



Joël FORTHOFFER

02/07/23

Note de travail sur les mobilités

Décarboner les transports

Les projets énergétiques en cours

Cette note fait le point sur la question des mobilités face à l'urgence climatique. Le secteur des transports est un gros consommateur d'énergie et de surcroît, souvent d'énergie fossile, responsable de l'émission de gaz à effet de serre. La demande de transport est croissante, particulièrement les transports publics dont on souhaite qu'ils se substituent le plus possible aux véhicules individuels - sources d'encombrement et de pollution. Par ailleurs les transports de marchandises sont essentiels à l'économie, et la réindustrialisation qui est désormais un objectif stratégique de l'Europe, ne peut que renforcer ce besoin. Pourtant le train peine à remplacer le camion. Que peut-on espérer des technologies en développement pour aider à résoudre un tel défi dans les années à venir?

Le secteur du transport doit relever plusieurs défis. Il doit répondre à la demande croissante de mobilité et limiter l'impact environnemental. C'est le premier consommateur d'énergie en France. Il voit celle-ci augmenter de 32 % entre 2008 et 2019. Cette hausse s'explique par l'augmentation continue des transports de personnes et de marchandises.

Il est le premier émetteur de gaz à effet de serre. Responsable de 39 % des émissions en France, il contribue donc massivement réchauffement climatique.

L'objectif de neutralité carbone d'ici 2050, qui a été fixé dans le plan climat français présenté en 2017, vise à s'aligner sur une trajectoire mondiale, limitant le réchauffement climatique à +2°C au maximum. Cet objectif ambitieux implique des efforts plus importants pour le secteur des transports que pour les autres. A la place d'une baisse des émissions d'au moins 70 % entre 2013 et 2050, le secteur doit s'approcher d'une décarbonation complète.

Trois conjonctures rendent urgente et nécessaire la transition énergétique du secteur des transports : le changement climatique, la pollution atmosphérique et la dépendance au pétrole. Plusieurs leviers de décarbonation peuvent être actionnés, à savoir : la modération de la demande de transport, le report modal (favoriser l'intermodalité ou la multimodalité), l'optimisation du remplissage des véhicules et l'efficacité énergétique des véhicules.

La fin des moteurs diesel ?

Aujourd'hui, les véhicules thermiques sont responsables de deux types bien distincts d'émissions dans l'atmosphère : les émissions de gaz à effet de serre - GES - (et notamment le dioxyde de carbone ou CO₂, émis par la combustion de carburants) qui contribuent au dérèglement climatique de la planète ; et les émissions de gaz et particules nocifs pour la santé. Suivant une approche de développement durable, le transport routier est engagé depuis plusieurs années dans des actions visant à réduire tant les émissions polluantes des véhicules (norme Euro), que les émissions de gaz à effet de serre.

Au fil des années, l'évolution des normes a entraîné une réduction de la pollution (cf. tableau ci-dessous) :

Normes	Textes de référence (directives)	Date de mise en application (tous types)	NOx (g/kWh)	CO (g/kWh)	HC (g/kWh)	Particules (g/kWh)
Euro 0	88/77	01-10-1990	14,4	11,2	2,4	-
Euro I	91/542 (A)	01-10-1993	9	4,9	1,23	0,36
Euro II	91/542 (B)	01-10-1996	7	4	1,1	0,15
Euro III	1999/96	01-10-2001	5	2,1	0,66	0,13
Euro IV	1999/96	01-10-2006	3,5	1,5	0,46	0,02
Euro V	1999/96	01-10-2009	2	1,5	0,46	0,02
Euro VI	Règlement (CE) n° 595/2009	31-12-2013	0,4	1,5	0,13	0,01

Source : Ministère de la transition écologique, mars 2017

- En 23 ans (entre Euro 0 et Euro VI), les NOx auront été divisés par 36, les HC par 18 et les particules par 35.
- La norme Euro VI, actuellement applicable, permet de réduire, de façon significative, les plafonds des émissions polluantes de poids lourds. Ainsi, les limites fixées pour les oxydes d'azote et les particules, ont toutes deux été diminuées de 92 % entre 2001 et 2014.
- Par rapport à la norme Euro V, la norme Euro VI impose une réduction supplémentaire des valeurs limites de 80 % pour les oxydes d'azote, de 50 % pour les particules et de plus de 70 % pour les hydrocarbures.
- Les recherches sur les normes Euro ont permis de développer des progrès technologiques sur les moteurs en diminuant la consommation moyenne en carburant des véhicules.
- Ainsi, grâce au durcissement des normes, les quantités globales de polluants émises par le parc ont été considérablement réduites.

