

FERROVIAIRE : LES BATTERIES, UNE SOLUTION POUR SAUVER LES PETITES LIGNES

Mille trains à traction Diesel circulent chaque jour en France. Ce sont généralement des petits trains qui consomment de 100 L à 200 L aux 100 km selon leur composition. Ils sont en service sur des lignes à faible fréquentation pour lesquelles l'électrification n'est pas envisageable pour des raisons de rentabilité économique. La SNCF prévoit de tous les remplacer d'ici les quinze prochaines années.

Les élections régionales à venir vont insuffler un renouveau, de nouvelles ambitions, de nouvelles dynamiques de mobilité sur les territoires.

La solution des batteries embarquées revient en force sur le devant de la scène. Les constructeurs misent aussi sur les technologies hybrides et hydrogène. Quel est l'impact carbone de ces différentes technologies ?



COUVERTURE : Au début du XX^{ème} siècle, des locomotives électriques fonctionnant sur batterie furent en service à travers le monde, notamment aux États-Unis (comme le modèle de la photographie de couverture présenté au Railroad Museum of Pennsylvania¹), en Grande-Bretagne et même en France autour d'Angoulême et de Toulouse. Un siècle plus tard, ces locomotives reviennent en apportant une solution pour décarboner à moindre coût les lignes non électrifiées.

SYNTHÈSE

Une grande partie des petites lignes ferroviaires, qui sont le plus souvent de compétence régionale, font l'objet de projets de régénération afin de maintenir leur vitesse et donc leur attractivité. Or beaucoup ne sont pas électrifiées. La combinaison des émissions de GES du diesel, des émissions des chantiers de régénération et des taux de remplissages en voyageurs modestes font que le TER thermique n'est d'un point de vue climatique pas plus avantageux que la voiture individuelle. Il le sera d'autant moins dans le futur avec l'électrification progressive du parc de voitures et les évolutions espérées vers d'avantage de partage des voitures.

Par ailleurs, ces lignes ne sont pas non plus avantageuses d'un point de vue strictement économique. Ainsi, la pérennisation de ces lignes et des avantages sociaux d'accès à la mobilité qu'elles confèrent, passe par l'amélioration de leur bilan carbone à un prix acceptable. Cette amélioration est possible avec : le passage à la traction électrique par batterie (l'électrification des lignes est en effet trop coûteuse), un acier progressivement moins carboné, la réduction du poids carbone des chantiers (animation Fonds d'Arbitrage Carbone). Les élections régionales de 2021 sont l'opportunité d'intégrer ces solutions aux politiques de transport.



CI-DESSUS : C'est aujourd'hui le Japon qui est le plus avancé en matière de train électrique à batterie. Le pays dispose d'une vingtaine d'unités de ce type de train, en remplacement des unités Diesel.

¹ Crédit photo : James St. John

1. LE DÉSASTREUX IMPACT CARBONE DES TER DIESEL

Plus de la moitié des lignes n'est pas électrifiée

Sur les 29 300 kilomètres de lignes en service en France, **15 700 km ne sont pas électrifiés, soit plus de la moitié (53%)** ². Ces lignes non électrifiées sont généralement des lignes secondaires, dont l'opération relève de la compétence des Régions. **Ces lignes non électrifiées n'assurent qu'environ 3% du trafic voyageur de la SNCF (en voy.km).**

