



HAL
open science

Le verdissement des matériels roulants du transport ferroviaire en France. Comment répondre aux défis de la sortie du Diesel et se tenir à la pointe de l'innovation technologique pour la transition énergétique ?

Benoit Simian, Hervé de Treglode, Ivan Fauchaux, Antoine Fremont, Pierre Izard

► To cite this version:

Benoit Simian, Hervé de Treglode, Ivan Fauchaux, Antoine Fremont, Pierre Izard. Le verdissement des matériels roulants du transport ferroviaire en France. Comment répondre aux défis de la sortie du Diesel et se tenir à la pointe de l'innovation technologique pour la transition énergétique ?. 2018, 111p. hal-02125084

HAL Id: hal-02125084

<https://hal.science/hal-02125084>

Submitted on 10 May 2019

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Rapport final

Le *verdissement* des matériels roulants du transport ferroviaire en France

Comment répondre aux défis de la sortie du Diesel
et se tenir à la pointe de l'innovation technologique
pour la transition énergétique ?



Établi par Benoît SIMIAN

Député

*Avec l'assistance des rapporteurs
Hervé de TREGLODÉ (CGEDD)
Ivan FAUCHEUX (CGE)
Antoine FREMONT (IFSTTAR)
Et Pierre IZARD (SNCF)*

Novembre 2018



Rapport final

Le *verdissement* des matériels roulants du transport ferroviaire en France

**Comment répondre aux défis de la sortie du Diesel
et se tenir à la pointe de l'innovation technologique
pour assurer la transition énergétique ?**

établi par

Benoit Simian

Député

avec l'assistance des rapporteurs Hervé de Tréglodé (CGEDD), Ivan Faucheux (CGE), Antoine Frémont (Ifsttar) et Pierre Izard (SNCF)^(*)

^(*) avec le concours de Rémi Lefebvre,
assistant de mission

Novembre 2018

Sommaire

Avant-propos de Benoit Simian.....	<u>4</u>
Résumé.....	<u>6</u>
1.1. Pourquoi <i>verdir</i> le transport ferroviaire ?.....	<u>6</u>
1.2. Pourquoi maintenant ?.....	<u>6</u>
1.3. Pourquoi l'hydrogène ?.....	<u>7</u>
1. Organisation de la mission.....	<u>9</u>
2. Les raisons du nécessaire <i>verdissement</i>.....	<u>15</u>
3. Les quatre filières industrielles.....	<u>16</u>
4. La filière de l'hydrogène.....	<u>18</u>
5. Les orientations pour la suite de la mission.....	<u>21</u>
Conclusion.....	<u>24</u>
Annexes.....	<u>27</u>
1. Lettre de mission.....	<u>28</u>
2. Les pollutions locales et les émissions de GES des circulations de matériels roulants à moteur Diesel de la SNCF et des autres entreprises ferroviaires en France.....	<u>31</u>
3. Les coûts d'électrification des lignes ferroviaires en France.....	<u>35</u>
4. Les trois technologies possibles pour verdir les matériels roulants ferroviaires en France, hors hydrogène : biocarburants, gaz naturel et batteries électriques.....	<u>37</u>
4.1. Les trois technologies.....	<u>37</u>
4.2. Solution à base de carburants liquides ou gazeux.....	<u>38</u>
4.2.1. <i>Biocarburants</i>	<u>38</u>
4.2.2. <i>Gaz naturel</i>	<u>39</u>
4.2.3. <i>Solutions à base d'électricité</i>	<u>41</u>
5. Les projets de Bombardier pour verdir les parcs français de matériels roulants.....	<u>44</u>
5.1. Principe et avantages du train à batteries tout électrique.....	<u>44</u>
5.2. Selon Bombardier, un train adapté qui répond à de nombreux besoins du réseau.....	<u>45</u>

5.3. Pour Bombardier, une opportunité industrielle évidente	46
6. Les études et projets de la SNCF pour verdir ses parcs de matériels roulants (hors trains à l'hydrogène).....	48
6.1. La SNCF : gros consommateur d'énergie mais faible contributeur national aux émissions de CO ₂ et de particules.....	48
6.2. Le <i>verdissement</i> par le déclin du Diesel SNCF et l'utilisation de carburants plus propres.....	49
6.3. Le <i>verdissement</i> grâce aux trains bimodes.....	50
6.4. Des projets de trains hybrides avec batteries pour limiter les investissements d'infrastructure.....	51
7. La proposition d'Engie pour la production locale d'hydrogène en vue du ravitaillement en hydrogène de dix trains régionaux.....	53
8. La proposition d'Alstom pour commencer à faire circuler au plus tôt en France des trains à l'hydrogène.....	55
9. Les études de la SNCF sur les trains à hydrogène.....	58
9.1. Les trains à hydrogène dans la stratégie de la SNCF.....	58
9.2. Des contraintes à mettre en regard des opportunités.....	59
9.3. L'hydrogène et la nécessaire mise en place d'un écosystème territorial.....	60
9.4. La structuration de la SNCF pour développer le train à hydrogène.....	61
10. Les enjeux spécifiques du verdissement du fret ferroviaire.....	62
10.1. Une traction fret principalement électrique mais un fret diesel comparable voire supérieur aux TER diesel.....	62
10.2. Des tractions fret qui s'effectuent majoritairement sur le réseau électrifié.....	63
10.3. Le développement des locomotives fret bi-mode comme première réponse.....	64
10.4. Une opportunité pour une locomotive fret à hydrogène : les OFP portuaires.....	65
11. Coûts actuels et futurs (achat et maintenance) des piles à combustible. 67	
12. Coûts de production et de stockage de l'hydrogène.....	70
12.1. Coûts de production.....	70
12.2. Coûts logistiques et coûts de stockage.....	72
13. Sources de financement pour les projets de train à hydrogène en France	74
13.1. Les financements dédiés au <i>verdissement</i> du transport ferroviaire.....	74
13.1.1. <i>Fonds des contrats de plan État – Région (subventions)</i>	74
13.1.2. <i>Plan Hydrogène du Gouvernement</i>	75
13.1.3. <i>Les financements communautaires</i>	76

13.2. L'implication des acteurs industriels dans le domaine de la fourniture du matériel ferroviaire, des infrastructures de production et de stockage de l'hydrogène.....	78
14. Les trains et trams avec pile à combustible hors de France.....	82
15. Compte rendu des quatre ateliers du 23 octobre 2018 présidés par le député Benoit Simian.....	84
15.1. Atelier sur la sécurité présidé par Francis Dufour (ÉPSF).....	84
15.1.1. <i>Présentation de Francis Dufour (ÉPSF)</i>	84
15.1.2. <i>Interventions / Questions</i>	86
15.2. Atelier sur l'énergie présidé par Alice Vieillefosse (DGÉC).....	88
15.2.1. <i>Présentation d'Alivce Vieillefosse, de la DGÉC</i>	88
15.2.2. <i>Questions / interventions</i>	89
15.3. Atelier sur le financement animé par Ivan Faucheux (CGÉ).....	91
15.3.1. <i>Présentation d'Ivan Faucheux (CGÉ – ci-après)</i>	91
15.3.2. <i>Questions / interventions</i>	92
15.4. Atelier sur la gouvernance animé par Hervé de Tréglodé (CGEDD).....	93
15.4.1. <i>Présentation de Hervé de Tréglodé (CGEDD)</i>	93
15.4.2. <i>Questions / interventions</i>	94
16. Liste des personnes rencontrées.....	103
17. Glossaire des sigles et acronymes.....	107

Avant-propos de Benoit Simian



Totalement engagé dans la transition énergétique en matière de transports, le Gouvernement d'Édouard Philippe s'est fixé un objectif ambitieux : celui d'atteindre la *neutralité carbone* d'ici 2050.

Le ferroviaire figure au premier plan des modes de transport à privilégier, compte tenu de ses vertus sur le plan écologique. Cependant, si 80 % des circulations sont réalisées par des matériels roulants à traction électrique, les 20 % restant correspondent à des trains fonctionnant au diesel, dont la plupart circulent en zone urbaine.

Conscient de ce constat, et soucieux d'accélérer la transition énergétique en matière de transport, le Premier ministre m'a confié, le 12 juin dernier, une mission dont l'objectif est de préparer le *verdissement*

du parc ferroviaire en envisageant le remplacement des matériels roulants les plus polluants.

Le présent rapport est une synthèse de nos travaux. Il constitue l'aboutissement d'une réflexion entamée dès la publication de la lettre de mission du Premier ministre et de la ministre chargée des transports, à laquelle ont été associés quatre co-rapporteurs du Conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD), du Conseil général de l'économie (CGE), de l'Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR) et de la SNCF. Nous avons auditionné plus d'une cinquantaine de personnes et une trentaine d'organismes, et reçu de nombreuses contributions écrites qui ont permis d'enrichir nos réflexions. L'ensemble des acteurs ont finalement été réunis sous ma présidence le 23 octobre, autour de quatre ateliers thématiques (sécurité, énergie, financement et gouvernance), afin d'analyser les conditions de mise en circulation des premiers trains à hydrogène à échéance 2022.

Trois critères ont été établis pour juger du bien-fondé des futurs projets de ligne ferroviaire à hydrogène. En premier lieu, l'enjeu de pollution locale, notamment dans les métropoles, les zones périurbaines et les parcs nationaux et régionaux. Ensuite, la nécessité de mutualiser les stations de recharge de l'hydrogène entre différents modes de transports (trains, bus, taxis). Enfin, pour des raisons de coûts économiques et environnementaux, la proximité de sources de production ou de distribution d'hydrogène de la ligne ferroviaire. Si la mission n'a pas vocation à se substituer aux travaux des Régions en la matière, la mission leur donnera un appui et une orientation dans ce défi majeur qu'est la sortie du diesel.

Avec la publication de ce rapport, je tiens à agir en toute transparence afin de favoriser la préparation de la sortie du diesel dans le secteur du transport ferroviaire, trop souvent oublié des réflexions en la matière, et encourager le déploiement d'une filière de l'hydrogène en plein développement.

Je tiens à remercier les co-rapporteurs de leur aide et de leur disponibilité, ainsi que de leurs suggestions qui ont permis d'alimenter la réflexion. Avec cette mission, le Gouvernement donne une impulsion décisive au verdissement de notre flotte ferroviaire, puisqu'il s'agit là avant tout de faire rentrer le secteur dans l'ère du *zéro émission* et dessiner les contours de notre politique industrielle pour demain.

Benoit SIMIAN

Résumé

Le présent rapport est notamment fondé sur les auditions qui ont été conduites dans le cadre de la mission, sur les ateliers du 23 octobre 2018, ainsi que sur les visites et autres entretiens depuis le commencement de la mission en juin 2018.

1.1. Pourquoi *verdir* le transport ferroviaire ?

En France comme ailleurs, le transport ferroviaire n'est pas un gros émetteur de gaz à effet de serre ou de polluants locaux. En France, il se fait à 80 % sur des lignes électrifiées. Mais **la moitié des lignes ne sont pas électrifiées. Et un quart des matériels roulants ont des moteurs Diesel.**

Le transport ferroviaire ne peut se tenir à l'écart de la nécessité de s'inscrire dans la *neutralité carbone* des économies nationales, plus particulièrement de l'économie française en 2050. De plus, la diminution des émissions de polluants locaux (NO_x, oxyde de carbone, particules fines, etc.) exige un gros effort de tous les transports en commun, singulièrement le transport ferroviaire dans les cœurs de ville comme dans les sites à protéger tout particulièrement. De nombreuses villes en Europe, et notamment Paris, ont annoncé des restrictions et interdictions de circulation pour les véhicules thermiques des particuliers. La mise en œuvre de restrictions de même nature pour les transports en commun a commencé (bus, etc.).

« Le train à hydrogène, c'est le train au service du territoire, et le territoire au service du train. »

(Pierre Serre-Combe, CEA-Liten, audition du 17 juillet 2018)

1.2. Pourquoi maintenant ?

Deux facteurs se conjuguent pour expliquer l'urgence à disposer de solutions pour *verdir* le parc ferroviaire.

Le premier facteur est budgétaire. Les électrifications de voie ferrée sont très coûteuses, alors même que la situation des finances publiques est difficile. Si de nombreuses solutions sont aujourd'hui envisagées afin de diminuer ces coûts, ou même d'éviter ces investissements, il faut en préparer dès maintenant l'application. Il faut être en mesure, dans les années qui viennent, de les mettre en œuvre en disposant d'un retour d'expérience suffisamment solide pour ne pas se trouver un jour piégé dans une impasse technique ou économique. Il faut bien garder à l'esprit que **les solutions nécessitant de nouveaux moteurs ou matériels roulants sont souvent bien moins coûteuses que des solutions d'électrification.**

Dans le cadre des contrats de plan État-Région, un certain nombre d'opérations ont été inscrites touchant au *verdissement* du ferroviaire, avec souvent des projets d'électrification de nouvelles voies ou de renouvellement de voies électrifiées anciennes. Plusieurs ne sont pas reprises dans les recommandations du Conseil d'orientation des infrastructures (COI). Sur un total d'un milliard d'euros d'opérations, celles qui ne sont pas inscrites dans les recommandations du COI dans le cadre contractuel établi par les contrats de plan État-Région peuvent être estimées à près de 700 millions d'euros.

Le second facteur est la fenêtre d'opportunité que représente **le remplacement d'un grand nombre de matériels fonctionnant aujourd'hui au gazole**. Selon les constructeurs, aujourd'hui près de mille trains TER bimodes ou seulement Diesel circulent en France. Ces matériels roulants datent pour moitié des années 1990 et des années 2000¹. Ainsi, ce sont près de 450 trains qui devront être renouvelés à partir de 2028/2030, et le reste environ dix à quinze ans plus tard.

De plus, **un quart du parc est à moteur Diesel**. Comme ce sont des matériels qui ont de longues durées de vie (plus de 30 ans), la mise en place d'une stratégie de long terme identifiant les principaux risques et les principales opportunités de renouvellement de ce parc conduisent à considérer comme déraisonnable de parier sur le fait qu'à cette échéance, la seule option soit un nouveau renouvellement du parc² par du matériel toujours émetteur, même partiellement, de gaz à effet de serre ou de polluants locaux.

1.3. Pourquoi l'hydrogène ?

Deux familles de technologies aujourd'hui ont des degrés de maturité suffisants : les technologies à base de batteries électrochimiques, et les technologies à base de pile à combustible (hydrogène). Dans le monde, l'industrie ferroviaire a souvent fait le choix de recourir aux batteries électrochimiques. Mais plusieurs entreprises, notamment Alstom, parient sur les avantages de l'hydrogène (autonomie, temps de recharge, etc.) pour considérer que cette solution peut être intéressante dès à présent dans des configurations territoriales particulières.

Il donc est apparu à la mission qu'une première circulation vers 2022 de trains à hydrogène était opportune, parallèlement à la circulation de trains avec batteries ou de trains hybrides (batteries-gazole).

La maturité de la technologie du stockage électrochimique de l'énergie, tirée par le marché automobile et le stockage stationnaire de l'énergie, autorise son développement et déploiement par les industriels et les exploitants. L'hydrogène, de son côté, est une alternative prometteuse pour la sortie du Diesel. Au plan technologique, elle est à maturité, **comme le prouve la circulation en Allemagne de deux trains Coradia iLint d'Alstom depuis le 17 septembre 2018**. Au plan économique, des avancées importantes sont apparues, par exemple sur les coûts des électrolyseurs alcalins en 2017. Un effort de la puissance publique est nécessaire si l'on veut que l'option générale de l'hydrogène dans l'économie française se transforme en succès.

¹ 109 trains X TER (X 72500, Alstom) mis en service entre 1997 et 2002, 336 trains A TER (X73500 et 73900, Alstom) mis en service entre 1999 et 2004, 163 trains XGC (X76500, Bombardier) mis en service entre 2004 et 2010, 326 trains BGC (X81500 et 82500, Bombardier - bimode) mis en service entre 2004 et 2011

² L'idée de pouvoir réutiliser tout ou partie du matériel en en changeant les composants principaux s'inscrit dans l'impératif d'optimisation des coûts d'investissement dans le domaine des infrastructures publiques. Le *retrofit* et la prolongation de la durée de vie des grandes infrastructures publiques devient un enjeu économique et technologique majeur.

« Déployer des innovations à grande échelle est indispensable dans de nombreux domaines des transports, par exemple [...] le basculement sur certaines lignes ferroviaires non électrifiées à des motorisations hydrogène, par exemple par un appel à projets [...]. »

(Conseil d'orientation des infrastructures présidé par Philippe Duron, 1^{er} février 2018)

La capacité à susciter et soutenir un premier déploiement d'une flotte significative de trains à hydrogène peut permettre, en particulier sur les parties à l'amont de cette filière (construction de matériel ferroviaire, électrolyseurs, pile à combustible et dispositifs de stockage), de cristalliser en France et en Europe les centres de compétences et les centres industriels. Le caractère mondial du marché ferroviaire, et surtout les gros enjeux de pollution locale (54 % de la population mondiale vit dans les zones urbaines, cette proportion devant passer à 66 % en 2050 d'après l'ONU) inscrivent le développement de cette technologie dans le cadre des avantages compétitifs potentiels de l'économie française à terme.

« L'hydrogène apportera sans aucun doute une part importante des réponses pour décarboner et dépolluer nos solutions de mobilité. »

Élisabeth Borne, ministre chargée des transports, présentation du plan Hydrogène, 1^{er} juin 2018)

1. Organisation de la mission

Confiée le 11 juin 2018 par le Premier ministre sur le *verdissement* des matériels roulants en France, la mission a été organisée en deux phases :

- une première phase de la fin de juin à la fin de septembre 2018, qui a conduit à un rapport d'étape,
- une seconde phase d'octobre à novembre 2018, qui a conduit au présent rapport.

Durant la première phase, des auditions hebdomadaires à l'Assemblée nationale ont permis de recevoir un grand nombre de personnalités et d'experts, représentant les principales filières et les principaux domaines industriels, représentant aussi les principales administrations et entreprises publiques. Les entretiens ont été résumés dans des comptes rendus, conservés par les rapporteurs avec les documents remis au député.

Une visite en Basse-Saxe a permis de connaître l'usine d'Alstom construisant les rames Coradia iLint alimentées en hydrogène, et de s'entretenir avec les dirigeants de la société.

Le 16 septembre 2018, le député Benoît Simian a participé à l'inauguration **des premières circulations de trains à l'hydrogène** en Basse-Saxe (Allemagne). Quatorze rames ont été commandées. Il s'est, à cette occasion, entretenu avec la ministre des transports du Land allemand, et avec le président d'Alstom.

Le 19 juillet 2018, le député Benoît Simian a adressé une lettre à tous les présidents de région, autorités organisatrices des transports régionaux, pour leur demander de faire connaître leurs politiques et leurs projets quant au *verdissement* du matériel roulant, et particulièrement des TER. Une seconde lettre leur a été adressée en septembre 2018, pour connaître les lignes sur lesquelles des premières circulations de trains à hydrogène seraient envisageables. La plupart des Régions ont répondu avec l'identification de lignes ou de zones propices au déploiement de premiers trains hydrogène.

Les réponses écrites des régions

La Région **Auvergne Rhône-Alpes** a indiqué que, « *forte d'une concentration exceptionnelle des acteurs de la filière hydrogène, la Région Auvergne-Rhône-Alpes a décidé d'en faire une filière d'excellence. Afin notamment de « booster » la mobilité hydrogène, la Région a notamment lancé le projet Zero Emission Valley. Dans ce contexte, elle est bien sûr intéressée à participer à des expérimentations sur le train à hydrogène.* ». Dans le cadre de la réponse à la demande de la mission, la Région indique que « *le territoire auvergnat, qui présente essentiellement des lignes thermiques, constituerait un bon terrain pour des tests. Notamment, les axes suivants : Lyon – Clermont ; Clermont – Le Puy ; Le Puy – Saint-Etienne ou, en secteur presque entièrement urbain dans l'aire urbaine de Lyon, la section Tassin – Lozanne des lignes dites de l'Ouest lyonnais.* »

La Région de **Bourgogne-Franche-Comté**, pour qui la « *baisse des émissions relatives à la consommation diesel a toujours été une préoccupation* », propose sa candidature « *à l'expérimentation sur le réseau français d'un train à hydrogène* ». La

Région a présenté deux lignes possibles pour des trains à hydrogène : la ligne Auxerre – Laroche-Migennes et la ligne Dole – Andelot – Saint-Claude et/ou Pontarlier.

La Région **Bretagne** a identifié au terme d'une étude croisant les potentiels en utilisation de l'hydrogène du territoire du pays de la Roche aux fées (production d'énergies renouvelables, enjeux de consommation pour des usages énergétiques, de transport et thermique), la ligne Rennes – Chateaubriand, qui fait partie des 5 lignes de l'étoile ferroviaire de Rennes, et dont la fréquentation est en hausse constante depuis 2008 (plus de 500 000 voyageurs).

La Région du **Centre-Val-de-Loire** rappelle les électrifications qu'elle a financées, ses achats de rames bimodes, sa participation aux études concernant l'hybridation des rames bimodes Régiolis. Elle porte une grande attention au maintien de plusieurs lignes ferroviaires du quotidien. A titre préliminaire, la Région a identifié que « *les lignes Tours/Loches et Tours/Chinon seraient les plus pertinentes. La perspective d'installer des stations-service sur Tours permettrait une mutualisation intéressante pour ces deux axes qui desservent, sur leur premier tiers, des zones agglomérées (métropole de Tours), puis des zones rurales jusqu'à leur terminus (deux sous-préfectures)* ».

La Région des **Hauts-de-France** rappelle qu'elle « *est engagée dans la transition énergétique et écologique notamment à travers la Rev3, troisième révolution industrielle* », et que la « *question du verdissement du parc ferroviaire est bien entendu l'une de [ses] priorités* ». A ce stade, elle n'a pas identifié de lignes, mais est engagée par ailleurs dans une opérations de déploiement de bus à hydrogène (financée en partie par la BEI).

La Région **Grand Est** a fait valoir ses financements en faveur des matériels roulants bimodes, des expérimentations sur le conditionnement d'air par pompe à chaleur des Régiolis, des remotorisations des AGC, à l'expérimentation de l'hybridation des Régiolis, et sur les infrastructures (installations de maintenance du matériel roulant, future électrification de Paris – Troyes), des études sur des carburants moins polluants. Concernant l'hydrogène, « *il est nécessaire de se mettre en ordre de marche pour permettre à terme l'exploitation de cette énergie « propre », et une fois que tout l'écosystème sera établi (matériel équipé et approvisionnement en hydrogène possible), la Région Grand Est souhaite participer à l'industrialisation de matériels circulant avec cette nouvelle source d'énergie* ». La Région a en particulier noté que l'expérimentation allemande se faisait dans une « *configuration (qui) se retrouve aussi en France sur les lignes régionales, notamment périurbaines* ». En effet, « *nombre d'entre elles affichent des longueurs plus importantes, bien supérieures à 100 km, comme il en existe en Région Grand Est, par exemple pour les relations inter-villes, certaines d'entre elles n'étant que partiellement ou pas électrifiées* ». Ainsi la Région a-t-elle identifiée que « *la ligne Paris-Mulhouse (ligne 4) serait dans ce sens parfaitement adaptée à cette expérimentation (...)* ; à l'issue de l'électrification jusqu'à Troyes dont l'achèvement est attendu au prochain CPER, la section non électrifiée restera néanmoins encore conséquente avec 269 km entre Troyes et Belfort ».

En parallèle, la présidente du **Département du Haut-Rhin** a fait valoir auprès du député le « *projet de mise en œuvre d'un train à hydrogène sur la ligne devant être reconstruite entre Colmar et la ville allemande de Fribourg* ».

La Région **Normandie** a, quant à elle, identifié « *en première approche, la Pointe de Caux, de Fécamp jusqu'au Havre (comme) le territoire le opportun pour une expérimentation (...)*. Ce territoire profite en effet de l'écosystème industriel de l'estuaire de la Seine ».

La région **Nouvelle Aquitaine** a indiqué travailler sur plusieurs sujets pour *verdir* la flotte régionale (158 matériels roulants à moteur Diesel aujourd'hui, sur 204 rames). La

Région « *s'associe pour 3 millions d'euros, avec les Régions Grand Est et Occitanie au projet de développement d'un TER Hybride avec stockage d'énergie embarqué porté par la SNCF* ». Dans le cadre d'une étude plus approfondie sur le profil des lignes, la Région a indiqué au terme de son analyse avoir identifié l'opportunité de déployer de premiers trains « *sur des lignes à proximité des centres de maintenance de Bordeaux, Limoges et Saintes* :

- *Angoulême-Saintes-Royan,*
- *Bordeaux-Bergerac-Sarlat,*
- *Bordeaux-Périgueux-Limoges,*
- *Bordeaux-Le Verdon sur Mer.* »

La Région d'**Occitanie** étudie la transformation de matériel thermique en matériel hybride. Mais elle veut aussi devenir « *le terrain privilégié de l'expérimentation de trains à hydrogène* », singulièrement sur deux lignes : ligne de Cerdagne entre Villefranche-de-Conflent et Latour-de-Carol, ligne Montréjeau – Luchon. L'Occitanie « *étudie en parallèle les conditions permettant qu'un écosystème autour de la production et la distribution d'hydrogène puisse voir le jour* ». La Région est candidate « *pour l'expérimentation d'automoteurs fonctionnant à l'hydrogène sur le réseau ferroviaire régional pour lequel un appui de l'État, pouvant s'avérer décisif, est fortement attendu* ». Elle précise toutefois « *qu'aucune ligne non ou partiellement électrifiée du réseau n'a été formellement identifiée* ». Elle précise encore que « *le caractère interrégional d'une définition des solutions permettant la transition vers l'hydrogène du parc de matériel roulant ferroviaire pourrait s'avérer pertinent en termes de mutualisation et de partage du financement* ».

