possibilité d'un objectif ambitieux à long terme pour l'aviation internationale* ». Il a été décidé de lancer des études afin d'évaluer la faisabilité et l'impact de tout objectif proposé, en tenant compte de son incidence sur la croissance ainsi que sur les coûts dans tous les pays, notamment ceux en développement, et ainsi faire avancer les travaux en vue de la 41ème session de l'Assemblée de l'OACI. L'évaluation des objectifs à long terme doit s'appuyer sur les renseignements fournis par les États contractants concernant leur retour d'expérience au

[240] L'hydrogène fragilise, par diffusion, les alliages, et ceux-ci deviennent ensuite plus sensibles à la corrosion.

regard des actions menées pour réaliser leurs objectifs à moyen terme[241]. Dans une communication, présentée au nom de l'Union européenne, la France avait plaidé pour l'adoption d'un objectif ambitieux de réduction à 2050 : elle continuera à le faire en participant activement aux travaux des groupes techniques du comité pour la protection de l'environnement de l'OACI proposant un objectif de réduction d'au moins 50 % des émissions par rapport à 2005 conformément à l'objectif adopté en 2009 par l'IATA. L'objectif de réduction de 50 % des émissions en 2050 par rapport à 2005 est déjà très ambitieux comme l'illustre le graphique ci-dessous (source Safran). Compte tenu de l'augmentation prévisible du trafic, une réduction de 50 % de 2005 à 2050 des émissions de gaz à effet de serre du secteur suppose en effet, en considérant que le trafic sera multiplié par cinq durant cette période, une réduction de celles-ci de 90 % par passager kilomètre. Aller plus loin semble difficile tant qu'un avion neutre en carbone n'aura pas été mis au point.



Les fuseaux verts et bleus montrent les réductions envisagées des émissions des gaz à effet de serre provenant respectivement des progrès technologiques attendus à la conception, des améliorations en vol et au sol et enfin, en bleu, des biocarburants et des progrès technologiques supplémentaires sur les motorisations et les carburants.

Figure 31 : Perspectives de réduction des émissions de GES de l'aviation mondiale[242]

Cet objectif de réduction de 90 % des émissions en 2050 peut naturellement être atteint de différentes manières. La figure 34 ci-après extraite d'une présentation effectuée par Safran en décembre 2019 s'appuie beaucoup plus fortement sur le progrès technologique des appareils et de leurs motorisations. Celle-ci ne pourra cependant se réaliser que dans la mesure où d'importants crédits de R&D sont déployés, dès aujourd'hui, pour permettre le déploiement non seulement d'avions et de motorisations ultra sobres dans la décennie 2030 -2040, mais également, à l'horizon 2050, d'avions zéro-émissions dont la conception et le design seront en rupture par rapport aux avions actuels.

[241] https://www.icao.int/Meetings/a40/Documents/WP/wp_626_fr.pdf

[242] Source : Safran, feuille de route environnementale 2019 https://www.safran-group.com/fr/media/safran-presente-sa-feuille-de-route-rt-et-environnement-20191206

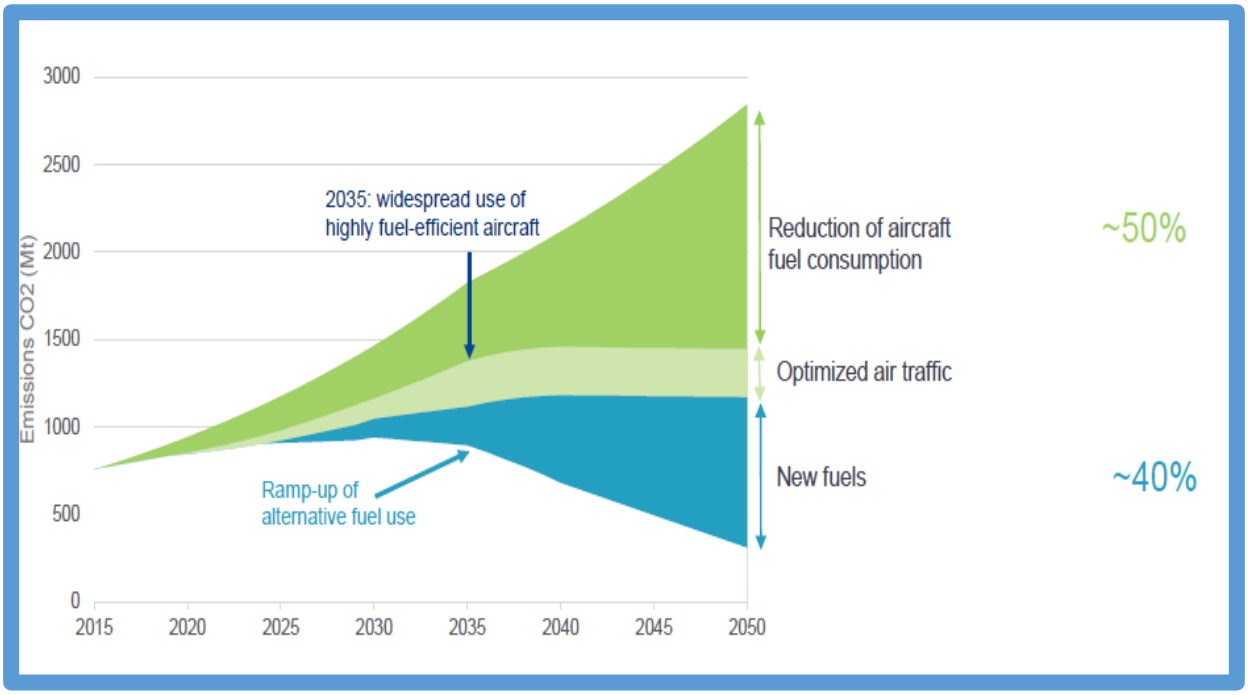


Figure 32 : Vision de Safran d'une possible stratégie de réduction plus orientée vers l'amélioration de l'efficacité énergétique de la flotte[243]

4.2.4 Le forçage radiatif de la vapeur d'eau émise par l'aviation doit également être réduit significativement

En juin 2020, le Gouvernement a annoncé un plan de soutien à l'aéronautique de 15Md€ pour aider la filière à traverser la crise et préparer la prochaine génération d'avions décarbonés. Pour soutenir l'innovation et accélérer les progrès technologiques, ce plan prévoit un investissement en R&D de 1,5 milliard d'euros sur trois ans. De par sa priorité écologique, cette démarche est inscrite dans le plan de Relance du Gouvernement, lancé en septembre 2020, d'un budget de 100Md€. La mise en œuvre de ce volet R&D du plan de relance aéronautique a été confiée aux services de la DGAC sous l'égide du ministre chargé des transports dans le cadre du CORAC. L'objectif est de faire de la France le leader mondial dans les technologies de l'avion décarboné, en préparant la prochaine rupture technologique, en continuant à travailler sur la réduction de la consommation en carburant, la transition vers des alternatives neutres en carbone comme l'hydrogène ou encore l'électrification des appareils. Dès 2020, ce sont 62 nouveaux projets répartis sur 117 sites industriels qui ont été soutenus grâce au plan de relance, pour un total de 376 M€[244].

Le ministre des transports a de plus annoncé fin octobre 2020 la création de la chaire Aviation & Climat entre l'Institut Pierre-Simon Laplace (COMUE Sorbonne Université, université Paris VI Pierre et Marie Curie) et l'ONERA, qui fera l'objet d'un soutien financier

[243] Source : https://www.safran-group.com/media/safran-introduces-its-rt-and-environment-road-map-20191206

[244] Pour plus de précisions sur l'ensemble de ce paragraphe, le lecteur pourra se référer à : https://www.ecologie.gouv.fr/france-relance-presentation-nouvelle-feuille-route-et-des-62-premiers-projets-construire-avions

au travers du volet aéronautique du plan de relance[245].

Cette chaire devrait analyser en toute indépendance les effets des traînées de condensation et élaborer les informations à mettre à disposition des compagnies aériennes pour qu'elles en tirent les bonnes pratiques en termes d'optimisation de trajectoire de leurs avions et de carburants à privilégier.

Dans son rapport transmis au Parlement européen[246] le 1er décembre 2020 sur les effets sur le climat de l'aviation non liés au CO_2, la Commission a envisagé plusieurs mesures possibles pour les réduire. L'une d'entre elles consiste à modifier à moyen-terme (cinq à huit ans) les trajectoires des avions pour éviter les zones sursaturées en glace. Une recherche effectuée dans le cas du Japon semble montrer en effet que le déroutage vertical de quelques centaines de mètres d'une faible partie du trafic aérien (1,7 %) pourrait réduire nettement le forçage radiatif des traînées de condensation et des cirrus induits (d'environ 60 %)[247]. Une telle mesure n'est cependant envisageable que si la saturation du ciel le permet et si les émissions supplémentaires de carbone qui en résulteraient sont faibles (0,014 % dans le cas précédemment cité du ciel japonais). Une deuxième piste de solution, complémentaire de la précédente et étudiée dans le rapport de l'AESA[248] relatif aux incidences de l'aviation sur le climat qui ne sont pas liées au CO_2, souligne l'intérêt d'améliorer la composition des carburants ainsi que l'efficacité des motorisations pour réduire le nombre de particules de suie sur lesquelles se forment les cristaux de glace : une réduction de 50 % des particules de suie émises pourrait ainsi réduire de 14 % le forçage radiatif des traînées de condensation et des cirrus induits[249].

Le recours à des moteurs avec un plus fort taux de dilution et l'utilisation de carburants de substitution contenant un pourcentage plus faible d'aromatiques devrait y contribuer. La Commission a indiqué début décembre dans sa *Stratégie de mobilité durable et intelligente* qu'elle assurerait le suivi des mesures figurant dans ce rapport.

4.2.5 À 2050, une division par deux des émissions françaises de l'aviation est atteignable

Si le trafic aérien mondial peut être multiplié par un facteur 5 d'ici à 2050, avec un fort développement en Asie, en revanche, la croissance du trafic aérien au départ de la France devrait être plus faible : une consommation à terme de kérosène de 9 Mtep contre 7,4 en 2015 est donc envisageable.

L'avion court courrier de demain, électrique ou à hydrogène, (qui au mieux ne pourrait intervenir que sur le segment régional voire court courrier, soit sur moins de 20 % des émissions) participera aux économies de kérosène fossile, est nécessaire mais ne suffira pas

---

245 https://www.ecologie.gouv.fr/mobilisation-des-acteurs-laerien-accelerer-verdissement-du-secteur-et-creation-dune-chaire-aviation

246 https://data.consilium.europa.eu/doc/document/ST-13451-2020-INIT/en/pdf

247 *Mitigating the climate forcing of aircraft contrails by small-scale diversions and technology adoption,* Teoh, R., Schumann, U., Majumdat A., Stettler, M. E. J.,. Environmental Science and Technology, doi: 10.1021/acs.est.9b05608. https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/acs.est.9b05608

248 *Updated analysis of the non-CO_2 effects of aviation*, European Union Aviation Safety Agency (EASA), https://ec.europa.eu/clima/news/updated-analysis-non-co2-effects-aviation_en

249 L'article précise que cette réduction est moins importante dans des atmosphères déjà saturées en vapeur d'eau. *Contrail cirrus radiative forcing for future air traffic,* Lisa Bock and Ulrike Burkhardt, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Physik der Atmosphäre, Oberpfaffenhofen, Germany, https://acp.copernicus.org/articles/19/8163/2019/acp-19-8163-2019.html

à décarboner le secteur de l'aviation d'ici 2050.

Dans ces conditions, un objectif d'incorporation de 50 % de biocarburants à 2050 devrait permettre de diviser par un facteur voisin de deux les émissions à 2050 par rapport à aujourd'hui. En admettant qu'avec les améliorations technologiques prévues, il soit possible, conformément aux hypothèses de la SNBC, de limiter cette consommation à moins de neuf millions de tonnes de kérosène d'ici 2050 et que la part des vols internationaux reste de l'ordre de 80 %, cela nécessiterait d'être en mesure de produire 3,6 millions de tonnes de carburants durables afin que leur proportion puisse atteindre 50 % dans le kérosène utilisé par l'ensemble des vols long-courriers.

Illustration 13 : Aviation et biocarburant - Crédit : Pixabay

Une décarbonation totale à 2060 est néanmoins possible : en 2019, la France a ainsi incorporé 3,46 Mtep de biocarburants dans les véhicules terrestres. Cela montre tout l'enjeu de la création d'une filière française. Cela pose aussi tout particulièrement la question de savoir si la France peut être en mesure d'être autonome pour assurer son besoin, sans faire appel à l'importation d'un carburant qui risque d'être rare et cher, et si, à terme, ainsi que l'envisage la stratégie de mobilité durable et intelligente publiée par la Commission européenne en décembre 2020, elle peut accorder une priorité à l'usage des biocarburants dans l'aérien. Tout doit donc être fait pour que cette filière française du biokérosène durable voie le jour.

Trois approches économiques sont possibles pour parvenir à ce résultat : elle consiste à mettre en place soit un signal prix carbone explicite, soit une obligation d'incorporation de biocarburants, ou, pour respecter la neutralité technologique, une réduction équivalente d'émissions de gaz à effet de serre.

Cette stratégie ne pourra porter ses fruits que si elle est poursuivie de manière pérenne dans le temps.

Dans son paquet *Fit for 55* publié en juillet 2021, la Commission retient de fait ces trois approches. Elle propose non seulement de renforcer le prix carbone à travers le marché ETS pour les vols intra-européens (suppression des quotas gratuits pour l'aviation à partir de 2027, réduction plus rapide que par le passé du volume de quotas disponibles, voire taxation du kérosène (ce qui ne peut être obtenu que par un vote à l'unanimité), limitation du *tankering* sur les aéroports européens …), d'utiliser le dispositif CORSIA pour l'international (en espérant qu'il puisse aboutir à un prix significatif du carbone et constituer ainsi un véritable signal-prix carbone), mais surtout d'imposer un pourcentage obligatoire de biocarburants de plus en plus élevé au cours du temps pour les vols au départ des aéroports européens (5 % en 2030 dont 0,7 % de carburants synthétiques, 20 % (dont 5 %) en 2035, et 63 % (dont 28 %) en 2050). Pour le moment, la proposition exclut l'utilisation des biocarburants de première génération qui ont pourtant vocation à permettre (sans étendre leur périmètre actuel) de culture) la décarbonation aujourd'hui du secteur routier, et demain, très probablement, celle de l'aérien. Ces leviers vont incontestablement dans le bon sens.

Ils doivent être accompagnés de la fixation au niveau international d'un objectif ambitieux de réduction des émissions de gaz à effet de serre du secteur aérien mondial, soit par l'OACI lors de sa prochaine assemblée générale prévue en 2022, soit, à défaut, dans le cadre de l'UNFCC.

En parallèle, le financement des recherches sur les technologies de demain, que ce soient le moteur électrique du futur (Safran), l'avion à hydrogène, les VTOL/taxis volants et les *commuters* électriques ou le design des futurs avions (ailes volantes, voilures haute performance …) doit être activement poursuivi.

4.3 Le maritime : une possible division par deux des émissions à l'horizon 2050

La stratégie française de décarbonation et de réduction des émissions atmosphériques polluantes du secteur du transport maritime ne peut se concevoir que dans une perspective internationale et européenne tant pour des raisons de concurrence internationale que d'importance des trafics internationaux par rapport aux trafics domestiques : les éléments de réflexion élaborés ci-dessous tiennent donc compte des objectifs de l'OMI, de l'Union européenne ainsi que des éléments de stratégie publiés par d'autres pays comme le Royaume-Uni, le Japon, les Pays-Bas et la Norvège à titre de parangonnage.

4.3.1 Les objectifs de décarbonation du secteur du transport maritime

Même si l'Organisation maritime internationale, l'OMI n'est pas directement engagée par l'Accord de Paris[250], le secteur maritime doit réduire ses émissions de gaz à effet de serre et aller vers la neutralité carbone aussi rapidement que possible : **l'adoption par l'OMI d'un**

[250] L'article 2-2 du Protocole de Kyoto prévoyait que : « Les Parties visées à l'annexe I cherchent à limiter ou réduire les émissions de gaz à effet de serre non réglementées par le Protocole de Montréal provenant des combustibles de soute utilisés dans les transports aériens et maritimes, en passant par l'intermédiaire de l'Organisation de l'aviation civile internationale et de l'Organisation maritime internationale, respectivement ». L'Accord de Paris ne reprend pas cette disposition.

objectif de réduction des émissions du secteur maritime international de 50 % en 2050 par rapport à 2008 [251] marque ainsi un engagement significatif de la communauté internationale. À terme, cependant, comme l'ensemble de l'humanité et comme toutes les Parties signataires de l'Accord de Paris[252] , le secteur maritime devra «[…] opérer des réductions rapidement par la suite [après l'atteinte du pic des émissions mondiales] conformément aux meilleures données scientifiques disponibles de façon à parvenir à un équilibre entre les émissions anthropiques par les sources et les absorptions anthropiques par les puits de gaz à effet de serre au cours de la deuxième moitié du siècle, sur la base de l'équité, et dans le contexte du développement durable et de la lutte contre la pauvreté ».

