

Comment décarboner le transport routier en France ?

Le transport routier représente à lui seul 29 % des émissions nationales de gaz à effet de serre. Contrairement au résidentiel ou à l'industrie, ses émissions n'ont pas diminué depuis 1990 : le nombre de kilomètres parcourus continue de croître et les véhicules utilisés fonctionnent très majoritairement par la combustion de carburants pétroliers. Afin de limiter le réchauffement climatique, il est donc nécessaire d'accélérer la décarbonation du transport routier, en utilisant au mieux les moyens techniques et l'énergie dont nous disposons. C'est le sujet que nous avons étudié dans le cadre d'un mémoire de troisième année de formation au Corps des mines, publié par la Fabrique de l'industrie¹. Si le report modal, l'augmentation du taux d'occupation des véhicules et les choix logistiques ou d'aménagement du territoire sont des leviers importants à actionner, il est probable que le transport routier continuera à représenter une part prépondérante du transport terrestre dans les années à venir. C'est pourquoi nous nous sommes concentrés sur les perspectives d'évolution du parc de véhicules et des infrastructures associées, en insistant sur l'intérêt du moteur électrique et en nous intéressant au domaine de pertinence des batteries et des solutions d'électrification des autoroutes.

Le rôle du moteur électrique

Continuer à utiliser des moteurs thermiques supposerait de refermer le cycle du carbone par la récupération du CO₂ atmosphérique, soit par des technologies de capture directe, soit en utilisant la biomasse comme carburant. Cependant, le coût énergétique du stockage de CO₂ atmosphérique est très élevé – environ 0,7 kilowattheure (kWh) d'énergie pour capter le CO₂ émis par la combustion de 1 kWh d'hydrocarbure – et les quantités de biocarburants qui pourraient être synthétisés sont limitées, si l'on ne souhaite pas concurrencer la production agricole ni réduire les puits de carbone.



L'utilisation généralisée de véhicules dotés de moteurs thermiques est donc incompatible avec la neutralité carbone du secteur routier. Par conséquent, il faudra que les véhicules de demain – aussi bien les véhicules légers que les poids lourds – soient équipés de moteurs électriques et alimentés par une énergie provenant de sources primaires décarbonées telles que le solaire, l'éolien, l'hydraulique et le nucléaire.

Le passage au moteur électrique suppose cependant de trouver une façon efficace de l'alimenter en énergie. En effet, si l'état liquide et la densité énergétique exceptionnelle des carburants fossiles rendent très facile l'alimentation du véhicule pour des longues distances par le simple stockage dans un réservoir à pression ambiante, cela n'est pas le cas des autres vecteurs énergétiques. Il faut alors déterminer la façon dont l'énergie est stockée à bord des véhicules et la quantité qui est nécessaire pour répondre au besoin.

L'intérêt de la batterie pour les véhicules légers

Les progrès récents des batteries, aussi bien en matière de densité que de coût – il a été divisé par sept en dix ans – en font actuellement une solution privilégiée pour les véhicules légers. Par rapport à d'autres solutions comme l'hydrogène décarboné, les

batteries permettent d'atteindre un meilleur rendement global et donc de réduire le besoin en énergie primaire. En effet, le processus consistant à produire de l'hydrogène par électrolyse, puis à l'utiliser pour alimenter une pile à combustible a un rendement de l'ordre de 25 %, alors qu'il est d'au moins 70 % pour une batterie². Cette contrainte de rendement incite à privilégier l'utilisation d'hydrogène décarboné pour des besoins hors mobilité (utilisations industrielles en substitution à l'hydrogène obtenu par vaporeformage, utilisations permettant de récupérer les pertes thermiques, par exemple pour le chauffage résidentiel) ou pour des utilisations de transport avec peu d'alternatives disposant d'un meilleur rendement (transport maritime longue distance, lignes de train peu fréquentées, poids lourds en dehors des grands axes). Sans fermer la porte à d'éventuelles solutions complémentaires, la batterie présente donc de réels atouts pour les véhicules légers.

Les analyses en cycle de vie avec le mix électrique français confirment l'intérêt des véhicules électriques à batterie. Bien que les valeurs varient selon les sources, ils conduiraient selon T&E³ à des émissions de CO₂ quatre fois moindres sur leur durée de vie que pour un véhicule à essence équivalent.