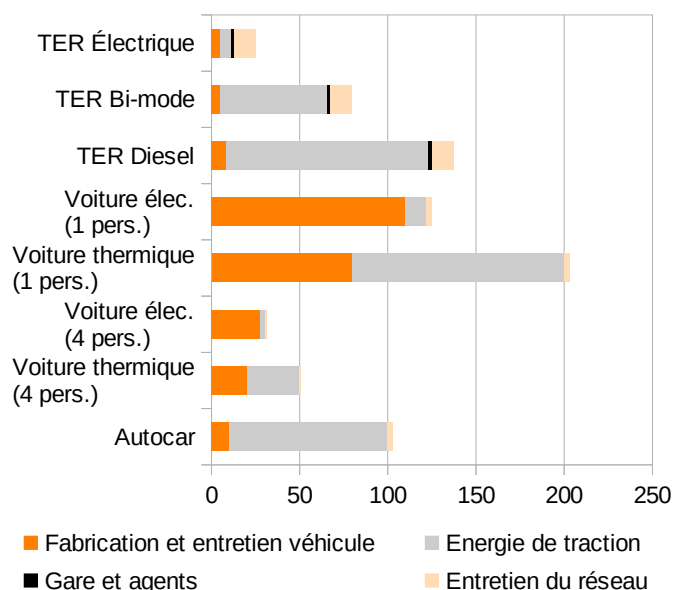
Une flotte thermique récente

Sur un parc total d'environ 3 300 locotracteurs (hors TGV), un tiers des matériels roulants a une motorisation Diesel ³. **Près de mille trains TER Diesel ou bimodes (électrique et thermique) circulent quotidiennement en France.** Cette flotte est pourtant assez récente puisque la moitié de ces trains date des années 1990 et 2000 ⁴. Le plan de la SNCF en faveur de la transition énergétique prévoit la sortie du diesel d'ici 2035.

Un impact carbone très différent selon les tractions et la fréquentation

Nous avons étudié plusieurs réseaux régionaux et il en ressort que les résultats varient énormément selon la motorisation, les heures et les tronçons. A partir des taux de remplissage moyens, le TER électrique a un impact carbone global cinq fois moindre que le TER thermique. **Seul le TER électrique (à moins de 25 gCO₂/km.passager) parvient à être plus performant qu'une voiture thermique avec 4 personnes.**

Impact carbone du TER vs voiture et autocar (en gCO₂/km.passager)



Sources : Base carbone, Objectif Carbone

² Source : <http://www.assorail.fr/actualites/fret-ferroviaire/donnees-ferroviaires/reseau-ferre/chiffres>

Carte des lignes : <https://www.sncf-reseau.com/sites/default/files/2019-07/Lignes%20électrifiées.pdf>

³ Source : opendata SNCF : https://ressources.data.sncf.com/explore/dataset/nombre-de-materiels-roulants-sncf-voyageurs-exploitable-par-serie-activite/table/?sort=-nombre_de_materiels_exploitable

⁴ Source : Rapport parlementaire sur le verdissement de la flotte ferroviaire (2018) :

https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/2018-11-22_rapport_final_sur_le_verdissement_de_la_flotte_ferroviaire.pdf

2. DES LIGNES SECONDAIRES A MODERNISER POUR CONSERVER UN SERVICE DE QUALITÉ

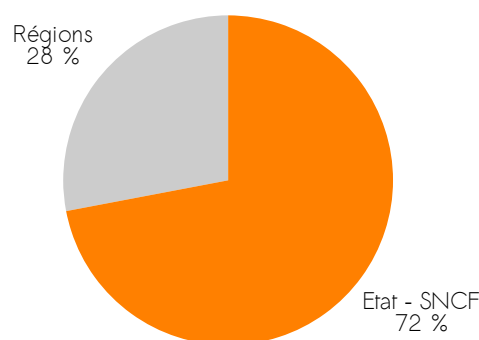
Des lignes secondaires sous-perfusion

Chaque année, les pouvoirs publics soutiennent à hauteur de près d'un milliard d'euros les lignes secondaires.

D'après un rapport ministériel ⁵, l'État et SNCF Réseau continuent de financer une part majeure de lignes secondaires, en couvrant l'essentiel des charges d'entretien courant et un tiers des coûts de remise à niveau, pour 710 M€/an.

Les Régions financent une petite partie des charges d'entretien, mais les deux tiers des coûts de remise à niveau, soit au total 280 M€/an.