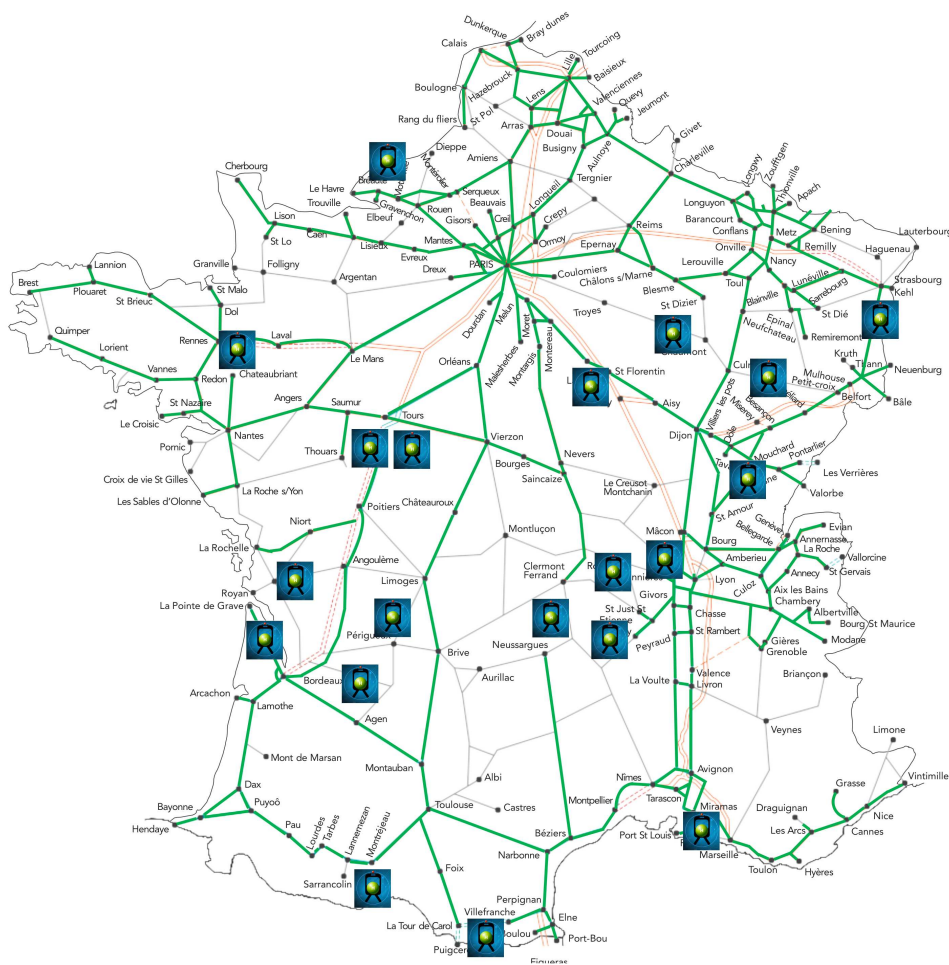
La Région des **Pays-de-la-Loire** a insisté sur l'importance de sa mobilisation en faveur de l'hydrogène, « *objectif majeur de la Feuille de route régionale pour la transition énergétique adoptée en 2016 par les élus régionaux* ». Elle ajoute que l'« *utilisation des sources d'énergie renouvelable par les parcs éoliens offshore ou on-land ligériens, pour une production d'hydrogène par électrolyse, permettrait de garantir une origine locale et de développer une chaîne de distribution et d'usage mutualisée entre acteurs du transport de biens et de personnes* ». A ce stade, la Région a confirmé son engagement et son intérêt stratégique pour continuer les travaux d'identification de lignes susceptibles d'accueillir rapidement des train hydrogène, mais souhaite approfondir les enjeux d'approvisionnement et d'usage de l'hydrogène pour les autres applications (soutien & service au système énergétique notamment).

La Région **Provence Alpes Côte d'Azur** a quant à elle indiqué examiner plusieurs technologies pour le verdissement, indiquant que « *deux sections sont prioritairement analysées actuellement, en raison du trafic supporté, du coût important que représenterait l'installation de caténaires et de leur fonction de desserte métropolitaine : Marseille–Aix-en-Provence TER et Nice–plan du Var, sur la ligne des Chemins de fer de Provence* ». De façon plus précise, et notamment en raison « *d'une production d'hydrogène fatal issue de l'industrie à Fos-sur-Mer* », la Région a identifié en particulier comme ligne présentant des conditions optimales pour tester cette technologie « *la ligne de la côte le entre Marseille et Miramas via Port-de-Bouc* » ; en effet, cette ligne « *est située dans une zone à fort enjeu de pollution, zones identifiées dans le contentieux européen sur la qualité de l'air* ».

La carte ci-après résume l'ensemble des lignes et zones identifiées dans les réponses des Régions ; la mission note avec intérêt que, dans les réponses qui sont remontées, et même si les territoire bien été analysé à l'aune des trois principaux critères de la lettre qui leur a été envoyée, ces dernières reflètent une grande diversité de

situations : depuis des enjeux d'étoile ferroviaire autour d'agglomération où le train hydrogène serait alors un outil de renforcement des mobilités périurbaines jusqu'à des portions de lignes de grandes distances interrégionales non électrifiées, les réflexions relatives à la fourniture de la molécule ont aussi conduit à des choix diversifiés (zone industrielle ou proximité d'énergies renouvelables intermittentes). Cette actuelle remontée d'expression d'intérêt et d'engagement de la part des collectivités territoriales, dans sa diversité des cas d'usage et des synergies avec le territoire identifié, permet d'envisager une expérimentation d'une part suffisamment massive, et d'autre part sur un nombre représentatif de cas d'usage, soit ferroviaire, soit de l'hydrogène en tant que vecteur énergétique territoriale.

Carte des lignes / zones identifiées par les Régions au terme de la consultation écrite comme susceptible d'accueillir une expérimentation hydrogène



Légende :

- Traction électrique
- Lignes principales non électrifiées
- - - Autres types de courant en service
- - - Électrification 25000V monophasé en cours
- - - Électrification 1500V en cours
- Lignes à grande vitesse 25000V
- Lignes à grande vitesse 1500V
- - - Électrification LGV 25000V en cours

Lignes ou zones d'expérimentation du train hydrogène identifiées par les Régions

Source : SNCF, Mission sur le verdissement du ferroviaire

Les matériels roulants à *verdir*

Durant la première phase, la mission a porté sur tous les matériels roulants émettant des pollutions soit de gaz à effet de serre, soit de gaz et particules nocives localement (NOx, CO, SO₂, particules fines, etc.). Il s'agit principalement de matériels pour les trains d'équilibre du territoire (TET), pour les trains régionaux (TER et Transilien), pour le transport de fret, pour les travaux d'infrastructure et pour les manœuvres en gare. Dans la seconde phase, la mission s'est concentrée sur la technologie de l'hydrogène.

Il est important de rappeler d'entrée de jeu que le transport ferroviaire est un mode beaucoup plus *propre* que les autres modes, singulièrement le mode routier et le mode aérien. Néanmoins, ce transport, comme les autres modes, doit apporter sa contribution aux efforts de décarbonation du pays, et de diminution de toutes les pollutions locales.

Les ateliers du 23 octobre 2018

Après la publication et l'envoi du pré-rapport à l'ensemble des personnes auditionnées, des ateliers réunissant tous les acteurs qui se sont signalés ont permis de rassembler des acteurs qui travaillent, dans le secteur du ferroviaire et de l'hydrogène, encore trop de façon indépendante. L'intérêt de ces ateliers a été :

- de constater un engagement réel de l'ensemble des acteurs de la filière pour l'objectif commun d'une mise en service le plus rapidement possible de trains hydrogène dans une opération pilote, c'est-à-dire de taille suffisante pour permettre d'être au rendez-vous du renouvellement du plus gros du parc diesel avec :
 - un retour d'expérience suffisant,
 - et une filière industrielle suffisamment robuste pour envisager une montée en puissance forte dans des conditions économiques acceptables.
- de positionner la technologie hydrogène à la croisée des enjeux énergétiques et des enjeux de transport de personne comme une solution prometteuse, techniquement éprouvée, économiquement à confirmer et industriellement à bâtir,
- d'ouvrir des pistes pour déterminer les meilleures localisations pour cette opération pilote (plusieurs territoires).

Le compte-rendu des ateliers est porté en annexe du présent rapport, mais, de façon plus spécifique, les principaux sujets qui ont émergés des ateliers peuvent être synthétisés comme suit :

- en ce qui concerne l'atelier sur la sécurité, des enjeux spécifiques sont sur le matériel roulant (EPSF) avec un besoin de transposer et adapter ce qui se fait par ailleurs, en raisonnant par écart par rapport au matériel classique, et sur les stations avec déjà un corpus existant, mais lié aux activités industrielles essentiellement. Ainsi des évolutions réglementaires seront nécessaires ;

- en ce qui concerne l'atelier sur l'énergie, la volonté de tous les acteurs de se lancer dans cette technologie pour des activités énergétiques, transport ou plus classiques (de type industriel) permet de se reposer sur un panel large de cas d'usages, d'applications et de solutions. La mutualisation à la phase d'amorçage des usages reste nécessaire ;

- en ce qui concerne l'atelier sur le financement, les ressources, qu'elles soient subventionnelles (Europe, CPER pour lesquels il sera nécessaire d'ouvrir aux Régions la possibilité de verdir le matériel, tout notamment via la technologie hydrogène, en alternative aux opérations d'électrification sur lesquelles les conclusions du COI sont parfois défavorables, plan gouvernemental hydrogène) ou sous forme de fonds propres, sont importantes. L'ADEME et la Banque des territoires ont confirmé leur capacité à financer des études d'ingénierie pour aider aux projets à affiner leurs modèles économiques et permettre ainsi l'intervention d'acteurs de marché ;

- en ce qui concerne l'atelier sur la gouvernance, le consensus pour aller vite orienté sur un avenant aux contrats existants entre la SNCF et Alstom (Régiolis en particulier) et la SNCF a confirmé que « 2022 est l'objectif de l'établissement pour faire circuler un train hydrogène accueillant des voyageurs ». Il reste nécessaire d'identifier plus finement les territoires, et notamment ceux qui ont une volonté stratégique de maintien et de développement des dessertes fines. Le profil des lignes (trafic suffisant, profil de ligne adapté et enjeu de zéro émission), ainsi que la possibilité de mutualiser avec d'autres usages doit maintenant faire l'objet de chiffrages.

2. Les raisons du nécessaire *verdissement*

La presque totalité des personnalités entendues dans le cadre de la mission conviennent que le *verdissement* des matériels ferroviaires est une nécessité qui va plus ou moins vite s'imposer. *Verdir* le parc ferroviaire, c'est remplacer les matériels roulants à émissions polluantes dans les meilleurs délais, afin de viser la *neutralité carbone* en 2050, mais aussi viser la diminution ou la suppression des pollutions locales. Pour beaucoup de personnalités politiques, la préoccupation envers la pollution locale est plus forte encore, car elle nuit d'ores et déjà à la santé et au confort des populations, notamment au cœur des villes. Nombreux sont ceux qui croient que les matériels ferroviaires Diesel seront un jour interdits dans les grandes villes, même s'ils savent bien qu'aujourd'hui, rapportée aux autres sources de pollution locale, la pollution ferroviaire est le plus souvent très faible.

Les constructeurs (Alstom, Bombardier, CAF, etc.) comme les exploitants (SNCF, etc.) se préparent donc à une évolution qui leur apparaît inéluctable : diminuer ou supprimer les émissions de leurs moteurs. Le remplacement du matériel Diesel est possible de deux façons.

- La première option est d'**électrifier les lignes**. C'est une option coûteuse. L'électrification coûte entre 0,35 et 1,5 million d'euros par kilomètre de voie simple, et de 0,7 million à 3 millions pour une ligne à double voie. Même si seulement 57 % du réseau ferré est électrifié en France, les lignes dont l'électrification est socialement ou économiquement intéressante sont désormais fort peu nombreuses.
- La seconde option est de **choisir des technologies de motorisation qui soient vertes et autonomes** (emportant leur propre énergie de propulsion). Le coût de l'infrastructure est alors reporté en partie sur le coût du matériel roulant. Dans un premier temps, il sera plus cher que s'il est raccordé par pantographe à une caténaire. Mais si elle est appuyée sur une filière de l'hydrogène efficace (avec coûts des piles à combustible et du kilogramme d'hydrogène pertinents), cette solution présentera un avantage économique doublant l'avantage écologique.

3. Les quatre filières industrielles

Il existe principalement quatre technologies pour *verdir* les matériels roulants :

- l'emploi de biocarburants à la place du gazole ou ajoutés au gazole,
- l'emploi de gaz naturel (méthane), notamment de biogaz,
- l'emploi de batteries d'accumulateurs, en complément ou non de moteurs Diesel,
- l'emploi d'hydrogène, associé à des batteries.

Assez peu de travaux de recherche et développement regardent les deux premières technologies, pour ce qui est du transport ferroviaire. L'analyse présentée en annexe conduit au tableau de comparaison suivant :

Solutions de <i>verdissement</i> de la propulsion ferroviaire – principaux avantages / inconvénients					
Technologies à base de carburants liquides ou gazeux			Technologies avec propulsion électrique		
Technologie	Avantages	Inconvénients	Technologie	Avantages	Inconvénients
<i>Biocarburants de première génération</i>	Disponibilité de la technologie / Coût	Mobilisation de la biomasse (et donc bilan environnemental sujet à caution) / Pollution locale	<i>100 % batteries</i>	Technologie arrivant à maturité (tirée par le secteur automobile)	Autonomie encore limitée / Long temps de recharge des batteries
<i>Biocarburants de seconde génération</i>	Pollution locale faible / Pas de nécessité de modifier les systèmes de propulsion	Solution non éprouvée industriellement / Bilan énergétique et économique non convaincant	<i>Hybrides</i>	Solution disponible	Gains plus ou moins importants en émission de CO ₂ , selon les profils d'usage, mais ne permettant pas d'atteindre le <i>zéro émission</i>
<i>Gaz naturel</i>	Disponibilité de la solution technique	Gains marginaux en pollution locale et en CO ₂ / Dépend de la filière d'approvisionnement en biogaz non encore mature	<i>H₂</i>	Emport massif intéressant par rapport aux batteries, et autonomie plus importante / Durée de charge réduit (compatible avec des usages fréquents)	Coût d'approvisionnement de l'hydrogène décarboné encore trop élevé, mais devant diminuer en mettant en place une filière française de l'hydrogène

Concernant le gaz naturel, une centaine de matériels circulent dans le monde en étant alimenté au gaz naturel, soit avec ce seul carburant, soit souvent en solution hybride avec du gazole. Selon la société GRDF, le GNV (gaz naturel pour véhicule) permet de diminuer les pollutions locales : - 95 % pour les particules fines et - 30 % pour les NO_x. Si le GNV est du biométhane, les émissions de CO₂ sont diminuées de 80 %³. Malgré

³ niveaux d'émission donnés par GRDF lors des auditions en septembre 2018

ces avantages environnementaux, cette solution n'est guère étudiée en France pour le moment, principalement parce que ce n'est pas une solution *zéro émission*.

Deux technologies (batteries et hybrides) sont l'objet d'études et de projets nombreux en France comme à l'étranger. Il est certain qu'elles donneront lieu, un peu partout dans le monde, à des expérimentations et à des circulations de plus en plus nombreuses.

Entre la solution des batteries (en mode hybride ou non) et de l'hydrogène, la filière ferroviaire se divise. La société Bombardier estime que le développement de la technologie de l'hydrogène sera précédé du développement de technologies avec batteries, sur lesquelles elle se concentre présentement. Cette technologie serait, selon Bombardier, d'autant plus compétitive qu'elle serait associée à des électrifications moins chères de voies ferrées. La société Alstom a aussi développé et commercialisé des trains hybrides pour la SNCF. Mais Alstom pense que la technologie hybride batteries-gazole, même si elle est immédiatement disponible et doit se déployer à court terme, ne répondra pas à long terme à l'objectif du *zéro émission* fixé ou prévisible dans de nombreux pays. C'est pourquoi Alstom a développé la technologie de l'hydrogène pour les trains régionaux allemands, et se propose d'adapter cette brique technologique à des trains régionaux français. La société Alstom, qui maîtrise la technologie de l'hydrogène et a lancé le Coradia iLint en Allemagne, est prête, contrairement à Bombardier, à étudier sans attendre l'intégration de la technologie de l'hydrogène sur des trains régionaux en exploitation, comme pour les trains de fret et les circulations techniques (trains de manœuvre, trains de travaux, locotracteurs, etc.)⁴. Mais aujourd'hui, l'hydrogène obtenu par électrolyse reste encore trop cher. Selon Alstom, c'est néanmoins la solution de référence dès lors qu'il est nécessaire d'avoir des trains à grande autonomie.

Pour les deux technologies que sont les trains à batteries (hybrides ou non) et les trains à hydrogène, les enjeux sont d'importance pour l'industrie française. Mais elles ne s'inscrivent pas dans les mêmes calendriers ni les mêmes besoins de développement. La concurrence des pays d'Asie (Chine, Corée et Japon) est de plus en plus vive sur les batteries et les chances de modifier profondément les actuelles places acquises en la matière sont faibles. Les enjeux industriels les plus importants concernent les cellules et systèmes de contrôle des batteries, les électrolyseurs et les piles à combustible.

⁴ Pour les locomotives exploitées sur des distances courtes, les deux technologies sont en concurrence plus forte. Car l'hydrogène tire ses plus gros avantages quand le ravitaillement doit se faire rapidement et peu souvent.

4. La filière de l'hydrogène

La France prépare le développement de l'hydrogène. Le plan présenté par le Ministre chargé de l'écologie le 1^{er} juin 2018 concerne notamment le déploiement de la production d'électricité par pile à combustible pour les besoins du transport.

Dans le Plan national Hydrogène publié par le Gouvernement le 1^{er} juin 2018, on distingue trois sources d'hydrogène :

- l'**hydrogène carboné**, issu principalement du vaporeformage,
- l'**hydrogène partiellement carboné ou gris**, issu de l'électrolyse de l'eau avec l'électricité du mix français (électricité décarbonée à environ 90 %),
- l'**hydrogène vert**, hydrogène fatal de l'industrie ou hydrogène d'électrolyse avec électricité verte (source entièrement renouvelable).

La filière française peine encore à se structurer et se renforcer, même si la France dispose de nombreux atouts. De ce point de vue, le marché ferroviaire représente pour la filière une opportunité intéressante en raison de volumes prévisibles et importants. De plus, il est apparu que cette opportunité pouvait dans un premier temps ne pas trop dépendre des perspectives de marchés de la mobilité personnelle pour lesquels l'hydrogène ne présente pas encore d'avantages évidents au regard de la densité énergétique et du coût total de possession des véhicules. Lors des auditions de la mission (notamment celle de la direction générale des entreprises au ministère de l'économie et des finances), le tissu industriel national est apparu significatif sur de nombreux segments de la chaîne de valeur : production, stockage, pile à combustible et électronique de puissance associée. Mais ce tissu est encore fragile. Le développement du marché, en fonction de sa localisation, influera de façon importante sur l'emplacement des futures unités de production.

En regard de cette opportunité industrielle, la mission a relevé que :

1. des opportunités de financement existent dans les contrats de plan État-Région (CPER) pour soutenir le déploiement d'une flotte suffisante, afin de permettre à la filière de basculer d'un mode de production encore artisanal à des premières unités industrielles significatives,
2. des possibilités de financements européens dans le cadre des financements opérés par l'*Innovation and Networks Executive Agency* INEA (dispositif *Connecting Europe Facility* CEF, doté de 22,4 milliards d'euros dans le domaine des transports) existent, mais sont encore peu utilisées,
3. l'intérêt de principe de la Caisse des dépôts et consignations (CDC) et de la Banque européenne d'investissement (BEI) pour l'hydrogène permet de compléter les financements des CPER,
4. la possibilité de mobiliser des moyens du Plan national Hydrogène du Gouvernement est une opportunité pour, en amont, soutenir les projets industriels qui pourraient émerger dans le domaine des nouvelles activités de production de matériel et de composants ainsi que les premiers déploiements.

Ainsi, si l'hydrogène est une opportunité pour le transport ferroviaire en France, il est aussi une opportunité industrielle à prendre en considération.

Obtenu par électrolyse⁵, l'hydrogène *gris* ou *vert* est encore bien trop cher. Aujourd'hui, les grosses infrastructures d'électrolyse donnent de l'hydrogène à 100 ou 200 euros par MWh, soit de 4 à 6 euros par kilogramme (prix à la sortie de l'électrolyseur), si leur durée de fonctionnement est supérieure à 7 000 heures par an. Ce prix doit être augmenté des coûts de compression (de 30 à 350 ou 700 bars). Au total, le prix de l'hydrogène *gris* ou *vert* est proche de 10 euros par kilogramme. Pour le CEA, le coût actuel de l'hydrogène obtenu par électrolyse pourrait diminuer de 4 euros à 2 euros par kilogramme entre 2018 et 2030 (objectif de 50 euros par MWh), à condition que l'électrolyseur soit assez grand, que sa durée d'utilisation régulière soit longue et que le prix de l'électricité soit suffisamment bas. Selon le CEA, de nouvelles technologies (électrolyse à haute température, etc.) contribueront à faire vite baisser les coûts.

**« Plus de 600 sites industriels en France consomment de l'hydrogène, dont 95 % issu de reformage de gaz naturel. »
(Christelle Werquin, Afhpac, audition du 17 juillet 2018)**

Des progrès sont attendus pour ce qui concerne tant les réservoirs⁶ (aujourd'hui très chers) que les piles à combustible. Notamment pour ce qui concerne la membrane des piles, ce facteur est de premier ordre car le coût de la membrane se monte à 60 % du cœur de la pile.

Les actuels surcoûts de la filière de l'hydrogène conduisent à choisir ce vecteur d'énergie pour des transports permettant :

- l'utilisation intensive du matériel⁷, qui est plus cher mais qui peut être ravitaillé rapidement,
- le *zéro émission*, et même la diminution des nuisances sonores,
- des consommations régulières d'hydrogène dans la journée,
- des possibilités suffisantes d'emport à bord⁸.

Sous cette grille d'analyse, le secteur ferroviaire apparaît clairement comme un mode intéressant.

⁵ Dans le monde, il y a aujourd'hui principalement deux types d'électrolyse : l'électrolyse alcaline (sociétés IHT en Suisse, ELT en Allemagne, Hydrogenix au Canada, Angstrom Advanced aux États-Unis, NEL Hydrogen au Danemark, McPhy Energy en France, Toshiba au Japon, etc.) et l'électrolyse PEM pour *Proton Exchange Membrane* (Proton OnSite aux États-Unis, Hydrogenics au Canada, Areva H2Gen en France, Giner aux États-Unis, ITM Power au Royaume-Uni, Siemens en Allemagne, ThyssenKrupp en Allemagne).

⁶ produit en France par exemple par Stelia Composites, Plastic Omnium ou Faurecia

⁷ à l'exemple des flottes de taxis partagés comme Hype à Paris

⁸ à l'instar du transport aérien qui, pour les auxiliaires de puissance des avions ou les systèmes de roulage, a commencé des expérimentations à grande échelle avec l'hydrogène

« Pour éviter la fermeture des petites lignes, l'hydrogène est la solution ! Les fonds prévus pour les électrifications de lignes doivent être maintenus au profit du verdissement du parc ferroviaire, notamment l'hydrogène. »

(Michel Neugnot, vice-président de Bourgogne-Franche-Comté, audition du 4 septembre 2018)

La question de savoir si les premiers projets ferroviaires en France pourraient se faire avec de l'hydrogène issu du vaporéformage⁹, *gris* ou *vert* est de grande importance.

« Dans un premier temps, la possibilité de faire appel à l'électricité sur le réseau qui s'inscrit dans le contexte du mix énergétique français particulièrement peu carboné peut être une solution transitoire, mais il restera nécessaire de démontrer la pérennité à terme d'une solution faisant appel à des modes de production totalement décarbonés de l'hydrogène. »

(Laurent Michel, directeur général de l'énergie et du climat au ministère de la transition écologique et solidaire, audition du 24 juillet 2018).

L'Allemagne¹⁰ a fait le choix de l'hydrogène *issu du vaporéformage* pour ses premières circulations ferroviaires. Mais les *Länder* allemands n'étaient pas tous de cet avis.

« Notre train à hydrogène remplacera les trains Diesel de manière bien plus économique. »

(Dr. Jörg Nikutta, inauguration du train à hydrogène en Allemagne le 16 septembre 2018)

⁹ L'hydrogène produit par vaporéformage de méthane émet beaucoup de dioxyde de carbone. 26 % du CO₂ émis par l'industrie française provient de sa production d'hydrogène.

¹⁰ Les circulations de trains à l'hydrogène ont commencé le 17 septembre 2018. Ayant une autonomie de 1 000 kilomètres, deux rames Coradia iLint, construites par Alstom dans son usine de Salzgitter (en Basse-Saxe), sont ainsi exploitées pour le transport des voyageurs par l'entreprise *Eisenbahn und Verkehrsbetriebe Elbe-Weser* (EVB) sur une ligne d'une centaine de kilomètres (Cuxhaven – Bremerhaven – Bremervörde et Buxtehude en Basse-Saxe, près de Hambourg). 12 autres rames seront livrées par la même usine d'Alstom vers la fin de 2021. Le coût total est de 200 millions d'euros. Une station mobile alimente temporairement les rames en hydrogène. En 2021, une station-service fixe d'hydrogène produit par vaporéformage, construite (pour 10 millions d'euros) par *The Linde Group* et financée par l'État fédéral, sera exploitée par *The Linde Group*.

5. Les orientations pour la suite de la mission

Le 23 octobre, l'ensemble des acteurs de la filière de l'hydrogène ont été réunis sous la présidence du député Benoit Simian. Quatre ateliers ont été organisés (sécurité, énergie, financement et gouvernance). Ces ateliers ont donné lieu au compte rendu publié en annexe.

La mission en retient les orientations suivantes, concernant les suites qu'il convient de donner à la mission qui s'achèvera avec le présent rapport.

Concernant **la sécurité**, Il est important de saisir très tôt l'EPSF (prêt à se mobiliser pour permettre les premières circulations avant 2022), pour les circulations ferroviaires, et la Direction générale de la prévention des risques (DGPR) au ministère de la transition écologique et solidaire, pour les stations de production, de stockage ou de distribution de l'hydrogène (installations classées pour la protection de l'environnement). Si l'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) permet de donner une base sur cette partie, ce dernier demeure très spécifiques aux véhicules routiers, des dispositions spécifiques devront déterminer notamment

- la nature de la réglementation dont pourrait dériver le référentiel de sécurité pour le matériel roulant (directive sur la réception des véhicules terrestres ou transport de matière dangereuses),
- la nature des installations de production / stockage / distribution par rapport aux droits de l'urbanisme (quelle nature d'activité) et au droit des installations classées pour l'environnement,

En ce qui concerne les installations fixes, de nombreuses réglementations, notamment européennes, sont susceptibles d'être impactées (près de 20 textes de niveau européen¹¹ dont la directive ICPE 2012/18/EU, Directive ATEX 2014/34/EU, la directive 2010/75/EU IED sur les émissions de polluants industriels, la directive 2014/52/EU sur l'impact environnemental de projets privés, la directive 98/24/EC sur la protection des travailleurs). L'application ou le recours un texte nécessitera en tout premier lieu une détermination du projet et de ses caractéristiques (taille du stockage, débit, pression, emplacement, connexion ou non au réseau, etc.) et une réactivité de la part des services de l'État et des collectivités territoriales pour déterminer, au cas du ferroviaire qui demeure encore très absent du corpus législatif et réglementaire, le référentiel applicable.