La loi européenne sur le climat[253] retient également un objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050, mais celui-ci ne s'applique qu'aux émissions maritimes réglementées dans le droit de l'Union : « L'équilibre entre les émissions et les absorptions des gaz à effet de serre réglementées dans le droit de l'Union à l'échelle de l'Union est atteint dans l'Union d'ici à 2050 au plus tard, les émissions nettes se trouvant ainsi ramenées à zéro d'ici à cette date, et l'Union s'efforce de parvenir à des émissions négatives par la suite ».

L'article 73 de la loi d'orientation des mobilités[254] fixe l'objectif d'atteindre, d'ici à 2050, la décarbonation complète du secteur des transports terrestres, entendue sur le cycle carbone de l'énergie : elle s'applique en particulier au secteur du transport fluvial domestique. **La pêche, la plaisance et le transport maritime domestique relèvent quant à eux de l'article premier de la loi climat énergie[255] qui prévoit d'atteindre la neutralité carbone à l'horizon 2050** en divisant les émissions de gaz à effet de serre par un facteur supérieur à six, ce qui conduit à envisager une décarbonation quasi-totale des émissions énergétiques, en particulier de celles du transport, comme le montre la SNBC.

Dans son rapport annuel de 2019[256], le Haut Conseil pour le climat a recommandé que « les objectifs concernant les transports internationaux, aériens et maritimes, [soient] intégrés et élevés au même niveau que les objectifs nationaux », et que « des mesures supplémentaires et une stratégie pour réduire l'empreinte carbone de la France [soient] développées ». La loi énergie-climat publiée le 8 novembre 2019 a indiqué que des plafonds d'émissions indicatifs seraient publiés à partir de 2022 concernant ces transports internationaux.

4.3.2 Le temps des expérimentations

Il n'existe pas aujourd'hui de solution unique et universelle qui permettrait d'atteindre à la fois la neutralité carbone et la dépollution du secteur, ce d'autant plus que la diversité des navires et de puissance de motorisation est très variable. Il apparaît cependant clairement que le *design* initial du navire (et dans une mesure moindre son *rétrofit* pour la

[251] Voir notamment : https://www.imo.org/fr/MediaCentre/PressBriefings/Pages/06GHGinitialstrategy.aspx

[252] Article 4 de l'Accord de Paris : https://unfccc.int/files/essential_background/convention/application/pdf/french_paris_agreement.pdf

[253] https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/PDF/?uri=OJ:L:2021:243:FULL&from=FR

[254] Loi n° 2019-1428 du 24 décembre 2019 d'orientation des mobilités : https://www.legifrance.gouv.fr/dossierlegislatif/JORFDOLE000037646678/

[255] Loi n° 2019-1147 du 8 novembre 2019 relative à l'énergie et au climat, https://circulaires.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000039355955/2021-01-13/

[256] https://www.hautconseilclimat.fr/publications/rapport-2019/

flotte existante), ainsi qu'une combinaison de mesures opérationnelles peuvent très fortement réduire les émissions de gaz à effet de serre. De plus, des systèmes de propulsion neutres en carbone sont envisageables, mais ils sont encore dans une phase de démonstration.

Une double priorité s'en déduit :

- **il est nécessaire d'une part de mener des expérimentations**, soutenues en partie par la puissance publique et par l'Union européenne, de mise en œuvre de systèmes de propulsion neutres en carbone ainsi que des technologies les plus prometteuses de décarbonation ;
- **dans la période de transition jusqu'à la neutralité carbone du maritime, il est nécessaire de faire les meilleurs efforts possibles** pour réduire les émissions correspondantes.

Ces efforts de décarbonation peuvent être déclinés suivant trois axes : les améliorations à la conception, les améliorations en exploitation et au port, et, enfin, le choix des motorisations et des carburants. Ils doivent être accompagnés d'un certain nombre de mesures ou d'instruments économiques permettant de favoriser cette évolution et donnant, dans toute la mesure du possible, une visibilité sur le futur aux acteurs du secteur.

4.3.3 Le respect de la neutralité technologique

La stratégie maritime française portée par le Gouvernement **ne doit pas choisir une technologie en particulier, mais doit veiller à la mise en place d'objectifs de résultats** (éventuellement à un niveau international) **et de dispositifs d'accompagnement** permettant d'une part de favoriser le recours à des technologies et à des mesures opérationnelles de moins en moins émettrices, et d'autre part d'encourager l'innovation.

Cette stratégie doit cependant limiter les solutions qui pourraient conduire à des *stranded assets*[257], autrement dit à des actifs dont le fonctionnement, compte tenu des objectifs renforcés de réduction des émissions de GES, devrait être arrêté avant que la rentabilité ne soit atteinte.

4.3.4 Les améliorations à la conception

En matière de conception, l'OMI avait fixé des objectifs d'amélioration de l'efficacité énergétique des navires à la conception à atteindre. Constatant que les objectifs à atteindre en 2025 étaient déjà satisfaits, elle a décidé en 2018 de renforcer les exigences correspondantes pour un certain nombre de types de navires, les porte-conteneurs en particulier. Ainsi, l'amélioration de l'efficacité énergétique des navires à la conception devra atteindre 30 à 50 % selon le type et la taille des navires en 2022/2025 par rapport aux lignes de référence représentant l'efficacité énergétique moyenne entre 1999 et 2009.

Certaines de ces mesures peuvent également concerner les navires déjà en exploitation : CMA-CGM indique qu'un *rétrofit* conduisant à revoir le bulbe de la coque (avec une immobilisation d'une dizaine de jours) peut s'amortir, pour certains navires sur une durée

[257] Littéralement des actifs irrécupérables parce qu'obsolètes et non transformables.

de quelques années. *L'Energy Transitions Commission*[258], s'appuyant sur des travaux du DNV GL, souligne que le *rétrofit* peut ainsi conduire à une amélioration de 15 % de l'efficacité énergétique.

4.3.5 Les mesures en exploitation et au port

Les mesures opérationnelles fixées par l'OMI constituent un second pilier extrêmement important : le *just in time*, l'électrification à quai, la réduction de la consommation du bord (froid, climatisation, appareillages, etc.), la réduction de vitesse, ainsi que l'optimisation de la conduite et des trajets des navires devraient pouvoir permettre une réduction d'au moins 20 %.

Code	Technology group	Conventional fuel price (% change from base price)			CO_2 abatement potential (%)
		-50%	0%	+100%	
		MAC (USD/tonne -CO_2)			
Group 10	Optimization water flow hull openings	-57	-119	-243	3.00%
Group 3	Steam plant improvements	-49	-111	-235	2.13%
Group 6	Propeller maintenance	-40	-102	-226	3.95%
Group 9	Hull maintenance	-29	-91	-215	3.90%
Group 12	Reduced auxiliary power usage	3	-59	-183	0.71%
Group 8	Hull coating	12	-50	-174	2.55%
Group 2	Auxiliary systems	23	-39	-163	1.59%
Group 1	Main engine improvements	28	-34	-158	0.45%
Group 13	Wind power	64	2	-122	1.66%
Group 16	Speed reduction	72	10	-113	7.54%
Group 5	Propeller improvements	80	18	-106	2.40%
Group 11	Super light ship	116	54	-70	0.39%
Group 4	Waste heat recovery	116	54	-70	3.09%
Group 7	Air lubrication	155	93	-31	2.26%
Group 15B	Use of alternative fuel without carbons	478	416	292	64.08%
Group 14	Solar panels	1,110	1,048	924	0.30%
Group 15A	Use of alternative fuel with carbons	-	-	-	-

Tableau 14 : Coûts de réduction des émissions de CO_2 du secteur maritime[259]

Le tableau ci-dessus extrait du quatrième rapport de l'OMI (figure 98) montre que, conjointement, les améliorations à la conception et en exploitation représenteraient un potentiel de réduction à 2050 de 36 % (pour un coût marginal d'abattement de 93 dollars par tonne de CO_2 évitée). Selon les calculs de l'OMI, certaines d'entre elles seraient même

[258] « *Some of these technologies could be retrofitted on the existing fleet – widening of container vessels, improving shape to reduce wave resistance or optimizing propellers – which is particularly important given the long lifetime of ships. Overall retrofitting could improve the energy efficiency of the existing fleet by 15%* ». *Mission Possible: Reaching net-zero carbon emissions from harder-to-abate sectors by mid-century: sectoral focus Shipping*, p. 9, The Energy Transitions commission, https://www.energy-transitions.org/wp-content/uploads/2020/08/ETC-sectoral-focus-Shipping_final.pdf

[259] Source OMI : Ce tableau montre par exemple que pour un prix de référence du fioul lourd de 55 $/l, un prix du carbone de 50 euros rendrait rentables les actions listées dans les onze premières lignes du tableau pour une réduction de 27 % environ et permettrait de réduire ainsi d'autant les émissions de gaz à effet de serre du secteur. La rubrique du groupe 15 B comprend l'hydrogène (produit par électrolyse), ses dérivés (l'ammoniac, le méthane, le méthanol et l'éthanol) ainsi que les carburants issus de la biomasse (méthane, méthanol, éthanol). Le quatrième rapport de l'OMI retient pour la fabrication des gaz de synthèse du CO_2 capté dans les émissions provenant de combustions ou directement dans l'air.

rentables[260] et correspondraient ainsi à une valeur négative de la tonne de CO_2 évitée. Dans l'ordre, les réductions attendues viennent de la réduction de vitesse[261] (7,54 %), de la maintenance du système propulsif (3,95 %), et de celle de la carène (3,90 %).

Si, dans son rapport de 2018 sur la neutralité carbone du maritime à 2035, le Forum international des transports (FIT) envisage, dans une première variante de ses scénarios, une réduction limitée de la vitesse des navires (6 % pour les porte-conteneurs, 9 % pour les tankers et les vraquiers), il considère des chiffres nettement plus ambitieux dans une seconde variante avec des réductions atteignant 26 % pour les porte-conteneurs, 30 % pour les pétroliers et 65 % pour les vraquiers[262].

4.3.6 La propulsion vélique

La propulsion des navires par le vent constitue un moyen de propulsion complémentaire (assistance vélique) et, sur certains marchés de niche, un moyen de propulsion principal. Neutre en carbone, cette propulsion permet de réduire sensiblement la consommation énergétique. Si dans le tableau ci-dessus, l'OMI considère qu'elle entraînerait une réduction moyenne sur l'ensemble des navires de 1,66 % à 2050[263], le FIT envisage quant à lui des gains énergétiques pouvant aller jusqu'à 30 % : ceux-ci vont cependant naturellement dépendre de la taille du navire, de sa vitesse, de son trajet … Plusieurs technologies sont en cours d'expérimentation : kites, voiles-ailes ou voile rigide (éventuellement avec gréements à balestron), voile souple, profil aspiré, rotor, turbine, qui verront le jour en France en 2021. Deux obstacles principaux doivent être levés pour en

[260] Avec un taux d'intérêt de 4 % et un prix du carburant conventionnel (VLSFO) de 375 US $/tonne pris comme référence, et deux calculs de sensibilité avec un prix du carburant réduit de 50 % ou doublé et un taux d'intérêt de 4 %. Les valeurs présentées dans le tableau correspondent au coût de la tonne de CO_2 évitée : ainsi, pour réduire de 7,54 % les émissions de CO_2 du navire en recourant aux mesures de réduction de vitesse, il en coûtera 10 dollars par tonne de CO_2 évitée.

[261] Dans le tableau, la réduction de vitesse correspond à une valeur d'abattement de la tonne de CO_2 positive. Ceci s'explique par le fait que pour maintenir un flux constant de marchandises, il est nécessaire d'utiliser des navires supplémentaires qui peuvent être déjà disponibles ou qui peuvent nécessiter de nouveaux investissements. Pour une réduction donnée de vitesse, le rapport de l'OMI (tableau 79) montre que la valeur de la tonne de CO_2 évitée varie fortement en fonction à la fois du ratio de navires à construire par rapport aux navires supplémentaires à mettre en œuvre pour assurer le même flux de trafic (ce qui se traduit en dépenses supplémentaires d'investissement) ainsi que du prix des carburants.

[262] *Decarbonising Maritime Transport: Pathways to zero-carbon shipping by 2035*, IFT, 2018, « *On the operational side, we consider speed reduction as a major measure that can reduce carbon intensity of ships. We consider two possible alternatives for implementing speed reduction: moderate and maximum speed reduction. Moderate speed reduction implies a reduction of 6% (for container ships) and 9% (for tankers and bulk carriers) of the standard operational speed for different ship types, which was assumed to be 12.8 knots for bulk carriers and tankers and 18.4 knots for container ships, in line with the study by Smith et al. (2016). In the case of maximum speed reduction, we consider a strong speed reduction that is technically possible, which is 26% (for container ships) and 30% (for tankers) and 65% (for bulk carriers) of the standard operational speed. Even though it is technically possible to attain such low operating speeds, navigators will prioritise safety and manoeuvrability, e.g. operating with higher speed in difficult weather conditions. Another operational measure that has been integrated in this modelling framework is optimised ship-berth planning. This relatively low-cost measure is aimed at reducing the waiting time of ships at port before berthing. According to our estimation, this measure could deliver around 1% reduction of the total CO2 emissions. We assume that the operational measures, especially speed reductions, could be implemented from 2020 onwards to yield maximum potential by 2030, which would require decision making by 2018* ».

[263] L'association Windship a précisé que l'assistance vélique associée au routage météo et à une réduction de la vitesse permettent de gagner au minimum 5 à 10 % des émissions de CO_2 (cf exemple du Maersk Pelican).

favoriser le développement : le manque d'informations fiables sur les performances, l'opérabilité, la sécurité, la durabilité et les répercussions économiques des technologies de propulsion par le vent ainsi que la difficulté d'accès au capital pour le développement des technologies, en particulier lors des phases de construction et des tests de démonstrateurs à grande échelle. Le marché n'est pas encore assez développé pour permettre un volume de production industrielle, mais la France possède des atouts et des technologies, principalement issues de la course au large et du nautisme, pour se positionner sur ce marché naissant à fort potentiel[264]. Il est à noter que en 2050, les propulsions à base de fiouls fossiles ne sont plus envisagées. Des indications utiles relatives aux perspectives de ce mode de propulsion figurent dans le rapport établi par Franck Cammas au titre de l'article 185 de la LOM.

Illustration 14 : Prototype de bateau à propulsion vélique – Source : https://media.lesechos.com/api/v1/images/view/60eea814d286c24f3468bc95/1280x720-webp/0611345549216-web-tete.webp

4.3.7 Les systèmes de propulsion neutres en carbone

Cependant, pour aller au-delà, le recours à un système propulsif utilisant des carburants neutres en carbone ou des dispositifs de capture et stockage du carbone (permettant de se rapprocher de la neutralité carbone) s'impose. Le rapport du Lloyd's Register et de l'UMAS[265], paru au premier trimestre 2020, envisage des navires à zéro émission à 2030 et étudie 21 solutions différentes pour répondre à ce besoin : là encore, il n'y a pas donc pas de solution unique. Les solutions employées diffèreront suivant le type de navire considéré et suivant le rythme de maturité économique des nouvelles filières de production de combustibles et de maturation des technologies de motorisation associée pour les

[264] De premiers navires devraient voir le jour en France à partir de 2021 pour Louis Dreyfus Armateurs, Alizés, Neoline ou TOWT. Ailleurs en Europe certains armateurs tels que Maersk, Viking ou Scandline naviguent déjà grâce à la puissance du vent. L'Asie et l'Amérique du Nord se positionnent également sur ce nouveau marché. K-Line, un armateur Japonais, s'est d'ailleurs engagé avec la société française Airseas.

[265] *Techno-economic assessment of zero-carbon fuels*, Lloyd's Register et UMAS, March 2020, https://www.lr.org/en/insights/global-marine-trends-2030/techno-economic-assessment-of-zero-carbon-fuels/

différents types de navires considérés. Elles sont rapidement évoquées ci-dessous.