En 2050, le secteur des transports ne devrait plus consommer de carburants pétroliers, hormis pour la moitié du mix énergétique du transport aérien et une partie du transport maritime. L'ensemble des transports terrestres en France serait alors électrifié ou fonctionnerait à partir de carburants issus de la biomasse, un pari difficile à réussir l'espace de trois décennies, alors que plus de 90 % de l'énergie des transports est encore issue du pétrole à ce jour.

Pour une alternative, différentes solutions sont envisageables pour la décarbonation des transports routier et ferroviaire : les biocarburants (biogaz et biodiesel) ; l'hydrogène, l'électrique-hydrogène (piles à combustible); l'électrique batterie ou l'électrique de type ferroviaire.

Quelles sont les principales caractéristiques des sources d'énergies alternatives au pétrole ?

Les **biocarburants** pourraient répondre aux besoins, mais ils comportent plusieurs risques majeurs. Leur disponibilité n'est pas assurée, aussi bien vis-à-vis du gisement dont l'estimation est difficile à évaluer, que de la concurrence entre usages : chauffage, production électrique et industrie pour le biogaz, aviation pour les biocarburants. Par ailleurs, le biogaz (biométhane) présente d'autres inconvénients, son pouvoir de réchauffement global de l'atmosphère est 84 fois supérieur à celui du CO₂ lors des inévitables fuites inhérentes aux processus de production, de stockage et de distribution existantes.

L'**hydrogène** ou l'électrique-hydrogène nécessitent trois fois plus d'énergie électrique sur l'ensemble du cycle de production-consommation que la solution électrique-batterie lorsque l'hydrogène vert est produit par électrolyse de l'eau (permettant le stockage de l'électricité produite par éolienne ou panneau solaire). Les autres procédés de production d'hydrogène (vaporeformage de méthane avec capture et stockage du CO₂, thermolyse de biomasse) posent encore des questions non résolues de capacités de stockage du CO₂ et de disponibilité de la biomasse. Cette solution présente de fortes incertitudes tant sur les coûts de production et distribution de l'hydrogène que sur les coûts des poids lourds électriques à hydrogène, ce qui semble faire de la solution électrique-hydrogène une solution insuffisamment mature pour permettre à elle seule une décarbonation massive du fret routier dès 2030.

L'**électrique à batterie** constitue une solution performante sur le plan des émissions de CO₂, y compris en incluant celles liées à la fabrication de la batterie. Cependant, cette solution se heurte à son coût (par rapport au moteur diesel), à l'autonomie limitée entre deux rechargement et à la problématique de la durée de la recharge qui nécessite l'immobilisation du véhicule. Cependant, cette solution permet à la fois une décarbonation forte des transports et présente un bon rendement énergétique.

Après les voitures au gaz, à la suite de la réglementation européenne en 2020, l'électrification des véhicules légers routiers, voitures particulières et véhicules utilitaires légers est la principale voie envisagée de décarbonation.

Quid des transports publics par autobus ou autocar ?

Les déplacements des personnes ont une place majeure dans les modes de vie et dans l'économie. Ils s'effectuent principalement par voiture. Les transports publics routiers par autobus pour les déplacements en zones urbaines ou par autocars pour les déplacements interurbains, ne représentent qu'un faible volume comparé aux transports ferroviaires (tramways, trains régionaux, trains grandes lignes).

L'autocar doit être une mobilité responsable et durable. En France, seuls quelques trolleybus (ou « tram-bus électriques ») qui avancent grâce à deux lignes aériennes de contact, sont encore en activité. Par ailleurs, la pratique courante de l'éco conduite avec motivation des conducteurs, ne suffit plus. Sur une flotte de 66 000 autocars en 2021, la répartition par énergie (98,9% d'autocars diesel) montre la nécessité pour la profession de définir une feuille de route de décarbonation réaliste des autocars avec l'offre industrielle des constructeurs.

Les interactions entre politiques de mobilité et politiques en faveur de l'environnement sont renforcées avec le plan climat prévoyant une neutralité carbone en 2050 et l'article 37 de la loi de 2015 relative à la transition énergétique pour la croissance verte. La France veut mettre en place un modèle énergétique robuste en adéquation avec le développement durable. La loi d'orientation des mobilités (LOM) a donc été conçue pour faire face aux enjeux énergétiques, à leurs coûts et à l'épuisement des ressources naturelles. Il est désormais explicitement écrit dans la loi que les actions des autorités organisatrices de la mobilité (AOM), doivent répondre à de grands enjeux en matière de lutte contre le changement climatique, contre la pollution atmosphérique et sonore, et en matière de protection de la biodiversité. Ces actions doivent être adaptées à tous les types de territoires desservis, et à toutes les catégories d'usagers.

Les AOM sont confrontées à des questions de stratégies de renouvellement de leurs flottes d'autobus pour accompagner la transition énergétique. En effet, lors du renouvellement de leur flotte, le cadre réglementaire national leur impose de choisir des véhicules « à faibles ou très faibles émissions ».