« 2022 est notre objectif pour faire circuler un train à hydrogène accueillant des voyageurs. »
(Pierre Izard, directeur général pour l'innovation à la SNCF, ateliers du 23 octobre 2018)

Concernant **le ravitaillement en hydrogène**, les solutions de production, de stockage, de distribution et de mutualisation sont à étudier dans chaque territoire. Les solutions seront certainement différentes d'une région à l'autre. Dans certains cas, on pourra recourir à de l'hydrogène *issu du vaporéformage* à titre transitoire, dans d'autres à de l'hydrogène *fatal*¹², dans d'autres encore à de l'hydrogène obtenu par électrolyse.

¹¹ Source <https://www.hylaw.eu/database/>

¹² Sans méconnaître l'actuelle inconnue des coûts de purification de cet hydrogène très dépendant de la source.

Concernant **le financement**, il faut très tôt mobiliser les établissements financiers, prêts à proposer des solutions adaptées. Il faut aussi mobiliser les organismes français (Caisse des dépôts et consignations, ADEME, fonds du Plan national Hydrogène, etc.), comme la Commission européenne et la Banque européenne d'investissement (BEI). En particulier, il est nécessaire de continuer à bien mobiliser l'ADEME dans sa capacité à participer au financement des études d'ingénierie utiles à la réalisation d'installation de production et de distribution à l'échelle d'un territoire. En parallèle, la Banque des Territoires est également un acteur majeur du financement des études d'ingénierie financière à intégrer très en amont des réflexions sur la structuration des opérations. Enfin, dans le cadre du plan gouvernemental H2 annoncé le 1er juin 2018, la participation de l'Ademe au portage du financement apporté par l'État pour le premier Train Hydrogène est une des pistes naturelles à analyser en priorité.

Concernant **la gouvernance**, la mission, après avoir examiné l'opportunité d'une société de projet pour le portage du matériel roulant, recommande dans un premier temps d'acquiescer des Régios d'Alstom dans le cadre des contrats en vigueur¹³. En effet, l'objectif d'une première mise en service en 2022 nécessite que la commande passée avec un constructeur puisse l'être au plus tard au cours de l'été 2019. À cette échéance, il sera aussi nécessaire que les modalités de financement et les conventions entre toutes les parties soient conclues. SNCF a informé la mission que, juridiquement parlant, elle peut faire construire, dans le délai prescrit, un premier Train Hydrogène au travers d'un avenant au contrat Regiolis (avec Alstom), selon des modalités comparables à celles visées pour le TER Hybride. Il s'agirait alors de rames bimode (moteur à hydrogène complété par une alimentation possible en électricité par caténaire).

La mission note une appétence des acteurs du financement privé pour cette technologie et considère qu'il est nécessaire de continuer à travailler sur l'hypothèse de portage des actifs (notamment les stations) par des structures juridiques permettant d'associer des partenaires privés, publics, industriels et financiers.

Il est dorénavant important, sur cette base, de préciser au plus vite les lignes où pourraient circuler des trains hydrogène sur la base du premier travail effectué par les Régions (cf. supra). Pour ce faire, il faudra tenir compte :

- des propositions déjà faites par plusieurs autorités organisatrices,
- du type des lignes (pentes des voies ferrées, dessertes de zones sensibles au regard de la qualité de l'air, importance du trafic, possibilité de construire une station de production, de stockage ou de distribution d'hydrogène, possibilité de mutualiser l'usage des stations-service, etc.),
- des TER à moteur Diesel à renouveler dans le courant de la prochaine décennie.

« Le Business Model est de grande importance pour le développement à grande échelle du train à hydrogène . »

(Pierre Izard, directeur général pour l'innovation à la SNCF, ateliers du 23 octobre 2018)

Ainsi, et au termes des ateliers du 23 octobre qui ont permis de constater un alignement d'intérêt fort de tous les acteurs, mais aussi et surtout un calendrier qui ne

¹³ Cette possibilité juridique a été confirmée par Pierre Izard (SNCF) lors des ateliers du 23 octobre 2018.

laisse que peu de place pour un mode de travail trop séquentiel, la mission confirme que les quatre thématiques des ateliers sont à poursuivre en mode projet : sécurité, gouvernance, énergie et financement. Le choix de passer par le contrat cadre sur le Régiolis résout de facto le choix du matériel. C'est pourquoi pour la suite de la mission, la principale recommandation organisationnelle pour l'État, les collectivités et les acteurs de la filière est de poursuivre l'élan initié, et notamment que les ateliers du 23 octobre puissent se formaliser en groupes de projet identifiés avec une feuille de route, des livrables et un pilote.

Conclusion

Au terme des travaux de la mission, il apparaît que la voie du *zéro émission* est celle qui, de l'avis du plus grand nombre, doit être approfondie. Il importe ainsi de se concentrer sur deux technologies : à court terme celle des batteries (engins hybrides ou non), et à plus long terme celle de l'hydrogène. Chacune aura son champ de développement et, compte tenu des incertitudes pesant sur chacune des deux technologies, il est raisonnable que les deux feront l'objet de réalisations dans le futur proche. Les trains à batteries, hybrides gazole-batterie ou non, sont déjà l'objet de travaux nombreux, chez les constructeurs comme chez les exploitants. Les technologies à base de batteries sont disponibles sur le marché sans qu'il soit nécessaire que l'État soutienne financièrement des expérimentations ou des déploiements. Elles répondront à une partie des besoins en France, à l'occasion notamment des différentes étapes de renouvellement du parc Diesel.

C'est pourquoi il est proposé que l'État **se concentre, dès la fin de la mission, sur l'hydrogène**. Il apparaît important de faire avancer rapidement cette technologie par des premières réalisations ferroviaires permettant d'en peser tout le potentiel. Car, si les obstacles techniques et économiques sont d'importance, les avantages apparaissent très grands :

- pas de pollution locale,
- possibilité de mutualisation des stations-service avec d'autres modes de transport (autobus, voitures particulières, poids lourds, etc.),
- seule solution *verte* pour les longues distances,
- vecteur d'énergie le plus intéressant à terme pour le stockage de l'électricité.

« L'hydrogène apparaît comme la seule option crédible lorsqu'on dépasse une certaine autonomie. »
(Henri Poupart-Lafarge, président-directeur général d'Alstom, audition du 19 juillet 2018)

Sans attendre, la filière industrielle nécessite d'être confortée dans le domaine de l'hydrogène. La réalisation de premières expérimentations sur des territoires présentant de solides atouts (politique de transport *vert*, bons profils de lignes ferroviaires, fortes nécessités environnementales, préparation du renouvellement des TER à moteur Diesel, etc.) favorisera le développement en France d'une solide filière industrielle.

Il faut vite arrêter les conditions qui permettront des premières circulations de trains à l'hydrogène avant 2022. La directrice générale de l'Établissement public de sécurité ferroviaire (EPSF) a précisé, lors de son audition, qu'elle ne voyait pas à ce stade d'obstacle important à une autorisation d'un matériel roulant à l'hydrogène en France avant 2022. Si l'on ne tarde pas à engager les procédures, les difficultés peuvent être dénouées les unes après les autres. Elle a cependant noté l'absence de base législative et réglementaire pour ce qui concerne le transport d'hydrogène pour la propulsion des trains. Si une réglementation existe pour le transport ferroviaire d'hydrogène (mais qui exclut les matières utilisées aux fins de propulsion du train), ou pour les véhicules routiers, aucun autre texte, tant au niveau national que communautaire ou international, n'a pu être identifié comme pouvant être directement utilisé.

Il apparaît clairement que les projets à étudier concernant l'hydrogène après la fin de la mission devront satisfaire **trois critères**.

Le **premier critère** est de rechercher un **matériel roulant n'émettant aucune pollution locale**. Les objectifs en matière de pollution dans les villes françaises obligent encore à de gros efforts au regard notamment des obligations européennes. La responsabilité des élus est engagée. La France a été, en mai 2018, renvoyée devant la Cour de justice de l'Union européenne (CJUE) pour non-respect des normes de qualité de l'air pour ce qui concerne les NO_x (en particulier NO₂)

« L'État et ses établissements publics, les collectivités territoriales et leurs établissements publics ainsi que les personnes privées concourent, chacun dans le domaine de sa compétence et dans les limites de sa responsabilité, à une politique dont l'objectif est la mise en œuvre du droit reconnu à chacun à respirer un air qui ne nuise pas à sa santé.

Cette action d'intérêt général consiste à prévenir, à surveiller, à réduire ou à supprimer les pollutions atmosphériques, à préserver la qualité de l'air et, à ces fins, à économiser et à utiliser rationnellement l'énergie. La protection de l'atmosphère intègre la prévention de la pollution de l'air et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre. »

(article L220-1 du code de l'environnement)

Le **deuxième critère** est la nécessité d'une **mutualisation des sources d'énergie entre plusieurs modes de transport**. Pour être économiquement soutenables, les stations-service de distribution de l'hydrogène doivent être de capacité suffisamment grande. Elles doivent être utilisées par plusieurs modes ; trains, bus, taxis, etc.

Le **troisième critère** regarde la production de l'hydrogène. Il faut viser une **énergie grise ou verte à terme, à l'issue éventuellement d'une période d'énergie carboné**¹⁴. En Basse-Saxe, le choix a été fait d'utilisation d'hydrogène obtenu par vaporeformage, avant l'étape suivante, qui sera celle de la production d'hydrogène par électrolyse à partir d'électricité décarbonée.

*« Nous sommes entrés dans l'ère du zéro émission. »
(Mathieu Gardies, président de Hype, audition du 17 juillet 2018)*

Concernant le **financement**, qui a été étudié durant la seconde phase de la mission, il importe que rapidement, **les programmes d'électrification ferroviaire inscrits dans les contrats de plan État-Région (CPER) intègrent aussi des opérations de verdissement des matériels roulants**. Il importe aussi que le premier fonds constitué à l'occasion du plan national Hydrogène annoncé le 1^{er} juin 2018 par le ministre de la transition écologique et solidaire, de 70 millions d'euros, soit réservé aux premières expérimentations de trains à hydrogène. Enfin, les crédits européens devront être mobilisés.

Benoît Simian

député

¹⁴ Lors de la conférence qu'il a organisé à San Francisco le 14 septembre 2018, le Conseil de l'hydrogène, qui rassemble les plus grands sociétés du monde, a répété son objectif : hydrogène entièrement décarboné pour la mobilité en 2030.

Annexes

1. Lettre de mission

Réf. CGEDD N° 012314-01

Le Premier Ministre

0 8 7 3 / 1 8 / S G

Paris, le 11 JUIN 2018

Monsieur le député,

Le Gouvernement est pleinement engagé dans la transition énergétique des transports. Dans le cadre du plan climat, un objectif ambitieux a été fixé, celui de la neutralité carbone en 2050. Pour relever ce défi nous devons dès maintenant faire évoluer nos systèmes de transport.

Le transport ferroviaire est un mode vertueux sur le plan écologique. Alors que sa part modale dans le transport de voyageurs s'élève à un peu plus de 10 % et que celle dans le transport de marchandises s'établit autour de 11 %, il représente moins de 1 % des émissions de gaz à effet de serre du secteur des transports. Plus de 80 % des circulations (mesurées en trains.km) sont réalisées grâce à la traction électrique et répondent pleinement à nos objectifs de lutte contre le changement climatique et pour la qualité de l'air. Cependant, les 20 % restants correspondent à des trains fonctionnant au diesel. Parmi ces circulations, près d'un quart a lieu en zone urbaine, où la lutte contre la pollution de l'air est prioritaire.

Afin d'accélérer la transition énergétique du transport ferroviaire, j'ai décidé de vous confier une mission dont l'objectif est de préparer le verdissement du parc ferroviaire en envisageant le remplacement des matériels roulants (locomotives, trains automoteurs, engins de manœuvre ou de chantier, etc.) les plus polluants dans les meilleurs délais et viser ainsi la neutralité carbone en 2050. Il s'agira notamment de :

- dresser un panorama des émissions du secteur ferroviaire en identifiant les matériels et les lignes dont les nuisances en matière d'émissions de gaz à effet de serre et de polluants sont les plus marquées ;
- évaluer les zones de pertinence des différentes technologies (électrification, hybridation diesel/électrique, hybridation diesel/batteries, hybridation électrification partielle/batterie, hydrogène, biocarburants liquides ou gazeux, etc.) à même de diminuer l'impact environnemental du secteur ferroviaire, en différenciant si possible l'analyse selon les secteurs de circulation (urbain, périurbain, rural). Il conviendra de mettre ces technologies en regard des leviers d'amélioration de l'efficacité énergétique du transport ferroviaire (aérodynamisme, allègement, etc.) ;

.../...

Monsieur Benoît SIMIAN
Député
Assemblée nationale
126, rue de l'Université
75355 PARIS 07 SP

- réaliser un panorama des initiatives en cours à l'étranger concernant le verdissement du ferroviaire ;
- grâce à des analyses socio-économiques, dresser un schéma de déploiement privilégié de ces technologies dans notre système ferroviaire, incluant la possibilité de remotorisation à mi-vie des matériels roulants. Vous mettrez en perspective les politiques d'achat de nouveaux matériels roulants avec l'objectif de neutralité carbone du secteur ferroviaire en 2050 ;
- identifier les leviers, notamment de politiques publiques, permettant de s'inscrire dans ce schéma au plus vite en limitant les investissements dans de nouveaux matériels roulants carbonés.

Dans le cadre de ces travaux, vous veillerez à prendre en considération les enjeux économiques et industriels ainsi que les défis en matière de compétences et d'emplois, en particulier ceux des opérateurs de fret ferroviaire. Vous identifierez les actions à même de faire du verdissement du secteur ferroviaire un atout pour la France dans la compétition industrielle mondiale. Vous vous assurerez de la bonne articulation de vos travaux avec ceux du Gouvernement concernant le plan fret, ainsi qu'avec ceux du comité stratégique de la filière ferroviaire. Vos recommandations pourront en effet trouver leur place dans le contrat stratégique de cette filière, qui sera signé d'ici la fin de l'année. Vous tiendrez également compte dans vos réflexions des objectifs du Gouvernement en matière de maîtrise de la dépense publique.

S'agissant des leviers de politiques publiques, dans un contexte d'ouverture à la concurrence et de rôle accru des régions, vous identifierez les mesures qui relèvent de l'Etat et de ses établissements publics, des régions, de la SNCF, de SNCF Réseau et des opérateurs ferroviaires ou encore de l'échelon européen. Vous veillerez notamment à identifier les enjeux de financement liés au remplacement des engins fonctionnant au diesel et aux investissements nécessaires en matière d'infrastructures. Sur la base des éléments que vous obtiendrez auprès des opérateurs ferroviaires et des constructeurs de matériels, vous évalueriez les ordres de grandeur des enjeux économiques et environnementaux ainsi que des impacts des changements de motorisation.

Vous accorderez une attention particulière aux possibilités offertes par l'hydrogène. Dans la mesure où l'usage de ce vecteur constituerait une rupture en termes d'homologation des engins et d'infrastructures, je souhaiterais que vous puissiez effectuer un travail spécifique permettant d'identifier les conditions nécessaires à la réalisation, d'ici la fin du quinquennat, d'une première expérimentation de train à hydrogène sur le territoire français. A cet effet, il conviendrait de :

- bâtir un consensus entre les autorités organisatrices de transport concernant les spécifications techniques du futur train à hydrogène pour décider quel modèle actuel de train serait remotorisé. Vous veillerez à associer les entreprises ferroviaires à ce processus ;
- identifier les ressources nécessaires à la réalisation d'essais et à l'homologation d'un train à hydrogène ainsi qu'à la mise en place des installations de production et d'avitaillement d'hydrogène. Il s'agit également d'identifier la contribution que pourraient apporter les acteurs industriels, les autorités organisatrices de transport, les acteurs publics soutenant la recherche et développement et les opérateurs ferroviaires ;

...

3.-

- identifier les modalités d'expérimentation pertinentes, permettant de composer avec les attentes et l'implication des différents territoires. De nombreuses régions ont fait part de leur intérêt pour accueillir une telle expérimentation ;
- construire une gouvernance permettant d'assurer le suivi du projet, depuis la rédaction du cahier des charges jusqu'à son homologation et sa mise en service. Cette gouvernance devra prendre en compte le plus en amont possible les questions de sécurité du train lui-même mais aussi de la station d'avitaillement.

Un décret vous nommera, en application de l'article L.O. 144 du code électoral, parlementaire en mission auprès de Madame Elisabeth BORNE, ministre auprès du ministre d'Etat, ministre de la transition écologique et solidaire, chargée des transports.

Vous prendrez l'attache des ministères concernés par cette problématique (transition écologique et solidaire, économie et finances), celle des organisations professionnelles du transport et de l'industrie ferroviaire ainsi que des autorités organisatrices de transport concernées. Vous vous rapprocherez de la SNCF, notamment pour obtenir les données nécessaires à la réalisation d'études socio-économiques.

Pour la mise en œuvre de votre mission, vous serez assisté du conseil général de l'environnement et du développement durable (CGEDD), du conseil général de l'économie (CGE) et de l'institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (IFSTTAR). Vous pourrez également vous appuyer sur les services de la direction générale des infrastructures, des transports et de la mer (DGITM), du commissariat général au développement durable (CGDD), de la direction générale des entreprises (DGE) ainsi que de la direction générale de l'énergie et du climat (DGEC).

Je vous remercie de bien vouloir me présenter le rapport issu de vos travaux dans un délai de cinq mois à compter de la présente lettre de mission.

Je vous prie de croire, Monsieur le député, à l'assurance de mes sentiments les meilleurs.


Edouard PHILIPPE


2. Les pollutions locales et les émissions de GES des circulations de matériels roulants à moteur Diesel de la SNCF et des autres entreprises ferroviaires en France

Représentant les circulations ferroviaires avec moteur Diesel sur le réseau ferré national le 11 octobre 2017, la carte ci-dessous a été dressée par SNCF Réseau. Sont reprises les circulations Diesel sur lignes électrifiées comme celles qui ne sont pas électrifiées.

La carte a été remise pour la mission de M. Benoît Simian en juillet 2018.

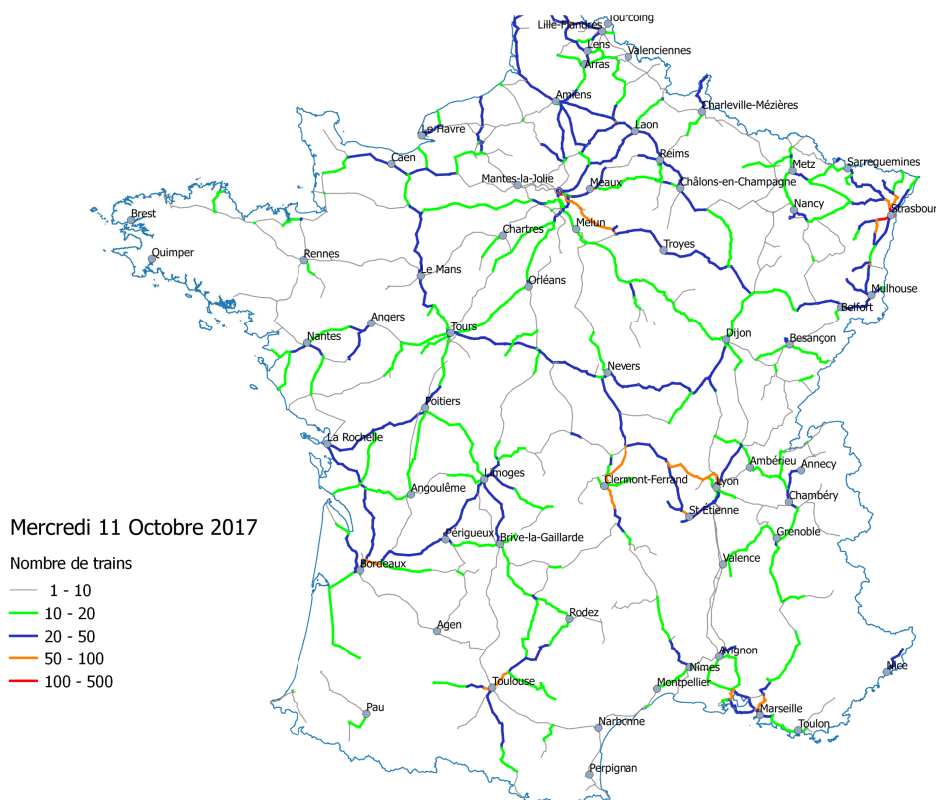


Illustration 1 : carte des circulations d'engins Diesel sur le réseau ferré (source : SNCF Réseau)

Le texte ci-dessous est une analyse de la Direction générale des infrastructures, des transports et de la mer (DGITM), au ministère chargé de l'écologie, sur les émissions du secteur ferroviaire.

« [...] la part modale du transport ferroviaire représente respectivement 10 % et 11 % pour le transport de passagers et de marchandises, et ne représente que moins de 1 % des émissions de gaz à effet de serre du secteur des transports.

Plus de 60 % en Europe, plus de 80 % en France des circulations en trains.km sont en traction électrique, mais le reste fonctionne au diesel. Et parmi les 20 % de circulations au diesel, le quart est en zone urbaine, où la lutte contre la pollution est prioritaire.

Les données disponibles des Comptes Transports de la Nation (CCTN) de 2016 permettent d'avoir certaines informations sur la consommation et les émissions du secteur ferroviaire. La consommation de gazole du transport ferroviaire est très faible

(0,3 % des consommations d'énergie), malgré sa stabilité en 2015, elle baisse fortement depuis 2010 (- 3,9 % en moyenne annuelle). En 2015, la consommation du transport ferroviaire de 0,8 tep, 0,1 pour le gazole et 0,7 pour l'électricité. Globalement en diminution de 1,1 % depuis 2010 : -3,9 % pour le gazole et -0,4% pour l'électricité.

En 2015, secteur des transports émet 132,3 millions de tonnes équivalent CO₂, dont 126,1 pour les modes routiers, 6,2 pour tous les autres modes confondus dont 0,5 pour le ferroviaire (0,4 %), en baisse de 3,6% depuis 2010 (principalement dû à la baisse du trafic).

Le transport de passagers (en voy.km) baisse de 0,3 % en moyenne depuis 2011, dont 1,7 % de baisse en 2016. Le transport de marchandises (en tonnes.km) baisse de 0,5 % en moyenne depuis 2011, dont – 4,9 % en 2016 (accentué par un regain en 2015).

Le transport ferroviaire a peu d'impact sur la pollution, au regard notamment du transport routier, et est un mode de transport à faible empreinte environnementale. En revanche, l'usage de vieilles locomotives diesel témoigne d'une marge d'augmentation d'efficacité énergétique et de réduction des émissions polluantes, en particulier en zones urbaines.

À noter qu'il est fait beaucoup état de la pollution due au moteur mais qu'il existe une autre part de la pollution locale qui est due aux frottements rails/roues, freins, caténaires. Celle-ci peut être réduite sur les locomotives modernes grâce à des solutions technologiques, (« éponges » à particules¹⁵ proches des roues permettant d'absorber les émissions).

Les locomotives diesel en cours d'utilisation servent au transport de passagers, de fret, mais aussi à l'entretien des voies, où la pollution locale pose problème pour le personnel d'entretien (en particulier quand dans espaces clos comme tunnels et gare, et où l'hydrogène peut être une alternative pertinente).

Le règlement sur les émissions des locomotives ferroviaires : EMNR (engins mobiles non routiers) est plus souple que l'équivalent pour les véhicules routiers (Euro). La dernière version de l'EMNR date de 2016 mais un certain nombre de dérogations ont permis à la SNCF de ne pas respecter ces règlements pour les locomotives diesel actuelles. Il eût été en effet nécessaire de remplacer non uniquement les moteurs, mais toutes les locomotives,

[...]

Dans une note menée fin mai 2016 pour le ministère par un groupement comportant le CITEPA¹⁶, il est calculé (par le biais de modèles utilisant des facteurs d'émissions), les émissions unitaires de polluants des transports de marchandises routier, fluvial et ferroviaire. Pour le ferroviaire, il est pris comme hypothèse qu'en 2030, il n'y aura plus de traction diesel et qu'elle n'est plus que de 1 % en termes de consommation énergétique en 2020 alors qu'elle était de 22 % en 2000.

¹⁵ Les éponges à particules sont une technologie encore en développement. Des incertitudes demeurent en particulier quant au maintien des performances au fil du temps.

¹⁶ Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique

Tableau [...] : Évolution des émissions de polluants du transport ferroviaire en valeur relative par rapport à 2000

Évolution des émissions référence 100 en 2000	NO _x	PM ₁₀	PM _{2,5}	COVNM ¹⁷
2000	100	100	100	100
2010	103	74	79	103
2020	7	58	48	7
2030	0	48	38	0

Le tableau ci-dessus représente les émissions de polluants du transport ferroviaire (de marchandises), par rapport à une base 100 en 2000. On note une forte diminution des émissions en 2020 sous l'impact de la disparition du diesel, seules persistent les émissions de PM dues aux abrasions (caténaires et freins). À noter que la solution hydrogène permettrait de diminuer les émissions dues aux caténaires. Les émissions par abrasion sont encore assez peu connues et les résultats du CITEPA sont obtenus à partir de références Suisses. La SNCF mène des travaux de mesures des émissions de PM par abrasion mais les résultats sont encore non disponibles. En termes de pollution (au sens polluants locaux), les émissions les plus problématiques sont celles concernant les zones urbaines. Les zones prioritaires pour une expérimentation de locomotives hydrogène sembleraient donc les plus pertinentes en zone urbaine. ».

Selon les données¹⁸ remises par SNCF Réseau pour la mission, 80 % des trains-kilomètres des trains Diesel pour le fret¹⁹ se font sur le réseau électrifié, alors même que les trains de fret ne représentent en France que 20 % de tous les trains-kilomètres des matériels roulants Diesel. Ce sont les TER qui représentent le plus gros des trains-kilomètres d'engins Diesel (73 %) ; 48% de ces TER-kilomètres avec moteur Diesel se font sur le réseau électrifié.

La carte ci-dessous présente toutes les lignes électrifiées et celle qui ne sont pas électrifiées en France. La carte est extraite du Document de référence du réseau publié chaque année par SNCF Réseau.

¹⁷ composés organiques volatils non méthaniques

¹⁸ selon les circulations ferroviaires relevées le 11 octobre 2017

¹⁹ Les données portent sur tous les trains de fret, ceux de la SNCF comme ceux des nouveaux opérateurs.