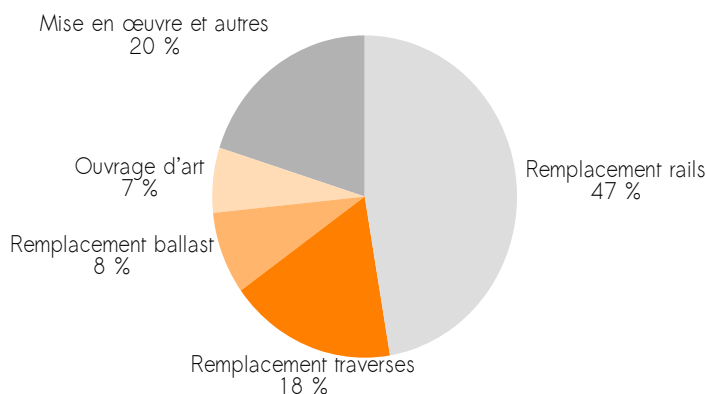
Répartition de l'aide publique aux petites lignes



Source : Rapport ministériel : Petite lignes ferroviaires, des plans d'actions régionaux (2020)

La problématique de la régénération des lignes secondaires

Répartition du Bilan Carbone du chantier de régénération d'une petite ligne type (sur 40 km)



Source : études Objectif Carbone

De nombreuses lignes secondaires doivent faire l'objet de régénération de leurs voies, c'est-à-dire d'un remplacement quasi-complet des éléments de base (rails, traverses et ballast). Ces chantiers doivent permettre de conserver les vitesses d'exploitation d'origine pour 30 années supplémentaires. Sans ces travaux, les vitesses de circulation chutent, les temps de parcours augmentent et la désaffection du public s'accélère...

Les deux principaux paramètres de l'évaluation carbone de ces projets sont :

- **Le report modal** : Les travaux vont parfois rétablir voire améliorer les temps de parcours historiques de la ligne et attirer quelques passagers supplémentaires dans chaque train. A l'inverse, leur non réalisation peut aboutir à la fermeture de la ligne et causer le report d'une part importante des voyageurs sur la voiture individuelle pour effectuer leurs déplacements. En

⁵ Rapport ministériel : Petite lignes ferroviaires, des plans d'actions régionaux (2020) :

https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/20200220_JBD_DP_Petites_lignes_vf.pdf

traction Diesel, il est fréquent que la consommation du train (100 à 200 litres/100 km) soit équivalente à la consommation des 20 voitures qui transporteraient les 20 passagers présents en moyenne à bord, en cas de suppression du train. En prenant en compte l'électrification du parc de voitures particulières et à terme, l'interdiction à la vente des voitures thermiques, ce seul bilan sur les consommations va vite devenir très favorable à la voiture, si le train continue en traction Diesel classique sur ces lignes à faible fréquentation.

- **L'impact carbone des travaux** : de manière classique, de l'ordre de 500 tCO₂e/km sont émises à l'occasion d'une opération de régénération complète. Il s'agit pour l'essentiel de produire des rails (250 tCO₂e/km, avec de l'acier neuf), des traverses, et du ballast ; et secondairement, de mettre en œuvre ces matériaux et de reprendre quelques ouvrages d'art vieillissants.

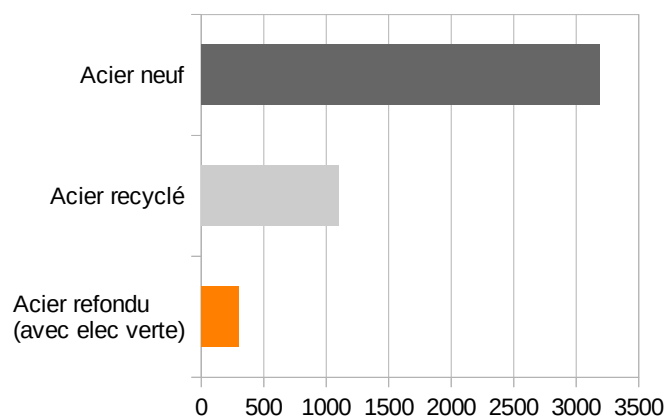
Pour mettre ces travaux en perspective avec la consommation des trains, on précise que la circulation de 20 trains chaque jour, consommant chacun 150 litres/100 km engendre une consommation de 10 000 litres de carburant par an et par km de voie, soit 30 tCO₂e/an. Ainsi, les opérations de mise à niveau (500 tCO₂e/km) consomment autant qu'une quinzaine d'années d'exploitation.