La loi climat et résilience du 22 août 2021 complète le mouvement engagé par la LOM en instaurant une obligation de création d'une zone à faibles émissions dans toutes les agglomérations de plus de 150 000 habitants avant le 31 décembre 2024, soit plus de 40 agglomérations. Pour les agglomérations où les valeurs limites sont régulièrement dépassées, les restrictions doivent porter en priorité sur les véhicules particuliers (fondées sur la classification Crit'Air). Il existe cependant de nombreuses dérogations nationales, par exemple les véhicules du ministère de la Défense, les véhicules de police, ambulances, etc. Et face aux nombreuses difficultés rencontrées, le calendrier de mise en œuvre pourrait être assoupli. Cependant, ce n'est pas le cas pour les transports en communs routiers, où elles doivent acquérir 50 % de véhicules à faibles émissions, et ce seuil passera à 100 % en 2025. Dans les agglomérations de plus de 250 000 habitants et celles couvertes par une zone à faibles émissions (ZFE), les véhicules à « faibles émissions » sont uniquement les véhicules électriques (avec batteries ou fonctionnant à l'hydrogène) et ceux fonctionnant au biogaz.

A titre d'exemple, le réseau de transport public de Mulhouse (TRACE) dessert 413 points d'arrêts répartis sur 20 communes. Engagé pour la protection de l'environnement, il a réalisé en 2020 plus de 2 millions de kilomètres avec 90% des véhicules fonctionnant au gaz naturel, 6% par des véhicules fonctionnant à l'électricité et 4% par des véhicules équipés de filtres à particules.

En complément, depuis juillet 2022 (art. L 224-8-2 du Code de l'environnement), une nouvelle contrainte s'applique à l'ensemble des réseaux de transport public urbain au niveau national (parc plus de 20 véhicules) : parmi les véhicules à faibles émissions choisis lors du renouvellement des flottes d'autobus, 50 % doivent être à « très faibles émissions ». Or, les véhicules thermiques ne sont pas considérés comme « à très faibles émissions ». Les AOM doivent ainsi se tourner vers les véhicules électriques.

Face à la nécessité d'améliorer la qualité de l'air dans les zones urbaines et de protéger la santé des citoyens, l'autobus électrique apparaît ainsi comme la solution du futur pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Il fait d'ailleurs l'objet d'un soutien politique important à l'échelle européenne.

Les principaux types d'autobus électriques en activité sont les suivants :

- Navettes électriques : il s'agit de mini bus électriques pouvant accueillir une vingtaine de passagers.
- Autobus électriques classiques : mesurant près de 12 mètres de long, les autobus électriques classiques ont une capacité d'accueil d'environ 90 personnes.



- Autobus électriques articulés : à l'instar véhicules thermiques articulés, ils permettent une capacité d'accueil passagers encore plus importante, en fonction du nombre de parties supplémentaires (autobus électrique 18 m, autobus électrique 24 m, etc.).

Les principales méthodes de chargement d'un autobus électriques sont :

- La recharge au dépôt : il s'agit de la méthode la plus courante qui consiste à le recharger avec une prise électrique une fois par jour au dépôt, durant sa phase d'inactivité. Souvent comprise entre 4 à 6 heures, la durée de chargement dépend principalement de la puissance des bornes.
- La recharge au terminus : il est également possible de recharger les autobus électriques en bout de ligne, au terminus, lors du temps de battement. Dans ce cas, le temps de charge oscille généralement entre 5 à 10 minutes.
- La recharge en ligne : il est enfin possible de charger les batteries des autobus électriques durant leur service, en station. Un temps de charge complémentaire de quelques secondes à chaque arrêt durant le temps où les passagers montent et descendent du véhicule. Le moyen de charge varie : recharge par induction, recharge via un pantographe montant ou descendant qui se déploie dès que le véhicule arrive à l'arrêt, etc.



Ces différentes méthodes peuvent se combiner selon le type de véhicule et ses besoins.

Ces systèmes offrent une diminution du poids des batteries embarquées, ce qui permet d'avoir des véhicules moins lourds. Depuis 2015, la RATP a testé plusieurs modèles dans le cadre d'une expérimentation. D'autres villes comme Lyon en 2016, lui ont emboîté le pas pour expérimenter plusieurs modèles de véhicules. Si les premières ventes de mini bus électriques ont démarré rapidement, il aura fallu attendre la baisse du poids des batteries et l'évolution des technologies, pour commercialiser en France les premiers autobus articulés en 2018. Nombreuses sont aujourd'hui les villes françaises qui se sont équipées. Ainsi, dès 2018 Mulhouse commande 5 véhicules (GX337 Elec). Strasbourg commande en 2019 : 12 véhicules (Aptis) qu'elle met en circulation l'année suivante et 12 véhicules (Yutong non commercialisé en raison de la liquidation judiciaire de DCG), puis passe un accord cadre pour la livraison de 49 (Irizar) en 2020/2021.