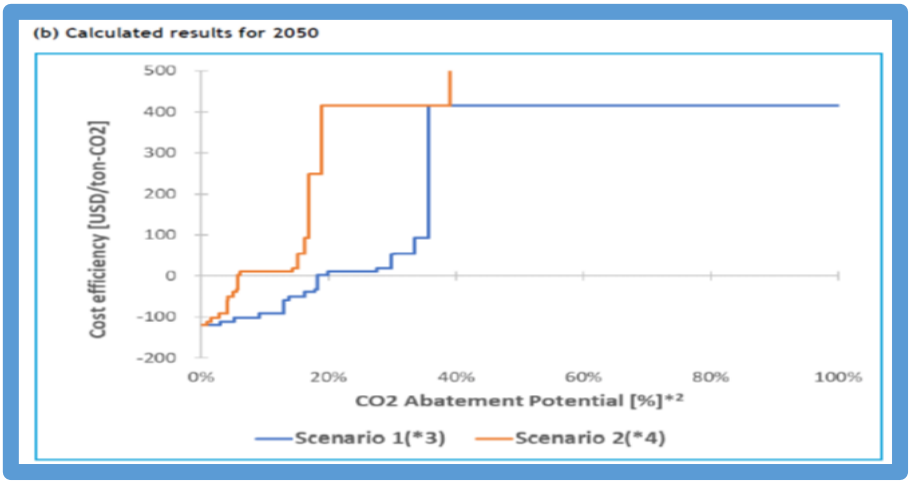


Figure 33 : Courbe du coût marginal de réduction des émissions de CO_2[266] selon deux scénarios de décarbonation

Dans son quatrième rapport, l'OMI présente le graphique (p 277) reproduit ci-dessus montrant qu'en 2050, dans les hypothèses retenues, les mesures d'efficacité énergétiques à la conception et en service permettraient de réduire de 36 % les émissions, tandis que des carburants neutres en carbone rendraient possibles des réductions allant jusqu'à 100 % pour un coût marginal de réduction de 416 $/t CO_2 évitée.

Deux technologies permettant de se rapprocher de la neutralité carbone apparaissent cependant extrêmement prometteuses et mériteraient d'être fortement encouragées :

- **le recours au GNL équipé d'un dispositif de capture et de stockage du CO_2** pour les navires les plus importants. Cette technologie permettrait de conserver les motorisations existantes ainsi que les chaînes d'approvisionnement en gaz naturel. Elle est envisagée notamment dans la stratégie japonaise et devrait être expérimentée par une compagnie maritime japonaise[267] ;

  De plus, réunis au sein de l'*Oil and Gas Climate Initiative* (OGCI), douze géants pétroliers et gaziers, dont Saudi Aramco, ExxonMobil, Chevron et Total, ont annoncé en juillet 2020 leur intention de réduire collectivement "l'intensité carbone" de leurs activités de production : ce qui devrait se traduire dans le domaine du maritime par une expérimentation de capture et stockage du carbone sur un navire. Les études menées dans le cadre du projet CO_2ASTS[268] et portant sur trois types de navires (un bateau de navigation intérieure, une drague de 7600 kW, un paquebot de croisière de 36 MW) conduisent à un coût de la tonne de CO_2

[266] Source, OMI, Fourth IMO GHG Study, https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx

[267] https://www.journalmarinemarchande.eu/filinfo/k-line-va-deployer-a-bord-un-demonstrateur-de-captage-de-co2

[268] *CO2ASTS – carbon capture, storage and transfer in shipping : A technical and economic feasibility study, Public Concise Report*, Juliana Monteiro, Research Scientist at TNO, https://www.conoship.com/wp-content/uploads/2020/06/200513-CO2ASTS-Public-Concise-Report.pdf

évitée[269] compris entre 100 et 300 €/t CO_2 et montrent que cette technologie pourrait être envisagée pour de nombreux navires sans être limitée aux seuls navires de très grande taille. L'installation de ce dispositif à bord d'un navire utilisant le GNL comme carburant permet de bénéficier d'une source froide pour la liquéfaction du CO_2 et de la chaleur de la combustion pour la régénération du solvant ;

- **le recours à l'électricité pour les bateaux et navires effectuant des courts trajets** (*short sea shipping*, *ferries*, navires de service) ou ceux pouvant effectuer des arrêts réguliers pour se recharger. Compte tenu du faible contenu en carbone de l'électricité française, cette technologie permet en effet d'atteindre une quasi-neutralité carbone[270] dès aujourd'hui.

Ces deux techniques ne sont pas cependant pas encore dans une phase de déploiement industriel :

- **le CCS (*Carbon Capture and Storage*), déjà expérimenté dans l'industrie, doit être adapté aux navires** et pourrait, si son intérêt économique est confirmé, équiper non seulement les navires neufs, mais également les navires existants à travers des opérations de rétrofit. Le CO_2 ainsi obtenu à bord des navires pourrait être soit transporté et stocké dans des couches géologiques, notamment au large de la Norvège pour l'Union européenne[271], soit réutilisé, notamment dans la fabrication de carburants synthétiques (à condition de trouver le modèle économique correspondant). Un navire équipé d'un dispositif de capture et stockage de CO_2 et utilisant du biogaz pourrait conduire à des émissions négatives, mais devrait probablement bénéficier d'un prix élevé du CO_2 pour constituer un investissement rentable ;
- **les standards de recharge dans l'électrique (plus de 1 MWe) pour des engins de forte puissance sont en cours de développement** (principalement pour les poids lourds) : une autre solution pour des navires de petite taille sur des trajets courts consiste à placer la batterie (ou le réservoir d'hydrogène) dans des conteneurs qu'il suffit de changer à l'escale.

L'hydrogène (fabriqué à partir de l'électrolyse de l'eau ou par vaporeformage en liaison avec la capture et le stockage du CO_2) pourrait également conduire à des solutions se rapprochant de la neutralité carbone. **Son volume, son utilisation sous forme d'hydrogène liquide, les conditions de sécurité à respecter et son coût conduisent cependant à des réticences de la part des armateurs.** De plus, la technologie des piles à combustible doit encore progresser pour qu'elle puisse être utilisée dans des navires de grande taille (puissance limitée, durée de vie de quelques milliers d'heures …). L'utilisation de l'hydrogène pourrait également reposer sur le développement de motorisations thermiques : cette combustion entraînera cependant le rejet de NOx qui devront être captés (autant une PAC ne rejette que de l'eau, autant un moteur thermique à hydrogène ou ammoniac va conduire à la formation de NOx).

Dès lors que son coût de production sera compétitif, l'hydrogène pourrait cependant trouver sa place d'abord pour des navires de service ou pour les navires effectuant de courts trajets. Le développement en France de solutions à hydrogène liquide suppose

[269] Ce coût correspond à la capture et stockage à bord du navire mais ne comprend pas de coût soit pour le stockage en couche géologique, soit pour sa réutilisation.

[270] Il faut néanmoins compter les émissions de CO_2 associées à la fabrication de la batterie.

[271] Voir notamment le projet Northern lights mené par Equinor https://www.equinor.com/en/what-we-do/northern-lights.html

cependant le développement en parallèle d'infrastructures d'avitaillement, la maîtrise parfaite de l'hydrogène à bord, et la mise au point de moteurs adaptés et/ou de PAC.

L'évaluation économique menée notamment par la Lloyd's et l'UMAS montre que **la solution ammoniac, fabriqué à partir d'hydrogène neutre en carbone** mais dont la combustion nécessite un traitement des oxydes d'azote et dont la toxicité réclame la mise en place de dispositifs de sécurité adaptés, **serait moins onéreuse que la solution hydrogène**. L'UMAS envisage ainsi que l'ammoniac puisse représenter 75 % à 99 % de la part du marché de l'énergie dans le transport maritime à 2050 suivant le scénario considéré (objectifs de l'OMI à 2050 ou scénario 1,5 °C) : la solution de l'ammoniac est cependant très peu explorée en France actuellement, alors que la Grande Bretagne semble beaucoup miser sur cette solution à partir de 2030.

Dans un scénario de réduction par deux des émissions à 2050, présenté dans le cadre de ses prévisions à 2050, le DNV-GL envisage que les navires mis en service à partir de 2040 seront tous neutres en carbone : l'ammoniac se développe dès lors fortement à partir de cette date et représente environ 25 % de l'énergie consommée en 2050, tandis que la part du GNL fossile décroît à partir de 2040.

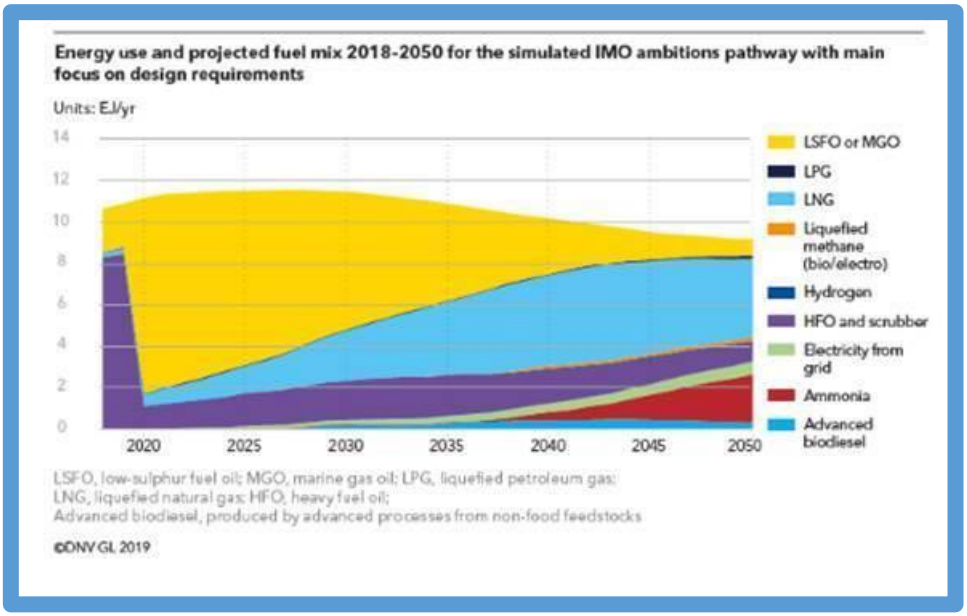


Figure 34 : Consommation et mix énergétiques 2018 – 2050 répondant aux objectifs à 2050 de la feuille de route de l'OMI[272]

À titre indicatif, le quatrième rapport de l'OMI propose les coûts futurs en 2030 et en 2050 présentés ci-dessous pour différents types de combustibles (neutres ou non en carbone) : ces coûts comprennent notamment pour le GNL un coût additionnel à celui du carburant seul pour tenir compte des coûts supplémentaires de logistique et de soutage :

[272] Source : DNV-GL, Maritime forecast to 2050, Energy transition outlook 2019 https://www.dnvgl.com/Publications/energy-transition-outlook-2019-162874

Fuels	Year	
	2030	2050
HFO (VLSFO)	375	375 (9USD/GJ)
LNG	590	590 (12USD/GJ)
Hydrogen	3,300	3,300 (28USD/GJ)
Ammonia	660	660 (32USD/GJ)
Methanol	400	400 (20USD/GJ)
Ethanol	670	670 (25USD/GJ)
Synthetic methane	-	4,500 (90USD/GJ)
Biomass methane	-	2,250 (45USD/GJ)
Synthetic methanol	-	1,500 (75USD/GJ)
Biomass methanol	-	800 (40USD/GJ)

Tableau 15 : Coût des carburants à 2030 et 2050[273]

Le recours au gaz naturel semble la solution la plus simple à court terme et a donc été choisi par un certain nombre d'armateurs[274] : il permet en effet, pour un surcoût modéré, de répondre aux objectifs classiques de dépollution. Il peut également conduire à une réduction des émissions des gaz à effet de serre pouvant atteindre 20 %, si les phénomènes de *methane slip* sont pris en compte dès le choix du type de moteur (ou conduisent à équiper les navires existants de dispositifs permettant de les réduire[275]) : il pourrait donc être logique d'imposer lors de la conception aux navires utilisant le gaz naturel de recourir à des motorisations permettant de réduire ce phénomène.

À moyen terme, l'utilisation du gaz naturel d'origine fossile ne permettra pas d'atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre : dans son *World energy outlook* de 2019, l'Agence internationale de l'énergie considère que le recours au gaz naturel dans le secteur maritime risque de conduire à des *stranded assets* (actifs irrécupérables : autrement dit à des navires qui, compte tenu des objectifs renforcés de réduction des émissions de GES, pourraient ne plus être utilisables à partir d'une certaine date). À cet horizon, le recours au gaz naturel n'est donc valable que dans la mesure où il permet de réduire très fortement les émissions de gaz à effet de serre sous peine pour les armateurs de se retrouver avec des navires qui ne répondraient pas aux normes d'émissions futures.

[273] Source : OMI, *Fourth IMO GHG Study*, https://www.imo.org/en/MediaCentre/HotTopics/Pages/Reducing-greenhouse-gas-emissions-from-ships.aspx

[274] Les armateurs français ont déjà deux dragues GNL en opération, trois RO-Pax de grande capacité en construction, 26 porte-conteneurs dont certains de très grande capacité (23.000 EVP), un paquebot de croisière brise-glace et une entreprise française s'est engagée à affréter à temps six tankers. Une grande proportion de ces navires a adopté le pavillon français.

[275] Alfa Laval et WINGD ont récemment communiqué sur la mise au point d'un dispositif de recirculation des gaz de combustion réduisant de moitié ces émissions. MAN a annoncé un dispositif similaire. https://www.alfalaval.com/contentassets/fa6a219e48214213ae966df529b33a2b/wkr0006.pdf

Quatre solutions sont cependant possibles :

- le recours au biogaz: mais sa disponibilité restera limitée[276], et son coût de production à partir de la biomasse dans des méthaniseurs (aux environs de 95 €/MWh) est de trois à six fois plus élevé que le coût d'importation du gaz naturel fossile (cf. tableau ci-dessus) et sa production n'est présente, pour le moment, que dans quelques pays européens. Le biogaz peut également être produit par pyrogazéification du bois, autrement dit par transformation du bois en gaz sous l'effet de la chaleur et en l'absence d'oxygène. Cette technique au stade de l'expérimentation devrait permettre d'augmenter la production de biogaz possible, même si son coût paraît aujourd'hui élevé. Dans les deux cas, le biogaz ainsi produit pourrait, moyennant un coût supplémentaire, être liquéfié[277] et transporté jusqu'à des stations de distribution ;
- le méthane de synthèse : le méthane peut enfin être produit sous forme de gaz naturel de synthèse, en fabriquant de l'hydrogène par électrolyse de l'eau puis, dans un second temps, en lui adjoignant du CO_2. Cette technique est cependant *a priori* plus coûteuse que la méthanisation ;
- l'utilisation de moteurs flexibles permettant dans le futur de basculer vers des carburants plus proches de la neutralité carbone, notamment l'ammoniac. Des études sont en cours pour valider la compatibilité des cuves de GNL, type C (entièrement pressurisées [278]) ou à membrane [279], pour l'ammoniac. La transformation d'un moteur à gaz en moteur à ammoniac devrait être possible : son intérêt économique dépendra du prix des carburants. Elle présente un gain énergétique : l'ammoniac devient liquide à la pression atmosphérique à - 33,5 °C tandis que le gaz naturel doit être refroidi à - 162 °C. Le réemploi des cuves pour l'ammoniac conduit à une réduction de l'autonomie du navire, la densité énergétique de l'ammoniac étant 1,8 fois moindre que celle du GNL. En revanche, elle évite l'installation de nouvelles cuves, qui seraient nécessaires pour stocker le CO_2 dans la mise en œuvre d'une solution de capture à bord ;
- l'utilisation de dispositifs de capture et de stockage du gaz carbonique à bord des navires.

Les avantages et les inconvénients de ces quatre solutions doivent être comparés et leurs coûts doivent être précisés à travers un certain nombre d'expérimentations : leurs conséquences sur le design des navires sont différentes. Dans la mesure où l'une de ces solutions pourrait être effectivement mise en place dès la conception des nouveaux

[276] L'article 71 de la loi d'orientation des mobilités, en prévoyant un complément de rémunération adapté à la production de gaz à l'écart des réseaux actuels de distribution, devrait également contribuer au développement de cette ressource.

[277] Un démonstrateur industriel de liquéfaction de biogaz de la société Cryopur a fonctionné quelques mois sur le site de Valenton, exploité par Suez. Ce démonstrateur a été un succès et a permis à la société française Cryopur d'exporter deux usines de liquéfaction du biogaz : une en Irlande en fonctionnement depuis 2018, la seconde en Norvège, en cours de construction. Air Liquide produit et exporte des installations de liquéfaction en Europe. On peut également citer plusieurs start-up françaises comme Azzola ou Sublime Energie qui développent des solutions originales et innovantes de liquéfaction du biogaz.