LIGNES ÉLECTRIFIÉES
SITUATION JUILLET 2017



Sources : Données Réseau RGI, avril 2017
Document non contractuel

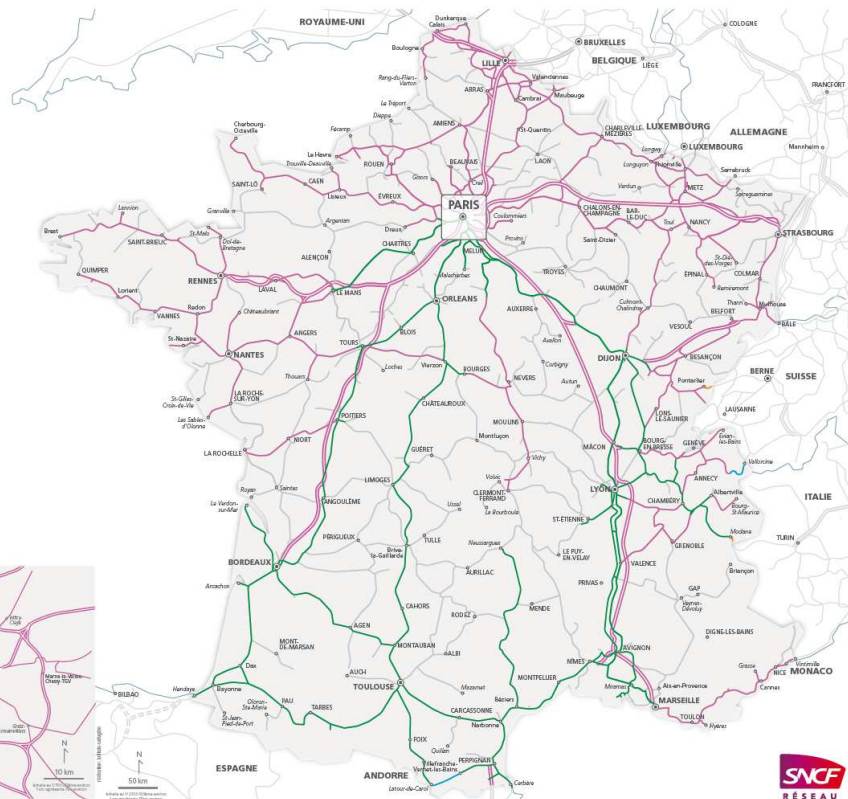


Illustration 2 : carte des lignes électrifiées en France (source : SNCF Réseau)

3. Les coûts d'électrification des lignes ferroviaires en France

Sur les 29 973 km du réseau ferré français, 15 164 km sont aujourd'hui électrifiés. C'est un peu plus de la moitié du réseau. Y circulent plus de 80 % des trains du fret et 90 % des trains de voyageurs. Sur l'autre moitié du réseau, les trains sont à traction thermique : ils fonctionnent au gazole.

Répartition de l'électrification par modes de transport ferroviaire (grande vitesse, Corail, TER, urbain, fret)

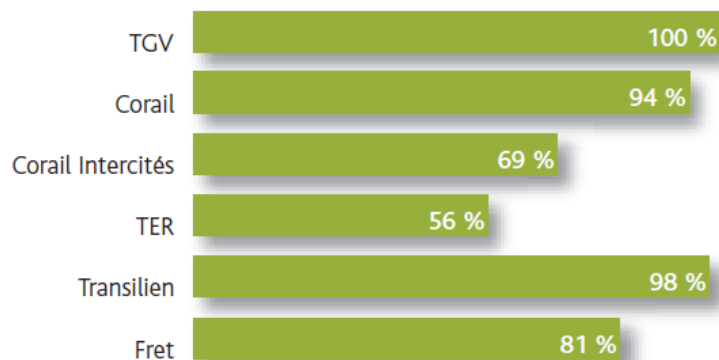


Illustration : électrification par type d'activité ferroviaire (source : SNCF)

Esquissée au début du XX^e siècle, l'électrification du réseau ferroviaire a pris son essor à partir de 1922, quand la France a adopté le courant continu à la moyenne tension de 1 500 volts. L'électricité permettait déjà un rendement beaucoup plus élevé que le gazole et la vapeur, produite à partir du charbon. Pour la France, qui ne disposait pas d'autant de charbon que ses voisins, l'électricité représentait un atout majeur pour moderniser le transport ferroviaire. Après la Seconde Guerre mondiale, la SNCF a accompli avec succès un grand programme d'électrification au courant alternatif de 25 000 volts.

Aujourd'hui, le coût moyen pour l'électrification des voies de type régional est d'un million d'euros par kilomètre de voie pour l'électrification ou pour le renouvellement des *installations fixes de traction électrique* (IFTÉ). Les coûts varient de 350 000 euros à plus de 1 500 000 euros en fonction des spécificités de la voie (nombreux ouvrages d'art ou non).

Pour l'électrification de la ligne Rennes – Saint-Malo, longue de 78,5 km, les coûts d'investissement en infrastructure²⁰ ont été les suivants :

- travaux nécessaires à l'électrification : 34,5 % ;
- travaux d'adaptation des ouvrages d'art, des installations de signalisation et des installations de télécommunication : 46,9 % ;
- renouvellement de la voie 1 sur la partie Dingé – Dol-de-Bretagne (23 km) : 10 % ;

²⁰ présentés en 2000 dans le dossier d'approbation ministérielle (DAM) relatif à l'électrification complète de la ligne à double voie

- travaux de relèvement de vitesse (de 120 km/h à 140 km/h), et mesures conservatoires pour faciliter ultérieurement des relèvements de vitesse : 8,6 %.

Hors les travaux relatifs à la gare de Dol-de-Bretagne, ces investissements ont été de 123,5 M€²¹, soit un coût au kilomètre de 1,57 M€, ce qui situe cette opération dans le haut de la fourchette.

Face à ces coûts, le concept d'électrification partielle, ou *frugale*, est souvent avancé. Une telle électrification peut conduire à de fortes économies d'investissement, plus ou moins forts selon le type de ligne. Il peut y avoir aussi des difficultés techniques.

- La caténaire pourrait ne pas être à même de faire transiter l'intensité nécessaire à une recharge rapide des systèmes de stockage d'énergie embarquée lorsque le matériel est à l'arrêt. Le renforcement des caténaires serait alors nécessaire.
- La nécessité de recharger les systèmes de stockage d'énergie embarquée pourrait conduire à diminuer la vitesse d'exploitation sur certaines portions de voies, afin de réduire le pic de puissance nécessaire (sauf à renforcer les stations d'injection et de soutirage du réseau électrique).
- L'adaptation du dimensionnement du système de stockage aux caractéristiques des voies ferrées pourrait faire disparaître l'avantage d'un moindre coût du matériel ferroviaire s'il fallait, projet par projet, ou voie par voie, disposer d'un matériel spécifiquement conçu.

L'électrification *frugale* reste néanmoins une solution qui mérite d'être examinée selon les cas.

²¹ coûts constatés mais inflatés de l'indice des prix de production et d'importation de l'industrie (série CPF 27.1 – Moteurs, génératrices, transfo. électr., matér. distrib., cmde électr.)

4. Les trois technologies possibles pour *verdir* les matériels roulants ferroviaires en France, hors hydrogène : biocarburants, gaz naturel et batteries électriques

4.1. Les trois technologies

Les solutions alternatives à la mise en œuvre de matériel à moteur Diesel, pour les lignes qui ne seront pas électrifiées, sont de deux catégories.

1. Il y a tout d'abord les carburants liquides ou gazeux utilisant le principe d'un moteur à combustion relativement proches des technologies Diesel au regard du modèle technique et économique. Deux technologies ont été examinées dans le cadre de la mission : celle des biocarburants (de première et de seconde génération) et celle du gaz naturel.
2. Les technologies utilisant la propulsion électrique *in fine* (dont l'hydrogène relève) renvoient à l'analyse comparée des solutions pour le stockage de l'énergie électrique.

D'un point de vue technique, les trois familles de solutions, si elles répondent à la question des alternatives à la propulsion Diesel, ne présentent pas les mêmes avantages compétitifs ou inconvénients.

- Les solutions qui se fondent sur l'utilisation de carburants liquides ou gazeux s'inscrivent dans le même modèle que le fonctionnement actuel des motrices Diesel. Le coût d'investissement (CAPEX) demeure raisonnable. Le principal coût est celui du carburant (OPEX). Ces solutions permettent de maîtriser le risque de sous-utilisation du matériel roulant.
- Au contraire, les solutions utilisant des moyens de stockage de l'électricité représentent des coûts d'investissement élevés. Elles ne trouvent leur rentabilité que par un usage optimisé des moyens de stockage embarqués ou de production d'hydrogène (cf. annexe n° 5).
- D'un point de vue environnemental, les trois familles de solutions ne peuvent être départagées sur la base du seul critère du CO₂ si l'hydrogène est *vert*. Toutes présentent une amélioration notable par rapport aux technologies Diesel. Mais les technologies de propulsion électrique sont, au regard de la pollution locale, dans la perspective immédiate d'un *zéro émission* pour les cœurs de ville et les zones sensibles.

Le tableau ci-dessous compare les trois familles. Il est fondé sur deux hypothèses structurantes. Pour ce qui concerne les biocarburants, la valeur est mesurée *du puits à la roue*, sans prendre en compte l'impact de la mobilisation de la biomasse. Pour ce qui concerne l'hydrogène, l'hypothèse retenue est celle d'un hydrogène *vert*, c'est-à-dire obtenu par électrolyse de l'eau et avec une électricité décarbonée.

Carburants	Coefficients en g/MJ					
	GES	CO	NOx	SO2	HC	PM
Diesel	90	1.812	1.450	0.0007	0.570	0.311
Diesel + catalytique	89.6	0.344	0.423	0.0007	0.0570	0.096
Biodiesel	18.9	0.381	0.305	0.0001	0.120	0.020
Gaz naturel	22.5	0.107	0.217	0.00003	0.380	0.041
Hydrogène	0.50	0.002	0.0003	0.0007	0.003	0.0007
Électrique caténaire	2.3	0.010	0.002	0.003	0.013	0.003

Illustration 1 : pollutions des différentes technologies (source : Alternative Railway Electrification in Norway, Hydrogen train workshop, Sintef, 15 mai 2017)

4.2. Solution à base de carburants liquides ou gazeux

4.2.1. Biocarburants

Les biocarburants sont principalement de deux types :

- les biocarburants de première génération, qui tirent parti directement de l'énergie contenue dans la plante (comme le bioéthanol ou les esters méthyliques d'acides gras de synthèse à partir de chaînes lipidiques d'origine agricole),
- les biocarburants de seconde génération, qui utilisent les chaînes carbonées de plantes à faible contenu énergétique pour ensuite être obtenus soit par voie thermochimique (fabrication d'un gaz de synthèse qui est ensuite utilisé pour synthétiser du gazole), soit par voie enzymatique.

Le principal avantage des biocarburants comme solution de *verdissement* du matériel ferroviaire réside dans son caractère substituable dans les matériels Diesel existants, directement pour les biocarburants de seconde génération ou en incorporation avec le gazole pour les biocarburants de première génération. On utilise le même principe que le moteur à combustion interne. Le carbone fixé par les plantes dans le cadre du mécanisme de photosynthèse remplace le carbone fossile. On diminue ainsi les émissions de carbone d'origine fossile.

Pour ce qui concerne les biocarburants de seconde génération, au regard de la pollution locale, le fait de passer par des étapes de type thermochimique utilisant un gaz de synthèse très pur, et dans une moindre mesure dans le cadre des voies enzymatiques, donne un gros avantage. Toutefois, restent présents les produits courants de combustion (autres que ceux liés à la présence d'impuretés), tels que les molécules NO_x et C_xH_y qui sont principalement liées au processus de combustion.

Lors des auditions menées avec opérateurs de transport et avec les constructeurs, le choix du biocarburant a rarement été présenté comme une vraie solution de *verdissement* ferroviaire. Différents arguments sont mis en avant selon la génération de biocarburants.

- Les biocarburants de première génération ont un impact faible, voire nul, sur les émissions de polluants locaux. S'il répond à un enjeu de CO₂ (avec une réserve relative à l'impact du développement d'une filière de biocarburants sur les filières agricoles, et notamment agroalimentaire, cf. ci-dessous), cette solution n'apporte *in fine* qu'une réponse insuffisante dans les agglomérations et les sites sensibles.

- La mobilisation de la biomasse pour les biocarburants de première et de seconde génération en limite l'intérêt.
 - Pour ce qui concerne spécifiquement l'agrodiesel, même en prenant la culture ayant le meilleur rendement à l'hectare (huile de palme avec 5 800 litres à l'hectare), la substitution au gazole en France nécessiterait la mobilisation de 23 % de la surface agricole utile, et de 37 % des terres arables dans cette surface. Même si le transport ferroviaire ne représente qu'une petite fraction de la consommation de gazole en France, la mise en place d'une filière industrielle exigerait des volumes importants. La séparation entre le transport routier, maritime et le transport ferroviaire ne permet pas aujourd'hui d'assurer qu'on pourrait avoir à terme des coûts de production compétitifs.
 - Plus généralement, un déploiement massif des biocarburants nécessiterait de *déplacer* d'actuelles cultures qui ont des usages surtout alimentaires. Ces *déplacements* dégraderaient le *bilan carbone* des filières agricoles. En fonction des scénarios, le *bilan carbone* d'une filière de biocarburants pourrait même être négatif si le déplacement des cultures se faisait sur des espaces trop éloignés.
- Pour les biocarburants de première génération, à l'instar de ce qui a été observé dans le domaine des véhicules, les solutions d'incorporation dans les carburants fossiles doivent prendre en compte la conception des moteurs thermiques : ils n'ont pas été conçus pour les caractéristiques physico-chimiques des nouvelles molécules. Il s'ensuit parfois des nécessités de reconception de certaines parties des moteurs (injecteurs, chambres de combustion, etc.).
- Pour les biocarburants de seconde génération, dont l'avantage par rapport aux filières de première génération est de mobiliser une biomasse aujourd'hui inutilisée, le passage par une étape de gaz de synthèse pour la voie thermochimique nécessite un apport énergétique important et un contrôle rigoureux de l'approvisionnement en biomasse en amont. Par rapport à la biomasse de première génération, qui profite en termes énergétiques de l'apport de la photosynthèse pour créer des molécules présentant une énergie interne intéressante, le bilan global des biocarburants de seconde génération est difficile à mesurer. Outre l'étape de fabrication du gaz de synthèse qui nécessite de *craquer* les molécules, les étapes de purification en amont sont fortement consommatrices d'énergie. Les différents projets de mise en place d'usines de biocarburants de seconde génération (par exemple par la société Choren) présentent des bilans énergétiques encore insatisfaisants.

Les biocarburants, qu'ils soient de première ou de seconde génération, n'apportent qu'une réponse insuffisante aux enjeux d'émission de CO₂ du transport ferroviaire. Les biocarburants de première génération, seule filière aujourd'hui disponible industriellement, ne répondent pas aux enjeux de pollution locale. L'incorporation progressive de biocarburants dans les carburants fossiles relève d'une politique globale de réduction des gaz à effet de serre. Elle est davantage adaptée aux enjeux du transport routier qu'à ceux du transport ferroviaire.

4.2.2. Gaz naturel

Dans le cadre des auditions, peu d'exemples d'expérimentation de conversion de trains au gaz naturel, ou de déploiement de solutions nouvelles, ont été présentés.

En Europe, une expérimentation est en cours avec un train touristique. La Renfe a commencé en janvier 2018 à faire circuler, sur une ligne de 20 kilomètres dans les Asturies, un train de voyageurs (automoteur) au GNL (gaz naturel liquéfié). L'un des deux moteurs Diesel est alimenté au GNL. C'est un train dont les caractéristiques de gabarit et de vitesse maximale ne répondent pas à l'enjeu de trouver une alternative à l'électrification des lignes. D'après les données publiques disponibles, l'expérimentation présente les caractéristiques suivantes :

- vitesse de 35 km/h,
- par rapport à un moteur Diesel sans solution de traitement catalytique des gaz, diminution des émissions de dioxyde de carbone comprises entre 20 % et 30 %, des émissions d'oxydes d'azote entre 60 % et 80 %, des émissions d'oxydes de soufre de 99 %, de bruit de 30 %, et encore des émissions de particules en suspension,
- réduction des coûts d'exploitation de 45 %.

En Floride aux États-Unis, l'entreprise ferroviaire de fret *Florida East Coast Railway* a été la première dans le pays à recourir au gaz naturel liquéfié pour tout son matériel roulant (24 engins). La société fait valoir une diminution de 80 % des émissions d'oxydes d'azote.

En Russie en 2018, la société Gazprom a commandé 24 locomotives au GNL au constructeur Sinara. Les dix premières seront livrées entre 2019 et 2024. Elles seront exploitées sur la ligne ferroviaire de Gazprom entre Obskaya et Bovanenkovo, longue de 525 kilomètres.

Le Canada s'intéresse aussi au gaz naturel liquéfié pour les locomotives du transport de fret. Les constructeurs Electro-Motive Diesel (EMD) et General Electric (GE) y travaillent.

L'Inde a l'ambition d'utiliser bien davantage le gaz naturel dans le transport ferroviaire, dans une démarche générale qui regarde toute l'économie indienne. Le but est de réduire les pollutions émises par les moteurs Diesel. Récemment, un partenariat stratégique a été signé entre les Chemins de fer indiens et la société indienne Gail pour approvisionner en gaz naturel des ateliers de maintenance du matériel roulant. Ce partenariat s'appuie notamment sur une infrastructure gazière dans l'est de l'Inde qui a été inaugurée en octobre 2016 (2 500 km de gazoduc).

Au-delà de ces quelques exemples, il n'est actuellement que peu d'études portant sur des projets de conversion de matériel ferroviaire Diesel au gaz naturel. Bien des expérimentations ont été faites dans le passé (cf. schéma ci-dessous sur les expérimentations depuis 1937 aux États-Unis), sans pour autant que les résultats aient jamais conduit au déploiement de cette technologie.

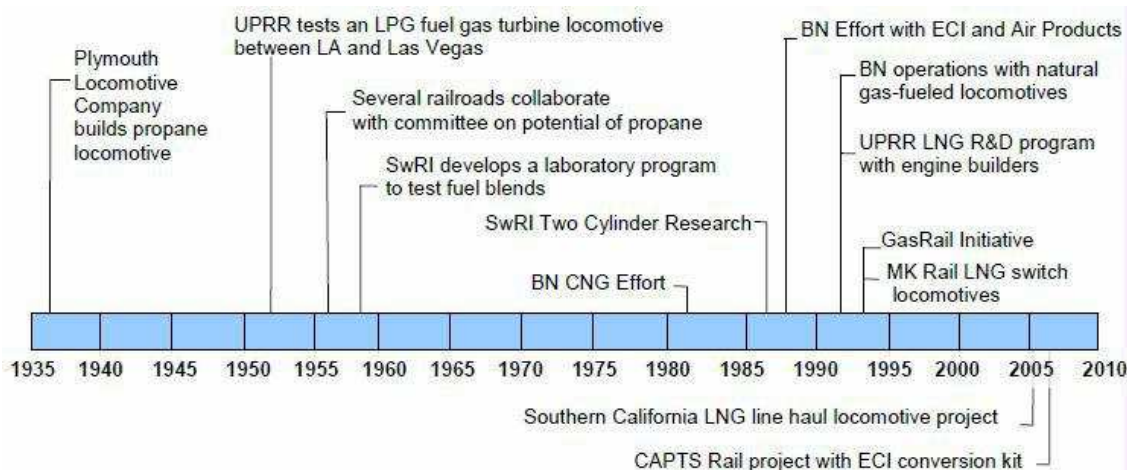


Illustration 2: expérimentations de trains au gaz naturel aux États-Unis

4.2.3. Solutions à base d'électricité

Contrairement aux solutions à base de carburant liquide ou gazeux, les solutions à base d'électricité utilisent directement des moteurs électriques pour la propulsion du matériel ferroviaire. Ces solutions sont surtout des alternatives à l'infrastructure de transport et de distribution du courant par caténaire et sous-station.

Compte tenu du coût de stockage de l'énergie électrique, lié aux limitations de l'usage des batteries pour les applications mobiles²², ces solutions ont été jusque récemment peu exploitées.

Les actuelles diminutions de coûts dans le domaine des batteries, particulièrement les électrochimiques, donnent aujourd'hui aux solutions utilisant l'électricité comme moyen de propulsion directe de nouvelles perspectives de déploiement. Les baisses de coûts sont le fruit du développement de l'électro-mobilité pour le marché des particuliers.

À côté des solutions à 100 % batterie, des concepts hybrides, comme dans le secteur automobile, apparaissent dans le domaine ferroviaire. Elles sont soutenues notamment par Bombardier et la SNCF qui y voient des rentabilités immédiates. Les solutions hybrides apportent cependant un gain faible en termes de coût énergétique de propulsion. D'ailleurs, les solutions hybrides, dans le domaine des véhicules particuliers, restent souvent adaptés à des profils de conduite spécifiques où la durée d'usage du moteur thermique et du mode électrique sont souvent difficiles à calibrer *ex ante*. Dans le cas de véhicules hybrides qui sont utilisés, pour des longs trajets sur des appels de charge réguliers (sur autoroute par exemple), le surpoids des batteries et du système électrique conduit à de moindres performances environnementales et économiques. Mais si le véhicule est utilisé pour des cycles d'accélération et de décélération trop fréquents par rapport au dimensionnement du système électrique, le recours au système thermique de propulsion rend dérisoire le gain de l'hybridation.

Solution	Train électrique	Train électrique à batteries	Diesel	Hybride Diesel	H ₂
Consommation d'énergie	5,0 kWh/km	5,7 kWh/km	1 l/km	0,85 l/km	0,33 kg/km

²² densités énergétiques massiques faibles, et donc autonomies faibles et coûts importants

<i>Prix de l'énergie</i>	0,1 €/kWh	0,1 €/kWh	1,3 €/l	1,3 €/l	10 - 2 €/kg
<i>Coût énergétique de la solution</i>	0,5 €/km	0,57 €/km	1,3 €/km	1,1 €/km	3,3 - 1,3 €/km

Comparaison des solutions à base d'électricité pour le transport ferroviaire (source : Bombardier et mission de B. Simian)

Pour répondre à la limitation technique des batteries au regard de la densité énergétique d'une part, et du nombre de cycles de charge et de décharge d'autre part, de nouvelles technologies de stockage en alternative au stockage électrochimique sont recherchées actuellement. L'ensemble des solutions s'analyse selon trois grands critères : la densité volumique d'énergie, la densité massique d'énergie, ces deux critères déterminant de façon plus ou moins directe l'autonomie, et le coût d'amortissement de l'investissement initial (ce qui revient principalement aux performances en termes de nombre de cycles que les systèmes peuvent réaliser).

Pour évaluer la capacité de stockage d'une technologie, il est utile d'avoir un terme de comparaison. Un kilogramme de pétrole a une capacité énergétique de 40 MJ. La densité du pétrole étant de 0,8 g/cm³, on a une chaîne d'équivalences : 1,25 l de pétrole équivalent à 1 kg pétrole, lui-même équivalent à 40 MJ (ou 11 kWh).

Pour ce qui concerne les batteries, le choix aujourd'hui dominant du lithium-ion par le secteur des transports automobiles est le résultat d'une bonne capacité volumique :

Technologie	Énergie massique (Wh/kg)	Énergie volumique (Wh/l)	Puissance massique (W/kg)
<i>Pb - acide</i>	40	110	340
<i>NiMH</i>	120	300	1 000
<i>Li-ion</i>	240	690	340

Performances des batteries

Ces valeurs sont obtenues en laboratoire. Dans les applications commerciales, les valeurs sont plus faibles. De plus, il faudrait prendre en compte aussi les poids du packaging, des connexions et des circuits électroniques nécessaires à la gestion de la batterie. Un kilogramme de batterie lithium-ion renferme une énergie de 240 Wh, ce qui équivaut à 20 g de pétrole. Il y a donc un facteur 50 entre l'énergie spécifique du pétrole et celle de la meilleure batterie actuelle disponible sur le marché ! Si on compte en terme de volume, un litre de batterie lithium-ion contient une énergie de 690 Wh, équivalant à 78 ml de pétrole, ce qui donne un facteur de volume égal à 13.

La recherche de solutions plus intéressantes au regard de la densité massique d'énergie embarquée conduit souvent aux technologies de l'hydrogène. La capacité énergétique de l'hydrogène est de 120 MJ/kg, ce qui est trois fois supérieur à celle du pétrole. Malheureusement, à température ambiante et pression ambiante, sa densité est très faible (0,09 kg/m³), ce qui nécessite des grands volumes de stockage. L'énergie stockée dans un mètre-cube d'hydrogène est équivalente à celle de 1/3 l de pétrole. Comprimé à 350 bars, l'hydrogène est au niveau de 0,04 kg/litre environ, soit 5,6 MJ/l, soit 5 fois moins d'énergie que dans un litre de pétrole.

Ainsi, entre les batteries et d'autres solutions de stockage, dont l'hydrogène, l'analyse des coûts-bénéfices au regard de la densité volumique (favorable au stockage électrochimique) ou de la densité massique (favorable à l'hydrogène) a conduit à des choix différents des deux grands constructeurs de matériel roulant (Alstom et Bombardier).

Le choix dépend largement des usages et des profils de charge du système énergétique de propulsion, eux-mêmes liés aux caractéristiques des lignes ferroviaires sur lesquelles le matériel est amené à circuler. Pour de très longs trajets, de grandes vitesses, des lignes en forte déclivité, il est peu probable que des solutions de type hydrogène s'imposent. Mais les perspectives restent largement ouvertes pour les autres usages (trains régionaux, tram-train et trains de manœuvre notamment).

Solutions de <i>verdissement</i> de la propulsion ferroviaire – principaux avantages / inconvénients					
Technologies à base de carburants liquides ou gazeux			Technologies à base de propulsion électrique		
Technologie	Avantages	Inconvénients	Technologie	Avantages	Inconvénients
<i>Biocarburants de première génération</i>	Disponibilité de la technologie / Coût	Mobilisation de la biomasse (et donc bilan environnemental sujet à caution) / Pollution locale	<i>100 % batteries</i>	Technologie arrivant à maturité (tirée par le secteur automobile)	Autonomie encore limitée
<i>Biocarburants de seconde génération</i>	Pollution locale faible / Pas de nécessité de modifier les systèmes de propulsion	Solution non éprouvée industriellement / Bilan énergétique et économique non convaincant	<i>Hybrides</i>	Solution disponible	Gains plus ou moins forts en émission de CO ₂ selon les profils d'usage, mais ne permettant pas d'atteindre le <i>zéro émission</i>
<i>Gaz naturel</i>	Disponibilité de la solution technique	Gains marginaux en pollution locale et en CO ₂ / Dépend de la filière d'approvisionnement en biogaz non encore mature	<i>H₂</i>	Emport massique intéressant par rapport aux batteries, et autonomie plus importante / Durée de charge réduit (compatible avec des usages fréquents)	Coût d'appro. de l'hydrogène décarboné encore élevé, mais devant diminuer en mettant en place une filière française de l'hydrogène

5. Les projets de Bombardier pour *verdier* les parcs français de matériels roulants

La société Bombardier a comme stratégie industrielle la mise en place de batteries sur les trains AGC bimodes et Diesel existants. Cette stratégie repose sur trois constats :

- la nécessité de reconditionner dans les prochaines années une flotte de 488 AGC bimodes et Diesel ayant de 5 à 20 ans d'âge,
- l'appui sur une technologie robuste, permettant un *verdissement* rapide du parc,
- la proposition d'une solution *low-cost* pertinente pour des lignes partiellement ou non électrifiées.