Des poids lourds électriques qui se rechargent en roulant ?

Le transport de marchandises, qui est un maillon indispensable du commerce et de l'ensemble de l'économie, l'évolution des volumes transportés, suit généralement l'évolution du PIB. Les transports routiers dominent largement les transports intérieurs de marchandises et s'effectuent souvent sur de longues distances, avec une part d'environ 90 % des tonnes-kilomètres transportées.

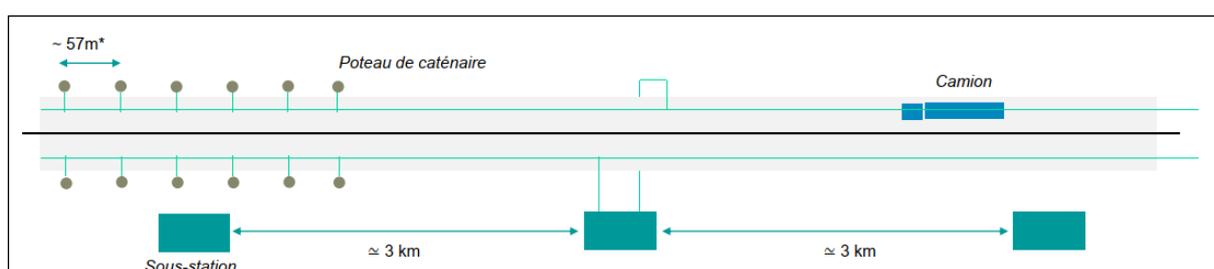
Les poids lourds sont responsables d'environ 25 % des gaz à effet de serre émis par le trafic routier. Cette part monte à 40 % si l'on considère les autoroutes les plus fréquentées. Les principales solutions envisageables pour décarboner ces véhicules sont le biogaz, le biodiesel, l'électrique à batterie, ou l'électrique à batterie et l'alimentation en roulant (autoroute électrique).

Toutes ces possibilités ont leurs avantages et leurs inconvénients. C'est également le cas d'une solution complémentaire appelée « route électrique » ou ERS (Electric Road System). Cette solution se passe de bornes de recharge car elle permet aux camions électriques de se recharger pendant qu'ils roulent. Elle permet également de réduire le poids des batteries tout en garantissant une longue autonomie, ce qui est un atout supplémentaire dans le cas des transports longue distance.

Plusieurs technologies pour une **alimentation électrique des poids lourds** ont été étudiées. Elles peuvent être regroupée en trois familles : induction, alimentation par conduction aérienne (caténaire - eHighway) et alimentation par conduction au sol (rail en chaussée, voire en bord de voie).



La solution conductive aérienne est une solution dérivée des lignes ferroviaires appliquée à la route. Une ligne aérienne de contact, appelée caténaire, alimente en énergie le véhicule par l'intermédiaire d'un pantographe par frottement. Comme la chaussée ne peut pas être utilisée comme conducteur de retour électrique, le système de ligne aérienne de contact et le pantographe sont électriquement bipolaires (deux lignes de caténaire et deux pantographes).



L'alimentation des lignes électrifiées s'effectue par des sous-stations réparties le long de l'itinéraire. La longueur des tronçons et le nombre de sous-stations au km dépendent de la puissance demandée.

Pour garantir le bon positionnement, les caténaires sont mises en tension et suspendues à des câbles porteurs, eux-mêmes suspendus à des pylônes et bras en porte-à-faux, positionnés sur l'accotement de la route. La distance entre chaque pylône est de l'ordre de 50 mètres.