L'analyse des deux paramètres montre que d'un point de vue strictement climatique, une part importante de ces opérations de régénération engendre sur 30 ans nettement plus d'émissions de CO₂ qu'elle n'en évite, lorsque la traction Diesel est conservée.

L'enjeu de la ressource acier : un biais méthodologique inhérent à l'évaluation carbone

Lors d'un chantier de régénération de ligne, les rails sont le plus souvent entièrement remplacés. L'acier utilisé pour le remplacement des rails peut représenter jusqu'à la moitié du bilan carbone d'une opération (voir graphique page précédente). **Fabriquer une tonne d'acier neuf (à base de minerai de fer) génère plus de 3 tonnes de CO₂, principalement en brûlant du charbon. L'acier recyclé (à base de ferraille) génère environ 1 tonne de CO₂ en consommant principalement de l'électricité dont le contenu carbone doit de plus significativement baisser dans les décennies à venir** ⁶.

Facteur d'émission de l'acier en kgCO₂/tonne



Sources : Base carbone, Objectif Carbone

A chaque opération de régénération, la SNCF remet dans le circuit de l'économie circulaire, le même tonnage d'acier (en restituant les rails existants) que ce qu'elle va acquérir en rail neuf. Dans l'évaluation carbone des chantiers, il peut donc apparaître légitime de ne compter qu'une prestation de refonte des rails (ie de l'acier 100% recyclé), plutôt que de compter de l'acier 100% neuf. Dans la perspective de décarbonation de l'électricité européenne, **le contenu carbone d'une tonne d'acier, pour les chantiers de régénération de la SNCF, pourrait ainsi baisser à 300 kgCO₂e.**

⁶ Source : Base carbone

Le contenu carbone d'un programme de régénération de voie serait alors réduit de 50% à moyen terme, sans modifications des exigences de sécurité et de qualité de service.

L'électrification systématique des voies revient très cher et son contenu carbone n'est pas neutre.

L'électrification d'un km de voie ferrée représente un investissement de l'ordre de 85 tCO₂e/km. La fabrication des 17 tonnes de poteaux caténaire en acier (neuf) représente 60% de ce bilan. Une voie ferrée faisant circuler 20 trains par jour, avec 20 personnes à bord en moyenne, payant 15 c€/km réalise une recette de billettique de 60 € par jour, soit 20 000 €/an.

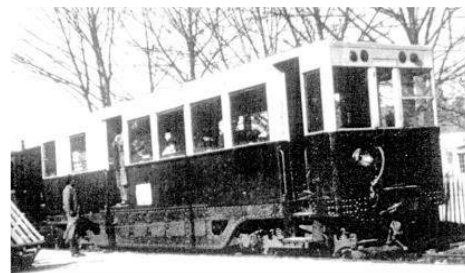
Les projets d'électrification de ligne existante en cours représentent en 2020, environ 200 km cumulés, soit 1,3 % du linéaire non électrifié ⁷. Suivant les conditions géographiques, **le coût de l'électrification oscille entre 0,4 M€ et 1,5 M€ par kilomètre** ⁸. Soit 20 à 75 ans de la recette de la vente des billets de train. Autrement dit, aujourd'hui comme hier, le coût d'une électrification classique des lignes secondaires reste inaccessible.

A contrario, l'évolution récente de la technologie des batteries embarquées lui permet maintenant d'être une alternative techniquement et économiquement intéressante. Cette solution peut être salvatrice pour les lignes sur lesquelles circulent moins de 20 trains par jour et qui sont souvent en sursis.