[278] « Les citernes de type "C" sont normalement des réservoirs pressurisés, sphériques ou cylindriques, avec des pressions de conception supérieures à 4 bars ».

https://www.isgintt.org/files/documents/Chapter_33fr_isgintt_062010.pdf

[279] Voir notamment https://www.gtt.fr/fr/applications/lng-brick

navires et à des conditions raisonnables de coût, le gaz pourrait donc constituer une solution se rapprochant de la neutralité carbone. L'article 6 du décret approuvant la PPE[280] a d'ailleurs retenu comme objectif le déploiement dans tous les grands ports [281] d'infrastructures de recharge ou de ravitaillement ouvertes au public pour le GNL maritime avant le 31 décembre 2023. En parallèle, si la capture à bord du CO_2 se développait, l'étude du stockage de CO_2 liquide dans les ports devrait être menée.

Le recours aux biocarburants (y compris sous forme de méthanol) peut également présenter de l'intérêt, notamment en période de transition en attendant les solutions totalement décarbonées, car ils permettent, à coût modéré pour certains, de continuer à opérer les navires existants en répondant aux objectifs de l'OMI avant le renouvellement de leurs flottes. Mais, compte-tenu de leur « relative rareté » et des compétitions d'usage associées, il est difficile de considérer, sauf dans quelques cas particuliers, les biocarburants comme la solution principale à long terme pour le transport maritime (même si la Lloyd's Register et l'UMAS soulignent leur intérêt en termes de coût).

Les e-fiouls peuvent être produits en plus grande quantité, mais leur coût est pour le moment élevé (cf. tableau ci-dessus) et leur production nécessite la disponibilité de fortes quantités de CO_2, ne provenant pas d'énergies fossiles.

Si certains segments peuvent trouver une solution spécifique - ainsi en est-il du biodiesel (moins volumineux que le biogaz) pour la pêche hauturière (qui est également confrontée à des questions de limitation de jauge) - les pistes pour les navires intermédiaires sont donc encore incertaines, ce qui peut conduire à envisager pour les nouveaux navires des motorisations (voire une architecture d'ensemble) adaptables dans le futur à des carburants se rapprochant de la neutralité carbone : un motoriste propose déjà des moteurs qui permettraient de brûler aujourd'hui des hydrocarbures classiques (y compris des biocarburants et des e-fiouls), mais aussi d'incorporer demain en plus ou moins grande quantité de l'ammoniac ou de l'hydrogène… La mise en place de tels moteurs qualifiés par certains de « couteaux suisses », devrait permettre à l'armateur correspondant d'être certain qu'il ne met pas en service un futur *stranded asset* autrement dit un actif qui, alors qu'il n'aurait pas atteint sa rentabilité, ne serait plus utilisable demain dans un monde neutre en carbone ; elle devrait dans une phase de démarrage être accompagnée par des aides de l'État afin de compenser une partie de la différence entre le prix d'un moteur n'utilisant qu'un type de carburant et celui d'un moteur « couteau suisse ». **La constitution d'un retour d'expérience sur le fonctionnement de ces moteurs, et plus généralement sur l'utilisation de bicarburations, sera donc un point extrêmement précieux pour les armateurs.**

Le recours à ces carburants propres sera probablement plus coûteux dans un premier temps : l'amélioration de l'efficacité énergétique à la conception et en exploitation restent donc absolument nécessaires. En 2017, l'OMI a adopté un objectif de diminution de l'intensité des émissions en carbone des navires de 40 % en 2030 et de 70 % en 2050 : cet objectif doit rester une priorité

[280] Décret n° 2020-456 du 21 avril 2020 relatif à la programmation pluriannuelle de l'énergie
https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000041814432/

[281] Certains ports comme Bordeaux ou Nantes Saint-Nazaire offrent déjà un service de ce type à partir de citernes routières (truck-to-ship) tandis que le GPM de Marseille accueillera fin 2021 un navire avitailleur pour des opérations en bord à bord. Les terminaux méthaniers existants sur les trois façades maritimes (Fos, Montoir de Bretagne et Dunkerque) offrent à cette fin de grandes capacités de stockage.

4.3.8 Les signaux économiques dans le secteur du transport maritime

La transition vers la neutralité carbone suppose la mise en place d'un certain nombre de signaux dans l'économie qui sont présentés de manière succincte ci-dessous et de façon plus détaillée en annexe 6. Les initiatives individuelles et les démarches volontaires et de labellisation qui permettent de l'initier se heurtent en effet à un certain nombre de défaillances de marché que sont notamment l'absence d'internalisation des dommages causés par les émissions de gaz à effet de serre, la myopie à l'égard du long terme dans les décisions d'investissements (conduisant par exemple à mettre en service des navires dont le fonctionnement pourrait être restreint, voire interdit dans un monde neutre en carbone), une information imparfaite et asymétrique, pourtant nécessaire dans une période d'évolution rapide des technologies, les inconvénients liés au renforcement des normes à la conception qui peut conduire les armateurs à anticiper leurs commandes juste avant l'échéance et à s'équiper de navires plus polluants et moins coûteux pour éviter les surcoûts correspondants.

Plusieurs pistes de solutions sont cependant possibles :

- la première d'entre elles consiste à introduire dans l'économie un signal prix associé à l'externalité carbone et à annoncer sa trajectoire longtemps à l'avance de façon que tous les acteurs puissent l'anticiper. Ce signal prix peut être direct sous forme de taxe ou de marché de quotas, ou indirect sous forme de normes ou d'imposition d'un taux d'incorporation de biocarburants dont le coût correspond à ce signal-prix ;
- la deuxième solution consiste en l'intervention de la puissance publique à travers des mécanismes de subventions, y compris des mécanismes de partage du risque : la Banque des territoires intervient par exemple en prenant à sa charge une partie du risque correspondant à une absence de croissance du nombre d'usagers utilisant les bornes de recharges électriques dans les parkings des copropriétés ;
- la troisième solution mise en avant par le FIT consiste à fixer des objectifs de décarbonation à long terme du secteur. Il donne un cap à tous les acteurs, encourage l'innovation et récompense les acteurs qui sauront les développer ;
- la mise en place de subventions et le renforcement concomitant des normes portant sur les navires en exploitation permettent d'éviter les conséquences défavorables des normes à la conception, lorsque celles-ci conduisent certains armateurs à anticiper la mise en application de normes plus sévères et à prolonger l'utilisation des navires anciens plus polluants.

Les travaux économiques menés par le Lloyd's Register et l'UMAS montrent, que pour les catégories de navires considérées, toutes les variantes envisagées sont nettement plus onéreuses que l'utilisation du fioul lourd et que, pour atteindre un équilibre économique, la valeur de la tonne carbone correspondante devrait être très élevée. Ceci conduit donc d'un point de vue économique à privilégier dans une première phase de développement des dispositifs d'accompagnement économique pour mettre au point les solutions technologiques, à fixer des objectifs (crédibles dans le temps) de décarbonation longtemps à l'avance pour donner de la visibilité aux industriels et à mettre en place, si possible au niveau mondial, un signal prix carbone permettant de favoriser les solutions bas carbone (même s'il est insuffisant à court-moyen terme pour conduire à un basculement de technologies), sous forme soit de taxes sur le carburant ou d'incorporation des activités concernées dans le marché ETS, soit de normes de réduction des émissions, dont le coût correspond au signal prix envisagé.

Le FIT souligne enfin qu'il n'existe pas une mesure unique permettant d'atteindre la neutralité carbone et que la transition pour y arriver doit reposer sur un paquet de mesures, dont certaines doivent être adoptées à une échelle internationale (voire européenne), mais dont d'autres peuvent relever du niveau national. Il insiste également sur l'idée que la neutralité carbone du secteur ne pourra être atteinte que grâce à la mise en service de navires zéro-carbone.

4.3.9 Le transport maritime : division par deux possible à 2050, neutralité carbone à l'émission vers 2060-2070

Conformément aux objectifs de l'OMI, une division par deux des émissions mondiales du secteur est envisageable à l'horizon 2050, elle va reposer sur des mesures à la conception, en exploitation ainsi que sur l'utilisation de combustibles neutres en carbone.

À plus long terme, la neutralité carbone à l'émission va reposer sur deux facteurs :

- à partir d'une date qui pourrait être estimée à 2035 – 2040, tous les nouveaux navires neufs mis en service devraient utiliser des combustibles neutres en carbone ;
- à partir d'une date plus rapprochée, 2024 selon la stratégie britannique, 2030 de manière plus raisonnable, tout navire neuf devrait satisfaire l'obligation d'être en mesure de passer à des carburants neutres en carbone (hydrogène, ammoniac, GNL avec CCS…).

Dans ces conditions, la neutralité carbone de l'ensemble de la flotte pourrait être atteinte vers 2060 -2070, en ajoutant aux dates précédentes, un délai correspondant à la durée de vie moyenne des navires.

Tant les mesures « limitées » adoptées par le 76ème Comité de la protection du milieu marin (MEPC) en juin 2021 que les propositions de juillet 2021 de la Commission dans son paquet *Fit for 55* portent sur l'efficacité énergétique des navires, ce qui est a *priori* positif si les objectifs sont suffisamment ambitieuses : mais, elles pourraient être améliorées en intégrant des mesures favorisant le développement des expérimentations relatives aux motorisations et aux carburants neutres en carbone. L'adoption par l'OMI et/ou la Commission d'une date à partir de laquelle tous les nouveaux navires neufs mis en service devraient utiliser des combustibles neutres en carbone constituerait une étape positive qui permettrait d'accélérer le développement du progrès technologique et d'envisager la neutralité carbone à moyen terme.

4.4 Le fluvial : un objectif de neutralité carbone à l'émission dès 2050

La réduction des émissions de gaz à effet de serre dans le fluvial va être dominée par quatre caractéristiques propres à ce secteur :

- la durée de vie extrêmement longue des bateaux, 60 ans pour certains, obligeant à prévoir le plus vite possible la mise en service bateaux neutres en carbone ;
- la possibilité de se réapprovisionner en combustible très régulièrement tout au long d'un trajet ce qui conduit à pouvoir retenir des solutions comparables à celles utilisées pour les poids lourds ;
- la feuille de route demandée à la CCNR par les cinq États-membres lors de la déclaration de Mannheim adoptée en 2018 qui fixe deux horizons de temps :

- une réduction des GES et des émissions polluantes de 35 % en 2035 ;
- une réduction quasi-totale en 2050 ;

- et enfin la volonté de la France de parvenir à la neutralité carbone à l'émission de ce secteur à l'horizon 2050.

Illustration 15 : Transport fluvial - Crédit : Pixabay

4.4.1 Les solutions technologiques commencent à apparaître

Comme dans le maritime, la réduction des émissions de gaz à effet de serre va passer par des gains en efficacité énergétique à la conception et en exploitation : ce seront ces gains qui représenteront l'essentiel des réductions d'émissions dans une phase de transition vers la neutralité carbone. Cependant, à terme, le fluvial, comme le maritime, devra recourir à des carburants neutres en carbone. La difficulté aujourd'hui réside dans le fait qu'il n'y a pas de solution qui s'impose naturellement à terme.

On peut simplement dire que le recours à l'électricité pour les bateaux et navires effectuant des courts trajets, comme le *short sea shipping* ou les *ferries* pour le maritime, ou ceux pouvant effectuer des arrêts réguliers pour se recharger, paraît la meilleure solution en termes d'émissions de gaz à effet de serre. Comme le souligne l'Adème[282], il est en effet possible d'estimer le rendement de la chaîne hydrogène, de sa production par électrolyseur à son usage en pile à combustible, à 25 % environ, valeur qui peut varier selon la nécessité ou non de le comprimer pour son usage. Dès lors, «l'efficacité du stockage par batterie, qui présente un rendement de conversion de l'ordre de 70 %[283], doit ainsi conduire à privilégier ce type de stockage, lorsque cela est techniquement et économiquement envisageable, c'est-à-dire ajusté aux conditions d'usage souhaité (durée de stockage, dimensionnement, temps de recharge…)».

Cette technique n'est cependant pas encore rentrée dans une phase de déploiement industriel pour le fluvial : les standards de recharge dans l'électrique (plus d'un MWe) pour des engins de forte puissance sont en cours de développement (principalement pour les

[282] https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/rendement-chaine-h2_fiche-technique-02-2020.pdf

[283] L'utilisation de charges lentes et des batteries lithium-ion permet d'atteindre des rendements plus élevés (85 %).

poids lourds), même si certains fournisseurs proposent déjà des solutions. Le chargement de conteneurs à bord de navires de petite taille contenant le carburant (électricité ou hydrogène) peut également être une solution pour des trajets courts. En outre, le poids et le coût des batteries diminuent très rapidement année après année, ce qui rend difficile la comparaison entre les différentes technologies.

Le déploiement de l'électricité dans la propulsion des bateaux

Si l'électricité a été jusqu'à présent essentiellement considérée comme une énergie permettant l'approvisionnement à quai des bateaux, les progrès techniques permettent désormais de l'envisager également comme système de propulsion. 70 bateaux électriques de passagers et de marchandises, existent déjà en France pour la navigation fluviale, côtière ainsi que sur des lacs[284]. La CCNR[285] et le port de Rotterdam[286] évoquent ainsi la mise en service de porte-conteneurs électriques à batteries :

a) de la part de la société Portliner[287] dans les ports de Rotterdam et d'Anvers : d'une longueur de 110 mètres et d'une largeur de 11,45 mètres, ils peuvent emporter 280 conteneurs. Ils utilisent à cet effet des batteries de 7,2 MWh ce qui leur donne une autonomie de 35 heures : leur recharge pourrait s'effectuer soit directement en quatre heures ou par le remplacement du conteneur dans lequel elles seront placées ;

b) de la part de la société ZES[288] avec la mise en place d'un système d'échange de conteneurs contenant les batteries : Heineken et le transport de la bière devraient en être le premier client.

La vitesse va constituer un élément important du dimensionnement de la batterie : ainsi une réduction d'un tiers de la vitesse (qui augmente d'autant la durée d'un trajet) permet à un automoteur de réduire sa consommation d'énergie journalière d'un facteur 3. La vitesse des automoteurs de petit gabarit (type Freycinet) varie ainsi de 6 à 20 km/h en fonction de la voie d'eau empruntée, mais est limitée à 6 km/h sur les petits canaux.

Les biocarburants peuvent également constituer de très bonnes solutions, sous réserve toutefois de leur disponibilité.

[284] Voir notamment https://www.bateau-electrique.com/catalogue/type/realisations-bateaux-electriques-hybrides/

[285] *Assessment of technologies in view of zero-emission IWT*, page 43 ; DST – Development Centre for Ship Technology and Transport Systems, https://www.ccr-zkr.org/files/documents/EtudesTransEner/Deliverable_RQ_C_Edition_1_Oct2020.pdf

[286] https://www.portofrotterdam.com/en/news-and-press-releases/electric-container-ships-for-tilburg-rotterdam-route

[287] https://www.portliner.nl/ships/ec110

[288] https://www.electrive.com/2020/06/04/battery-swapping-for-dutch-container-ships/

4.4.2 Une flotte neutre en carbone à l'horizon 2050

Le volet mobilité propre de la PPE[289] rappelle que « *les orientations stratégiques pour le développement des mobilités propres découlent de l'objectif de neutralité carbone qui implique une très forte ambition nécessite une décarbonation quasi-complète du secteur des transports terrestres, fluviaux et maritimes domestiques, soit par passage à des motorisations électriques, soit par passage aux carburants alternatifs décarbonés (en analyse du cycle de vie*) ».

« *Pour le segment fluvial, la France se fixe le même objectif de tendre vers une flotte neutre en carbone à horizon 2050 (loi d'orientation des mobilités). Au regard des contraintes spécifiques au transport fluvial, notamment de la durée de vie importante des unités, un enclenchement de la transition énergétique de la flotte dès 2020 sera nécessaire pour assurer la décarbonation du transport fluvial à l'horizon 2050, avec des solutions adaptées à chaque segment de flotte (transport de marchandises, transport de passagers en distinguant croisière avec hébergement et excursion journalière, pêche professionnelle en eaux intérieures, bateaux de services effectuant des opérations régaliennes – entretien, police, secours – sur les voies de navigation intérieure*) ».