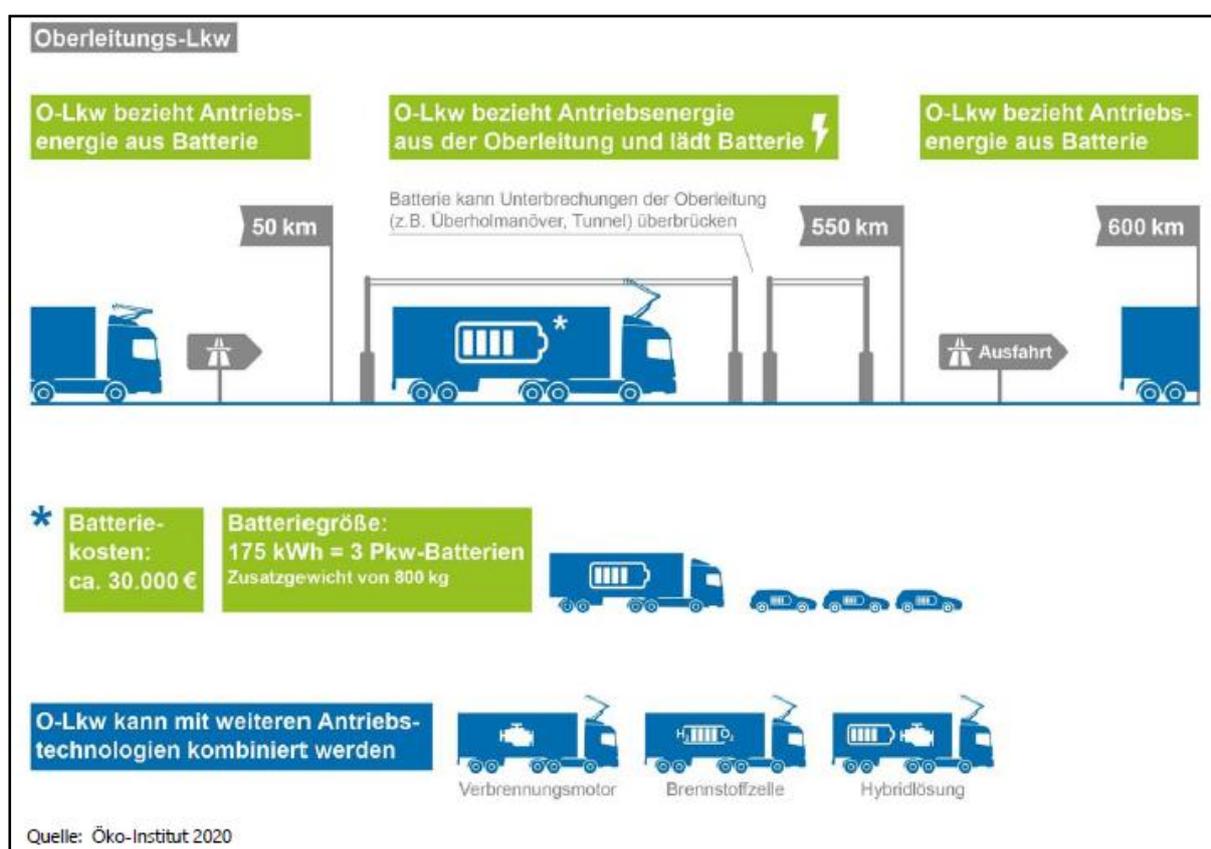


La recherche scientifique accompagne ces projets. L'étude menée par l'Institut Fraunhofer ISI souligne les perspectives d'alimentation sur autoroute, livre une estimation du poids et prix de la batterie et livre les différentes possibilités de motorisation (cf. schéma ci-après).

De nombreuses technologies sont étudiées, expérimentées en site propre avant de lancer les projets pilotes. Parmi ces projets, les plus remarquables ont été menés aux Etats Unis (2010), Suède (2016) et Allemagne (2019). Ils privilégient l'alimentation électrique par contact entre ligne aérienne et pantographe sur le toit du véhicule.

L'**Etat américain** de Californie a testé le système de ligne aérienne dans la région de Los Angeles sur l'Alameda Street sur une longueur d'un mile dans les deux sens. Cette route dessert les ports à conteneurs importants d'Amérique du Nord, Los Angeles et Long Beach.

En juin 2016, la **Suède** teste le système de ligne électrique aérienne au nord de Stockholm sur l'autoroute entre Gävle et Sandviken (E16) sur une longueur de deux kilomètres et relie le port de Gävle à une importante zone industrielle.



En **Allemagne**, après l'adoption d'un programme d'action pour le climat, en 2015, le gouvernement fédéral a décidé de financer et mener des projets pilotes sur le fonctionnement électrique des poids lourds hybrides. Ils sont financés dans le cadre du programme « Mobilité renouvelable » du ministère fédéral de l'environnement, et s'inscrivent dans le prolongement des recherches et développements. Aujourd'hui, trois projets pilotes pour tester des technologies différentes et développer un cadre de mise en œuvre orienté vers l'application, sont en cours.

Le premier, dans le Land de Schleswig-Holstein, sur un des itinéraires autoroutiers les plus fréquentés entre Lübeck et Hambourg (A1), où transitent les marchandises vers la Scandinavie, la Russie et les Etats Baltes. Sur un tronçon d'environ six kilomètres entre le carrefour Reinfeld et l'échangeur autoroutier de Lübeck les catenaires installées font office de piste d'essai eHighway (cf. projet FESH : www.ehighway-sh.de/de).

Le deuxième, dans le Land de Hesse, concerne le tronçon autoroutier entre la zone industrielle de Darmstadt-Nordt/Weiterstadt et le carrefour Zeppelinheim/ Cargo City Süd à l'aéroport de Francfort. Sur cet axe très fréquenté, circulent plus de 8000 poids lourds par jour. Il est équipé d'environ cinq kilomètres de ligne électrifiées dans les deux sens pour un investissement d'environ 30 millions d'euros (cf. projet ELISA : www.ehighway.hessen.de).