3. TRAINS ÉLECTRIQUES A BATTERIE : RETOUR VERS LE FUTUR

Des locomotives à batteries électriques sont en circulation à travers le monde depuis plus d'un siècle

Au début du XX^{ème} siècle des locomotives électriques fonctionnant sur batterie furent en service à travers le monde. **Dans les années 30, des automotrices sur batteries ont circulé en France, autour d'Angoulême et de Toulouse** (photo ci-contre, Automotrice à accumulateurs du réseau des Charentes, 1927). Le procédé redevient d'actualité en Angleterre, mais également au Japon, en Autriche, en Allemagne ⁹. Il existe deux types de trains :



- ceux qui fonctionnent entièrement sur batterie ;
- ceux qui fonctionnent avant tout avec les caténaires, et qui possèdent également une batterie qui leur permet de desservir des extrémités de réseau non-électrifiées.

⁷ Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Électrification_du_réseau_ferré_en_France#Projets_d'électrification

⁸ Source : Rapport ministériel cité précédemment : Petite lignes ferroviaires, des plans d'actions régionaux (2020).

⁹ Pour plus d'information sur les trains électriques sur batterie en circulation à travers le monde :

https://en.wikipedia.org/wiki/Battery_electric_multiple_unit

De nouveaux trains électriques circulent sur batterie à l'étranger

Depuis quelques années, des trains fonctionnant sur batterie sont en circulation pour le transport de personnes et de marchandises. Une autonomie d'une centaine de kilomètres est largement suffisante sur bien des tronçons.



Au Royaume-Uni, l'entreprise Vivarail convertit d'anciennes automotrices en trains à batteries électriques. Ils circulent depuis avril 2019 ¹⁰.



Aux États-Unis, le constructeur Wabtec teste en Californie une locomotive à batterie électrique depuis novembre 2020 ¹¹.

Le Japon a réintroduit les trains sur batterie en 2014 sur son réseau. Une vingtaine de rames sont aujourd'hui équipées de batteries de 360 kWh de stockage, soit l'équivalent de 7 batteries de Zoé. Historiquement un des pionniers ferroviaires dans le monde, la France, après avoir privilégié l'hybridation, le bio-diesel et l'hydrogène, s'empare désormais du sujet des batteries. A partir de 2023, cinq régions (Auvergne-Rhône-Alpes, Hauts-de-France, Nouvelle-Aquitaine, Occitanie et PACA) vont mettre en circulation un train à batteries chacune ¹².

Le contenu carbone de la fabrication des batteries en forte baisse

Depuis 10 ans que le process de fabrication des batteries est en plein chamboulement, son contenu carbone a drastiquement baissé. En premier lieu, les améliorations sur le process de fabrication réalisées par le changement d'échelle font apparaître une très forte baisse de la consommation d'énergie par kWh de capacité de batterie. Des valeurs évoluant de 160 kWh/kWh à 16 kWh/kWh¹³ sont évoquées dans plusieurs études. Ces process sont largement basés sur de la consommation d'électricité dont le contenu carbone est généralement très élevé dans les principaux pays producteurs (USA/Chine). Alors qu'un facteur d'émission de l'ordre de 180 kgCO₂ par « kWh de batterie » était admis il y a encore 5 ans, les nouvelles analyses font apparaître des facteurs d'émissions allant de 40 à 100 kgCO₂/kWh, selon les fabricants et les pays de production. Ils devraient encore baisser dans les années à venir avec la décarbonation de l'électricité dans les pays producteurs.

Ainsi, une batterie de 400 kWh embarquée dans un train rajouterait de l'ordre de 30 tCO₂e à sa fabrication, une valeur à mettre en perspective avec les quelques 200 tCO₂e émis pour la fabrication d'un autorail de 50 tonnes, ou les 85 tCO₂ induit pour électrifier un seul km de voie ferrée.