Si le véhicule électrique est plus coûteux que son homologue thermique, cela est principalement dû à la batterie. Pour elle seule, il faut en effet compter au moins 3 000 euros par tranche de 100 kilomètres d'autonomie. À l'usage, en revanche, le véhicule électrique coûte moins cher en carburant : environ 3 centimes d'euros par kilomètre – avec une charge lente à domicile – contre 10 centimes d'euros pour un véhicule thermique. Cette différence de coût, taxes incluses, est essentiellement due au rendement énergétique puisque le coût du kWh électrique est assez proche de celui du kWh thermique.

La différence de coût entre les carburants fossiles et l'électricité compense donc en partie le surcoût à l'achat du véhicule. D'après l'UFC-Que Choisir⁴, le coût total de détention (en prenant en compte le bonus écologique) serait même plus faible pour une petite citadine électrique que pour un véhicule thermique de même segment.

Le coût des batteries – aussi bien environnemental (utilisation de ressources et d'énergie pour la fabrication) qu'économique (prix, impact du poids sur le dimensionnement du véhicule) – étant proportionnel à leur capacité, les véhicules électriques à batterie d'autonomie limitée sont donc a priori plus accessibles et pertinents. La question qui se pose est alors de savoir si un véhicule électrique d'autonomie limitée permet de répondre de façon satisfaisante aux besoins de l'utilisateur.

Les véhicules légers majoritairement utilisés pour des distances limitées

Des analyses de distribution des distances parcourues suggèrent que moins de 5 % des jours d'utilisation d'une voiture correspondent à un besoin d'autonomie supérieur à 150 kilomètres et que les trajets de moins de 80 kilomètres (qualifiés de *mobilité locale*) représentent environ 70 % des kilomètres parcourus par les véhicules particuliers et environ 80 % de leurs émissions de CO₂. On comprend dès lors que l'utilisation de véhicules électriques d'autonomie limitée permet de réduire de façon significative les émissions de CO₂ des véhicules particuliers, sous réserve qu'il existe des solutions complémentaires pour les trajets longs occasionnels.

Dès aujourd'hui, la conservation d'un véhicule thermique pour les longs trajets du foyer et la conversion du ou des éventuels autres véhicules à l'électrique dans les foyers multimotorisés permettraient d'électrifier au moins 30 % du parc des véhicules détenus par les foyers. Ce gisement peut contribuer au dévelop-

pement du parc électrique et à l'accélération, dans les prochaines années, du développement de l'infrastructure de recharge privée et publique, qui reste une condition *sine qua non* à l'adoption du véhicule électrique.

Sans être tout à fait comparable, le profil de déplacement des véhicules utilitaires légers est également bien en phase avec la batterie d'autonomie limitée : les parcours quotidiens sont majoritairement inférieurs à 150 kilomètres et ces véhicules ont des kilométrages annuels plus élevés, ce qui permet d'amortir plus rapidement le surcoût de la batterie. La Poste fait figure de précurseur dans le domaine, en étant équipée de 10 000 véhicules électriques, soit plus de 20 % de son parc.

Les alternatives pour la longue distance

Pourtant, le besoin en trajets longs persistera pour les particuliers et il faudra donc également trouver des alternatives aux véhicules thermiques utilisés à cet effet. Sans étudier les éventuelles ruptures technologiques susceptibles de survenir (progrès dans les batteries ou les technologies à l'hydrogène), on peut déjà citer aujourd'hui plusieurs approches prometteuses.

D'une part, il est important de permettre aux véhicules électriques de moyenne autonomie qui seront produits dans les années à venir de pouvoir accroître à terme leur domaine d'utilisation. Cela peut notamment se traduire par l'utilisation de prolongateurs externes pour les longs trajets, à l'image de la solution proposée par l'entreprise EP Tender⁴. Le principe consiste à raccorder à l'arrière du véhicule une remorque de petite taille, dotée d'une batterie qui permet d'accroître ponctuellement l'autonomie effective du véhicule.