Bombardier ne mise pas aujourd'hui sur le train à hydrogène. Elle juge que la technologie n'est pas mûre. L'industrie ferroviaire n'est pas à même de tirer cette innovation de rupture, car elle n'est pas une industrie de masse. Le train à hydrogène serait pour 2030, mais pas avant.

5.1. Principe et avantages du train à batteries tout électrique

Il consiste à équiper des rames électriques de packs multiples de batteries (*Battery Electric Multiple Unit*, BEMU). Ils permettent de donner à la rame une autonomie, hors alimentation électrique par caténaire, qui pourrait aller de 40 à 100 kilomètres en fonction des lignes. Les batteries sont chargées par caténaire ou en station de recharge.

Bombardier porte ce projet à travers sa rame automotrice électrique Talent 3 compatible avec le système de batterie au lithium-ion Bombardier Primove. La société s'appuie sur son expérience en matière de trams (à Nankin en Chine) et de métro.

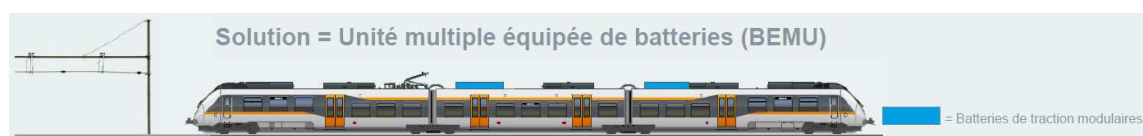


Illustration 1 : solution BEMU de Bombardier (source : Bombardier)

Le train a les avantages d'un train tout électrique : coût de maintenance réduit par rapport à un train Diesel, absence de pollution locale, réduction des émissions de CO₂ en fonction du mix énergétique, réduction du bruit, amélioration du confort des voyageurs. Il serait aussi plus économique que les trains Diesel ou H₂.

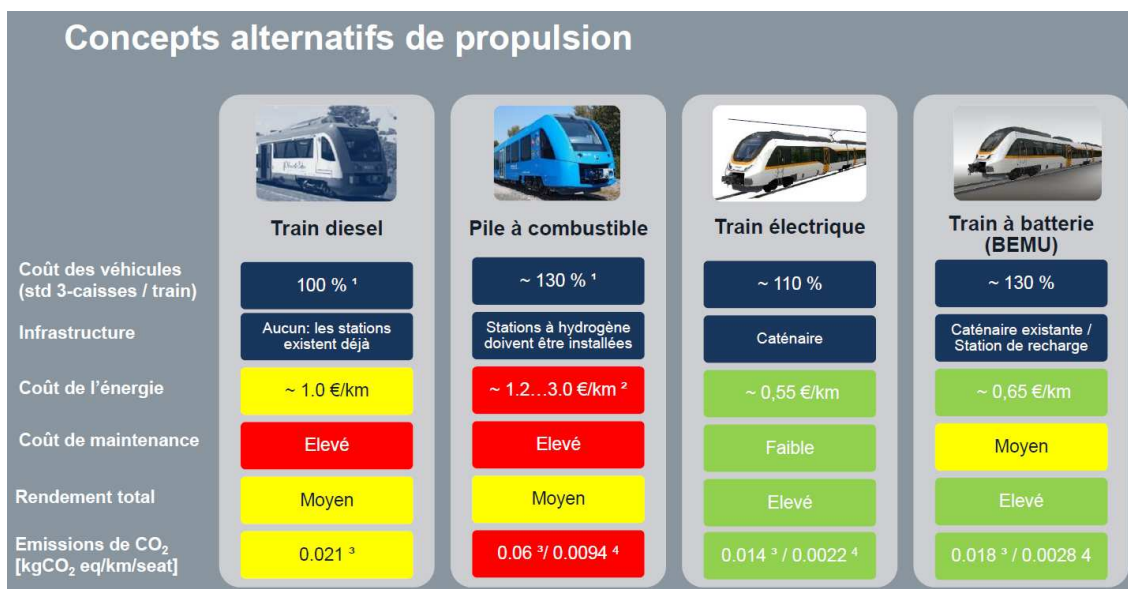


Illustration 2 : concepts alternatifs de propulsion selon Bombardier (source : Bombardier)

5.2. Selon Bombardier, un train adapté qui répond à de nombreux besoins du réseau

En France, 48 % du réseau ferré n'est pas électrifié. Du fait de sa faible autonomie, le train à batteries de Bombardier n'est pas adapté aux longues liaisons non électrifiées. Mais il permet des circulations sur des lignes partiellement électrifiées, par exemple en début ou en fin de parcours.

Il pourrait aussi rendre possible l'électrification *frugale* de certaines lignes actuellement non électrifiées, mais à fort trafic. L'électrification *frugale* évite d'électrifier des parties difficiles à équiper (pont, tunnel, etc.), en divisant par trois le coût de l'électrification.

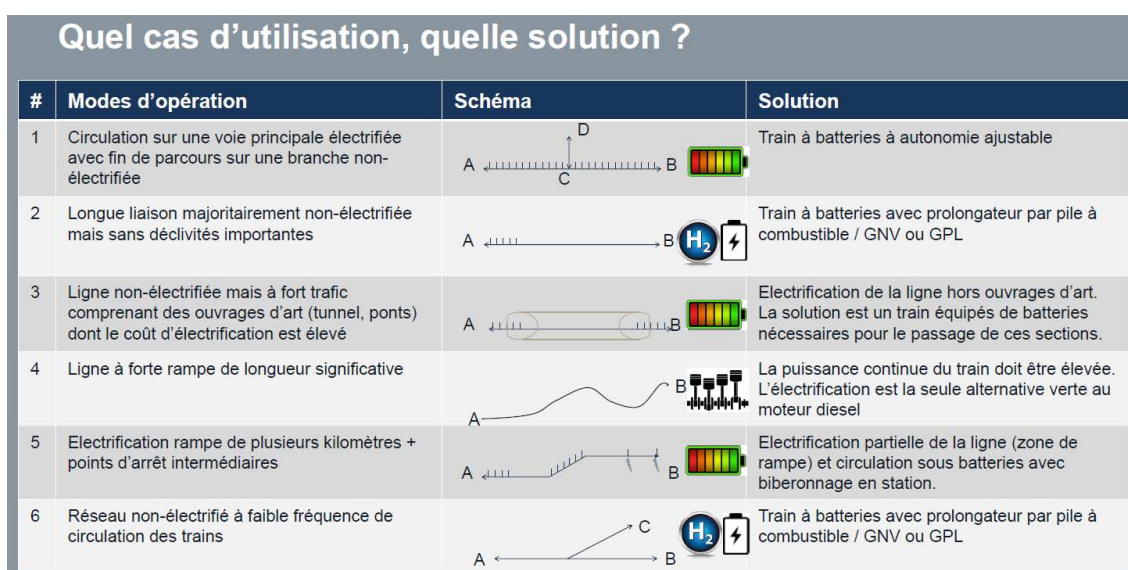


Illustration 3 : solutions selon les types de ligne (source : Bombardier)

Un travail approfondi serait à mener afin de dresser un état des lignes et des services conventionnés (TER ou TET) qui correspondraient à la situation 1 décrite ci-dessus, c'est-à-dire avec des sections non électrifiées de moins de 50 kilomètres, afin de vérifier la pertinence de la solution proposée.

5.3. Pour Bombardier, une opportunité industrielle évidente

Les vieux trains Diesel à transmission hydraulique ne sont pas adaptés à une transformation en train à batterie par la nécessité d'une adaptation trop lourde (mise en place d'un moteur électrique).

Les AGC Bombardier Diesel ou bimodes offrent une réelle opportunité du fait de leur âge (nécessité de les reconditionner). De plus, les AGC bimodes sont déjà équipés d'un convertisseur capable de prendre des sources d'énergie d'un moteur asynchrone. Ils disposent de la disponibilité en poids et en surface pour accueillir les packs de batteries. La maîtrise de l'informatique embarquée serait fondamentale pour ces nouveaux AGC.

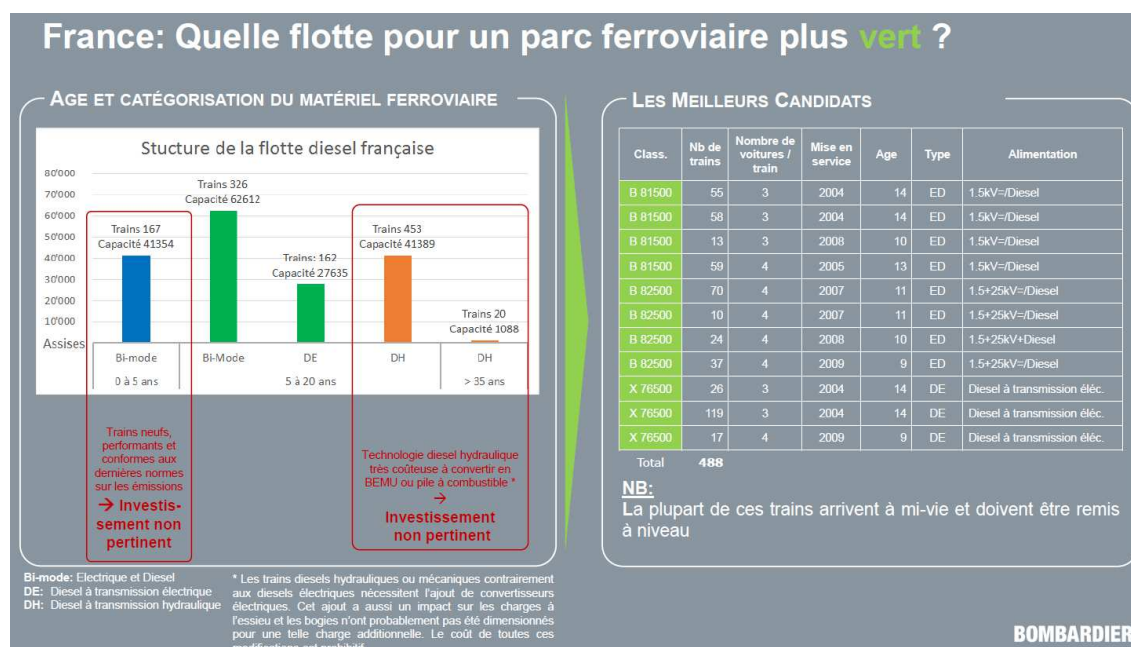
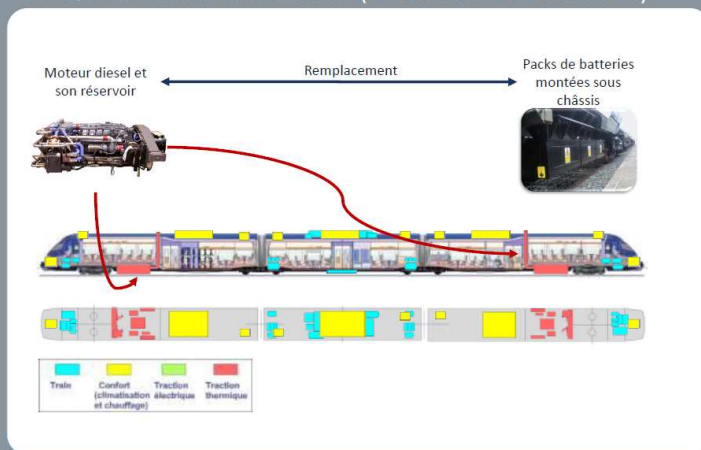


Illustration 4 : solutions de matériel roulant vert (source : Bombardier)

Transformation de l'AGC en train à batteries

BiBi → BEMU PRINCIPE DE MODIFICATION (SIMILAIRE AU PROJET ELECTROSTAR)



- Suppression du moteur diesel et de toutes les pièces associées à ce type de propulsion (tuyauterie, échappement, réservoir...)
- Ajout des batteries en lieu et place des moteurs diesel
- Connexion des batteries au bus continu des convertisseurs électriques déjà présents sur le train
- Mise à niveau des logiciels de traction et de contrôle du train et de l'interface de conduite

Illustration 5 : transformation d'AGC en train à batteries (source : Bombardier)

Les AGC ayant été produits durant sept ans, leur reconditionnement pourrait demander aussi sept années. Serait ainsi offerte une perspective industrielle pour le site industriel de Bombardier à Crespin (Hauts-de-France).

6. Les études et projets de la SNCF pour *verdir* ses parcs de matériels roulants (hors trains à l'hydrogène)

Résumé

Le poids du transport ferroviaire dans les émissions de gaz à effet de serre et d'autres polluants est faible dans le transport en France. La part de la traction thermique pour la SNCF ne cesse de diminuer depuis les années 1980, ce qui traduit un *verdissement* continu du parc ferroviaire.

Les économies d'énergie tant pour le parc Diesel qu'électrique contribuent à *verdir* l'ensemble du parc. Elles constituent un gisement d'économies pour la SNCF.

Les trains bimodes améliorent considérablement l'exploitation de nombreuses lignes fonctionnant antérieurement uniquement par mode thermique, tout en permettant le *verdissement* du parc ferroviaire.

La SNCF souhaite désormais développer des trains hybrides avec batteries. Ils apportent des avantages dans l'exploitation des lignes électrifiées ou non, et permettraient à l'avenir une électrification frugale du réseau.

6.1. La SNCF : gros consommateur d'énergie mais faible contributeur national aux émissions de CO₂ et de particules

Le groupe SNCF (SNCF-Réseau, SNCF Mobilités, SNCF Immobilier) consomme en un an 17 TWh d'énergie, dont 60 % d'électricité. C'est le 1^{er} consommateur d'électricité en France : 2 % de la consommation totale. Le groupe émet 3 millions de tonnes de CO₂ par an, autant que la ville de Bordeaux. La réduction de la consommation d'énergie est un sujet stratégique pour le groupe SNCF. C'est une source majeure d'économie. C'est aussi un moyen pour réduire son impact environnemental.

La traction ferrée représente plus de 59 % de la consommation d'énergie du groupe. Cette traction est elle-même électrifiée à près de 80 %. Sur les 29 300 km du réseau, 15 700 km de lignes sont électrifiées.

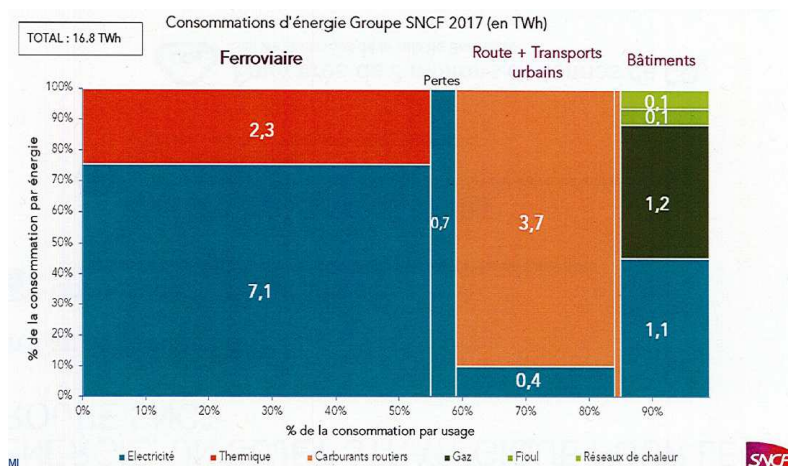
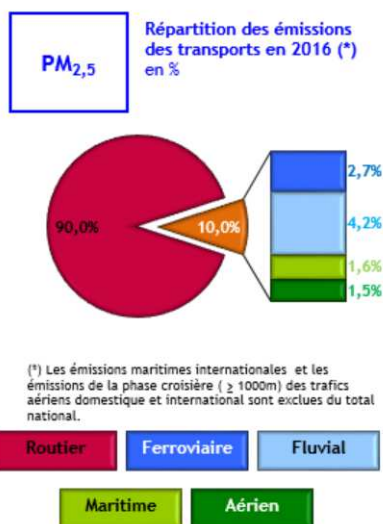


Illustration 1 : consommations d'énergie du groupe SNCF en 2017 en TWh (source : SNCF)

Le transport ferroviaire est, à l'échelle nationale, un faible contributeur aux émissions de gaz à effet de serre ou de particules. Le transport ferroviaire ne représente que 2,7 % des émissions de PM 2,5. Un voyageur qui parcourt 1 kilomètre émet en moyenne 7,2 grammes de CO₂ dans un train, mais 71 g dans une voiture avec un conducteur et deux passagers, et 213 g dans une voiture avec le seul conducteur.



Source CITEPA / format SECTEN - avril 2018 CITEPA-transport-2018-d.xlsx

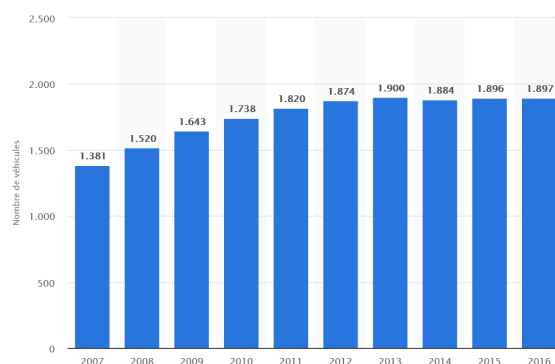
Illustration 2 : pollution des différents modes de transport (source : https://www.citepa.org/fr/activites/inventaires-des-emissions/secten#Contribution_ss-secteurs)

6.2. Le *verdissage* par le déclin du Diesel SNCF et l'utilisation de carburants plus propres

La part des parcours en mode thermique s'élève à environ 20 %. Elle est stable depuis 10 ans. Elle ne correspond qu'à 12 % des trafics.

Le parc de locomotives Diesel de la SNCF a diminué de 40 % depuis 10 ans. La part thermique des tonnes-kilomètres brutes remorquées (TKBR) a chuté de 21 % à 7 % entre 1980 et 2016, alors que celle de la traction électrique est passée de 79 % à 93 %. Cette diminution s'explique notamment par le remplacement des trains de voyageurs en rames tractées par des matériels automoteurs plus légers.

À l'échelle nationale, à l'inverse de cette tendance propre à la SNCF, le nombre de locomotives Diesel n'a cessé d'augmenter en France depuis 2007, passant de 1 381 à presque 1 900 en 2016, soit une augmentation de 500 unités. Cette tendance s'explique entre autres par la montée des opérateurs de fret ferroviaire concurrents de la SNCF, et le déclin de l'activité du fret pour l'opérateur SNCF.



© Statista 2018

Illustration 3 : nombre total de locomotives Diesel en France de 2007 à 2016 (source : <https://fr.statista.com/statistiques/473001/locomotives-diesel-france/>)

Pour la SNCF, cette diminution de la part du Diesel entraîne celle de la consommation de gazole de traction, ramenée de 217,5 milliers de m³ en 2007 à 158,4 milliers de m³ en 2016, soit une baisse de 27 %. Cette tendance devrait se poursuivre dans les prochaines années.

À la suite du paquet climat-énergie qui instaure de nouvelles normes environnementales pour les carburants et biocarburants (directive 2009/30/CE) et sa transposition en France en 2011, les entreprises de transport ferroviaire ont l'obligation d'utiliser du gazole non routier (GNR) en lieu et place du *Fuel Oil Domestique* (FOD) qui avait la particularité d'émettre beaucoup de matières polluantes, notamment du dioxyde de soufre. Depuis le 31 décembre 2014, le GNR peut incorporer jusqu'à 8 % de biodiesel.

En 2016, des expérimentations ont été menées sur la ligne Paris-Granville pour utiliser du B30, un carburant qui comprend de 24 % à 30 % de biodiesel (de 70 % à 76% de gazole). Le cahier des charges du matériel Regiolis est en effet compatible avec l'utilisation du B30. L'expérimentation a démontré qu'il était techniquement possible d'utiliser ce carburant. Mais ce B30, actuellement seul carburant alternatif moins polluant que le gazole, potentiellement disponible en quantité industrielle, est plus coûteux que le GNR.

6.3. Le verdissement grâce aux trains bimodes

En matière de *verdissement*, les trains bimodes, déclinés dans leurs différentes versions (bimode gazole/1 500 volts, bimode bicourant/gazole) ont représenté une véritable révolution. Ils permettent d'utiliser la traction électrique sur la partie électrifiée du parcours, et de passer en mode Diesel lorsque le réseau n'est pas électrifié. Ainsi, sur 662 kilomètres de parcours entre Nantes et Lyon, 144 km doivent être effectués en mode thermique entre Saint-Germain-des-Fossés et Saint-Germain-au-Mont-d'Or. Ces trains bimodes tirent pleinement parti d'un réseau partiellement électrifié, avec une exploitation et un confort pour les voyageurs nettement améliorés.

L'innovation remonte à 2004 avec les rames AGC de Bombardier. 326 AGC sont de type bimode sur les 700 rames produites. 198 Régiolis sont de type bimode gazole-bicourant sur 273 rames actuellement commandées.

La technologie bimode s'étend aujourd'hui aux locomotives avec deux types principaux. Les locomotives bimodes de desserte terminale sont principalement

électriques, mais disposent d'un groupe Diesel leur permettant d'accéder aux voies de service ou à des embranchements particuliers non électrifiés. Les plus grands engins bimodes disposent de puissances électriques et thermiques pour la longue distance, comme les rames AGC ou Régiolis.

6.4. Des projets de trains hybrides avec batteries pour limiter les investissements d'infrastructure

Le *verdissement* du parc ferroviaire ne pourra pas passer à l'avenir par l'électrification totale des lignes, car le coût de cette électrification est trop élevé même si l'électrification offre des performances inaccessibles en traction autonome. Pour la SNCF, l'objectif est de limiter l'électrification aux zones les plus simples à électrifier tout en étant des zones pertinentes (trafic, exploitation), ou inversement de ne pas électrifier les parties les plus délicates du réseau (tunnels, ponts, etc.). À cette possibilité d'électrification partielle répond celle d'une optimisation et d'une plus grande robustesse du réseau déjà électrifié, par exemple en diminuant le nombre de sous-stations.

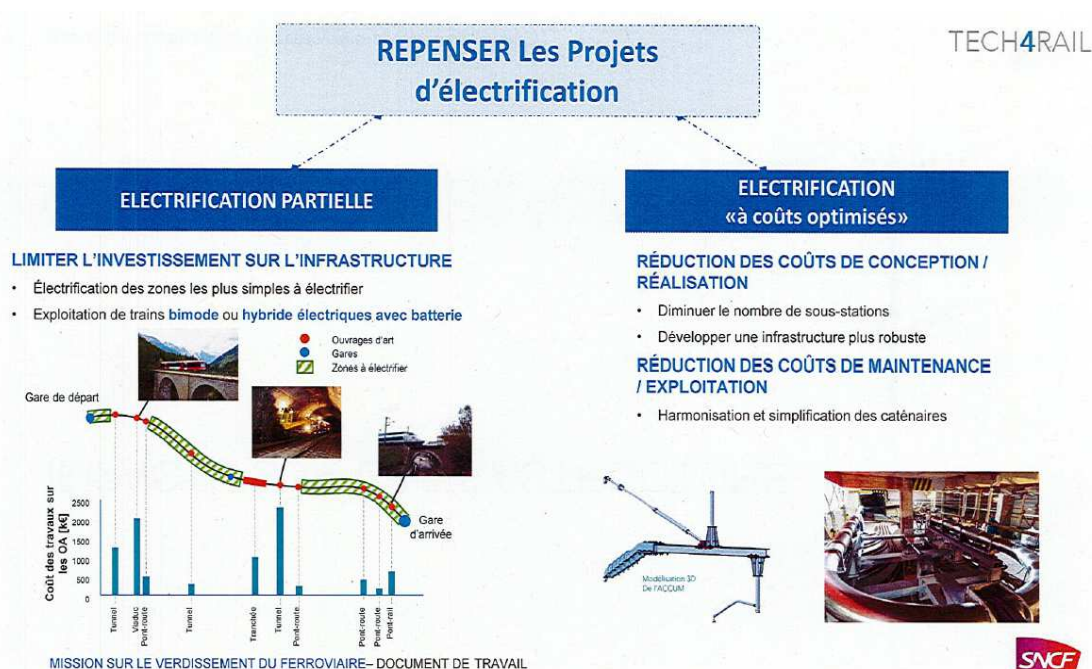


Illustration 4 : limitation des coûts d'investissement (source : SNCF)

Dans la logique des trains bimodes, les trains hybrides avec batteries permettraient de répondre à ce double enjeu d'électrification partielle et d'une plus grande robustesse du réseau déjà électrifié, par exemple pour pallier une défaillance du système des caténaires. Ils offrent ainsi un complément du moteur Diesel ou du pantographe, de la même manière qu'une voiture hybride en réduisant jusqu'à 20 % les consommations d'énergie, les coûts de maintenance ou en récupérant l'énergie de freinage. Ils procurent les avantages induits des trains bimodes : plus de confort, moins de bruit, moins d'émissions de particules. Ils correspondent donc davantage à une opportunité d'améliorer l'exploitation grâce à un système plus robuste, y compris sur le réseau déjà électrifié, qu'à une logique de *verdissement*. Mais ils représentent incontestablement une étape vers la fin du mode thermique.

La technologie du train hybride consiste à remplacer une partie des moteurs Diesel sur les rames TER par des batteries, en optimisant la gestion de l'énergie. L'énergie de freinage du train pourra être récupérée et réutilisée à bord, alors que plus de 30 % de l'énergie produite par le freinage se dissipent en pure perte.

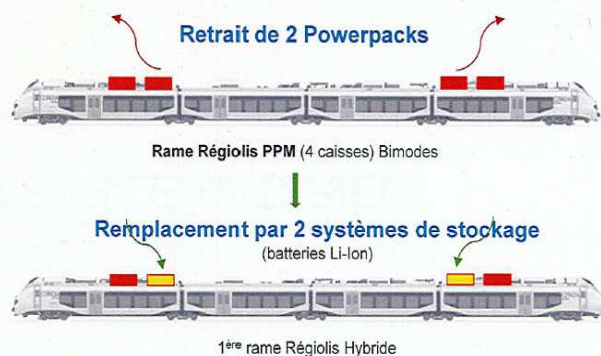
Les batteries lithium-ion sont les plus courantes. Elles ont fait la preuve de leurs avantages dans d'autres domaines (téléphones portables ou outillage sans fil) : haute densité d'énergie pour un poids et un volume faible, faible auto-déchargement, rechargement rapide, nombreux cycles possibles et aucun effet mémoire. Ces packs de batterie auraient des durées de vie de 7 ou 8 ans, et pourraient donner au train hybride une autonomie d'une vingtaine de kilomètres.