¹⁰ Source : http://news.wmtrains.co.uk/pressreleases/first-class-230-begins-passenger-services-between-bletchley-and-bedford-2855922?utm_campaign=send_list

¹¹ Source : <https://trn.trains.com/news/news-wire/2020/11/13-news-photo-battery-electric-locomotive-set-to-leave-erie>

¹² Source : <https://www.sncf.com/fr/innovation-developpement/innovation-recherche/ter-a-batteries>

¹³ Source : https://www.oliver-krischer.eu/wp-content/uploads/2020/08/English_Studie.pdf

4. LE PARI RISQUÉ DE L'HYDROGÈNE

En France, les pouvoirs publics semblent avoir plutôt misé depuis quelques années sur l'hydrogène pour remplacer le Diesel. L'État vient d'annoncer un plan de 7 milliards d'euros en faveur de cette filière ¹⁴. Quelques semaines auparavant, la Commission Européenne présentait sa feuille de route stratégique pour le déploiement de l'hydrogène.

Le moteur électrique peut être alimenté par une batterie ou bien par une pile à combustible, qui transforme l'hydrogène en électricité. L'hydrogène étant un vecteur énergétique plus dense que la batterie électrique, il permet d'augmenter l'autonomie du véhicule électrique. **Le dihydrogène (H₂), souvent appelé hydrogène, est produit, en France, à 94 % à partir de gaz naturel** ¹⁵, il est donc largement issu d'une énergie fossile, même si cela peut évoluer favorablement.

« Si une certaine baisse peut éventuellement être attendue par effet d'échelle, atteindre la compétitivité économique semble hors de portée face à la maturité industrielle du bio-GNV et aux progrès spectaculaires des batteries ».



Negawatt (2020)
Développer l'hydrogène :
pourquoi et comment

L'hydrogène se transporte difficilement (par camion, par voie maritime ou par pipeline), ce qui nuit à son impact carbone. **On peut estimer que les émissions associées sont comprises entre 200 et 300 gCO₂/kWh** ¹⁶, **contre 80 gCO₂/kWh pour l'électricité en France**, qui a des perspectives de décarbonation à faible coût dans les prochaines années. L'hydrogène est donc un process complexe pertinent pour convertir des surplus d'énergie, mais peu pertinent pour être utilisé dans une large flotte captive.

Pour des raisons de coût également, l'hydrogène ne présente pas des perspectives satisfaisantes pour la mobilité. **Son prix oscille entre 300 € et 600 €/MWh (contre 60 à 70 €/MWh pour les carburants fossiles et 50 €/MWh pour l'électricité achetée par la SNCF).**

5. DÉCARBONER POUR MAINTENIR LE SERVICE

Décarboner la mobilité passe par les modes doux, le partage de la voiture et des transports en commun performants. Or beaucoup de trains thermiques offrent une prestation de transport coûteuse pour la collectivité et dont l'impact carbone est équivalent à l'autosolisme. Les pouvoirs publics rechignent de plus en plus à maintenir ces lignes qui sont des gouffres financiers et énergétiques. Le maintien d'un service de transport ferroviaire public passe donc par la suppression du Diesel.

¹⁴ Présentation de la stratégie nationale pour le développement de l'hydrogène décarboné en France (2020) <https://www.economie.gouv.fr/presentation-strategie-nationale-developpement-hydrogene-decarbone-france#>

¹⁵ Plan ministériel de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique (2018) : https://www.ecologie.gouv.fr/sites/default/files/Plan_deploiement_hydrogene.pdf