Sous réserve de standardiser l'architecture électrique du véhicule et d'assurer l'homologation au tractage, le développement progressif de plateformes pour la récupération ou l'échange de prolongateurs permettrait ainsi de valoriser le parc à venir de véhicules électriques de moyenne autonomie, tout en limitant l'immobilisation de matière. Une simulation prenant en compte les départs en congés annuels suggère en effet qu'un prolongateur suffit pour répondre aux besoins de 15 à 20 véhicules. L'idée sous-jacente – que l'on retrouve aussi dans le principe du *rétrofit* (pour convertir un véhicule hybride en électrique ou augmenter l'autonomie d'un véhicule) – est de concevoir des véhicules qui seront capables de répondre à un besoin plus large de mobilité, sans avoir besoin d'être renouvelés. À cet égard, l'utilisation de prolongateurs permet de plus une forme de neutralité technologique, puisque la forme de stockage énergétique devient indépendante du véhicule.

D'autre part, il s'agit de remettre progressivement en cause le modèle du véhicule multi-usages possédé par l'utilisateur. Avec ce prérequis, il devient possible de mutualiser davantage les véhicules et de développer la multimodalité avec le train, qui peut être couplée avec des locations facilitées de véhicules pour les déplacements locaux. Les plateformes de location de véhicules entre particuliers (OuiCar, Getaround) représentent à cet égard un levier complémentaire des offres traditionnelles.

L'intérêt d'une stratégie de ce type est qu'elle permet d'amorcer la transformation du parc de véhicules légers d'ici 2030 avec un impact progressif sur le confort d'utilisation, laissant ainsi le temps de faire évoluer le rapport à la mobilité.

L'alimentation en électricité des poids lourds sur les grands axes

L'approche que nous venons de décrire n'est cependant pas transposable aux poids lourds, qui représentent tout de même plus de 20 % des émissions de CO₂ du transport routier.

« *L'électrification des autoroutes permettrait [le] platooning[,] qui consiste à faire rouler les poids lourds en pelotons [...], ce qui contribue à réduire la consommation énergétique et la congestion.* »



Si le report modal vers le fret ferroviaire présente un réel intérêt, il ne pourra pas suffire à décarboner le transport de marchandises. En effet, bien que le train soit pertinent pour des matériaux denses (céréales, minerais, chimie) transportés sur des distances importantes, il ne jouit pas de la flexibilité de desserte et d'organisation des poids lourds et ne peut, à ce titre, être une solution de remplacement pour l'intégralité du transport terrestre de marchandises, qui transite aujourd'hui à 90% (en tonnes par kilomètre) par la route. Il s'agit donc d'étudier les technologies permettant de transporter des marchandises par la route avec des émissions moindres.

Les usages des poids lourds sont différents de ceux des véhicules légers, notamment en ce qui concerne le besoin d'autonomie et les distances parcourues. Si le besoin de les équiper de moteurs électriques reste valide, il n'y a à ce jour pas de réel consensus sur la manière de les alimenter en électricité. Quoi qu'il en soit, il est essentiel de minimiser la quantité d'énergie électrique à fournir pour déplacer ces marchandises. En effet, dans un contexte où la décarbonation de nombreux secteurs (résidentiel, transport...) passe par l'électrification et compte tenu des difficultés posées par l'accroissement de la production électrique décarbonée, la sobriété énergétique est un impératif.

L'hydrogène présente l'inconvénient du rendement médiocre et la batterie des problématiques de coût si le besoin d'autonomie est élevé. L'alimentation électrique au roulage est par conséquent à privilégier lorsque celle-ci est possible.

Intérêt technique de l'électrification

C'est ce que proposent les solutions d'électrification des routes, qui peuvent être classées en trois grandes catégories :

- **Les caténaires**, qui alimentent le poids lourd par un pantographe. Les briques technologiques nécessaires sont déjà bien connues par le monde du ferroviaire et les conditions d'installation et la maintenance ne portent pas atteinte à l'intégrité de la chaussée.
- **L'alimentation conductive par le sol**, qui fournit de l'électricité au poids lourd par un pantographe inversé. Cette solution est a priori compatible avec un nombre plus important de véhicules.

• **L'induction**, qui ne nécessite pas de contact physique. Malgré la polyvalence qu'elle permet, elle est toutefois plus coûteuse que les solutions conductives et les puissances électriques qu'elle est capable de transférer sont encore trop limitées pour les poids lourds.