Le troisième projet pilote, celui du Land de Bade-Wurtemberg se déroule sur une route fédérale (B462) d'environ dix-huit kilomètres entre Kuppenheim et Gernsbach-Obertsrot dont deux tronçons de quatre kilomètres sont électrifiés. Contrairement aux projets précédents davantage liés au transport à longue distance, celui-ci privilégie les transports régionaux et locaux. Sur cette route, de nombreux poids lourds effectuent de nombreuses rotations 24H sur 24 entre trois fabricants de papier à Obertsrot vers un centre logistique à Kuppenheim. Par ailleurs, alors que les camions hybrides sont équipés de moteur diesel et électrique, le projet permet de tester en conditions réelles d'autres formes de propulsion : entièrement électrique, hydrogène/pile à combustible, utilisation de carburants synthétiques. Le coût du projet en cours est d'environ 28 millions d'euros assuré en majorité par le Land et une contribution de 1,6 millions d'euros par l'Etat fédéral (cf. projet eWayBW : www.ewaybw.de).

Comme pour les précédents, ce projet se décompose en plusieurs phases : planification, attribution du contrat, construction de l'installation puis suit la mise en service de la ligne pour suivre l'opération durant 3 ans. Après le lancement du projet eWayBW en 2017, la mise en service se déroule de juillet 2021 à juin 2024.

En France, des projets similaires sont en cours. Par exemple, l'association d'un constructeur et des chargeurs permet de tester en grandeur réelle un poids lourd réalisant des navettes journalières entre le dépôt Egiom de Chelles (77) et les centrales à bétons (BPE) d'Alfortville (94) ainsi que de Tolbiac Paris XIII (75).

La première expérimentation d'infrastructure routière électrique n'a été envisagée que fin 2025 sur une portion de deux kilomètres d'une autoroute du sud de l'Alsace, dans le Haut-Rhin. Elle fait suite à l'ouverture pour l'année 2023 par le gouvernement, de l'appel à projets « Ecosystèmes des véhicules lourds électriques ». Ce dispositif, opéré par l'ADEME, vise à soutenir l'acquisition et la location longue durée de poids lourds ou d'autocars électriques, ainsi que l'installation de bornes de recharge adaptées à leur usage. Cet appel à projets sera doté d'une enveloppe de 60 millions d'euros, dont 55 millions d'euros exclusivement pour les camions et 5 millions d'euros pour les autocars. Lancé en 2021, il devrait ainsi permettre d'expérimenter les différents systèmes de routes électriques pour poids lourds, comme l'alimentation par rail dans le sol, utilisée par Alstom pour les tramways des villes de Bordeaux, d'Angers ou de Tours.

L'expérimentation en Alsace serait initiée par un consortium public-privé. La banque publique d'investissement française Bpifrance et plusieurs acteurs industriels sont également pressentis pour y prendre part :

- Scania, le constructeur suédois de poids lourds appartenant au groupe Volkswagen qui fait déjà circuler une flotte de 22 poids lourds équipés en Allemagne, pourrait allouer un ou deux véhicules,
- la filiale Equans du groupe Bouygues ou encore l'entreprise allemande Siemens, qui possèdent déjà des expériences d'électrifications des infrastructures routières.

Transports ferroviaires en route vers le 100% décarboné

L'électrification du réseau ferré en France est un processus toujours en cours et l'équipement des lignes permet la traction électrique, principalement en 25 000 V alternatif (50Hz) ou 1 500 V continu. Environ 55 % du réseau ferré français en service est électrifié et assure près de 85% des transports de voyageurs (Trains grandes lignes, Intercités, TER).

Le transport ferroviaire n'est donc pas un gros émetteur de gaz à effet de serre, mais aujourd'hui encore de nombreux trains diesel circulent dans les zones urbaines ou métropoles. Et depuis les années 2000, plusieurs pays européens ont identifié des secteurs dans lesquels

l'accès est interdit aux véhicules les plus polluants : les zones à faibles émissions (ZFE). Aujourd'hui la France compte cinq ZFE situés dans trois régions : Paris, Strasbourg, certaines communes de la Métropole du Grand Paris, de la Métropole du Grand Lyon et de Grenoble-Alpes Métropoles. Les véhicules routiers 100 % électriques ou à faibles émissions de CO₂ et les trains peuvent y accéder sans restriction.

L'électrification des lignes secondaires étant très coûteuse, des solutions partielles ou bien alternatives sont donc recherchées. Se pose la question : qu'en est-il des trains régionaux TER diesel qui représentent encore un quart du parc ?