Cette neutralité carbone envisagée à 2050 rejoint la feuille de route demandée à la Commission centrale pour la navigation du Rhin (CCNR) par les cinq États-membres lors de la déclaration de Mannheim adoptée en 2018 qui fixe deux horizons de temps : une réduction des GES et des émissions polluantes de 35 % en 2035 et une réduction quasi-totale en 2050. La déclinaison française de cette décarbonation devrait déboucher d'ici fin 2021 sur une stratégie complète de verdissement de la flotte fluviale française compatible avec la feuille de route de la CCNR, qui devra être accompagnée par un déploiement de bornes électriques à quai et par des dispositifs de distribution des carburants alternatifs décarbonés couplés avec ceux des autres modes de transport terrestres, tant sur les itinéraires fluviaux que sur les ports fluviaux proprement dits.

[289] https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20200422%20Programmation%20pluriannuelle%20de%20l%27e%CC%81nergie.pdf

Annexe 5 : Quelques réflexions économiques sur la valeur du carbone dans le secteur du transport

Le calcul de la valeur d'abattement du carbone (coût de la tonne de CO_2 évité) et de sa trajectoire, permettant d'atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre, constitue un outil essentiel du pilotage de la transition. Cette valeur peut ensuite être traduite dans l'économie sous des formes très différentes : taxe carbone, marché de quotas de carbones, normes ou obligations réglementaires (traduisant une valeur indirecte du carbone), mécanisme d'incitation ou valeur pour l'action.

Pour autant, dans le secteur du transport, ce ne sont ni la mise en place d'une taxe carbone ni même l'annonce de son évolution dans le temps qui permettront de décarboner réellement le secteur : la fixation normative d'objectifs de décarbonation dans le temps, accompagnée de la mise en place d'un dispositif pénalisant les constructeurs qui ne respecteraient pas ces valeurs, est bien plus efficace. C'est l'exemple pour les véhicules particuliers de la mise en place des normes d'émissions à ne pas dépasser pour la vente des véhicules neufs d'un constructeur et l'interdiction en France de la vente des véhicules émetteurs de gaz à effet de serre à partir de 2040 (2030 désormais pour le Royaume-Uni). Un règlement européen de 2019, qui, dans la lignée du Pacte vert et du paquet *Fit for 55*, devrait être renforcé en 2022, limite également pour un constructeur les émissions des poids lourds neufs vendus en 2025 et 2030.

La taxe carbone a néanmoins dans le secteur des transports un double rôle qui justifie sa mise en place :

- c'est un signal pédagogique à l'attention de tous les citoyens leur expliquant, d'une part, que les émissions vont endommager la planète et qu'elles vont donc avoir un coût (principe pollueur payeur), et les incitant, d'autre part, à réduire leurs émissions : dans cette vision, il serait donc nécessaire d'afficher très clairement le prix du carbone dans le prix du litre à la pompe (et redistribuer le produit de la taxe ainsi perçu aux ménages des premiers déciles) ;
- c'est un signal de long terme pour tous les acteurs, en particulier pour les industriels, qui, dès lors que la trajectoire est crédible, leur permet d'optimiser leurs investissements : la compétitivité du véhicule électrique par rapport au véhicule thermique en est bien sûr également améliorée ;
- c'est enfin un signal qui permet de développer l'incorporation progressive de biogaz ou de biokérosène : le fournisseur de carburants a le choix entre payer (ou faire payer) la taxe ou incorporer du biocarburant.

Ce chapitre s'appuie en particulier sur :

- les analyses menées par le Forum international des transports (FIT) dans un rapport paru en 2018 sur la décarbonation à 2035 du secteur maritime[290] ;

[290] *Decarbonising Maritime Transport, Pathways to zero-carbon shipping by 2035*, International forum transport, 2018, https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/decarbonising-maritime-transport.pdf

- le chapitre relatif au climat du rapport[291] sur les *Grands défis économiques* de la Commission internationale présidée par Olivier Blanchard et jean Tirole ;
- le rapport[292] de la commission présidée par Patrick Criqui sur les coûts d'abattement dans les transports.

5.1 La signification du prix du carbone

En émettant des gaz à effet de serre, la génération actuelle crée une modification progressive du climat de la terre qui ne la gêne que modérément (même si les catastrophes climatiques gagnent en ampleur et probablement également en fréquence) mais dont les dommages seront supportés par les générations futures. Nicholas Stern[293] qualifie ainsi l'absence d'internalisation des dommages causés par les émissions de gaz à effet de serre comme le plus grand échec du marché que le monde ait jamais connu : les futures générations devront payer le prix de la pollution qui est émise aujourd'hui gratuitement par les générations actuelles. On pourrait également souligner l'effet intra-générationnel : en émettant aujourd'hui des gaz à effet de serre, un individu aggrave les dommages subis par le reste de la population sans en supporter le prix et se comporte ainsi, dans une certaine mesure, comme un passager clandestin. Ce n'est donc en rien, comme beaucoup de personnes qui combattent le principe de la fiscalité carbone aiment à le répéter, une taxe punitive.

L'absence de prise en compte de cette externalité, renforcée par une fiscalité qui n'en tient pas suffisamment compte, conduit au contraire à favoriser des produits plus émetteurs : le fioul lourd maritime est ainsi détaxé tandis que l'électricité est taxée.

5.2 Les initiatives individuelles et les démarches de labellisation

Le rapport du FIT souligne que certains acteurs recherchent un effet d'innovation qui leur permettrait de créer un nouveau marché[294] et que de nombreux autres se lancent, notamment sous l'impulsion des ONG, dans des démarches volontaires de réduction de

[291] https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2021-rapport-les_grands_defis_economiques-juin_0.pdf

[292] https://www.strategie.gouv.fr/publications/couts-dabattement

[293] *« The problem of climate change involves a fundamental failure of markets: those who damage others by emitting greenhouse gases generally do not pay,"; "Climate change is a result of the greatest market failure the world has seen. The evidence on the seriousness of the risks from inaction or delayed action is now overwhelming. We risk damages on a scale larger than the two world wars of the last century. The problem is global and the response must be a collaboration on a global scale »*, https://www.theguardian.com/environment/2007/nov/29/climatechange.carbonemissions

[294] Le rapport cite ainsi les exemples du cargo Yara Birkeland entièrement électrique, ou du ferry Tycho Brahe, entre la Suède et le Danemark, utilisant une technologie hybride diesel/électrique avec des batteries de 4,6 MWh, rechargeables lors des escales grâce à une technologie développée par ABB en moins de 10 minutes (probablement pour moins de la moitié de la capacité de la batterie)

leurs émissions et/ou de leur empreinte carbone[295].

Cette multiplicité d'initiatives résultant des acteurs économiques du secteur et allant vers de moindres émissions pourrait être considérée comme suffisante pour réaliser la transition vers un monde neutre en carbone. Le rapport du FIT écarte cependant cette idée compte-tenu des failles du marché et des barrières qui empêchent d'atteindre ce but.

5.3 Les failles de marché et les barrières qui retardent la décarbonation

Outre la défaillance de marché évoquée par Nicholas Stern, plusieurs barrières et failles du marché retardent la décarbonation :

- *la myopie à l'égard du long terme dans les décisions de construction* : le risque de *stranded asset*[296], de coût échoué, n'est généralement pas pris en compte par les acteurs : des transports neutres en carbone à une date donnée devraient conduire à la fabrication de véhicules neutres en carbone de nombreuses années auparavant. De même, des décisions d'investissements dans de nouveaux véhicules vont tenir compte, bien souvent, des conditions d'approvisionnement actuel et non de la possibilité de disposer de biocarburants ou d'autres énergies alternatives ;

- *les divergences d'intérêt entre acteurs* : dans le maritime, l'armateur peut avoir intérêt à fabriquer un navire lui coûtant moins cher, mais peu efficace sur le plan énergétique, tandis que le chargeur devra supporter les coûts énergétiques de son exploitation. En outre, les nombreux acteurs présents dans l'économie du maritime peuvent conduire à retarder la diffusion de l'innovation : la généralisation d'un nouveau carburant (ammoniac, hydrogène, biocarburants, électricité, ...) ne peut s'envisager que dans la mesure où les navires sont conçus à cet effet, le port en permet l'approvisionnement, la production est suffisante, les chargeurs sont prêts à l'utiliser ... Le développement des bornes de recharge le long des autoroutes en constitue un autre exemple dans le domaine routier ;

- *une information imparfaite et asymétrique* : celle-ci ne permet pas aujourd'hui à tous les acteurs de connaître l'état d'avancement des différentes technologies (parfois survendues par certains promoteurs de filières), en particulier des différents types de carburants et de motorisations, qui pourraient être mis en œuvre, et retarde ainsi la diffusion des innovations les plus prometteuses. C'est aussi ce manque d'information

[295] Le rapport évoque ainsi plusieurs démarches volontaires telles que le *Sustainable Shipping Initiative* (SSI), le *Clean Cargo Working Group* (CCWG), le *Green Marine*, le *Green Ship of the Future* et le *Clean Shipping Project*. Il cite également la *World ports climate initiative*, fondée par 55 des plus grands ports mondiaux dont les adhérents s'engagent à développer des stratégies de réduction de leurs émissions de gaz à effet de serre : le port d'Oslo a déjà affiché son objectif de réduire de 85 % ses émissions de CO_2 d'ici 2030 (https://www.bloomberg.com/news/articles/2019-11-08/oslo-s-ambitious-plan-to-decarbonize-its-port) et utilise des grues zéro-carbone. La Norvège a par ailleurs adopté un objectif de réduction des émissions de gaz à effet de serre émises par le transport maritime, de 50 % avant 2030 par rapport aux niveaux de 2005, dépassant en cela l'ambition fixée par l'OMI pour le secteur maritime mondial.

[296] Actifs irrécupérables parce qu'obsolètes et non transformables, autrement dit des actifs dont le fonctionnement, compte tenu des objectifs renforcés de réduction des émissions de GES, devrait être arrêté avant que la rentabilité ne soit atteinte.

qui conduit à ne tenir compte dans les transports que des émissions à l'avancement des véhicules en ignorant les émissions à la fabrication du véhicule ou des carburants qu'il utilise.

Enfin, la mise en place des normes d'émissions à la conception peut entraîner un certain nombre d'effets négatifs : la mise en place de normes d'émissions sur les nouveaux véhicules ou navires à partir d'une date donnée peut conduire, d'une part, à une anticipation des commandes et ainsi à la mise en service d'un plus grand nombre de véhicules et de navires plus polluants et moins coûteux, et, d'autre part, après l'échéance à prolonger l'utilisation de véhicules et de navires nettement plus anciens et plus émetteurs : une première solution consiste, pour la puissance publique, à mettre en place des subventions pour inciter les acteurs à anticiper l'échéance avec des véhicules ou des navires performants et, après l'échéance, à continuer à s'équiper. Une deuxième solution consiste à renforcer progressivement la norme ou les contraintes sur les véhicules et les navires en exploitation en parallèle des normes sur les véhicules neufs. Dans le maritime, l'OMI cherche ainsi à faire évoluer en parallèle le renforcement des normes à la conception des navires, correspondant à *l'Energy Efficiency Design Index* (EEDI), et celles en exploitation, à travers *l'Energy Efficiency eXisting ship Index*, l'EEXI, ou le renforcement des *Ship Energy Efficiency Management Plan* (SEEMP) – ce qui évite la prolongation de la durée de vie de navires polluants.

5.4 Les pistes de solutions possibles

Plusieurs pistes de solutions, dont certaines sont mises en avant par le rapport du FIT, sont envisageables :

- la première d'entre elles consiste à introduire dans l'économie un signal prix associé à l'externalité carbone et à annoncer sa trajectoire longtemps à l'avance afin que tous les acteurs puissent l'anticiper. De la même façon, la Commission présidée par Tirole et Blanchard approuve sans réserve « *une tarification du carbone bien conçue* »[297]. Correspondant au contenu carbone des carburants, ce signal peut être ajouté au prix du carburant soit directement au moyen d'une taxe, soit, indirectement, à travers la mise en place d'un marché de quotas d'émissions, soit enfin, de manière équivalente, par la mise en place d'un système de normes portant sur les émissions des véhicules[298].

  La solution la plus efficace du point de vue économique consisterait à mettre en place un prix mondial du carbone. Néanmoins, une telle initiative risque de se heurter dans le maritime à l'inégalité qui existe entre des pays continentaux qui tirent une bonne partie de leurs échanges de leurs frontières terrestres, et des pays insulaires qui utilisent la mer pour la majeure partie de leurs échanges. Les pays en développement s'opposeront également à toute mesure non compensée qui conduirait à augmenter le prix de leurs importations.

[297] Voir notamment page 14 : https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/fs-2021-rapport-les_grands_defis_economiques-juin_0.pdf

[298] Ce système n'est pas équivalent aux précédents pour les véhicules automobiles puisqu'il ne porte que les véhicules neufs. Dans le maritime, comme nous l'avons vu, l'OMI fait porter ce système à la fois sur les navires neufs et sur les navires existants.

À défaut de trouver un accord mondial, cette idée pourrait être reprise à l'échelle nationale, voire européenne. Elle ne doit cependant pas nuire à la compétitivité des opérateurs concernés. Le paquet *Fit for 55* de juillet 2021 de la Commission propose ainsi d'intégrer dans le marché ETS le transport maritime intra-européen, ainsi que, pour moitié, les trajets maritimes au départ et à l'arrivée des ports européens… Mais, en l'absence d'un mécanisme d'ajustement aux frontières de l'UE, il peut conduire à une certaine perte de compétitivité du commerce européen et à des distorsions de concurrence possibles par rapport aux pays limitrophes : la Turquie et les pays d'Afrique du Nord par exemple, mais aussi le Royaume-Uni. Dans ces conditions, le recours à des normes de préférence mondiales, portant à la fois sur la conception des navires[299] et sur les émissions en exploitation (compte-tenu de la diversité d'intérêts entre armateurs et chargeurs), pourrait constituer une solution de repli si elles sont suffisamment ambitieuses ; l'imposition d'un taux de biocarburants n'en est qu'une variante.

Le quatrième rapport de l'OMI montre cependant l'intérêt d'un signal-prix carbone dont la trajectoire est connue suffisamment longtemps à l'avance pour que les décisions d'investissement puissent être optimisées. Il évalue en effet le coût des différentes technologies possibles de décarbonation et la valeur du carbone à partir de laquelle ils deviennent rentables. Les travaux économiques menés par le *Lloyd's Register* et l'UMAS montrent que pour les catégories de navires considérées, toutes les variantes envisagées sont nettement plus onéreuses que l'utilisation du fioul lourd et que, pour atteindre un équilibre économique la valeur de la tonne carbone correspondante devrait être très élevée. Ceci conduit donc, d'un point de vue économique, à privilégier dans une première phase de développement des dispositifs d'accompagnement économique pour mettre au point les solutions technologiques, à fixer des objectifs de décarbonation longtemps à l'avance pour donner de la visibilité aux industriels et à mettre en place, si possible au niveau mondial, un signal prix carbone permettant de favoriser les solutions bas carbone (même s'il est insuffisant à court-moyen terme pour conduire à un basculement de technologies), sous forme soit de taxes sur le carburant ou d'incorporation des activités concernées dans le marché ETS, soit de normes de réduction des émissions, dont le coût correspond au signal prix envisagé.

Le rapport de la Commission présidée par Patrick Criqui sur les coûts d'abattement dans les transports [300] montre l'intérêt de définir une trajectoire de la valeur du carbone dans le temps et d'une valeur de l'action pour le climat, 250 €/tCO_2 à 2030, en l'occurrence :

- l'évaluation socioéconomique permet en effet d'établir que si le coût d'abattement associé à la mise en place d'un véhicule électrique est supérieur à la valeur de l'action pour le climat, ce coût devient inférieur dès 2025 pour la citadine électrique et en 2030 pour la berline électrique ;

[299] Normes s'appliquant à tout navire présent dans les eaux européennes en fonction de sa date de mise en service.

[300] https://www.strategie.gouv.fr/publications/couts-dabattement

- « cet indicateur de coût d'abattement ne permet pas vraiment de discriminer véhicules hybrides et électriques à batterie, dont la rentabilité socioéconomique advient au même horizon. Cependant, […] dans la mesure où les véhicules hybrides induisent des émissions résiduelles incompatibles avec la décarbonation complète du transport terrestre, ils semblent appelés à ne jouer qu'un rôle transitoire dans la transformation du parc automobile. Cette considération invite notamment à limiter les efforts en faveur des motorisations hybrides afin d'éviter les effets de verrouillage ou de *lock-in* ».

« Au total, pour les véhicules particuliers, les véhicules électriques remplissent à la fois les critères de rentabilité à moyen terme et de potentiel important de décarbonation et semblent être une solution « sans regret » »[301].