Peu connues du grand public, ces technologies ont déjà conduit à la réalisation de plusieurs expérimentations⁶. La solution par caténaires développée par Siemens et appelée *eHighway* fait notamment l'objet de deux projets pilotes de 5 kilomètres construits en Allemagne, en 2018.

Pour qu'une solution d'électrification soit pertinente, son taux d'utilisation doit être suffisant pour permettre un amortissement de l'infrastructure. C'est pourquoi l'équipement doit avoir lieu en priorité sur les axes les plus fréquentés tels que les autoroutes et routes à caractéristiques autoroutières. D'après l'Union Routière de France⁶, elles représentent 1,4% du réseau routier et concentrent 66% des kilomètres parcourus par les camions. En dehors de ces axes, les poids lourds devront utiliser leur stockage propre d'énergie.

Pour accompagner le développement de l'infrastructure, des poids lourds hybrides, dotés d'un moteur électrique et d'une petite batterie tampon, constituent une solution transitoire pertinente. En raison de leur intensité d'utilisation, le renouvellement des tracteurs routiers est plus fréquent que celui des véhicules légers. La transformation du parc pourrait donc accompagner le développement de l'infrastructure d'électrification.

Cette approche consistant à adopter des solutions dédiées et plus efficaces pour traiter des flux importants a souvent guidé les choix industriels ou d'infrastructures depuis la révolution industrielle. On notera, par exemple, que cela a été le cas pour le train, pour lequel les lignes très parcourues ont été progressivement électrifiées durant le XX^e siècle, jusqu'à atteindre 55% d'électrification des lignes aujourd'hui.

Quelques ordres de grandeur économiques

Pour fixer les idées, nous proposons un modèle économique très simplifié. Le coût estimé d'installation de la solution

d'alimentation par caténares est de l'ordre de 2 millions d'euros par kilomètre, la durée d'infrastructure de vingt ans, le coût de maintenance de 2% par an. Le tiers le plus fréquenté du réseau autoroutier concédé – 3 000 kilomètres environ – voit passer environ 8 000 poids lourds par jour⁸.

Si l'on met de côté le coût du capital et que l'on considère que l'infrastructure est utilisée au maximum de son potentiel (hypothèses optimistes), on en déduit une redevance d'infrastructure de 5 euros pour 100 kilomètres pour les poids lourds qui l'utilisent. Cette redevance est compensée par la différence de coût entre l'électricité et le diesel, qui conduit à une économie d'environ 13 euros pour 100 kilomètres. Il en résulte une économie nette qui peut contribuer au financement du surcoût d'équipement d'un tracteur à pantographe par rapport à un tracteur thermique.

Un tel déploiement sur le cœur du réseau (3 000 kilomètres, 8 000 poids lourds par jour), à l'horizon 2035, représenterait un coût d'investissement total de l'ordre de 6 milliards d'euros sur quinze ans, soit environ 400 millions d'euros par an. À titre de comparaison, les charges de service public de l'électricité liées au développement des énergies renouvelables s'élèvent à près de 5 milliards d'euros par an.

À la lumière de cette analyse, on comprend l'intérêt de l'électrification des grands axes autoroutiers pour réduire efficacement les émissions de CO₂ du transport routier de marchandises.

Synergies et points de vigilance

Outre ses effets directs, l'électrification des autoroutes permettrait d'accompagner d'autres tendances utiles pour la décarbonation :

- un intérêt accru pour les poids lourds hybrides;
- la mise en place d'une alimentation électrique haute puissance sur les grands axes, qui pourrait à terme être valorisée pour les véhicules légers (recharge statique ou dynamique) qui y circulent aussi;
- la synergie avec les progrès de la conduite autonome, par une combinaison entre électrification et *platooning* (pratique qui consiste à faire rouler les poids lourds en pelotons, les uns derrière les autres à une faible distance, ce qui contribue à réduire la consommation énergétique et la congestion).

Cette électrification des autoroutes nécessite la mise en place d'un standard partagé entre les différents pays européens et la coordination de leurs investissements, car une part importante des poids lourds traverse les frontières. Elle suppose, en outre, une adaptation des schémas logistiques pour optimiser le taux d'utilisation de l'infrastructure et la prise en compte des besoins des différentes parties prenantes (transporteurs, concessionnaires autoroutiers, électriciens et constructeurs) avant le déclenchement des investissements.