Dans un contexte marqué par l'accélération du réchauffement climatique et la flambée des prix de l'énergie, la transition énergétique est une priorité. L'enjeu principal de la décarbonisation consiste donc à remplacer le diesel par des énergies et des modes de propulsion moins polluants. Cela fait partie depuis plusieurs années des préoccupations du secteur ferroviaire. La SNCF, dont plus de la moitié des lignes exploitées ne sont pas électrifiées, ne peut se tenir à l'écart de la nécessité de s'inscrire dans la neutralité carbone. Elle accompagne les Régions, dont relève la compétence d'une grande partie de ces lignes ferroviaires non électrifiées, pour déployer la solution la plus adaptée à leur territoire et permettre la transition écologique. La priorité consiste donc à transformer le matériel existant livré dans les années 2000 qui possède une durée de vie d'une trentaine d'années avant de concevoir un matériel nouveau.

Quelles sont les projets ferroviaires en cours ?

Le **TER au colza** : en avril 2021, une expérimentation en service commercial de l'utilisation de biocarburant végétal a été lancée sur la ligne Paris-Granville avec quinze rames Régiolis (Alstom). L'un des avantages de cette innovation par rapport au train diesel est qu'elle n'impose aucune modification de la motorisation, que la consommation est identique au gazole et surtout que les émissions de CO₂ diminuent de 60 % par rapport au gazole. Des tests se sont également déroulés avec succès dans les Hauts-de-France et en Bourgogne. C'est donc une bonne alternative en attendant que des technologies ferroviaires plus décarbonées soient mises au point.

Il convient toutefois de préciser que cette énergie suppose de détourner une partie des terres destinées à la culture du colza, largement importé, d'autres productions destinées à l'alimentation humaine.

Le **TER à hydrogène** consiste à remplacer les moteurs diesel par une chaîne de traction hydrogène pour éliminer les émissions de CO₂. Ce mode



de motorisation exonère le gestionnaire des temps de rechargement des batteries et permet une plus grande autonomie. Selon le cabinet conseil en stratégie Roland Berger à horizon 2035, environ 15 à 20 % du marché européen régional pourrait fonctionner à l'hydrogène. Les quatre régions Auvergne-Rhône Alpes,

Bourgogne-Franche-Comté, **Grand-Est** et Occitanie ont lancée en 2021 une première commande auprès d'Alstom de douze rames bi-mode électrique-hydrogène (Coradia Polyvalent) qui bénéficient d'une autonomie pouvant aller jusqu'à 600 kilomètres sur les portions de lignes non électrifiées.

Cependant, le recours à cette énergie n'aboutit pas forcément à la décarbonation, car seul l'hydrogène « vert », fabriqué à l'aide d'énergies renouvelables et n'émettant pas ou peu de CO₂, est considéré comme durable. D'autres méthodes de fabrication de l'hydrogène, à partir d'énergies fossiles, bien plus courantes, existent et émettent des gaz à effet de serre.



Le TER hybride : dans les rames bimodes (Régiolis d'Alstom) qui fonctionnent initialement à l'électricité et au diesel, la moitié des moteurs diesel seront remplacés par des batteries qui récupéreront l'énergie de freinage pour la réutiliser. Cette dernière représente environ 30 % de l'énergie de traction. Pour garantir une disponibilité maximale, les batteries pourront également être rechargées par les moteurs thermiques et les caténaires. La première rame de ce train de nouvelle génération fera ses débuts en service commercial en 2023 dans les quatre régions



partenaires : **Grand-Est**, Nouvelle-Aquitaine, Occitanie et Centre-Val de Loire.

Le TER à batteries : en 2021, le constructeur Bombardier a remplacé les moteurs diesel dans cinq rames bi-mode (électrique et thermique) par des batteries. Ces batteries sont rechargées par les caténaires lorsque les rames circulent sur des portions électrifiées ; elles permettent l'alimentation de la chaîne de traction sur les portions non électrifiées. L'autonomie de quatre-vingts kilomètres, assurée par les batteries est jugée suffisante pour déployer ces trains sur des lignes partiellement électrifiées. Des



essais sont prévus dès 2023 dans les régions Hauts-de-France, Nouvelle-Aquitaine, Occitanie, Auvergne-Rhône-Alpes.

Parallèlement, pour répondre aux besoins de mobilité collective et attirer des clients vers le ferroviaire, la SNCF explore dans le cadre de son programme d'innovation *Tech4Mobility* des trains légers adaptés aux lignes moins fréquentées. Deux solutions alternatives à la voiture pour assurer le dernier kilomètre dans les territoires ruraux se distinguent :

- Flexy qui se compose de navettes de capacité de neuf places. Ces véhicules peuvent circuler sur route comme sur des lignes ferroviaires à faible trafic ;
- Draisy qui utilise de nouvelles technologies et matériaux ce train léger de trente places assises est destiné à circuler sur des lignes peu exploitées.