- la deuxième solution consiste en l'intervention de la puissance publique par l'intermédiaire de mécanismes de subventions. Il est bien connu que l'intervention de l'État est nécessaire pour soutenir la recherche à long terme, encourager l'innovation et en favoriser le déploiement, mais aussi pour aider le déploiement, dans sa phase initiale, d'un réseau de télécoms ou d'électricité qui ne devient rentable qu'à partir d'un certain nombre d'abonnés[302]. La Banque des territoires intervient par exemple en prenant à sa charge le risque correspondant au déploiement de bornes de recharge électrique dans les parkings des copropriétés : l'investissement ne sera en effet remboursé dans le temps que si plusieurs personnes achètent des véhicules électriques dans la copropriété. Le développement de l'hydrogène, de l'ammoniac, de l'électricité ou des biocarburants avancées, nécessitera vraisemblablement des aides pour développer les infrastructures correspondantes et les installations de production, dans leur phase de démonstration. Ces mécanismes doivent naturellement être conçus dans le respect de la réglementation relative aux aides d'État ;

- la troisième solution mise en avant par le FIT consiste à fixer un objectif de décarbonation à long terme du secteur, et, en particulier, de date à partir de laquelle tout nouveau véhicule doit fonctionner avec un carburant neutre en carbone . C'est l'exemple de l'objectif de la fin à 2040 de la vente des véhicules utilisant des combustibles d'origine fossile, inscrit dans la loi LOM, et repris par le paquet *Fit for 55* de la Commission avec une date d'échéance plus rapprochée à 2035. Elle donne un cap à tous les acteurs, encourage l'innovation et récompense les acteurs qui sauront la développer. Arrivé à l'échéance initialement envisagée, ce cap peut être repoussé dans le temps si aucun des acteurs n'arrive à développer de solution

[301] *Ibidem*

[302] Sur de tels réseaux, l'intervention de l'État se justifie également, lorsque le réseau est mâture en raison de la structure de monopole naturel des réseaux. Il s'agit, alors, non pas de garantir la rentabilité de l'entreprise exploitante, mais au contraire de s'assurer qu'elle ne réalise pas des profits excessifs.

correspondante[303], par contre, il oblige tous les acteurs à se mettre en position de devoir passer à une économie décarbonée et à faire leurs meilleurs efforts en ce sens sous peine d'être écartés du marché si leurs concurrents arrivent à trouver des solutions décarbonées. Le FIT souligne la difficulté pour le secteur maritime de s'entendre sur un objectif perçu comme réaliste et son hésitation à retenir des objectifs qui seraient extrêmement difficiles à atteindre : ceci explique probablement pourquoi l'OMI ne s'est engagée que sur une décarbonation de 50 % à l'horizon 2050. Dans ces conditions, il est dès lors souhaitable de s'entendre sur une date à laquelle tout nouveau navire ou bateau doit être neutre en carbone, ainsi que, sur une date plus rapprochée à partir de laquelle tout nouveau navire ou bateau mis en service doit être capable de basculer dans le courant de son exploitation vers un carburant neutre en carbone ;

- enfin, pour combattre les effets négatifs des normes à la mise en service de véhicules ou de navires neufs, une première solution consiste, pour la puissance publique, à mettre en place des subventions[304] pour inciter les acteurs à anticiper l'échéance avec des véhicules ou des navires performants et, après l'échéance, à continuer à s'équiper. Une deuxième solution consiste à renforcer progressivement la norme ou les contraintes sur les véhicules et les navires en exploitation en parallèle des normes sur les véhicules neufs. Dans le maritime, l'OMI cherche ainsi à faire évoluer en parallèle le renforcement des normes à la conception des navires, correspondant à *l'Energy Efficiency Design Index* (EEDI), et celles en exploitation, à travers *l'Energy Efficiency eXisting ship Index*, l'EEXI, ou le renforcement des *Ship Energy Efficiency Management Plan* (SEEMP) – ce qui évite la prolongation de la durée de vie de navires polluants.

Ainsi, et en reprenant les idées contenues dans le rapport du FIT, il n'existe pas une mesure unique permettant d'atteindre la neutralité carbone. La transition pour y arriver doit reposer sur un paquet de mesures, dont certaines doivent être adoptées à une échelle internationale (voire européenne), mais dont d'autres peuvent relever du niveau national. Deuxième point important, la neutralité carbone du secteur ne pourra être atteinte que grâce à la mise en service de véhicules navires zéro-carbone. Les mesures d'efficacité énergétique en sont le complément naturel : elles conduisent en effet à baisser le coût de la transition énergétique et à réduire l'empreinte carbone de la chaîne énergétique associée.

Enfin, comme le rappelle, le rapport de la commission présidée par Olivier Blanchard et Jean Tirole[305], la mise en place d'une tarification du carbone bien conçue doit prendre en compte les perdants potentiels, par exemple des ménages modestes vivant en zone péri-urbaine et rurale.

---

[303] Cette solution n'est donc vraisemblablement pas efficace dans un marché oligopolistique ou dans un marché susceptible d'entente entre les acteurs : elle est par contre opérationnelle dans un marché fortement concurrentiel, et fonctionnera d'autant mieux que ce marché sera ouvert à de nouveaux acteurs, ce qui est le cas dans un certain nombre de secteurs du transport, mais pas dans tous…

[304] Même si les subventions peuvent également avoir leurs effets pervers : effets d'aubaine, surconsommation…

[305] Les grands défis économiques, par la commission internationale Blanchard-Tirole, https://www.strategie.gouv.fr/publications/grands-defis-economiques-commission-internationale-blanchard-tirole

Annexe 6 : Trois ambiances technologiques possibles et les risques associés

Les chapitres précédents montrent que les évolutions des technologies de motorisations et de carburants pourraient jouer un rôle important dans la transition vers la neutralité carbone, mais qu'elles ne suffisent pas à atteindre la neutralité carbone. De plus, les incertitudes sont nombreuses sur les technologies qui vont réellement se développer, sur leurs calendriers de déploiement, sur leurs coûts ainsi que sur leur acceptabilité. Dans ces conditions, l'exercice retient trois ambiances technologiques différentes associées à un développement plus ou moins important de celles-ci et décrites dans le chapitre 4-3 de ce rapport.

La réalisation de cette transition est cependant confrontée à au moins deux types de risques qui sont loin d'être indépendants :

- les risques d'échec dans l'atteinte des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre : les premiers bien illustré par le scénario du pire réside dans l'échec de l'atteinte des objectifs fixés notamment dans le cadre de la politique climatique et peuvent résulter du contexte international, d'un manque d'innovations technologiques ou de leur rejet, du refus de l'augmentation des prix liée aux émissions de carbone ou de l'absence de mise en place soit des leviers économiques suffisants pour assurer cette transition, soit des mesures d'accompagnement nécessaires à l'égard des industries et de leurs employés, des territoires associés et des ménages ;

- les seconds sont d'ordre économiques et sociaux. Une transition énergétique mal préparée et/ou trop rapide, une volonté de développer toutes les technologies en même temps ou, à l'inverse, d'en privilégier une qui ne sera finalement retenue au niveau international peuvent conduire à des coûts économiques trop importants pour l'industrie, pour les ménages ou pour les dépenses publiques, conduisant, dans un second temps à son échec. Ils peuvent être illustrés par un scénario qui pourrait être qualifié d'hypercontraint dans lequel le développement technologique n'est pas au rendez-vous tandis que les contraintes sont maintenues ce qui amène à des dépenses élevées, voire, en cas d'absence de politique redistributive, à une aggravation des inégalités sociales.

Ainsi que Jean Pisani Ferry[306] le souligne, en prenant l'exemple du secteur automobile dont les investissements, les brevets et le savoir-faire dans la fabrication des véhicules thermiques seront en partie perdus dès 2035, si le paquet *Fit for 55* de la Commission européenne qui prévoit la fin de la vente des véhicules neufs émetteurs de gaz à effet de serre à cette date est adoptée, les conséquences macroéconomiques d'une transition énergétique, - trop longtemps différée et devenue urgente-, seront probablement notables sur notre croissance et nos emplois ; il faut en prendre conscience et les étudier de façon à en minimiser les effets.

[306] *Climate Policy is Macroeconomic Policy, and the Implications Will Be Significant*, Jean Pisani-Ferry, August 2021, Policy Brief, Peterson institue for International economics https://www.piie.com/system/files/documents/pb21-20.pdf

6.1 Les risques d'échec

Même si l'Accord de Paris représente un engagement moral pour l'ensemble des Parties prenantes et pour la génération actuelle et si certaines technologies permettent de réduire fortement les émissions de gaz à effet de serre, leur adoption n'est pas pour autant acquise. De multiples obstacles peuvent en effet surgir qui en empêcheront la diffusion :

- au plan international, la précédente présidence américaine montre que certains pays - les États-Unis hier, mais peut-être d'autres pays ou blocs de pays demain - peuvent nier la réalité du changement climatique et sortir de l'Accord de Paris, ce qui amènent d'autres nations, en concurrence commerciale, à ralentir leurs efforts et finalement à annuler la dynamique de l'Accord de Paris (qui repose sur un principe de renforcement progressif des mesures de lutte contre le changement climatique grâce à des rendez-vous tous les cinq ans). La nouvelle présidence américaine, l'annonce d'un objectif de neutralité carbone non seulement par la Chine, mais aussi par la Corée du sud et le Japon à 2060, et la volonté de l'Union européenne de réduire ses émissions de - 55 % à 2030 et d'atteindre la neutralité carbone à 2050, constituent au contraire une conjoncture favorable au renforcement de la lutte contre le changement climatique. Ce risque paraît donc écarté à court terme ;

- une société de moins en moins technophile, et la France fait partie de ces pays, peut malgré l'objectif climatique refuser l'adoption d'une nouvelle technologie telle que le véhicule électrique . De la même façon, l'absence d'un accompagnement suffisant du développement des technologies peut en gêner le développement et conduire à leur rejet par la population. C'est l'exemple de l'absence de bornes de recharges rapides sur les stations d'autoroutes : ne pas en installer conduit, d'une part, à freiner le développement des véhicules électriques et, d'autre part, à ce que certains automobilistes s'équipent de véhicules avec des batteries leur permettant de parcourir des distances de plus de 500 kilomètres sans arrêt, avec une forte émission de gaz à effet de serre lors de leur fabrication ;

- l'échec de certaines promesses, peut également conduire à devoir prolonger l'utilisation des énergies fossiles : une promesse de 100 % de biocarburants, ou de biogaz dans les transports conduit logiquement à prolonger l'utilisation des véhicules thermiques actuels, voire à les développer, plutôt que de développer de nouvelles motorisations... La rareté des gisements rendra l'exécution de ces promesses très difficile ;

- une difficulté d'approvisionnement de certains matériaux et produits, liée de manière plus ou moins temporaire, à un déséquilibre dans la chaîne de production entre l'amont et l'aval : il peut porter sur la matière première (dont l'offre va suivre le cycle des matières primaires : la rareté, à un moment donné, amène à des prix élevés et à des investissements, conduisant durant la période suivante à un prix plus bas et à des investissements plus faibles) ;

- le refus du signal prix carbone, bien illustré par le mouvement des gilets jaunes ;

- l'absence de mise en place soit des leviers économiques suffisants pour

assurer cette transition, soit des mesures d'accompagnement nécessaires à l'égard des industries et de leurs employés, des territoires associés et des ménages ;

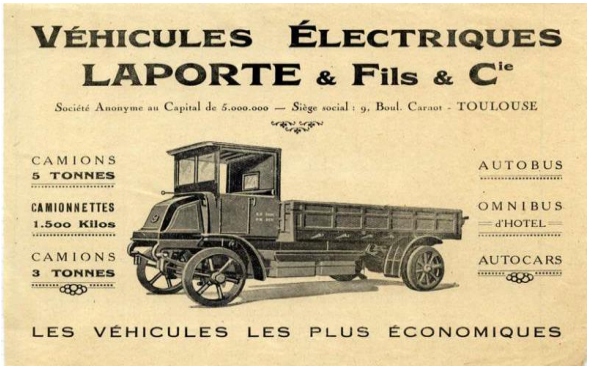
- et, bien sûr, le non-respect des objectifs de réduction fixés aux constructeurs.

6.2. Les risques économiques et sociaux

Trois risques économiques et sociaux, de nature différente, peuvent être soulignés :

- le risque de désindustrialisation liée à l'adoption de technologies fabriquées à moindre coût en dehors de l'Union européenne (c'est l'exemple actuel déjà constaté de la fabrication des panneaux solaires, qui pourrait se répliquer sur les batteries), mais aussi à des contraintes carbone trop élevées (en l'absence de mécanisme européen d'ajustement carbone aux frontières) ;
- l'absence de choix du ou des carburants à privilégier peut conduire à une multiplication des dépenses d'infrastructures, conduisant à équiper les stations de distribution de carburants d'équipement permettant la fourniture d'électricité, de biogaz (sous formes gazeuse et liquide), d'hydrogène (à 300, à 7000 bars ainsi que sous forme liquide), d'ammoniac. À l'inverse, un choix prématuré peut conduire à ne pas retenir qui s'imposera au niveau international ;
- l'accentuation des inégalités en l'absence de mesures redistributives : un Français, ayant une empreinte carbone de 10 tonnes de CO_2 en 2030 pourrait être amené à payer 2 500 euros, de manière directe, dans le cas d'une contribution climat énergie et de la mise en place d'un mécanisme d'ajustement à la frontière, ou, de manière indirecte, à travers les normes mises en place. Autrement dit, même si une signal prix carbone n'est pas mis directement dans l'économie sous forme de taxe, la mise en œuvre des mesures de lutte contre le changement climatique va avoir un coût sensible pour le consommateur, ce qui nécessite la mise en place de mesures redistributives.

Annexe 7 : Un poids lourd électrique de 40 tonnes est-il possible ?



Laporte, Toulouse, 1922-1925. Camion électrique lourd d'une capacité de 5 tonnes, mu par deux moteurs de 7 cv montés directement sur l'essieu arrière. L'autonomie était de 90 km.
©Fondation Marius Berliet Lyon - France

Dans la perspective d'un monde neutre en carbone, il est nécessaire de recourir à des poids lourds dont la circulation n'émette pas de GES (ou le moins possible dans une analyse en cycle de vie). À 2040, la SNBC envisage des efforts importants d'efficacité énergétique : « pour les poids lourds, viser à l'horizon 2040 une consommation de : ▪ 21 l/100 km en conditions réelles pour les véhicules neufs roulant au diesel ; ▪ 15 kg/100 km pour les véhicules neufs roulant au gaz naturel véhicule (GNV) ; ▪ 129 kWh/100 km pour les véhicules roulant à l'électricité ».

L'Union européenne impose[307] aux constructeurs de poids-lourds une réduction de leurs émissions de CO_2 de 15 % d'ici à 2025 et de 30 % d'ici à 2030 par rapport aux niveaux de 2019. Les constructeurs devront également s'assurer que les véhicules à faibles émissions ou à zéro émission représentent 2 % de la part de marché des véhicules neufs d'ici 2025. Il est à noter que la méthodologie permettant de préciser si les PI au gaz naturel font ou non partie des véhicules à faible émissions devrait être précisée dans les prochains mois. Les

[307] *The Regulation includes an incentive mechanism for : i)* ***zero-emission vehicles*** *(ZEV), lorries with no tailpipe CO_2 emissions, ii)* ***low-emission vehicles*** *(LEV), lorries with a technically permissible maximum laden mass of more than 16t, with CO_2 emissions of less than half of the average CO_2 emissions of all vehicles in its group registered in the 2019 reporting period.To incentivise the uptake of ZLEV and reward early action, a* ***super-credits system*** *applies from 2019 until 2024, and can be used to comply with the target in 2025. A multiplier of 2 applies for ZEV, and a multiplier between 1 and 2 applies for LEV, depending on their CO_2 emissions. An overall cap of 3% is set to preserve the environmental integrity of the system.From 2025 onwards, the super-credits system is replaced by a* ***benchmark-based crediting system****, with a benchmark set at 2%. The 2030 benchmark level will have to be set in the context of the 2022 review.As a result, the average specific CO_2 emissions of a manufacturer are adjusted downwards if the share of ZLEV in its entire new heavy-duty vehicles fleet exceeds the 2% benchmark, out of which at least 0.75 percentage points have to be vehicles subject to the CO_2 targets, i.e. the largest vehicles. Each percentage point of exceedance of the benchmark will decrease the manufacturer's average specific CO_2 emissions by one percent. In both systems, ZEV not subject to the CO_2 targets are accounted in the incentive mechanism. Buses and coaches are excluded from the scheme. The ZEV not subject to the CO_2 targets can contribute to a maximum of 1.5% CO_2 emissions reduction.*

constructeurs qui ne respecteraient pas ces objectifs devront payer une pénalité financière pour leurs émissions excédentaires.