Un double défi

Pour engager efficacement la décarbonation des transports routiers en tenant compte des contraintes économiques, écologiques et sociales, il paraît donc nécessaire de généraliser le moteur électrique comme moyen de propulsion pour ces transports. L'alimentation de ce moteur en électricité peut avoir lieu dès aujourd'hui par des batteries embarquées d'autonomie limitée, couplées au déploiement progressif d'infrastructures permettant d'accroître l'autonomie pour la longue distance tels que les caténares, les prolongateurs d'autonomie (batterie ou hydrogène) et l'infrastructure de recharge.

Une telle approche, qui se concentre sur le volet technique avec la question de la motorisation, devra également être accompagnée par la mise en œuvre d'autres leviers tels que l'augmentation du taux d'occupation des véhicules, le report modal, les choix d'aménagement du territoire et la maîtrise du besoin en mobilité.

Enfin, son succès nécessite de relever les deux défis suivants :

- la capacité des citoyens et des acteurs économiques à s'adapter, en acceptant d'utiliser des outils qui ne sont pas dimensionnés uniquement par le pic d'utilisation comme c'est le cas aujourd'hui, à savoir des véhicules particuliers à 5 places et 800 kilomètres d'autonomie, la possibilité de faire le plein en énergie en trois minutes, un mode d'alimentation énergétique permettant l'accès à l'intégralité des routes françaises;
- la capacité de l'État français à établir un cadre stratégique stable rendant possibles les investissements d'infrastructure nécessaires, notamment pour les bornes de recharge et pour l'électrification des autoroutes, en concertation avec ses homologues européens.

En serons-nous capables?

Samuel Delcourt et Étienne Perrot, ingénieurs des mines

NOTES

1. S. Delcourt et E. Perrot, *Comment décarboner le transport routier en France?*, Les Docs de La Fabrique, Presses des Mines, avril 2021 – <https://www.pressesdesmines.com/produit/comment-decarboner-le-transport-routier-en-france/>.
2. Source : https://www.ademe.fr/sites/default/files/assets/documents/rendement-chaine-h2_fiche-technique-02-2020.pdf
3. « How clean are electric cars? T&E's analysis of electric car lifecycle CO₂ emissions », T&E, avril 2020.
4. « Véhicules à faibles émissions : l'intérêt économique des consommateurs rejoint enfin l'intérêt environnemental », UFC-Que Choisir, octobre 2018.
5. Source : <https://eptender.com/>
6. « Electric Road Systems: A solution for the future ? », PIARC, 2018.
7. Source : <https://www.unionroutiere.fr/wp-content/uploads/2019/11/Faits-et-Chiffres-2019-Complet.pdf>
8. A. Schuller, J.-M. Jancovici, A. Schuller et S. Borie, « L' autoroute électrique : une innovation pour réduire les émissions de CO₂ du transport de marchandises », Carbone 4 (carbone4.com), février 2017.

La Gazette de la société et des Techniques

La Gazette de la Société et des Techniques a pour ambition de faire connaître des travaux qui peuvent éclairer l'opinion, sans prendre parti dans les débats politiques et sans être l'expression d'un point de vue officiel. Elle est diffusée par abonnements gratuits. Vous pouvez en demander des exemplaires ou suggérer des noms de personnes que vous estimez bon d'abonner.

Vous pouvez consulter tous les numéros sur le web à l'adresse :
<http://www.anales.org/gazette.html>

RENSEIGNEMENTS ADMINISTRATIFS

Dépôt légal février 2021

La Gazette de la Société et des Techniques

est éditée par les *Annales des mines*
120, rue de Bercy – télédéc 797 – 75012 Paris
<http://www.anales.org/gazette.html>
Tél. : 01 42 79 40 84 – Mél. : michel.berry@ecole.org
N° ISSN 1621-2231

Directeur de la publication : François Valérian

Rédacteur en chef : Michel Berry

Illustrations : Véronique Deiss

Réalisation : École de Paris du management

Impression : Graph'Imprim