TER HYBRIDE:

AMÉLIORER LA PERFORMANCE ET RÉDUIRE L'IMPACT SUR L'ENVIRONNEMENT

PRINCIPE

- > Récupérer et stocker l'énergie de freinage habituellement dissipée (aujourd'hui perte de 30%)
- > Combiner cette énergie stockée avec les autres sources d'énergie (moteur thermique ou caténaire).
- > Optimiser la gestion énergétique pour maximiser les économies d'énergie et offrir de nouveaux services à bord (accélération de l'engin, traversée de zones urbaines denses en mode électrique...)



MISSION SUR LE VERDISSEMENT DU FERROVIAIRE- DOCUMENT DE TRAVAIL - 10 Juillet 2018



Illustration 5 : TER hybride (source : SNCF)

Selon la SNCF, cette technologie du train hybride est mûre. La SNCF passera à un démonstrateur avec un TER hybride en partenariat avec les régions. Le coût de ce démonstrateur est estimé à 15 ou 20 M€. Trois régions ont manifesté leur intérêt : Occitanie, Nouvelle Aquitaine et Grand Est. La SNCF financera le projet à hauteur de 50 %. Alstom et la SNCF financeront les autres 50 %, à parts égales. Une première circulation pourrait se faire en 2021. L'accord a été annoncé en septembre 2018.

À la suite de cette démonstration, il serait possible de transformer des anciens matériels Regiois de 4 ou 5 ans d'âge, avec une possibilité de *retrofit* pour 100 à 150 rames. Les régions pourraient passer une convention de financement avec la SNCF, qui introduirait un avenant avec Alstom dans le marché des Régiois.

Il reste à vérifier qu'il existe bien un marché pour ces TER hybrides. Il faudra une analyse fine des lignes et des services potentiellement concernés.

7. La proposition d'Engie pour la production locale d'hydrogène en vue du ravitaillement en hydrogène de dix trains régionaux

Lors de leur audition par le député Benoît Simian le 24 juillet 2018, les représentants de la société Engie ont présenté une proposition pour la circulation de trains à hydrogène en France.

Pour Engie, cette solution technologique permettrait d'éviter l'électrification ou la réélectrification de lignes ferroviaires en France. Car chaque électrification coûte cher : entre 0,35 million et 1,5 million d'euros par kilomètre de ligne à voie unique. Pour Engie, la solution de l'hydrogène est compétitive (en CAPEX) dès qu'il y a plus de vingt kilomètres à électrifier. C'est une bonne solution aussi pour les tramways.

Présenté par Engie le 24 juillet 2018, le schéma ci-dessous présenté par Engie le 24 juillet 2018 illustre la production et la distribution d'hydrogène obtenu par électrolyse.

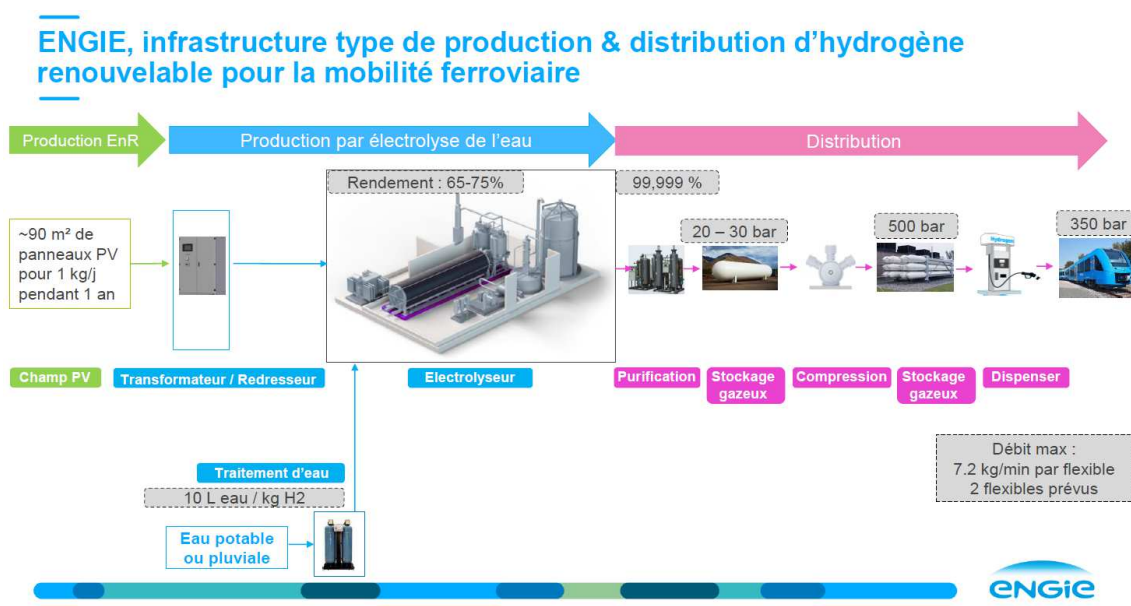


Illustration 1 : production et distribution d'hydrogène pour le transport ferroviaire (source : Engie)

Le schéma ci-dessous résume la proposition soumise par Engie pour le fonctionnement à l'hydrogène de dix TER circulant une même ligne. Le coût des installations serait compris entre 5 et 10 millions d'euros. L'étude et la construction demanderaient entre un an et demi et deux ans.

ENGIE, exemple de dimensionnement d'une station de production / distribution pour la mobilité ferroviaire (1 ligne, 10 TER H2)



- Consommation spécifique : 0.25 kg H₂ / km vs 1.1 L diesel / km (soit -25%)
- Masse d'H₂ stockée par train : 260 kg @ 350 bar (gaz)
- Masse H₂ totale stockée sur site : 4.3 tonnes → Installations Classées pour la Protection de l'Environnement (ICPE) sous autorisation
- Planning (études → mise en service de l'infrastructure) : 1.5 à 2 ans

Rôle d'architecte d'ENGIE pour optimiser les coûts :

- Station de **grande capacité** avec **production sur site**
- **Impact** significatif du **design** de la station sur les **CAPEX**

Illustration 2 : station de production et distribution d'hydrogène (source : Engie)

Un tel investissement apporterait, selon Engie, des avantages sûrs. Mais il faudra avoir grande attention à plusieurs *points de vigilance*. Apports et points de vigilance sont présentés ci-dessous.

ENGIE, Trains H2 / Tramway H2 Apports et points de vigilance

- **Apports**
 - Décarbonisation du transport ferroviaire (contribution à l'objectif de neutralité carbone du secteur ferroviaire en 2050)
 - Compétitivité par rapport au coût d'électrification d'une ligne (CAPEX)
 - Contribution au développement d'une économie circulaire et à l'indépendance énergétique des territoires
 - Développement d'une filière d'excellence française du transport ferroviaire à hydrogène, création d'emplois
- **Points de vigilance**
 - Clarification du cadre législatif / rôles et responsabilités des parties prenantes
→ Engager les acteurs (décisionnaire investisseur, exploitant, fournisseur du matériel roulant, fournisseur d'hydrogène décarboné) de manière collaborative dès à présent pour optimiser les solutions Train & Tramway H2
 - Clarification de la spécification du matériel roulant H2 attendu pour dimensionner les infrastructures de production / distribution, critères de sélection des lignes pour optimiser les coûts, clarification des lignes retenues pour étudier l'implantation des stations
 - Etudes de sécurité à mener en amont pour l'application de l'hydrogène dans le transport ferroviaire, clarification du cadre réglementaire (production, distribution : distances de sécurité ...)
 - Clarification des modalités de financement – Subvention / conditions favorables pour la production d'hydrogène décarboné vs diesel
 - Clarification de l'articulation entre la mission en cours et le groupe de travail ECVs Mobilité H2 – ferroviaire

Illustration 3 : points de vigilance en matière de production et distribution d'hydrogène (source : Engie)

8. La proposition d'Alstom pour commencer à faire circuler au plus tôt en France des trains à l'hydrogène

Henri Poupart-Lafarge, le président-directeur général d'Alstom, a été entendu par le député Benoît Simian le 19 juillet 2018 à l'Assemblée nationale.

Le Président-directeur général a précisé que les échéances fixées par les pouvoirs publics en France étaient bienvenues pour mettre en tension l'industrie et le transport ferroviaire, compte tenu du temps nécessaire au déploiement de la technologie de l'hydrogène.

Au sein du groupe Alstom dans le domaine de l'hydrogène, les développements ont d'abord été une réponse à une demande initiale des *Länder* allemands sur la décarbonation des transports. Il faut rappeler qu'il a été assez peu question des transports lors des débats de la COP21, où l'on a plutôt mis l'accent sur la production et les économies d'énergie. Ce sont les sujets de la pollution locale et de la santé publique qui ont pressés les collectivités à étudier la voie de l'hydrogène.

L'efficacité des trains électriques est un enjeu d'économie d'énergie et d'amélioration de la consommation générale d'énergie du transport ferroviaire,

Sur le mode Diesel, Alstom a étudié toutes les options de *verdissement*. L'hydrogène devient l'option de référence pour le transport ferroviaire dès que l'on dépasse une certaine distance, singulièrement pour éviter l'électrification des lignes. L'analyse a été faite sur des hypothèses d'électrification totale des lignes, et pas avec des solutions d'électrification *frugale*. Le sujet du renouvellement des infrastructures ferroviaires est aussi entré en ligne de compte.

Selon Alstom, le défaut d'analyse sur la mauvaise rentabilité d'une ligne induit trop souvent à une conclusion binaire : fermeture ou maintien de la ligne. Il n'y a guère d'analyse sur d'autres options que les actuelles innovations soit dans le domaine du matériel roulant, soit dans celui des infrastructures. Or, pour les petites lignes, il y a d'autres enjeux.

- L'analyse d'un matériel roulant de type tram-train (matériel roulant sobre) mérite d'être approfondie à chaque fois. Sans que cela regarde un marché très grand dans une première phase, une hypothèse est de mettre de l'hydrogène sur le tram-train, dont l'extension à des trains régionaux ne poserait probablement pas de difficulté. L'autonomie des tram-trains est un sujet d'étude pour la SNCF, mais pas le sujet de l'hydrogène.
- Un des aspects importants des analyses est de savoir si une grande partie de l'économie passera à une économie de l'hydrogène, ce qui permettrait une baisse des prix de ce gaz. Si ce n'était pas le cas, et si les batteries étaient suffisamment économiques, l'hydrogène serait cantonné à des champs de pertinence plus étroits.

En Allemagne, les *Länders* se sont bien davantage mobilisés en faveur de l'hydrogène que la Deutsche Bahn.

Les batteries en mode hybride pour les Régiolis ont pour but d'économiser des coûts liés à la consommation de carburant, mais la traction resterait toutefois à base de gazole. Un train régional ne sera jamais à batteries seulement. La solution Diesel / électrique est une solution de court terme, certainement pas de long terme.

Concernant les autres technologies de *verdissement*, Alstom fait valoir deux choses.

- Les biocarburants donnent satisfaction. Mais il faut s'interroger sur leur avenir, compte tenu de leur impact sur les émissions de CO₂ au niveau mondial.
- Concernant le bioGNV, le sujet principal est l'absence de filière qui permette d'avoir du bioGNV à un prix abordable. Cette solution est fragile. Au regard de la pollution locale, le bio GNV ne répond pas à la demande de *zéro émission* en cœur de ville.

Sur la question de ce qu'il faudrait faire pour hâter le *verdissement* avec la technologie de l'hydrogène, Alstom fait valoir ceci :

- La première question est de savoir si l'on considère que l'Allemagne est un cas trop différent du cas français. Faut-il adapter un train allemand pour la France ? Cette option cantonnerait à une expérimentation le déploiement d'un train à hydrogène. Cette solution risque de faire perdre du temps pour la seconde étape de déploiement avec des trains bien adaptés aux marchés français.
- Il vaut sans doute mieux réfléchir à une solution avec un des deux trains en circulation en France (Citadis Dualis et Régiolis) : tram-train sur de l'infra-urbain et Régiolis sur des lignes régionales. Un point doit être fait avec les régions pour savoir quelle est leur stratégie.
- Les locotracteurs ont des puissances plus importantes que les trams et les trains. Cela change l'analyse en termes de pertinence du mode de traction. Cela rend une solution *100 % batteries* moins évidente même si les distances sont limitées. Alstom conduit un programme de recherche à Belfort sur les locotracteurs.
- Toronto au Canada a un programme de modernisation *verte* de son réseau urbain. La ville pèse attentivement deux solutions : électrification ou train à hydrogène.
- L'expression de besoins par les collectivités territoriales est crucial pour homogénéiser les fonctionnalités du matériel. Fort de l'exemple du TGV du futur, Alstom est prêt à entrer dans une société de projet qui porterait le matériel ferroviaire, mais avec une expression raisonnable des besoins, et surtout un caractère homogène et normalisé de la commande.

Les surcoûts du matériel roulant à hydrogène sont variables. Approximativement, ils sont de 2 M€ par rapport à une version électrique bimode, et de 1 M€ par rapport à un hybride Diesel / batteries. Mais le coût de développement serait de 50 M€ ; il serait à amortir sur une série raisonnable.

En 2025, il faudra prendre une décision d'importance pour l'avenir des 900 TER Diesel en vue d'atteindre la *neutralité carbone* en 2050. Mais une première flotte sera nécessaire pour connaître les comportements, les vibrations, etc... Cette flotte serait de 25 trains pour avoir un bon retour d'expérience.

S'agissant du portage des infrastructures de distribution ou de production, il est difficile à Alstom d'entrer dans une société de projet. Les grands énergéticiens français sont en concurrence, et il sera sans doute bon qu'ils restent en concurrence.

Concernant les piles à combustible, Alstom fait valoir que son partenariat avec Hydrogenix n'est pas exclusif. C'est surtout un accord sur la réduction des coûts. Un partenariat avec Ballard et Hydrogène de France est un élément du paysage des consortiums nationaux qu'Alstom peut évaluer.

À ce stade de l'analyse, la situation du point de recharge pour l'hydrogène est un élément qui reste à analyser dans un objectif de mise en commun des infrastructures.

Alstom a présenté un planning (cf. ci-après) sur ce que la société estime raisonnable pour pouvoir entrer, à horizon 2030, dans une phase de déploiement à grande échelle, tout en tirant parti d'un retour d'expérience suffisant sur le service commercial d'une première flotte de trains.

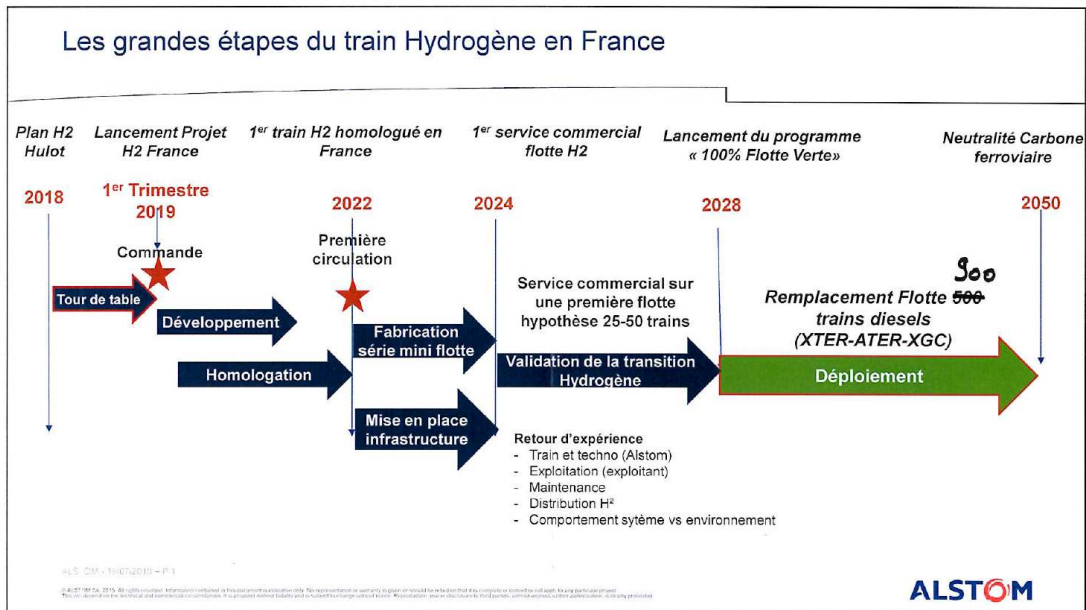


Illustration : planning d'étude et de déploiement du train à hydrogène en France selon Alstom (source : Alstom)

9. Les études de la SNCF sur les trains à hydrogène

Pour la SNCF, le déploiement des trains à hydrogène ne devrait pas intervenir massivement avant le prochain renouvellement de la flotte de trains régionaux et à celui des TER hybrides (moteurs Diesel et batteries) qui auraient été mis en service à partir de 2023 ou 2025.

9.1. Les trains à hydrogène dans la stratégie de la SNCF

L'avantage principal du train à hydrogène est d'offrir des performances d'autonomie et de vitesse qui sont comparables à celles des tractions thermiques, tout en garantissant un train *zéro émission* (CO₂, NO_x, PPM, etc.) à partir du moment où la production d'hydrogène se fait à partir d'énergie renouvelable.

Selon la SNCF, cette technologie n'est pas encore naturellement parvenue à maturité économique. Des points bloquants restent à lever. Elle n'a pas atteint un stade industriel. À l'inverse, un déploiement rapide des trains hybrides à batteries est envisageable dans des conditions socio-économiques viables, avec des avantages nombreux pour l'exploitation du réseau.

C'est pourquoi la SNCF envisageait le déploiement des trains à hydrogène uniquement à partir de 2030 ou 2035, avec éventuellement la circulation d'un prototype vers 2023. Suite aux échanges, SNCF est alignée sur la position de la mission parlementaire et affirme s'engager comme membre actif du projet de déploiement du premier train à hydrogène d'ici 2022.

COMPLÉMENTARITÉ TER HYBRIDE ET HYDROGÈNE

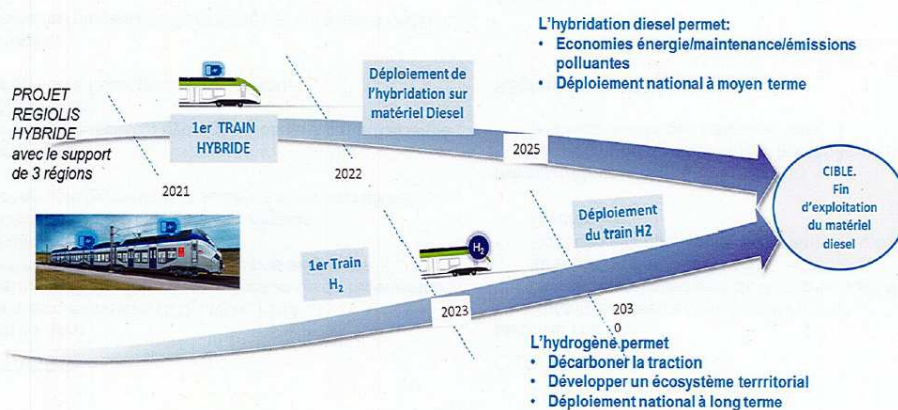


Illustration 1 : déploiement des technologies Hybride et Hydrogène pour les TER selon la SNCF (source : SNCF)

9.2. Des contraintes à mettre en regard des opportunités

Les avantages du train H₂ ne se limitent pas à ceux d'un train *zéro émission* (si l'hydrogène est *vert*) qui offre des performances comparables à une traction thermique. Il permet aussi de ne pas électrifier les lignes, voire de renoncer à maintenir l'électrification d'une ligne lors de sa régénération ou modernisation. Il est donc potentiellement une source de fortes économies pour le réseau. En outre, il est tout à fait envisageable d'adapter des rames existantes de type Régiolis à l'hydrogène. Enfin, parce qu'il nécessite beaucoup d'hydrogène, le train H₂ peut contribuer à diffuser dans les territoires la production d'hydrogène locale à partir des énergies renouvelables.

À ces avantages répondent les nombreuses contraintes d'une technologie qui n'aurait pas atteint le stade industriel. Le coût d'investissement d'un train H₂ serait supérieur de 30 % à celui d'un train Diesel, et de 20 % à celui d'un train hybride à batteries. Cette différence est due au coût élevé, à l'heure actuelle, des piles à combustible, mais aussi des réservoirs permettant de stocker l'hydrogène à bord du train. Le coût d'un stockage de 200 kg s'élèverait ainsi à 200 000 euros. De même, le coût d'exploitation serait élevé avec de l'hydrogène *vert* (produit à partir de l'énergie renouvelable). Son coût de production serait nettement supérieur à celui de l'hydrogène *gris* (10 €/kg contre 4 €/kg).

À ces questions de coût s'ajoutent des contraintes de sécurité qui restent à lever afin de garantir une exploitation fiable : passage dans les tunnels, arrivée et stationnement dans les gares, circulation sous réseau électrique, ateliers de maintenance de ces trains, etc. Il n'existe pas de retour d'expérience sur le vieillissement des réservoirs à hydrogène sous pression de 350 bars, qui seraient soumis à des vibrations importantes et répétées lors de la circulation des rames.

LE TRAIN H₂

Avantages et contraintes du train H₂?

AVANTAGES:

Matériel roulant

- Train zéro émissions (CO₂, NOx, PPM...);
- Alternative à un projet d'électrification ou de régénération;
- Performances compatibles avec nos exigences d'exploitation;
- Rétrofit possible sur des trains existants;
- Technologie permettant la sortie de la traction diesel;

Infrastructure

- Production possible d'hydrogène locale à partir d'énergie renouvelable;
- Intégration à l'écosystème H₂ territorial

Financement

Financements français (PIA3, ADEME) et européens (FCH JU, S2R...);

CONTRAINTES:

Matériel roulant

- Coût investissement du train H₂ (hors infrastructure) supérieur de 30% à un train diesel et 20% par rapport à un hybride;
- Coût d'exploitation essentiellement lié au coût de l'hydrogène;

Infrastructure

- Logistique de distribution de l'hydrogène à mettre en place (stockage, station service...);

Règlementation/Sécurité

- Dossiers sécurité et homologation à instruire sur le matériel roulant ainsi que sur l'infrastructure;

Exploitation

- Modifications des règles d'exploitation (maintenance, conduite...);

24 MISSION SUR LE VERDISSEMENT DU FERROVIAIRE – DOCUMENT DE TRAVAIL



Illustration 2 : avantages et inconvénients du train H₂ selon la SNCF (source : SNCF)

	Matériel roulant	Production et Distribution H ₂	Centre de maintenance
Conception & Installation	<ul style="list-style-type: none"> Intégration des systèmes H₂ Procédure d'admission du matériel roulant (tunnels, arrêt en gare, ...) 	<ul style="list-style-type: none"> Localisation du site: <ul style="list-style-type: none"> ICPE SEVESO ATEX 	<ul style="list-style-type: none"> Intégration H₂ dans les ateliers <ul style="list-style-type: none"> ICPE ATEX
Exploitation	<ul style="list-style-type: none"> Règles d'exploitation à définir => formation Lien avec les services de secours (SDIS, ...) 	<ul style="list-style-type: none"> Règles d'exploitation à définir => formation Procédures de maintenance. Métrologie => facturation 	<ul style="list-style-type: none"> Procédures de maintenance <ul style="list-style-type: none"> PAC et Stockages H₂ Equipements autres que hydrogène Equipements ATEX

MISSION SUR LE VERDISSEMENT DU FERROVIAIRE- DOCUMENT DE TRAVAIL



Illustration 3 : questions préalables à dénouer selon la SNCF (source : SNCF)

9.3. L'hydrogène et la nécessaire mise en place d'un écosystème territorial

Le train à hydrogène nécessite la présence d'une station à hydrogène afin de *faire le plein* aussi aisément que dans une station-service d'essence. Le temps d'un plein pour un train à hydrogène serait de l'ordre d'une trentaine de minutes seulement.

Afin d'être viable économiquement mais aussi de répondre aux objectifs de développement durable, une station-service d'hydrogène, dont le coût pourrait s'élever à environ 1 million d'euros, nécessite la mise en place d'un véritable écosystème territorial. Plusieurs conditions sont à réunir pour y parvenir.

La production d'hydrogène *vert* nécessite des sources d'énergie renouvelable situées si possible à proximité de la station-service, permettant de produire suffisamment d'électricité nécessaire au fonctionnement de l'électrolyseur qui produit l'hydrogène. L'électrolyseur doit lui-même être proche de la station-service afin de ne pas avoir à transporter l'hydrogène, ou en tout cas à limiter au maximum ce transport. Enfin, une grosse station-service permettrait de bénéficier des économies d'échelle dans la production de l'hydrogène, ce qui signifie qu'il faut suffisamment de demande. Pour cela, la station doit être en mesure d'assurer le plein d'un ou plusieurs trains mais aussi de répondre à la demande d'autres utilisateurs gestionnaires de flottes (autobus, véhicules utilitaires et taxis notamment). La station-service doit être mutualisée pour différents usages. Elle doit être multimodale. Cela soulève un défi technique et économique avec la nécessité de délivrer de l'hydrogène à 350 bars de pression pour les trains, mais à 750 bars pour les véhicules plus légers.

Le train à hydrogène peut fortement contribuer à la viabilité de la station-service par les volumes d'hydrogène qu'il nécessite²³. Mais la mutualisation sera souvent indispensable. C'est pourquoi l'implication des régions et autres collectivités territoriales est nécessaire afin de mettre en place un bon écosystème territorial.

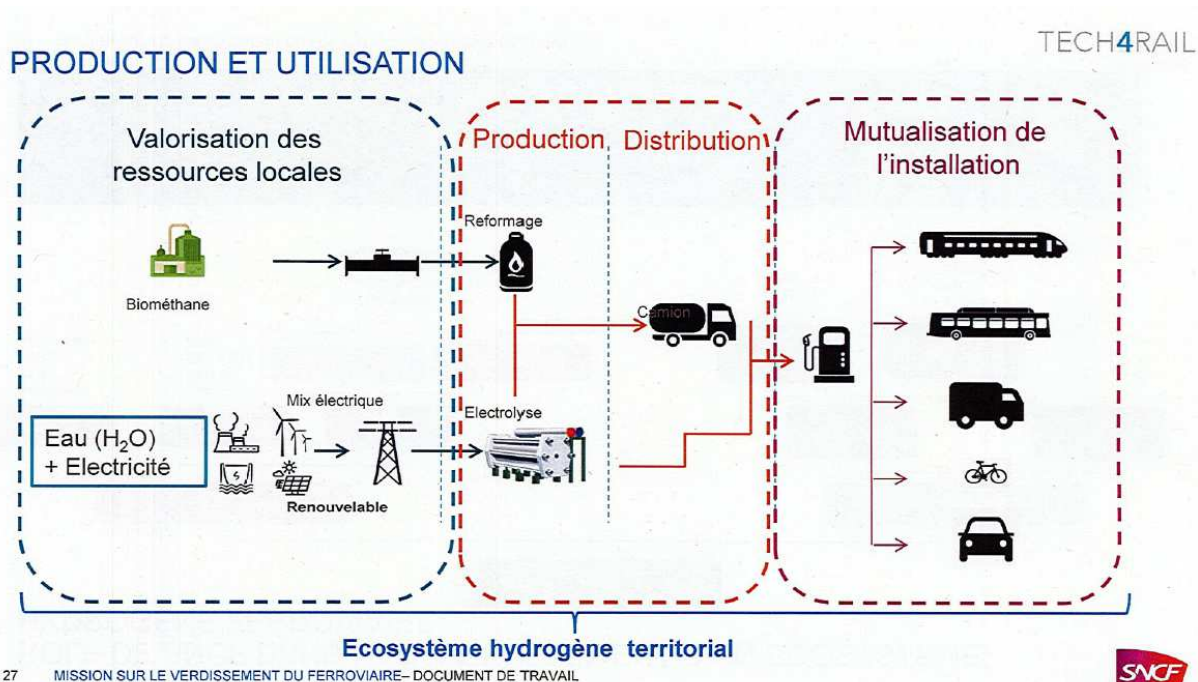


Illustration 4 : construction d'un écosystème territorial pour l'hydrogène selon la SNCF (source : SNCF)

9.4. La structuration de la SNCF pour développer le train à hydrogène

La SNCF dispose d'un chef de projet Hydrogène rattaché à la direction chargée de l'innovation et de la recherche au sein de l'EPIC de tête. Au total, une cinquantaine de personnes de SNCF Mobilités et de SNCF Réseau sont mobilisées sur le sujet, couvrant l'ensemble des compétences nécessaires.