Mi-juin 2023, le constructeur Lohr dans le cadre d'un consortium avec la SNCF, GCK Battery, Stations-e et l'Institut de recherche Technologique Railenium a présenté un prototype qui pourrait être testé en 2025 sur une section de ligne non exploitée (Sarreguemines-Bitche ?) avant de réaliser des circulations sur une ligne en démonstration à partir de 2025.

Décarboner : une question de temps ?

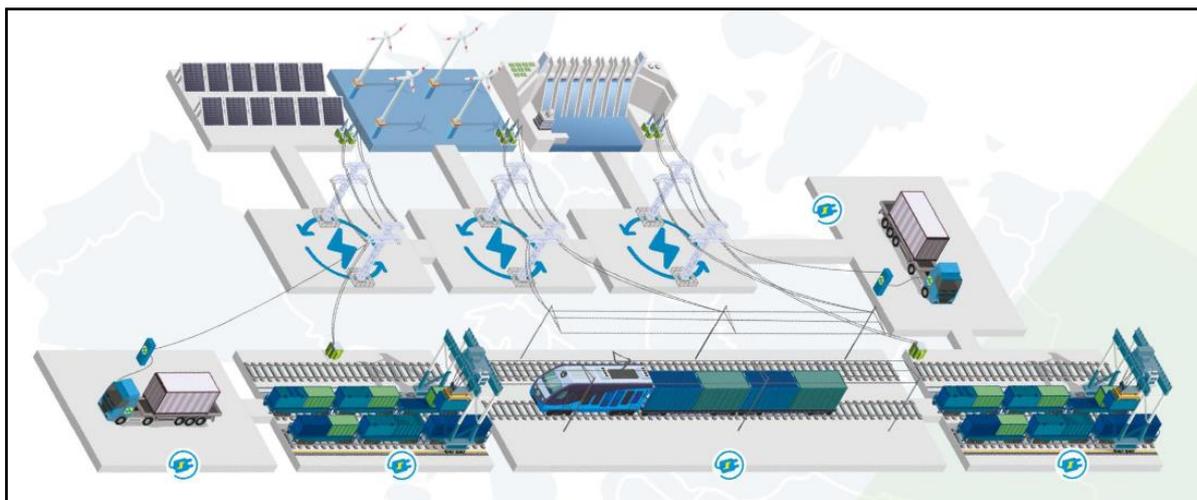
Les projets énergétiques en cours reposent sur les sources d'énergies alternatives dont la production mérite d'être consolidée pour répondre à la demande. Jusqu'ici la motorisation des véhicules reposait sur le diesel. Si la production électrique résulte de différentes sources (panneaux solaires, éoliennes, hydraulique, nucléaire,...), faut-il privilégier cette seule énergie comme alternative au pétrole ou diversifier pour des motorisations différentes ?

La mise en place des normes Euro pour réduire la pollution s'est faite progressivement pour permettre aux entreprises de les accompagner lors du renouvellement de leur flotte. Aujourd'hui nous constatons que les échéances de mise en place des ZFE rencontrent des difficultés auprès des particuliers. Qu'en sera-t-il des échéances concernant les entreprises ?

Pour ces différentes technologies, les enjeux sont importants pour l'industrie française qui a l'occasion de créer de nouvelles filières. Nous avons vu qu'elles ne s'inscrivent pas dans les mêmes calendriers et besoins de développement. Les projets pilotes pour les transports routiers, s'ils sont déjà bien avancés pour les transports en communs, ne le sont pas pour les transports à longues distances qui approvisionnent les villes, ou les poids lourds qui assurent les services (ordures ménagères, ambulances, pompiers,). De même, les innovations ferroviaires qui seront portées par la SNCF aux côtés des Régions et des industriels pour le

rétrofit¹ et le matériel roulant neuf vont-elles contribuer de façon décisive à réussir la sortie du diesel en 2035 ?

En attendant un équipement sur les grands axes routiers en Europe, le réseau de transport combiné rail-route avec ses terminaux européens offre déjà une alternative : parcours principal ferroviaire ; et après transbordement du tout en utilisant l'énergie électrique, il reste à solutionner le dernier kilomètre.



Investir dans les infrastructures ferroviaires pour développer et améliorer les performances du transport intermodal sur les axes européens et investir dans des véhicules zéro émission de carbone pour les livraisons/enlèvements, ne limiterait-il pas la circulation des poids lourds ?

Joël Forthoffer

¹ **Retrofit** (de l'anglais *retrofit*) : opération consistant à remplacer des composants anciens ou obsolètes par des composants plus récentes ou, dans le cadre de cet article, opération visant à remplacer une motorisation thermique, émettrice de CO₂ par une énergie non polluante. Cette démarche, pour le particulier peut, sous certaines conditions, ouvrir droit à des avantages financiers (Arrêté du 13 mars 2020 relatif aux conditions de transformation des véhicules à motorisation thermique en motorisation électrique à batterie ou à pile à combustible).