Dans le cadre du paquet *Fit for 55,* paru en juillet 2021, la Commission a renforcé les objectifs de réductions des émissions de gaz à effet de serre des véhicules neufs à 2030 : le texte correspondant devrait paraître en 2022 pour les poids lourds.

À 2050, la nouvelle loi d'orientation des mobilités « fixe l'objectif d'atteindre, d'ici à 2050, la décarbonation complète du secteur des transports terrestres, entendue comme le cycle carbone de l'énergie utilisée ».

Si le véhicule électrique connaît un démarrage notable depuis quelques années, laissant espérer un développement important de l'électrique pour les VP et les VUL dans les prochaines décennies, la situation est plus incertaine pour les poids lourds qui représentent aujourd'hui 2,5 Gt CO_2, soit environ 7,3 % des émissions mondiales de CO_2 liées à l'énergie. Dans un scénario tendanciel, ces émissions pourraient atteindre 4,6 Gt CO_2 en 2050, soit 11,6 % des émissions mondiales. En première approximation, *l'Energy transitions commission* envisage une baisse de 30 % de ces émissions qui pourrait provenir du report modal (principalement vers le ferroviaire) ainsi que d'une meilleure logistique. Aller vers « une décarbonation complète du secteur des transports terrestres » suppose donc de recourir à des véhicules beaucoup moins émetteurs de GES.

Plusieurs technologies respectant la neutralité carbone ou une quasi-neutralité carbone sont possibles : a) poids lourds électriques avec batteries, b) poids lourds électriques à hydrogène provenant d'une électrolyse de l'eau, c) poids lourds électriques avec caténaire, d) poids lourds avec biocarburants, e) poids lourds avec gaz d'origine renouvelable, e) poids lourds avec gaz d'origine fossile transformé en hydrogène avec captation du CO_2 lors de la réaction de transformation du CH_4 en H_2 ; f) hybridation de ces différentes techniques.

Illustration 16 : Concept de poids lourd électrique - Crédit : Pixabay

Cette annexe donne de manière succincte les caractéristiques retenues pour le raisonnement en ACV simplifiée des PL 40 tonnes.

Les paramètres retenus pour une ACV simplifiée d'un PL 40 tonnes

Remarques préliminaires :

Cet ACV simplifiée est caractérisée par :

- des choix de simplification par rapport à une ACV normale : circulation sur autoroute à 90km/h avec un PTAC de 40 tonnes, absence de recyclage et de prise en compte de la fin de vie ;
- des incertitudes à lever sur les paramètres retenus (rendement des motorisations, émissions GES liées à la masse du véhicule, aux pneus,…) ;
- des incertitudes sur les émissions liées à l'infra : ce calcul comprend une première estimation à améliorer fortement.

Pour les motorisations,

- il est supposé que le Pl électrique n'utilise qu'une seule batterie (775 000 km correspondant à un peu moins de 2 000 cycles, donc au nombre de cycles envisagé dans le livre blanc de la filière sur les véhicules électriques industriels) qui permet d'assurer une autonomie de 4h30 (environ 400 km à 90 km/h) ;
- le PL dual fuel-GNL n'a pas été retenu à ce stade en l'absence de renseignements sur les émissions à l'amont du cycle et sur les émissions possibles de méthane ;
- le PL avec petite batterie et caténaire devrait conduire à des émissions moindres en ACV que le Pl électrique considéré : mais le déploiement de cette technologie est coûteux, d'autant plus qu'elle doit être déployée sur des centaines de kilomètres avant que les transporteurs n'achètent les camions correspondants ;
- le PL hydrogène sera également considéré dans une prochaine version, avec néanmoins une interrogation sur la durée de vie de la PAC.

Dans ces conditions et dans ce calcul préliminaire, le tableur montre qu'une division par quatre ou cinq des émissions de GES en ACV simplifiée serait envisageable à l'horizon 2040 pour un PL électrique ou biogaz par rapport à un PL thermique actuel.

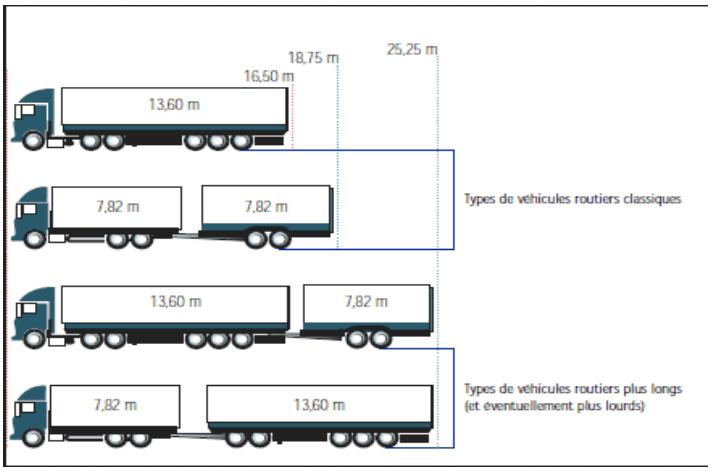
Il montre également que dans la mesure où le carburant est décarboné, le poids relatif des émissions en cycle de vie de la caisse du véhicule et de la batterie prend une importance accrue par rapport à aujourd'hui.

1°) Poids lourd retenu

En reprenant les données Ademe, nous retenons comme sujet d'étude dans cette fiche **un Pl de 40 tonnes dont la durée de vie est de 7ans et qui couvre, durant cette période, 750 000 km.**

Un tel PL constitue un ensemble articulé (appelés communément "semi-remorque"), constitué très généralement d'un tracteur de 7 t de poids environ et de remorques dont le poids à vide est de 8 t environ. La capacité maximale de fret de ces ensembles est de 25 t, pour parvenir à un poids total en charge de 40 tonnes environ.

La directive 96/53 (révisée en 2015)[308] fixe des poids et dimensions autorisés dans toute l'UE (ce qui n'interdit pas à certains pays d'aller au-delà comme la Suède et les Pays Bas l'ont fait) : les dimensions maximales actuellement admises au sein de l'Union européenne se résument ainsi : 18,75 mètres et 40 tonnes, les États membres pouvant autoriser des valeurs supérieures pour la circulation interne. Concrètement, les dérogations à la longueur vont jusqu'à 25,25 mètres, le poids maximal atteint souvent 44 tonnes et culmine à 60[309].



Pour un tel poids lourd, l'Ademe retient à la fabrication un chiffre de 5,5 t CO_2/t de poids à vide du camion, ce qui donne au total une valeur en 2019 de 82,5 tonnes de CO_2. Les ACV effectués par certains constructeurs montrent cependant un chiffre plus optimiste de 3,3 t CO_2/t de poids à vide.

À 2040 et 2060, nous supposons pour le moment, une réduction de 20 % du poids du PL à vide si bien que les émissions à la fabrication ne seraient plus que de 66 tonnes.

Par contre, nous prenons comme hypothèse volontariste qu'en 2040 le PL pourrait pour la caisse parcourir un nombre de kilomètres deux fois plus élevés, correspondant à une durée de vie de 14 ans.

NB : le tableur joint comporte également une ligne relative aux pneus : une première approche consiste à retenir la valeur de l'empreinte carbone d'un PL 12 tonnes de livraison, soit 9,1 g CO_2e/km (cf étude IFpen sur l'ACV de véhicules roulant au GNV et bio GNVde 2019), de multiplier ce chiffre par deux (en supposant qu'un Pl de 40 tonnes ait 12 pneus (à vérifier) au lieu de 6 pour un PL de 12 tonnes), soit 18,2g CO_2e/km. (Nb ceci suppose que le pneu est remplacé tous les 40 000 km). Au total, l'empreinte des pneus du PL 40 tonnes serait donc de 18,2*40 000= 728k CO_2e.

À 2040, nous retenons comme hypothèse que l'empreinte carbone du pneu pourrait être divisée par deux.

2°) Énergie nécessaire à l'avancement du véhicule

[308] L'Article R312-4 du code de la route accorde une augmentation du PTAC de 2 tonnes pour les poids lourds à énergie alternative de moins de 26 tonnes. Celle-ci n'est pour le moment que d' une tonne pour les poids lourds dont le PTAC est inférieur à 26 tonnes.

https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000043893472/ Cette dérogation figure également dans l'article 20 modifiant la directive 96/53/CE du règlement (UE)2019/1242 du Parlement européen et du Conseil du 20 juin 2019.

https://eur-lex.europa.eu/legal-content/FR/TXT/?uri=CELEX%3A32019R1242

[309] *Source : «Starter, Safer, Cleaner» - Automotive research institute FKA pour T&E*

En première approximation, la résistance à l'avancement d'un camion est caractérisée par l'addition des trois termes suivants (cf extrait ci-dessous du rapport Syrota[310], carburants et électricité) :

- la résistance au roulement est, en première approximation, proportionnelle à la masse du véhicule. En supposant qu'il y a roulement sans glissement, on a :

  $F_{roulement} = C_{résistance\ au\ roulement} \times m_{véhicule} \times g$, avec g l'accélération de la pesanteur ;

- la résistance aérodynamique dépend en particulier du coefficient de traînée (souvent noté Cd ou Cx) et de la surface frontale Sf, fonctions de la forme du véhicule, de la vitesse du véhicule et de celle du vent contraire à l'avancement. Une formule simplifiée serait la suivante :

  $F_{aérodynamique} = ½\ P_{air}\ CD\ S_{frontale}\ (v_{véhicule} + v_{vent})^2$

  avec p_{air} la masse volumique de l'air et la vitesse du vent supposée positive quand elle arrive de face (dans le sens contraire du déplacement du véhicule). Notons que la résistance aérodynamique augmente comme le carré de la vitesse du véhicule et du vent ;

- la résistance à la pente est fonction de la masse du véhicule et de la pente, comme l'illustre la relation suivante : Fpente = mvéhicule × g × sin**α** avec g l'accélération de la pesanteur et **α** l'angle de la pente.

  En prenant les hypothèses supplémentaires suivantes :

  - Coefficient de traînée d'un camion normal : 0,6 ;
  - Coefficient de traînée d'un camion spécifiquement conçu (Semi de tesla) à cet effet : 0,36.

Ces formules nous amènent aux consommations d'énergie suivantes d'un poids lourd (de 40 tonnes sur une route horizontale) :

- 0,97 kWh/km pour un camion à l'aérodynamique améliorée ;
- 1,22 kWh/km pour un camion actuel en Europe.

Dans ces conditions, nous retiendrons une énergie à l'avancement de :

- 1,22 kWh/km pour un camion en 2019 ;
- 0,97 kWh/km pour un camion en 2040 et 2060.

Obtenir un tel coefficient de traînée dans l'Union européenne pourra rendre nécessaire la révision de la directive sur les poids et dimensionnements (cf paragraphe précédent).

3°) Les rendements des différentes motorisations et les émissions à la circulation et en amont

- Rendement de l'énergie emmagasinée dans la batterie à l'énergie délivrée à la roue pour un PL électrique : 0,85 (décharge batterie : 0,95 – continu/alternatif : 0,95- moteur 0,95 – transmission PL électrique : 0,99) source T&E ;
- rendement d'un PL diesel normal (du réservoir à la roue) = le rendement d'un moteur PL diesel 2019 va varier suivant les véhicules concernés. Une fourchette de

310 http://archives.strategie.gouv.fr/cas/content/rapport-la-voiture-de-demain-carburants-et-electricite-0.html

0,39 à 0,46 pourrait être retenue. Si on retient un rendement de 39 %, on arrive à une consommation que l'on peut qualifier de classique de 33l/100 km. Les PL neufs retenus dans le cadre de l'exercice Equilibre auraient un rendement plus proche de 43 %. Dans ces conditions, en retenant un rendement moteur de 39 %, on arrive à un rendement du réservoir à la roue de 0,37 (moteur 0,39- transmission 0,95) ;

- rendement d'un diesel optimisé (du réservoir à la roue) = PL diesel 2040 : 0,437 (moteur 0,46 – transmission 0,95). A l'inverse, on peut prendre le haut de la fourchette pour le rendement du moteur à 2040 soit 0,46 ;
- rendement d'un PL au gaz compressé à 200 bars = PL gaz 2019 : 0,32 (moteur 0,34 – transmission 0,95) : rendement 33 % estimé. Là encore, le rendement des différents moteurs varie : un rendement de 0,34 conduit à un chiffre (là encore classique) de consommation de 28 kg/km ;
- rendement d'un PL au gaz optimisé = PL gaz 2040 : 0,44 (moteur 0,45 – transmission 0,95) ;
- facteur d'émission en circulation : diesel : 263,5 g CO_2e/kWh – GNV : 204,1 g CO_2e/km source IFPEN ;
- facteur d'émission amont : diesel 43,9 g CO_2e/kWh – GNV 45,3 g CO_2e/km- GNVbio 28,4 g CO_2e/kWh source IFPEN ;
- facteur d'émission amont élec 2019 55,7 g CO_2e/kWh source IFPEN (que l'on peut décomposer en : 40 g CO_2 à la production (chiffre RTE), 13 g CO_2 à l'amont, 5g CO_2 de perte) ;
- facteur d'émission amont élec 2040 : 30 g CO_2e/kWh (17 g CO_2 production (scénario Volt) (10 millions de tonnes émis à la production (589 TWh) dans le scénario Volt), 10 à l'amont, 3 en perte chiffres proportionnels) ;
- facteur d'émission amont élec 2060 : 0 g CO_2 à la production gaz renouvelable pour production élec + pas de gaz fossile ; 9 g à l'amont ; 1 en perte (8 % total précédent) soit 10 g CO_2/kWh.

On obtient pour 2019 :

	PL élec 19	PL diesel 19	PL GNV 19	PL GNV bio 19
Énergie avancement 2019 kWh/km	1,22	1,22	1,22	1,22
Rendement	0,85	0,37	0,323	0,323
Énergie nécessaire à fournir au moteur kWh/km	1,43	3,30	3,77	3,77
Énergie nécessaire à fournir par le réservoir	143kWh/100km	33 l/100km	28,6 kg/100km	28,6kg/100km

Émissions à la circulation g CO_2e/km		868 g CO_2e/km	771 g CO_2e/km	
Émissions à l'amont	80 g CO_2e/km	145 g CO_2e/km	171 g CO_2e/km	107 g CO_2e/km

Et pour 2040 :

	PL élec 40	PL diesel 40	PL GNV 40	PL GNV bio 40
Énergie avancement 2019 kWh/km	0,97	0,97	0,97	0,97
Rendement	0,85	0,44	0,43	0,43
Énergie nécessaire à fournir au moteur kWh/km	1,14	2,22	2,27	2,27
Énergie nécessaire à fournir par le réservoir	114kWh/100km	22,2l/100km	17,2 kg/100km	17,2 kg/100km
Émissions à la circulation g CO_2e/km		585 g CO_2e/km	463 g CO_2e/km	
Émissions à l'amont	34 g CO_2e/kWh	97 g CO_2e/kWh	103 g CO_2e/kWh	64 g CO_2e/kWh

À noter que ce calcul désavantage probablement le PL électrique qui récupère de l'énergie au freinage et dans les descentes (plutôt que de la perdre dans le freinage).

NB : capacité des batteries des PL électriques : dans ces conditions, l'énergie nécessaire pour qu'un camion parcoure 400 ou 800 km est donnée par le tableau suivant (en prenant en compte le fait qu'une batterie doit conserver 10 % de sa charge) :

		400 km	800 km

Conso PL électrique aérodynamique 2040	1,15 kWh/km	506 kWh (2,3 t)	1012 kWh (4,6 t)
Conso PL électrique normal 2019	1,44 kWh/km	633 kWh (2,9 t)	1167 kWh (5,8 t)

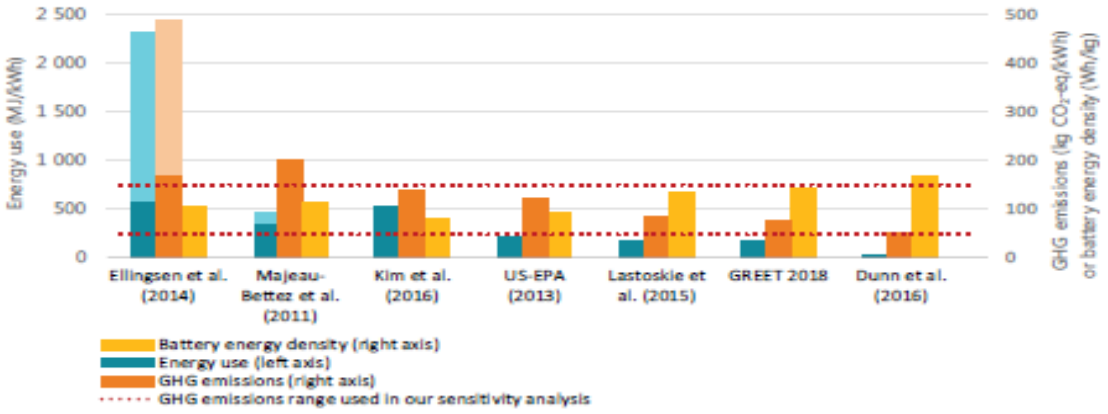
NB : le calcul ne retient pas l'hypothèse d'un PL dual-fuel GNL reposant sur un cycle diesel (allumage spontanée et non sur un cycle essence) et circulant à la fois au GNL entre – 120°C et – 145 °C (ce qui permettrait de diminuer la consommation de 15 à 25 % par rapport à celle de moteurs à gaz classiques) et au diesel pour le démarrage (ce qui ajouterait deux litres environ de diesel au kilomètre). Inconvénient le recours à un allumage par compression et à un mélange pauvre conduit à des émissions de NO_X et donc à devoir utiliser de l'*Adblue*.