²³ Selon le document remis par Air Liquide après son audition, « dès lors que la capacité de la station dépasse 200 kg/jour (seuil au-delà duquel Air Liquide considère que, lorsque la station atteint un taux de charge suffisant à savoir 60-70% - donc qu'il y a suffisamment de véhicules déployés - l'investissement dans les infrastructures pourra être porté par le secteur privé car présentant une rentabilité sur le long terme), que ~50-60 % des coûts proviennent de la production et de l'acheminement de l'hydrogène et 40-50% correspondent aux coûts d'installation, d'exploitation, et d'entretien de la station ».

10. Les enjeux spécifiques du verdissement du fret ferroviaire

Même si dans le cadre des auditions et du présent rapport, les discussions se sont essentiellement concentrées sur le matériel de transport de personnes, les enjeux du verdissement du fret ferroviaire sont loin d'être négligeables. Cependant, les solutions potentielles pour ce verdissement doivent être examinées avec prudence du fait de la fragile situation du fret ferroviaire en France. Pour mémoire, le fret SNCF s'élevait à 55 milliards de tonnes-kilomètres en 2000 pour seulement 33 en 2016. En valeur relative, la part du fret ferroviaire par rapport aux autres modes de transport dans le transport intérieur de marchandise était de 16% en 2001. Elle n'est plus que de moins de 10% en 2016.

10.1. Une traction fret principalement électrique mais un fret diesel comparable voire supérieur aux TER diesel

Pour la SNCF, le transport de fret s'effectue à plus de 80% grâce à la traction électrique aussi bien en trains-kilomètres qu'en Tonnes-Kilomètres Brutes Remorquées (TKBR). Comme pour le transport des voyageurs, le mode ferroviaire est vertueux pour le fret grâce au mix énergétique français qui est très décarboné car l'électricité est principalement d'origine nucléaire.

Le parc et les parcours fret de FRET SNCF au 31.12.2016

	Locos électriques		Locos diesel		locotracteurs		total
		%		%		%	
Nombre	296	39,6	286	38,3	165	22,1	747
Millions de trains-km	35,4	83,3	7,11	16,7			42,51
Milliards TKBR	40,44	89,6	4,67	10,4			45,11

Source : Mémento statistiques SNCF Mobilités 2016

Cependant, la comparaison entre les circulations TER diesel et fret diesel permet de montrer que les enjeux du verdissement du fret diesel sont comparables à ceux des TER. En effet, si le fret ne représente que 14% des TER-km diesel, il compte à peu près autant (89%) en TKBR du fait des tonnages transportés.

Ces chiffres ne concernent que la SNCF. Or les opérateurs de fret ferroviaire non-SNCF ont une part de marché d'environ 30%, soit environ 20 millions de trains-kilomètres qui s'effectuent principalement par traction diesel. Si on estime cette part de la traction diesel pour ces opérateurs non SNCF à 75% et si on admet qu'un train de fret consomme au moins 3 fois plus qu'un TER, alors les 22 millions de trains-kilomètres fret en valent au moins 60 à 70 en équivalent TER de consommation, soit plus que les TER thermiques (49 M de kms). Les enjeux du verdissement du fret ferroviaire sont donc comparables voire supérieurs à ceux des TER...

Comparaison des parcours TER diesel et fret diesel de la SNCF au 31.12.2016

	TER	Fret
Millions de trains-km	49,27	7,11
Milliards TKBR	5,27	4,67

Source : Mémento statistiques SNCF Mobilités 2016

10.2. Des tractions fret qui s'effectuent majoritairement sur le réseau électrifié

Selon les données remises par SNCF Réseau pour la mission, 80 % des trains-kilomètres des trains Diesel pour le fret se font sur le réseau électrifié (circulations ferroviaires du 11 octobre 2017 pour l'ensemble des circulations de fret celles de la SNCF comme celles des nouveaux opérateurs).

Circulations ferroviaires du 11 octobre 2017

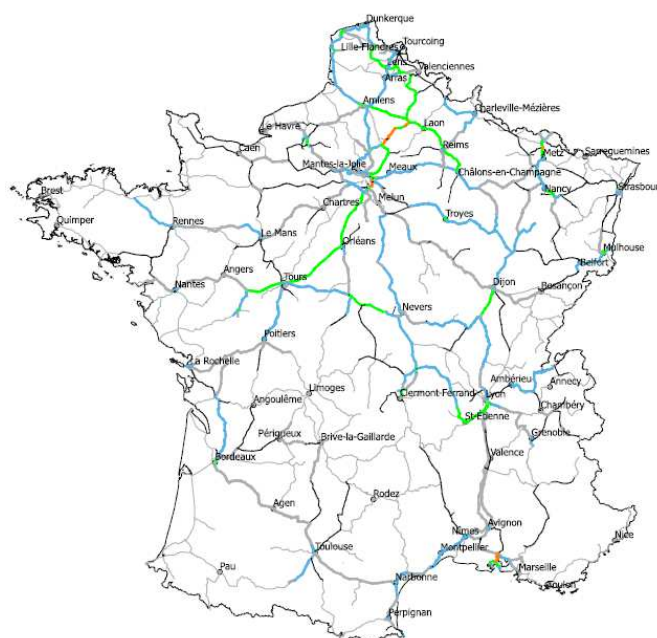
Type	Trains-km	Réseau	
		Electrifié %	Non électrifié %
Fret	66006	80	20
Transilien	6282	46	54
TER	245697	48	52
Voyage	19257	29	71
TOTAL	337242	53	47

La carte permet par exemple de constater l'importance des circulations diesel fret sur l'axe Tours-Orléans-Paris qui est électrifié.

Circulations Fret thermique (Mercredi 11 octobre 2017)

Nombre de trains

- 1 - 2
- 2 - 5
- 5 - 10
- 10 - 20
- 20 - 40



10.3. Le développement des locomotives fret bi-mode comme première réponse

L'utilisation de locomotives hybrides à batteries ou a fortiori de locomotives fonctionnant à l'hydrogène ne peut sans doute pas encore être à l'ordre du jour pour le fret ferroviaire. En effet, outre les surcoûts qui seraient liés à l'utilisation éventuelle de nouveaux matériels, le fret requiert de surcroît des besoins spécifiques notamment en matière de puissance. Ce qui est technologiquement possible pour les rames voyageurs ne l'est encore sans doute pas pour les trains de fret.

Par contre, une nouvelle génération de locomotives bi-mode arrive sur le marché près de quinze ans après l'apparition des premiers engins bi-mode (électrique et Diesel) sous forme de rames TER en France. Elles offrent les mêmes avantages que les rames TER bi-mode : profiter de la traction électrique lorsque cela est possible et passer en traction diesel lorsque la ligne n'est pas électrifiée. Or pour le fret, cette partie non-électrifiée peut parfois se limiter aux derniers kilomètres notamment sur l'installation terminale embranchée qui permet d'accéder au chargeur. Plus le prix des carburants

diesel ferroviaires seront élevés, plus les opérateurs de fret auront intérêt à recourir à ces nouveaux engins qui sont aussi plus faciles à entretenir que des engins purement diesel. C'est sans doute dans cette perspective que VFLI a signé en juin 2018 l'acquisition d'une première locomotive bi-mode (cf. encart ci-dessous).

Il serait donc pertinent de favoriser l'utilisation de ces locomotives bi-mode par les opérateurs de fret.

VFLI fait figure de précurseur et acquiert la toute première locomotive bi-mode du marché : l'EURODUAL

Actu Transport logistique. 5 juin 2018

Séduite par ses innovations technologiques, VFLI vient de signer l'acquisition de la toute nouvelle locomotive EURODUAL. Fabriquée dans l'usine espagnole du constructeur Stadler, l'EURODUAL bénéficie d'une traction bi-mode, électrique et thermique, qui s'adapte ainsi parfaitement au réseau ferré national.

L'unique exemplaire est actuellement en cours d'essai en France et en Belgique et sera réceptionné par VFLI dès décembre 2018.

VFLI a privilégié ce modèle pour son extraordinaire puissance et ses atouts environnementaux indéniables qui s'alignent parfaitement avec la stratégie de l'entreprise qui défend un mode de transport plus propre et plus responsable.

*De type CC, "cette locomotive prototype sera capable à la fois de remorquer des trains de fret sous caténaires alimentées en 1 500 ou 25 000 V et sur lignes non électrifiées. Elle sera pour cela équipée d'un moteur Diesel Caterpillar C175 16 cylindres avec système SCR (injection d'urée et filtre à particules) développant une puissance de 2 800 kW (3 800 ch environ – Ndlr) et répondant à la norme de pollution la plus exigeante « Etape IIIB » et d'une motorisation électrique lui conférant une puissance de 6 000 kW, y compris sous ligne 1 500 V", explique **Alain Ribat, directeur général de VFLI**. Elle éliminera ainsi les longs parcours Diesel effectués sous caténaires faute d'installations terminales électrifiées.*

*L'entrée en service de cette première locomotive bimode pourrait progressivement débloquer l'utilisation de ce type d'engin réputé cher en France. **Le prix d'une locomotive neuve est de l'ordre de 5,5 millions d'euros**. Nul doute que les contrats en cours de discussion, notamment auprès d'opérateurs allemands, devraient en abaisser le coût d'acquisition. Ainsi devrait être éliminé progressivement le délicat problème de la desserte du dernier kilomètre (last mile).*

Source : <https://www.actu-transport-logistique.fr/ferroviaire/premiere-francaise-vfli-sequipe-dune-locomotive-hybride-502541.php>

10.4. Une opportunité pour une locomotive fret à hydrogène : les OFP portuaires

Depuis la réforme de 2008, les grands ports maritimes sont gestionnaires de leur réseau ferroviaire. En outre des opérateurs ferroviaires de proximité interviennent dans ces ports. Des industries de raffinage, pétrochimiques, chimiques mais aussi sidérurgiques sont localisées dans les zones industrialo-portuaires de ces grands ports maritimes. Elles produisent de l'hydrogène gris qui peut être produit en excès.

Il existe donc une réelle opportunité pour l'expérimentation d'une locomotive fret à hydrogène dans ces grands ports maritimes en se basant sur le principe de l'économie circulaire. Les ports pourraient constituer un terrain d'expérimentation d'une telle locomotive dont l'utilisation pourrait être ultérieurement élargie en fonction des résultats obtenus et en utilisant de l'hydrogène vert. La France pourrait être ainsi précurseur dans le domaine.

11. Coûts actuels et futurs (achat et maintenance) des piles à combustible

Une pile à combustible (PAC) est une pile dans laquelle la génération d'une tension électrique se fait grâce à l'oxydation sur une électrode d'un combustible réducteur (par exemple l'hydrogène), couplée à la réduction sur l'autre électrode d'un oxydant, tel que l'oxygène de l'air. Parmi les différentes technologies de piles à combustibles, les piles à membrane à échange de protons, utilisant comme membrane la membrane Nafion de DuPont, sont aujourd'hui les plus répandues et les plus stables industriellement parlant.

Une pile à combustible à membrane échangeuse de protons comporte :

- deux plaques bipolaires, une pour distribuer l'hydrogène, et une autre pour distribuer l'oxygène et évacuer l'eau,
- deux électrodes, une anode et une cathode pour faire circuler le courant électrique (électrons),
- une membrane échangeuse de protons faisant fonction d'électrolyte (elle bloque le passage des électrons et laisse passer les ions H^+),
- des catalyseurs (alliages à base de platine) qui accélèrent les réactions entre les gaz.

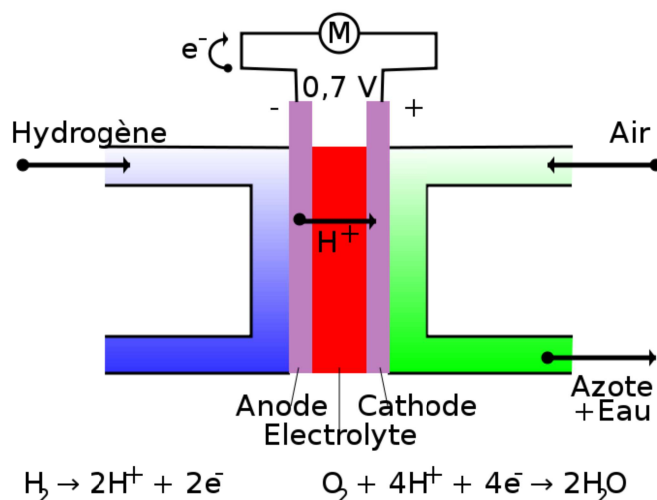


Illustration 1 : schéma de principe d'une pile à combustible

L'hydrogène (provenant d'une électrolyse ou d'un reformage d'hydrocarbures) entre par la plaque bipolaire à gauche sur la figure. Arrivé à l'anode, le dihydrogène (H_2) se dissocie (oxydation) en ions H^+ et en électrons selon : $2H_2 = 4H^+ + 4e^-$. Les ions traversent alors la membrane. Mais les électrons, bloqués, sont contraints d'emprunter un circuit extérieur, ce qui va engendrer un courant électrique. À la cathode, les ions d'hydrogène, les électrons et du dioxygène (pur ou provenant de l'air) se rencontrent pour former de l'eau selon la réaction : $4H^+ + 4e^- + O_2 = 2H_2O$. L'eau et le dioxygène

passent par la plaque bipolaire de droite. Cette réaction va produire aussi de la chaleur pouvant être récupérée.

Les rendements actuels varient selon les sources de 30 % à 50 %, et les coûts de 250 €/kWe à 3 200 \$/kWe³⁰. Faute de données publiques actualisées (les études les plus récentes datant de 2015²⁴) :

- Le scénario optimiste prend comme base la Mirail (66 k€) pour une PAC de 114 kW, en comparaisons d'une PRIUS hybride (30 k€), le surcoût du système pile (y compris stockage nécessaire au fonctionnement de la PAC) peut être estimé à 310 € / Kwe, hors coûts de développement.
- Le scénario pessimiste prend comme base une étude de 2010 sur la mise en place d'une solution ferroviaire en Ontario (*International Journal of Hydrogen Energy, 2010, Rail transportation by hydrogen vs. Electrification, Case study for Ontario*) dont le scénario médian du coût du système PAC donne 1 500 € / kWe.

Sur cette base, le tableau ci-après résume les surcoûts relatifs des PAC pour différents matériels

scénario bas	issance de motorisation (par cais)		surcoût système PAC		prix de base	surcoût relatif	
Regiolis	1200	1800	372 000,00 €	558 000,00 €	8 333 333,33 €	4,46 %	6,70 %
I-lint	315	390	97 650,00 €	120 900,00 €	3 269 230,77 €	2,99 %	3,70 %
Citadis	720		223 200,00 €		3 375 000,00 €	6,61 %	
Toyota Mirai	117		36 270,00 €		30 000,00 €	120,90 %	

scénario haut	issance de motorisation (par cais)		surcoût système PAC		prix de base	surcoût relatif	
Regiolis	1200	1800	1 800 000,00 €	2 700 000,00 €	8 333 333,33 €	21,60 %	32,40 %
I-lint	315	390	472 500,00 €	585 000,00 €	3 269 230,77 €	14,45 %	17,89 %
Citadis	720		1 080 000,00 €		3 375 000,00 €	32,00 %	
Toyota Mirai	117		36 270,00 €		30 000,00 €	120,90 %	

Illustration 2 : surcoûts relatifs des PAC (source : mission de B. Simian)

En première analyse, le surcoût d'un matériel ferroviaire fonctionnant à l'hydrogène strictement lié au surcoût d'investissement sera essentiellement lié à l'amortissement des coûts de développement sur une série suffisamment longue. Par rapport aux véhicules particuliers pour lequel l'absorption d'un surcoût d'investissement aujourd'hui quasiment égal au coût d'acquisition du véhicule base, deux facteurs permettent de baisser très massivement le surcoût relatif dans le domaine du ferroviaire, à savoir un prix matériel de base déjà très élevé.

Le surcoût lié au surinvestissement dans un système hydrogène rapporté au kilomètre passager est, d'autre part, favorable à l'hydrogène dans ce cas compte tenu de l'usage intensif du matériel, d'une part, et du nombre de passagers transportés par les solutions ferroviaires (dans un cas idéal, bien entendu), d'autre part.

En revanche, la durée de vie et les coûts de maintenance des systèmes de piles à combustible sont critiques compte tenu de l'enjeu de l'utilisation maximale du matériel. Dans un calcul rapportant le surcoût au kilomètre-passager par rapport à une solution émettrice de gaz à effet de serre, l'analyse de l'opportunité d'avoir un transport de masse de type ferroviaire par rapport aux enjeux de mobilité du territoire concerné doit être positive.

²⁴ étude de France Stratégie

En termes de coût de maintenance, de nombreuses incertitudes demeurent aujourd'hui. Un des facteurs dimensionnant de la pile à combustible pour estimer le surcoût *in fine* du système est fonction de l'usage et la durée de vie de la pile. Pour les systèmes développés pour la mobilité routière, la durée de vie des systèmes hydrogène était plutôt de l'ordre de quatre à cinq mille heures. En revanche, pour des systèmes ferroviaires, l'exigence de fonctionnement doit être plus de l'ordre de 20 000 heures (ce qui est comparable aux systèmes de stockage stationnaire de l'énergie), voire plus pour des matériels appelés à rouler 200 000 km/an (ce qui est l'hypothèse de base des études allemandes sur l'opportunité de lancer des expérimentations de train à hydrogène), soit près de 45 000 heures de fonctionnement pour un matériel d'une durée de vie de vingt ans.

Aujourd'hui, les recherches dans le domaine de la fiabilité des piles à combustibles ne permettent pas d'affirmer que de telles durées de fonctionnement sont possibles. Les meilleurs fabricants de piles à combustibles ne garantissent que de 20 000 à 30 000 heures de fonctionnement.

12. Coûts de production et de stockage de l'hydrogène

En regard d'un prix du gazole professionnel (hors taxe intérieure) de 0,8 €/l, le litre de gazole contenant 10,55 kWh, la parité entre le gazole et l'hydrogène (supposé non taxé) est atteinte si le prix livré (coût de production s'ajoutant aux coûts de la logistique et du stockage) est de 1,89 €/kg en énergie pure.

En intégrant une taxe CO₂ de 86,2 €/tonne, la parité H₂ est atteinte avec un prix au kilogramme de 2,03 €.

Enfin, en tenant compte du rendement des moteurs thermique et du moteur électrique, ainsi que des consommations des auxiliaires pour l'hydrogène (production notamment), la parité au gazole de l'hydrogène (60 %) se situe plus vraisemblablement entre 3 et 4,5 €/kg.

12.1. Coûts de production

L'hydrogène est une molécule n'existant pas à l'état naturel. Il est donc nécessaire de la produire à partir de différentes sources, chaînes carbonées (C_xH_y) ou eau (H₂O). Les trois principales sources sont aujourd'hui les sources fossiles (vaporeformage à partir de gaz naturel ou oxydation partielle du charbon/pétrole), la biomasse par transformation thermo-chimique et enfin l'électrolyse de l'eau (que ce soit une électrolyse simple ou des électrolyses plus compliquées comme la photo-électrolyse). La très grande majorité de l'hydrogène industriel actuel est produit à partir de ressources fossiles :

- le plus utilisé est le vaporeformage du gaz naturel, qui émet environ 10 kg de CO₂ par kg d'H₂ produit (41 % de la production nationale),
- puis vient l'oxydation partielle des hydrocarbures, émettant 13 kg de CO₂ par kg d'H₂ produit (40 % de la production nationale)
- enfin la gazéification du charbon peut générer près de 20 kg de CO₂ par kg d'H₂ produit (14 % de la production nationale).

Les 5 % restant sont produits par électrolyse, principalement dans l'industrie du chlore où l'hydrogène est un coproduit aujourd'hui majoritairement valorisé sur le site pour la production de chaleur et d'électricité (combustion/turbinage).

En regard de l'objectif de décarbonation de la production d'hydrogène, l'utilisation des chaînes carbonées, sauf si elles sont issues de biomasse, ne sont pas des solutions répondant à la demande à terme de *neutralité carbone*. Si la technologie d'oxydation partielle à partir d'hydrocarbures est exothermique (ne nécessitant pas d'énergie d'appoint), la technologie de reformage à partir de gaz naturel ou d'électrolyse nécessite un apport important d'énergie : 265 kJ par mole pour le vaporeformage du méthane à 280 kJ par mole pour l'électrolyse de l'eau en milieu alcalin qui est la technologie la plus répandue aujourd'hui.

Pour ce qui concerne l'électrolyse, les coûts de production de la molécule d'hydrogène peuvent être en première approche considérée comme dépendant de deux paramètres : le coût d'amortissement annuel de l'installation rapporté à la puissance unitaire de production, et le coût de l'énergie nécessaire pour alimenter le système. Deux catégories d'électrolyse sont aujourd'hui à maturité : l'électrolyse alcaline de l'eau utilisant une anode et une cathode dans un bassin, et l'électrolyse par membrane à

échange de protons²⁵ (très similaire au principe de la pile à combustible, mais en fonctionnement inverse). Les deux technologies présentent des rendements de l'ordre de 60 % ou 70 % ce qui les rend, par rapport à ces deux paramètres, comparables. Aujourd'hui, la principale différence entre les deux technologies, c'est que dans le domaine de l'électrolyse alcaline de l'eau, la durée de vie de l'électrolyseur peut aller jusqu'à 60 000 heures, voire 100 000 heures. Pour ce qui concerne la technologie par membrane à échange de protons, les durées de vie sont bien inférieures. Une baisse de rendement est souvent observée au fur et à mesure de l'usure de la membrane (baisse pouvant atteindre de 5 % à 10 % de rendement global).

S'agissant du coût au kilogramme, le tableau ci-après résume, en fonction du coût d'investissement et du nombre d'heures d'utilisation, le coût théorique de production de la molécule d'hydrogène. Il est pris comme hypothèse un prix de l'énergie égale à 50 € par MWh, un amortissement du matériel sur 12 ans et un amortissement global sur 12 ans, 7 % de frais annuels de maintenance et un rendement global de 70 %.

nombre d'heure De fonctionnement / an	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000	7 000
Prix au kW de l'investissement						
400,00 €	4,17 €	3,72 €	3,50 €	3,36 €	3,27 €	3,21 €
700,00 €	5,18 €	4,39 €	4,00 €	3,76 €	3,61 €	3,50 €
1 000,00 €	6,18 €	5,06 €	4,50 €	4,17 €	3,94 €	3,78 €
1 300,00 €	7,19 €	5,73 €	5,01 €	4,57 €	4,28 €	4,07 €
1 600,00 €	8,20 €	6,41 €	5,51 €	4,97 €	4,62 €	4,36 €
1 900,00 €	9,21 €	7,08 €	6,01 €	5,38 €	4,95 €	4,65 €
2 200,00 €	10,21 €	7,75 €	6,52 €	5,78 €	5,29 €	4,94 €

Illustration 1 : plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique
(source : rapport d'étude Ineris N°DRA-15-149420-06399C, « A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis », *calculs de la mission*)

La possibilité de recourir à des énergies renouvelables dans les créneaux où elles sont abondantes, et donc à coût marginal d'électricité très faible, reste très limitée au regard des durées de fonctionnement. Le recours aux énergies renouvelables permet certes d'améliorer le rendement global et le coût final de la molécule d'hydrogène. Mais il ne jouerait, par rapport à une durée de fonctionnement optimisée pour amortir le coût d'investissement, que de façon marginale.

Selon EDF, dans le cadre de son audition lors de la mission, un électrolyseur du mode alcalin de 50 MW, alimenté en électricité du mix français²⁶, fonctionnant au moins 5 000 heures par an, peut produire de l'hydrogène à 5 euros par kilogramme à la pression de 30 bars (à comparer au prix de 1,6 euros par kilogramme de l'hydrogène *gris* à la sortie de l'unité de vaporeformage). S'y ajoute le coût de la compression, du transport et de la distribution, ce qui conduit à un prix final de 10 euros par kilogramme. Un tel électrolyseur pourrait approvisionner une cinquantaine de TER.

Dans le land allemand du Schleswig-Holstein, EDF étudie un projet de 52 trains à hydrogène *vert*. L'électricité de l'électrolyseur proviendrait entièrement de sources renouvelables (éolien et solaire).

²⁵ dite PEM (*Proton Exchange Membrane*)

²⁶ L'électricité du mix français est décarbonée à un niveau variant de 90 % à 93 %.

12.2. Coûts logistiques et coûts de stockage

Une fois la molécule d'hydrogène produite, deux hypothèses sont structurantes pour déterminer le coût de la molécule livrée. Dans un modèle centralisé, il faut rajouter des coûts de logistique, qui dépendent de la distance au centre de production. Dans un modèle décentralisé, le prix de la molécule livrée dépend du coût de stockage.

Dans le second modèle, les coûts de stockage par rapport à une taille de station déterminée dépendent principalement du taux moyen d'utilisation (nombre de jours par an où la station est utilisée à pleine capacité).

De plus, aux coûts d'amortissement de la capacité de stockage, il faut ajouter les coûts de compression. Estimés dans une approche prudente à 2 kWh par kilogramme (en se plaçant dans l'hypothèse d'une production par électrolyse alcaline, et non pas par électrolyse PEM qui permet d'obtenir de l'hydrogène à 30 bars et donc d'économiser les premiers paliers de compression), ces coûts sont fixes aux kg, de l'ordre de 0,1 € / kg. Dans le cas d'un électrolyseur alcalin, la consommation est estimée à 3 kWh / kg, soit à 55 € / MW.h un surcoût au kilo par rapport au tableau ci-après de 0,055 € / kg.