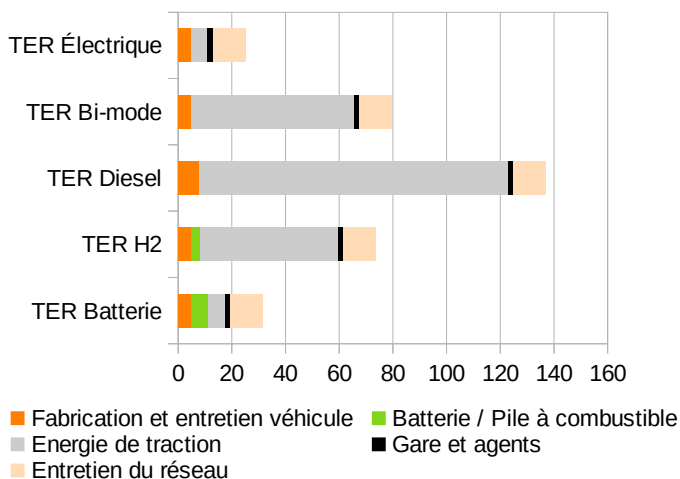
¹⁶ Rapport ministériel « Filière hydrogène-énergie » (2015) : https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/filiere-hydrogene-energie.pdf

Seuls les trains à batterie offrent dès aujourd'hui une solution bas carbone

Les trains à batteries rechargeables par caténaire présentent un bilan carbone par passager.km d'environ **50 gCO₂**, **en intégrant le coût carbone de la fabrication de la batterie.**

Le train à hydrogène présente quant à lui un bilan de 80 gCO₂/km.pass, hors infrastructure de transport de l'hydrogène. L'hydrogène vert en grande quantité ne sera en effet pas disponible avant 2035. Il est donc dangereux d'investir des montants colossaux dans un carburant qui ne pourra pas être décarboné avant une quinzaine d'années.

Impact carbone du TER selon les technologies (en gCO₂/km.passager)



Sources : Base carbone, Objectif Carbone

Faire le bon choix dès aujourd'hui

Le plan de la SNCF en faveur de la transition énergétique prévoit la sortie du diesel d'ici 2035. Les élections régionales de 2021 et le renouvellement des élus offrent une fenêtre d'opportunité d'autant plus importante qu'elles coïncident avec le besoin de remplacement d'un grand nombre de matériels fonctionnant aujourd'hui au gazole. **Ce sont ainsi près de 450 trains qui devront être renouvelés à partir de 2030**, et le reste environ dix à quinze ans plus tard.

Décarboner les chantiers de régénération des lignes

Les investissements de régénération de lignes secondaires représentent des montants importants qui perdent beaucoup de leur intérêt pour y faire circuler des trains qui consomment autant que si les passagers prenaient leurs voitures. Ces lignes pourraient retrouver leur raison d'être avec un matériel électrique.

Réduire l'impact carbone des travaux de régénération est également crucial. Le Fonds d'Arbitrage Carbone[®], mis en avant par l'Union Internationale des Chemins de fer¹⁷, offre une solution pour financer le différentiel de coût entre des solutions traditionnelles à forte empreinte carbone et des solutions "bas-carbone"¹⁸. Objectif Carbone a accompagné le groupe Eiffage à la mise en place un Fonds d'Arbitrage Carbone doté de 6 M€ sur le projet de construction de la LGV Le Mans – Rennes. Le fonds est aujourd'hui généralisé à l'ensemble du groupe.

Sur une vingtaine d'années, le gain CO₂ réalisé par un changement d'énergie de traction au profit de l'électricité, les progrès sur le facteur d'émission de l'acier (les rails), la réduction de l'impact carbone des chantiers, ajoutés aux bénéfices sociétaux du maintien de la desserte ferroviaire pourraient alors permettre de justifier pleinement ces travaux.

17 Rapport de l'UIC sur l'impact carbone : https://uic.org/IMG/pdf/carbon_footprint_of_railway_infrastructure.pdf

18 Objectif Carbone est à l'origine de l'invention du [Fonds d'Arbitrage Carbone[®]](#).

Cette note a été co-rédigée par Damien, Olivier et Anaïs de l'équipe d'Objectif Carbone, cabinet de conseil en stratégie énergie-climat.

Une réaction, un commentaire, une précision : info@objectifcarbone.org



www.objectifcarbone.org