4°) Émissions à la fabrication de la batterie et durée de vie

Dans ces conditions, un PL thermique émettra sur l'ensemble de sa durée de vie pour l'amont du cycle pétrolier une valeur de 750 000 km * 0,131kg = 98 tonnes de CO_2.

Ces émissions sont à comparer à celles provenant de la fabrication d'une batterie d'environ 600 kWh. La figure suivante extraite du rapport de l'AIE (EV 2019) donne les chiffres que l'on peut trouver dans différentes sources ainsi que les chiffres supérieurs et inférieurs retenus par l'AIE :

Figure 4.1. Battery energy density for lithium-ion NMC batteries, energy use and GHG emissions intensity from manufacturing by various analyses



Notes: MJ/kWh = megajoules per kilowatt-hour; kg CO_2-eq/kWh = kilogrammes of carbon-dioxide equivalent per kilowatt-hour; Wh/kg = Watt hour per kilogramme.

Sources: Dunn et al. (2016); Ellingsen et al. (2014), Kim et al. (2016); Majeau-Bettez et al. (2011); ANL (2018); US Government (US Government, 2013); (Latoskie and Dai, 2015); Personal communications with M. Wang, J. Kelly and Q. Dai of Argonne National Laboratory.

The GHG emission intensity of battery manufacturing per kWh tends to decline as assumptions on battery energy density, plant size and plant capacity utilisation increase.

La référence la plus récente date de 2018 et provient du modèle utilisé par la laboratoire d'Argonne (GREET 2018) : il retient ainsi une consommation d'énergie de 100 MJ (=28kWh) par kWh de batterie produit et des émissions de gaz à effet de serre d'environ 75 kg CO_2eq/kWh. Nous la retenons dans la mesure où ces trois paramètres vont fortement dépendre de la composition de l'électrode (le passage au NMC 811 diminue nettement la

consommation d'énergie), de la taille de l'usine, de sa capacité de production ainsi que de l'énergie utilisée (gaz naturel par exemple pour la fourniture de la chaleur). La valeur fournie par le laboratoire d'Argonne (correspondant à l'état de l'art actuel) conduirait pour la fabrication d'une batterie d'un PL de 600 kWh l'émission d'environ 45 tonnes de CO_2. Elle va bien entendu dépendre également très fortement du contenu carbone de l'électricité utilisée.

Dans son texte[311], le *Research Center for Energy Economics* allemand donne les valeurs suivantes : 62 kg CO_2/kWh de batterie produite (pour une électricité entièrement décarbonée et une énergie de 50 kWh pour produire un kWh de batterie) et 87 kg CO_2/kWh de batterie produite (pour le mix électrique allemand avec une énergie de 50 kWh pour produire un kWh de batterie).

L'IFPEN indique cependant qu'en 2050 des publications récentes[312] montreraient que les émissions tendraient vers une valeur de 60-70 kg CO_2e/kWh avec la technologie Lithium-ion, et qu'elles pourrait basculer vers 20 kg CO_2e/kWh de batterie en cas de rupture technologique.

Dans ces conditions, nous retiendrions :

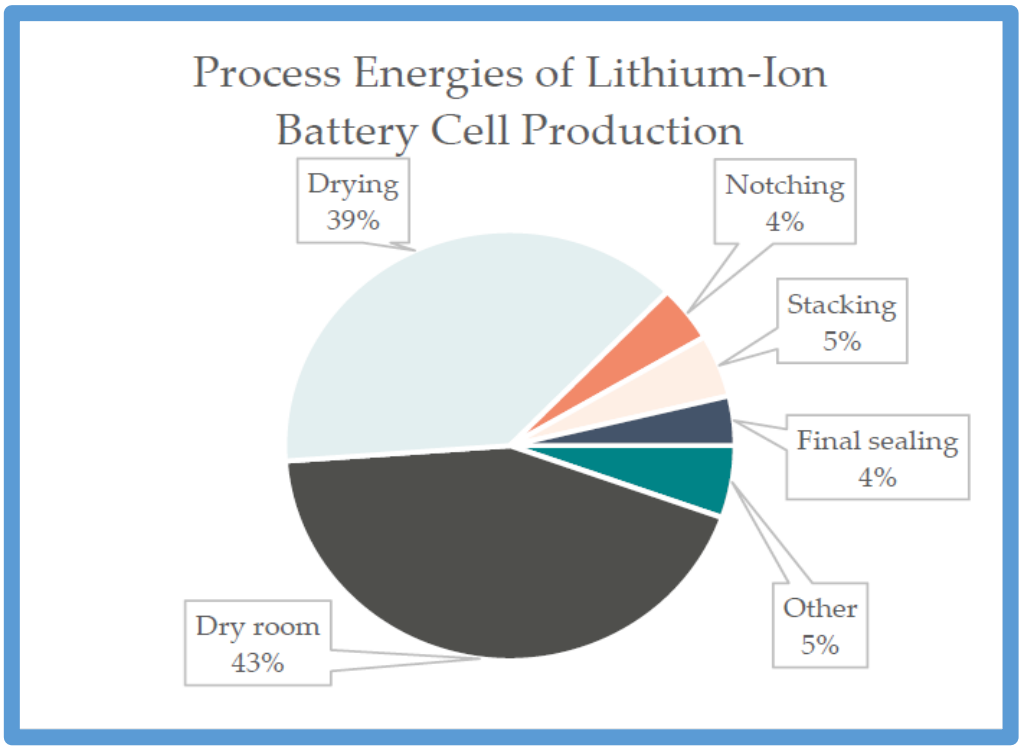
- une valeur actuelle 2019 de 75 kg de CO_2/kWh ;
- une valeur à 2040 et 2060 qui pourrait être de 62 kg CO_2/kWh. Cette valeur dépendra néanmoins fortement de la composition chimique utilisée pour les batteries à cette époque.

NB : Notons enfin que le graphique suivant provenant du *Swedish environmental research laboratory*[313] montre enfin que les deux principaux facteurs consommateurs d'énergie dans la fabrication des cellules de batterie devraient diminuer fortement dans le futur : des batteries utilisant un électrolyse solide ne nécessiteraient pas en effet le poste de séchage de l'électrolyte liquide (*drying* 39 %) et l'augmentation de la taille des usines devrait améliorer notablement le rendement de l'énergie consacrée au maintien des conditions d'une salle blanche (*dry room* 43 %).

[311] https://www.ffe.de/attachments/article/856/Carbon_footprint_EV_FfE.pdf

[312] *Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA, Final report,* 2020-07-01, Corporate author(s): Directorate-General for Climate Action (European Commission) , Ricardo Energy & Environment, Personal author(s): Morgan-Price, Samantha ; Jöhrens, Julius ; Haye, Sebastien ; Helms, Hinrich ; Amaral, Sofia ; https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/1f494180-bc0e-11ea-811c-01aa75ed71a1

[313] https://www.ivl.se/english/startpage/top-menu/pressroom/press-releases/press-releases---arkiv/2019-12-04-new-report-on-climate-impact-of-electric-car-batteries.html



Durée de vie des batteries :

Le livre blanc de novembre 2019 rédigé par la filière automobile sur les véhicules industriels électriques donne les indications suivantes :

« Pour des batteries à recharge au dépôt, ou au centre logistique, la durée de vie d'un pack batteries s'exprime en nombre de cycles de charge et de recharge, un cycle représentant une recharge complète, soit 80 % de la capacité totale du pack batteries, sachant qu'il est usuel de considérer un nombre de jours d'utilisation de 300 jours par an pour un véhicule industriel urbain (camion et bus).

Le remplacement du pack batteries après 2 500 cycles (soit environ 7 à 8 ans) est désormais confirmé, et les 3 000 cycles ne sont pas un objectif irréaliste et doivent constituer le référentiel des années à venir. Certains constructeurs s'engagent dès à présent sur cette durée de vie avec des résultats proches des performances initiales ».

Si nous supposons que la longueur parcourue par le PL durant sa durée de vie soit de 750 000 km, ceci représente 1875 cycles de 400 km.

Nous pouvons donc supposer qu'une seule batterie permette d'accompagner le PL sur toute sa durée de vie. Néanmoins, un certain nombre de recharges auront lieu en 2C, ce qui peut conduire à un vieillissement plus rapide. Une hypothèse plus pessimiste conduirait donc à retenir deux batteries pour la durée de vie du PL.

5°) Émissions liées aux infrastructures : approche simplifiée

Le calcul ci-dessous constitue une « première » approche des émissions attribuables à la circulation des poids lourds. Il s'appuie sur le calcul des émissions d'un contournement

autoroutier de 15 km sur une période de vingt ans. Conformément au graphique ci-après[314], on arrive à un ratio respectivement de 6 % et de 0,5 % entre les émissions de la circulation sur vingt ans et les émissions respectivement de la construction et de l'entretien. Un premier raisonnement conduirait dès lors à dire qu'aux émissions en circulation d'un PL actuel, il faut ajouter 6,7 %/0,933, soit 7,2 % d'émissions liés à la construction.

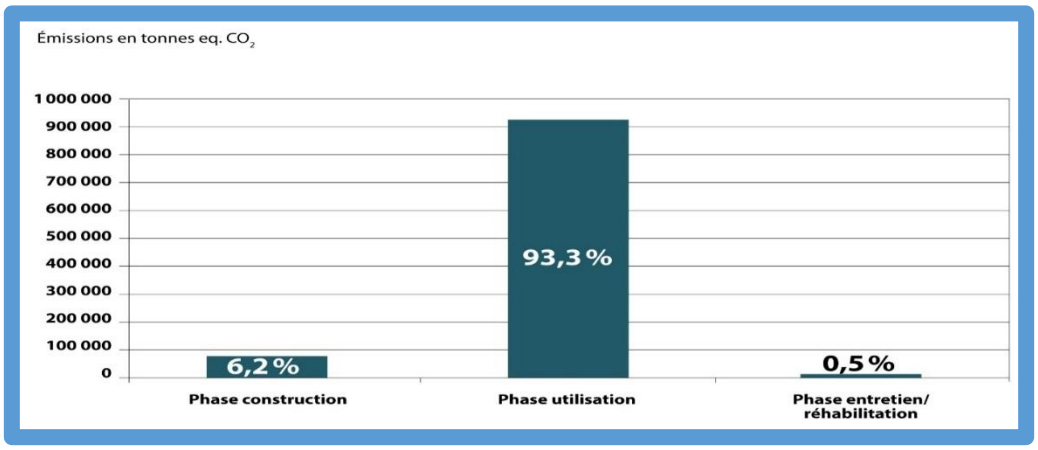


Figure 35 : Émissions de GES c'un contournement autoroutier de 15 kilomètres- synthèse par phase du projet
Source : CETE 2009

Avant d'appliquer ce ratio aux émissions d'un PL, il faut néanmoins tenir compte du fait que :

- les émissions liées à la fabrication des routes et autoroutes ne doivent être prises en compte que pour la circulation des poids lourds sur des routes et autoroutes construites depuis moins de vingt ans, ce qui représente au plus 20 % des kilomètres parcourus (en prenant comme hypothèse (NB : le réseau autoroutier national a augmenté d'environ 10 % sur dix ans de 2007 à 2017) ;
- les PL, qui représentent environ 28 % des émissions de la circulation, sont nettement plus destructeurs de la route que les VL : nous prenons comme hypothèse simplificatrice qu'ils sont responsables de la totalité des émissions liées à la fabrication et à l'entretien/réhabilitation.

Pour un PL thermique 2019, il faut donc ajouter aux émissions à la circulation un terme égal à 0,5/0,28 % des émissions pour la maintenance et un terme égal à (0,068*0,2) : 0,28 pour la fabrication (terme concernant 20 % des kilomètres parcourus), soit un terme égal à 6,6 %.

Par le même raisonnement, les émissions à ajouter à celles en circulation des VL pour tenir compte de la réalisation et de l'entretien des infrastructures sont nulles.

À 2040 ou 2060, nous prenons comme hypothèse que les émissions à la fabrication et à l'entretien auront été divisées par deux.

Ceci suppose dans les scénarios les plus décarbonés que des politiques soient mises en œuvre pour décarboner la maintenance et la construction des infrastructures, grâce à des technologies de transport décarbonées disponibles et à un effort de décarbonation de l'extraction, la transformation, et la déconstructionou recyclage des matériaux utilisés,

[314] : Émissions de GES d'un contournement autoroutier de 15 kilomètres – synthèse par phase du projet (Source : CETE, 2009) https://www.mamunicipaliteefficace.ca/205-efficacite-energetique-ges-empreinte-carbone-dune-infrastructure-routiere.html

y compris s'ils sont importés

Cela suppose également que, dans ces scénarios, soit mise en œuvre une politique d'établissement de bilans en ACV des infrastructures, au cas par cas pour les grands projets, ou sous forme d'analyses de programmes, en fonction des principales variables explicatives, notamment le niveau de trafic.

Le lecteur trouvera plus de précisions dans l'étude du Cete correspondante ainsi que dans les travaux (à paraître) de Fabien Leurent et Enguerand Prie sur la place des infrastructures dans le bilan carbone des modes de transports terrestres (pour le conseil scientifique de la société du Grand Paris).

Annexe 8 : Glossaire des sigles et acronymes

Acronyme	Signification
AAP	*Appel à projets*
AIE	*Agence internationale de l'énergie*
ACV	*Analyse du cycle de vie*
AMI	*Appel à manifestation d'intérêt*
AVERE	*Association nationale pour le développement de la mobilité électrique*
BNEF	*Acronyme de l'anglais « Bloomberg New Energy Finance »*
CCNR	*Commission centrale pour la navigation du Rhin*
CCNUCC	*Convention Cadre des Nations Unies sur les Changements Climatiques (UNFCC)*
CCTN	*Commission des comptes des transports de la nation*
CEA	*Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives*
CORSIA	*Acronyme anglais pour Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation*
DGEC	*Direction générale de l'énergie et du climat*
EEDI	*Acronyme de l'anglais « Energy Efficiency Design Index »*
EEXI	*Acronyme de l'anglais « Energy Efficiency eXisting ship Index »*
FIT	*Forum international des transports*
GES	*Gaz à effet de serre*
GNL	*Gaz naturel liquéfié*
IFPEN	*IFP Energies nouvelles*
MTE/MTES	*Ministre de la transition écologique/ Ministre de la transition écologique et solidaire*
NCA	*Oxydes d'aluminium lithium-nickel-cobalt*
NMC	*Oxyde de lithium-nickel-manganèse-cobalt*
OMI	*Organisation maritime internationale*
PAC	*Pile à combustible*
PFA	*Plateforme filière automobile et mobilités*
PTAC	*Poids total autorisé en charge*
RTE	*Réseau de transport de l'électricité*
SDES	*Service de la donnée et des études statistique du ministère de la transition écologique*
SEEMP	*Acronyme de l'anglais « Ship Energy Efficiency Management Plan »*

Acronyme	Signification
SNBC	*Stratégie nationale bas-carbone*
TCO	*Acronyme de l'anglais « Total cost of ownership »*
T&E	*Acronyme de l'anglais « Transport & Environnement »*
TNO	*Acronyme pour Netherlands Organisation for applied scientific research*
TRM	*Transport routier de marchandises*
UMAS	*Acronyme de l'anglais « University Maritime Advisory Services »*
VU	*Véhicule utilitaire*
VUL	*Véhicule utilitaire léger*
XtL	*Le diesel XTL est un carburant diesel dérivé du pétrole, réalisé soit à partir de gaz naturel (on liquéfie le gaz), soit de biomasse (par thermochimie), ou soit de l'hydrogénation d'huiles végétales.*

Site internet du CGEDD : « Les derniers rapports »

Site internet de France Stratégie : « Publications »