Le tableau ci-dessous donne les coûts tels que reconstitués dans le cadre de la mission, sur la base d'un compresseur de 750 Nm³/h (23 kg/heure), d'un système de stockage de 1 000 kg (soit 4 pleins pour un train consommant 0,25 kg H₂/km) en faisant varier le coût du stockage par kilogramme et le taux de remplissage (débit journalier de la station divisé par la capacité de la station)²⁷ :

taux d'usage quotidien	40 %	100 %	160 %	200 %
coût stockage / kg				
900,00 €	1,47 €	0,41 €	0,26 €	0,22 €
1 500,00 €	2,16 €	0,52 €	0,30 €	0,24 €
2 100,00 €	2,84 €	0,63 €	0,34 €	0,27 €
2 700,00 €	3,53 €	0,74 €	0,39 €	0,30 €

Illustration 2 : Illustration 2 : plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition écologique, prix du stockage (y compris compression) de l'hydrogène (source : mission à partir des données d'Engie, d'Hydrogène de France et de l'Afhyac)

Il apparaît que, parmi les facteurs dimensionnants, la taille du stockage est à rapporter au profil de remplissage. Dans un profil de remplissage relativement régulier, le stockage peut être dimensionné au plus juste (quelques heures de remplissage). Dans le cas d'un profil où tous les trains sont approvisionnés à la même heure, le stockage intermédiaire par rapport à la production doit être dimensionné sur 24 ou sur 48 heures. Ainsi, par rapport à un taux moyen d'utilisation annuelle, pouvoir remplir et vider deux fois par jour la capacité de stockage aboutit à un taux de 200 %. C'est, au regard du coût de stockage, l'optimisation principale du système.

Le coût d'investissement entre les deux hypothèses varie d'un facteur 1 à 2 (le coût du compresseur étant *ne varietur*). Par rapport à un scénario idéal présentant un taux de charge moyen de l'ordre de 80 % pour une taille de station de 1 000 kg (ce qui permettrait d'atteindre à peu près trois euros par kilogramme d'hydrogène stocké), un remplissage non optimisé des trains conduit à des coûts de stockage allant plutôt vers le niveau de trois euros par kilogramme. D'autres coûts dépendent non pas tant de la capacité installée mais du débit, la multiplication par deux de l'investissement ne conduisant pas à une multiplication par deux du coût du stockage. Selon les données

²⁷ Hypothèses : matériel de compression sur 20 ans, 100 000 heures de fonctionnement du compresseur, taux de maintenance à 7 % du CAPEX

avancées en audition par EDF, on comprend que l'expérimentation en Allemagne n'a pas permis une optimisation de ce coût.

Le juste dimensionnement de l'installation de stockage, et le travail sur l'optimisation du profit de recharge des trains et des autres véhicules en aval, constituent un élément critique du coût global du système. Si la baisse des coûts des installations de stockage est aujourd'hui envisageable à court terme, ce poste de coûts reste pour l'économie globale de l'hydrogène un élément bloquant pour atteindre une compétitivité intrinsèque. Il y a, dans ce poste de coût, un élément critique à travailler avec l'écosystème territorial pour aboutir un optimum entre la quantité délivrée par jour et la capacité de stockage global. À cet égard, le système ferroviaire, par le caractère prévisible et relativement régulier de ses besoins, présente une opportunité intéressante pour disposer d'une capacité de stockage optimisé en regard des besoins journaliers.

À court terme, l'atteinte, par des moyens décarbonés de production de l'hydrogène, d'un prix compatible avec une compétitivité Diesel n'est pas envisageable compte tenu des coûts de production et de compression, et de leurs contraintes en termes d'heures de fonctionnement annuel, d'une part, auxquels se rajoutent les coûts de stockage qui dépendent essentiellement du dimensionnement global de ce dernier, d'autre part.

13. Sources de financement pour les projets de train à hydrogène en France

D'un point de vue économique, le financement de l'électrification d'une ligne revient à faire porter sur une infrastructure et sur un investissement initial une grande partie des moyens financiers, permettant ensuite au matériel ferroviaire (électrique) d'être très économe en termes de coûts d'exploitation pour ce qui concerne la fourniture en énergie. Un tel modèle présente, outre les coûts d'électrification qui sont aujourd'hui très élevés et très dépendants de la configuration de la ligne (et notamment du nombre d'ouvrages d'art situés le long du sillon), deux principaux défauts. Le premier est la nécessité d'avoir un trafic suffisamment soutenu pour justifier un amortissement au kilomètre-voyageur suffisant en regard du coût d'investissement. Le second est de figer sur la durée d'amortissement des investissements en électrification ce trafic minimal, ce qui n'offre pas beaucoup de souplesse en fonction des évolutions démographiques ou économiques, voire d'opportunités de développement de nouveaux territoires. Enfin, il convient de noter que le financement des opérations d'électrification pèse essentiellement sur le budget public au sens large du terme (sur les opérations des contrats de plan État-Région, la part des financeurs publics sous forme de subventions étant de l'ordre de 83 % du coût total des opérations. Au contraire, le financement du matériel ferroviaire et, en quote-part, plus lié à la tarification de la prestation de transport, même si le transport ferroviaire reste, au sens large, subventionné à hauteur de 38 % au global, mais 73 % pour les services régionaux de transport conventionnés.

13.1. Les financements dédiés au *verdissement* du transport ferroviaire

13.1.1. Fonds des contrats de plan État – Région (subventions)

Dans le cadre des contrats de plan État-Région, un certain nombre d'opérations ont été inscrites touchant au *verdissement* du ferroviaire, avec souvent une entrée sur l'électrification de nouvelles voies ou le renouvellement de voies électrifiées anciennes (cf. tableau ci-dessous, portant sur un total d'un milliard d'euros environ). De nombreuses opérations, sous le seuil d'examen, n'ont pas été analysées par le Conseil d'orientation des infrastructures (COI).

Il existe donc, par rapport à ces opérations d'électrification ou de renouvellement d'électrification, un enjeu important de recherche de solutions alternatives quand, ce qui est souvent le cas, la rentabilité économique ou socio-économique est insuffisante.

Nouvelles Régions	Projet	Coût Total	Etat	Région	Départements	Union Européenne	Autre Financier Non-Spécifique	Autres Financiers	Snct	Snct Réseau
BOURGOGNE-FRANCHE-COMTE	Electrification de tronçon ferroviaire	2,31 M€	0,77 M€	0,77 M€	-	-	-	-	-	0,77 M€
BOURGOGNE-FRANCHE-COMTE	Electrification de tronçon ferroviaire	36,20 M€	5,43 M€	22,57 M€	-	-	8,20 M€	-	-	-
BOURGOGNE-FRANCHE-COMTE	Electrification, mise au gabarit et interconnexions de lignes TGV et TER	22,20 M€	3,70 M€	3,70 M€	-	-	11,10 M€	-	-	-
BOURGOGNE-FRANCHE-COMTE	Réouverture de ligne	9,90 M€	9,90 M€	-	-	-	-	-	-	-
CENTRE VAL DE LOIRE	Renforcement de l'alimentation électrique	20,00 M€	18,35 M€	-	-	-	-	-	-	9,00 M€
GRAND-EST	Electrification de la ligne	84,54 M€	27,09 M€	27,09 M€	-	-	-	18,00 M€	-	9,26 M€
GRAND-EST	Renforcement de l'alimentation électrique du réseau	20,50 M€	12,30 M€	5,13 M€	-	-	3,08 M€	-	1,00 M€	-
HAUTS-DE FRANCE	Electrification de la ligne	22,50 M€	2,50 M€	20,00 M€	-	-	-	-	-	-
HAUTS-DE FRANCE	Electrification : dégagement du gabarit et travaux préparatoires	46,80 M€	23,40 M€	23,40 M€	-	-	-	-	-	-
HAUTS-DE FRANCE	Electrification : pose des caténaires	153,20 M€	-	153,20 M€	-	-	-	-	-	-
HAUTS-DE FRANCE	Réouverture de ligne Fret	15,00 M€	11,00 M€	2,00 M€	-	-	-	-	-	-
ILE-DE-FRANCE	Paris-Troyes	50,00 M€	22,50 M€	22,50 M€	-	-	5,00 M€	-	-	-
NORMANDIE	Electrification atelier de maintenance de Granville	1,15 M€	1,15 M€	-	-	-	-	-	-	-
NORMANDIE	Electrification voie de service	1,00 M€	0,50 M€	0,50 M€	-	-	-	-	-	-
NOUVELLE AQUITAINE	Modernisation de la signalisation, modernisation de ligne, doublement de voie, contournement ferroviaire	146,30 M€	28,20 M€	73,50 M€	19,35 M€	-	-	-	-	22,00 M€
NOUVELLE AQUITAINE	Electrification de l'étoile de Saintes	182,00 M€	53,00 M€	70,00 M€	59,00 M€	-	-	-	-	-
NOUVELLE AQUITAINE	Renforcement des installations de traction électrique	14,06 M€	2,49 M€	2,49 M€	-	2,08 M€	-	-	-	7,00 M€
NOUVELLE AQUITAINE	Renouvellement caténaires	39,17 M€	5,43 M€	5,43 M€	-	-	-	28,30 M€	-	-
NOUVELLE AQUITAINE	Renouvellement caténaires	14,17 M€	7,08 M€	7,08 M€	-	-	-	-	-	-
NOUVELLE AQUITAINE	Modernisation de ligne et de signalisation	61,00 M€	10,00 M€	24,00 M€	12,20 M€	-	-	-	-	-
PACA	Etudes VAP - Réouverture voyageurs de la ligne Aix - Etang de Berre	8,00 M€	2,00 M€	2,00 M€	-	-	2,00 M€	6,75 M€	6,75 M€	-
PACA	Travaux de réouverture voyageurs de la ligne Aix - Etang de Berre	87,00 M€	0,00 M€	27,84 M€	-	-	50,20 M€	6,50 M€	6,50 M€	-
Total		1 036,99 M€	246,79 M€	493,20 M€	90,55 M€	2,08 M€	79,58 M€	59,55 M€	14,25 M€	48,03 M€

Illustration 1 : opérations d'électrification (en tout ou en partie) dans les contrats de plan (source : CPER et ministère de la cohésion des territoires)

Les prochaines négociations entre État et Régions pourraient être l'occasion de rechercher des solutions alternatives moins onéreuses. Ainsi, le remplacement des actions d'électrification des voies par une formule plus ouverte comme « *verdissement du mode de transport ferroviaire, utilisant l'ensemble des technologies disponibles (batteries, hydrogène, électrification partielle, etc.)* » pourrait permettre, en fonction des études conduites en regard de la spécificité des lignes considérées, de financer le déploiement de technologies alternatives au diesel autre que l'électrification des lignes.

13.1.2. Plan Hydrogène du Gouvernement

Annoncé avant l'été, le plan Hydrogène du Gouvernement affiche un budget global de 100 millions d'euros avec notamment une priorité sur l'hydrogène industriel et sur la mobilité. Le transport ferroviaire est évoqué, sans pour autant faire parti des actions prioritaires du plan. La disponibilité réelle des crédits pour une opération de soutien au déploiement de premier train à hydrogène nécessitera que soient clarifiées les modes d'intervention du plan Hydrogène, notamment pour ceux qui sont inscrits dans le cadre du programme des investissements d'avenir dont le mode d'intervention est majoritairement sous forme d'avances remboursables. La recherche d'un équilibre économique ou de recettes suffisantes engendrées par les opérations en regard du taux de subvention générique du ferroviaire (cf. ci-dessus) conduit à considérer que les moyens de ce plan soient concentrés non pas sur l'infrastructure ou l'acquisition de matériel ferroviaire, mais plutôt sur les projets industriels que si les premiers déploiements permettront de faire naître et qui sont adjacents.

13.1.3. Les financements communautaires

13.1.3.1. FEDER (subventions)

De manière générale, la Commission européenne n'est pas opposée à financer l'achat de matériel ferroviaire de type TER. En revanche, elle a fortement freiné l'inscription des projets ferroviaires dans les programmes opérationnels français.

Compte tenu des règles en termes de dégagement d'office des crédits non engagés ou non payés, l'achat de ce type de matériel pose des questions en matière de calendrier. Entre la commande et la réception du matériel, les délais ne sont pas toujours compatibles avec le calendrier de mise en œuvre des programmes des fonds structurels.

Seul le programme opérationnel du Languedoc a sollicité la *priorité d'investissement 7c* : systèmes de transport respectueux de l'environnement, y compris les systèmes peu bruyants, et à faible émission de carbone, y compris le transport maritime et sur les voies navigables, les ports, les liens multimodaux et les infrastructures aéroportuaires, de façon à promouvoir une mobilité locale et régionale durable. Cependant, le projet Languedoc-Roussillon consiste à « *favoriser l'intermodalité portuaire - L'aménagement de zones portuaires de transfert modal (plateformes ferroviaires) pour les marchandises et les passagers et la réalisation d'équipements spécifiques au développement du transport fluvial à partir de ces ports d'intérêt régional* ». La possibilité de mobiliser les crédits disponibles dans le cadre d'une expérimentation ne pourrait se faire que si le matériel ferroviaire retenu sont des locomotives des sites multimodaux.

Enfin, dix-neuf programmes opérationnels ont inscrit la *priorité d'Investissement 4e* : stratégies de développement à faible émission de carbone pour tous les types de territoires, en particulier les zones urbaines, y compris la promotion d'une mobilité urbaine multimodale durable et de mesures d'adaptation au changement climatique destinées à l'atténuer. Mais ce sont plus des projets de transports urbains en site propre, et moins des projets ferroviaires.

13.1.3.2. Autres financements européens

De nombreux autres financements sont aujourd'hui disponibles dans le cadre européen de l'INEA (*Innovation and Networks Executive Agency*). Cette agence gère notamment le CEF (*Connecting European Facility*) qui soutient le développement de réseaux transeuropéens hautement performants, durables et efficacement interconnectés dans les domaines des transports, de l'énergie et des services numériques.

Outre les subventions (50 % au maximum pour les projets innovants), le CEF offre un soutien financier aux projets grâce à des instruments financiers innovants tels que des garanties et des cautionnements de projets. Ces instruments créent un effet de levier important dans l'utilisation du budget de l'Union européenne, et agissent comme un catalyseur pour attirer des financements supplémentaires du secteur privé et d'autres acteurs du secteur public.

La partie dédiée aux transports est de 22,4 milliards d'euros. Des appels à projets sont organisés régulièrement par l'INEA. La principale condition est d'appartenir à un des réseaux identifié dans le règlement sur les orientations de l'Union pour le développement du réseau transeuropéen de transport n° 1316/2013 et n° 1315/2013.

La carte ci-dessous des réseaux identifiés montre que de nombreuses possibilités existent de pouvoir émerger, pour les territoires européens, à ce dispositif.

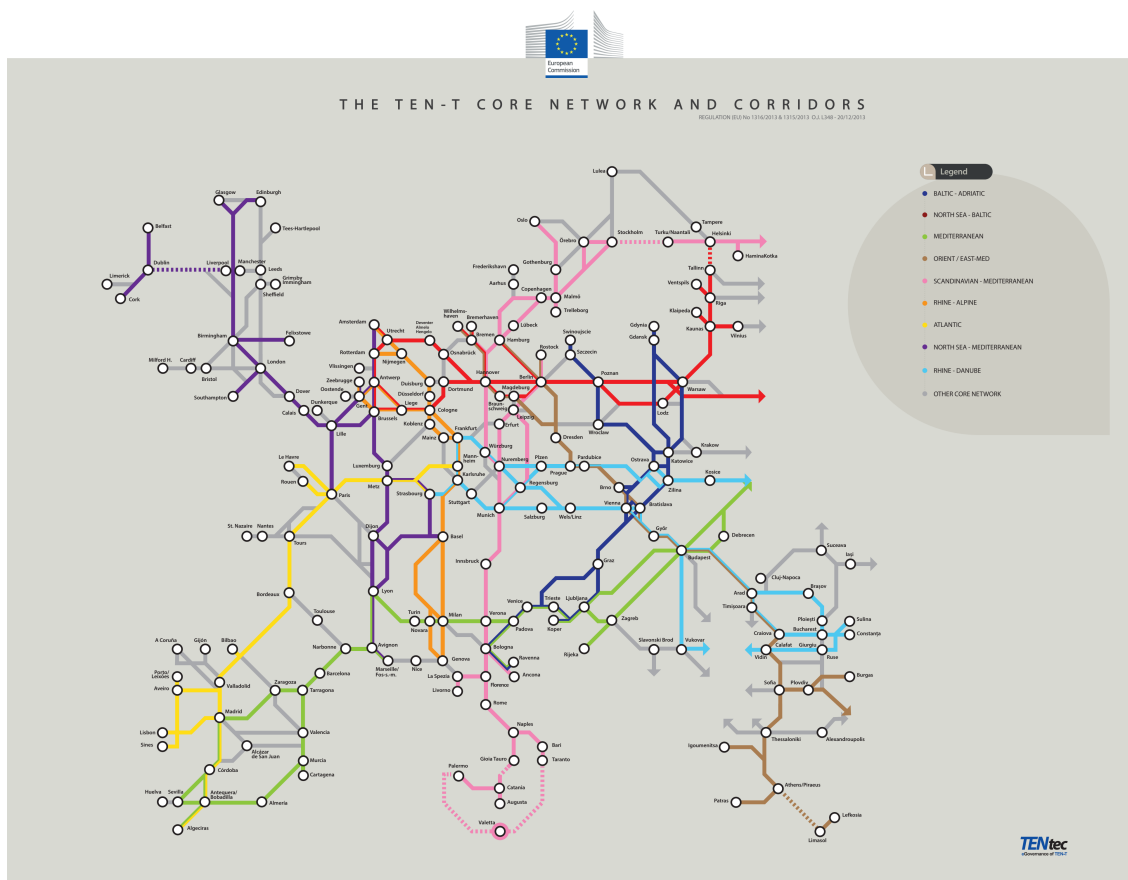


Illustration 3 : carte des réseaux européens (source : UE)

13.1.3.3. Banque européenne d'investissement (BEI) et Caisse des dépôts et consignations (CDC), s'agissant de fonds propres ou de prêts

Les moyens que peuvent mobiliser la BEI et la CDC se font principalement dans le cadre des investissements dits avisés : investissements d'un acteur de marché agissant dans des conditions normales selon la jurisprudence décisionnelle de la Commission européenne. L'intervention de ces deux institutions se place donc dans le cadre d'un modèle économique équilibré : une fois les subventions déduites, le modèle économique doit dégager une rentabilité suffisante par rapport à l'investissement initial pour permettre le remboursement. Ainsi la CDC a-t-elle investi dans la société de taxis Hype. La BEI a soutenu en 2016 l'entreprise RTC (*Rig Transport Company* en Lituanie) pour la modernisation de sa flotte, notamment l'achat de 10 bus à hydrogène et de 10 trolleybus hybrides à hydrogène ; elle a encore accordé en 2017 un prêt au Syndicat mixte des transports Artois-Gohelle pour le financement de 6 nouvelles lignes de bus, dont une fonctionnant à base de bus à hydrogène²⁸.

Les auditions conduites avec la BEI, la CDC et Meridiam ont montré que les acteurs privés du financement des infrastructures

²⁸ cf. https://ec.europa.eu/commission/commissioners/2014-2019/katainen/annoncements/plan-dinvestissement-pour-leurope-la-banque-de-lunion-europeenne-finance-hauteur-de-110-meu-un_en

- ont une réelle appétence pour les actifs et les infrastructures qui participent à la transition énergétique, dans le cadre des mandats fixés en termes de priorité d'investissement ou dans le cadre de leurs interventions classiques permettant de baisser au global l'exposition aux actifs dit « carbonés »,
- cette expression d'intérêt pour l'investissement peut se faire dans des cadres contractuels et juridiques souples, sous des formes allant du prêt aux fonds propres, et avec des temps de retours qui sont calés sur la durée de vie sous-jacente des actifs,
- cette intervention peut se positionner tant en ce qui concerne le matériel ferroviaire que les installations de production, de stockage et de distribution de l'hydrogène.

Pour la BEI, un point d'attention particulier quant au respect des règles de mise en concurrence des différents acteurs industriels a été mis en avant, mais rejoint largement l'enjeu que le matériel choisi soit au mieux des intérêts économiques de la société porteuse des actifs.

Enfin, les divers projets aujourd'hui financés dans le domaine de l'hydrogène tendent à privilégier des modèles économiques capables de tirer des revenus des divers services que peut rendre l'hydrogène (stockage d'électricité intermittente & services réseau, transport, hydrogène industriel principalement), la viabilité d'un modèle économique sur un seul des services que peut rendre cette technologie étant difficilement atteignable (hors contexte spécifique comme les ZNI où le coût de production de l'électricité excède les 200 € / MW.h).

13.2. L'implication des acteurs industriels dans le domaine de la fourniture du matériel ferroviaire, des infrastructures de production et de stockage de l'hydrogène

La possibilité de faire porter les actifs d'une expérimentation à grande échelle de trains à hydrogène par des sociétés de projet a été évoqué avec les principaux acteurs industriels lors des auditions. Elle a reçu un accueil de principe favorable à l'étude d'un tel dispositif.

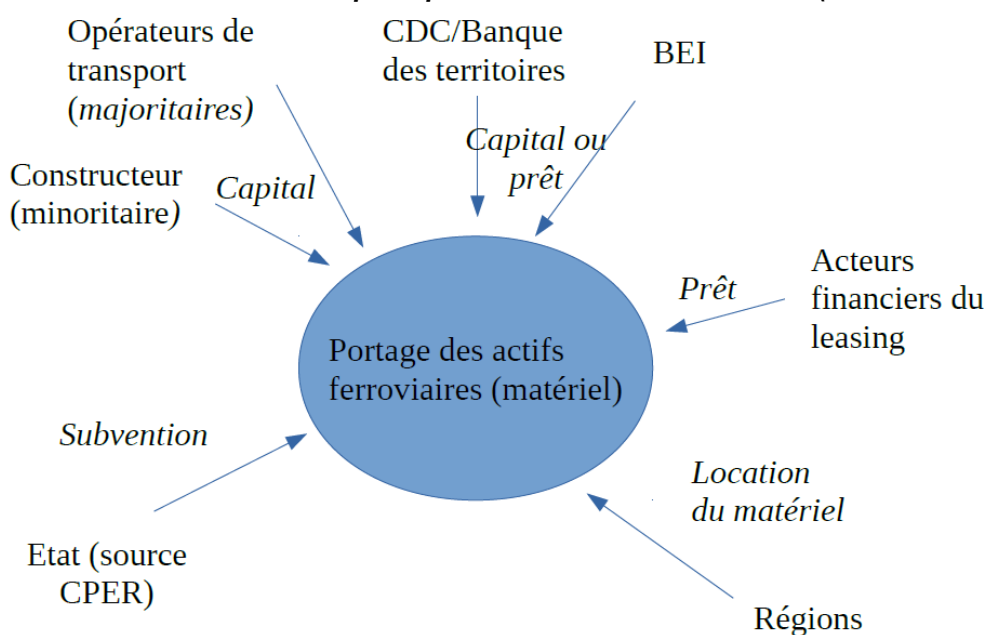
En ce qui concerne le matériel ferroviaire, compte tenu de l'incertitude quant à l'usage réel à long terme des trains à hydrogène, la mise en commun du risque pour les différentes collectivités territoriales impliquées au sein d'une société amenée à porter les actifs peut être un élément permettant au dispositif de monter en puissance de façon progressive. L'idée serait de permettre la création d'une structure de portage du matériel roulant dans lesquelles les actionnaires pressentis pourraient être :

- le fournisseur du matériel roulant, afin d'aligner en intérêt ce dernier avec les utilisateurs (collectivités territoriales et entreprises de transport) sur la fiabilité et la durée de vie du matériel produit,

- les collectivités territoriales ou des entreprises de transport s'engageant dans la technologie de l'hydrogène²⁹,
- des acteurs du financement la transition énergétique au service des territoires (banques des territoires, Caisse des dépôts et consignation), dont le rôle serait plutôt financier en tirant parti de leur expérience dans le domaine du financement d'actifs de long terme,
- enfin, des acteurs à caractère plus financier comme la banque européenne d'investissement dans le cadre du plan Juncker (ou dans le cadre de ses interventions classiques en fonction du modèle économique sous-jacent), ainsi que des acteurs du financement d'actifs dans le domaine des transports (sous forme de leasing ou de prêts, le cas échéant syndiqués).

Pour ce qui concerne les infrastructures de production et de stockage de l'hydrogène, surtout si elles sont utilisées non seulement pour le transport ferroviaire mais aussi pour d'autres applications comme les flottes dédiées (sur le modèle des taxis de Hype), le financement par des acteurs de l'énergie ou intervenant habituellement dans le domaine de l'hydrogène industriel de ces infrastructures est sans doute plus naturel. En revanche, compte tenu des coûts de production et de stockage, le modèle économique devra intégrer de façon prévisible des éléments à caractère subventionnel pouvant renvoyer notamment aux dispositifs du plan hydrogène du Gouvernement.

Illustration 4: schéma de principe du financement du matériel (source : mission)



²⁹ Il convient de noter à cet égard que c'est l'article L. 2121-4 du code des transports qui fixait l'obligation de contracter entre chaque Région et la SNCF au titre de l'exploitation et du financement de des services ferroviaires relevant de la compétence régionale ; cet article a été abrogé pour les conventions qui seront négociées à compter du 3 décembre 2019. Ces conventions sont analysées par la jurisprudence du Conseil d'État comme étant des « *délégations de service public régional des transports ferroviaires* » (CE, 29 septembre 2010, Société Les courriers automobiles picards, n°324531). La possibilité de faire intervenir directement les collectivités territoriales dans une société portant les actifs reste sujette cependant à l'analyse de la légalité d'une telle intervention (notamment si cette intervention se fait sous forme de prises de participation). Une intervention sous forme subventionnelle (subventions pures ou avances remboursables) pourrait être envisagée en fonction de l'usage par chacun des territoires du matériel, par exemple par le biais du tarif de location.

Dans un tel schéma, le risque opérationnel revient en priorité à l'opérateur de transport et au constructeur du matériel. Le risque de sous-utilisation du matériel est, lui, porté non seulement par les actionnaires (opérateurs de transports et constructeurs), mais aussi par les acteurs financiers pressentis. Les collectivités territoriales et l'État, intervenant sous une forme subventionnel (soit en direct soit par le biais des tarifs de location du matériel), sont amenés à compenser, dans le cadre d'un plan d'affaires raisonnables, la surcharge d'exploitation. Cette compensation ne peut excéder la juste rémunération des capitaux de la société de portage actif dont la détermination, en l'absence de données historiques sur du matériel nouveau, sera un élément de négociation entre les acteurs. Un schéma de même type peut être envisagé pour le portage des actifs de production, de stockage et de distribution d'hydrogène. Dans ce cadre, les acteurs nécessaires seraient en particulier :

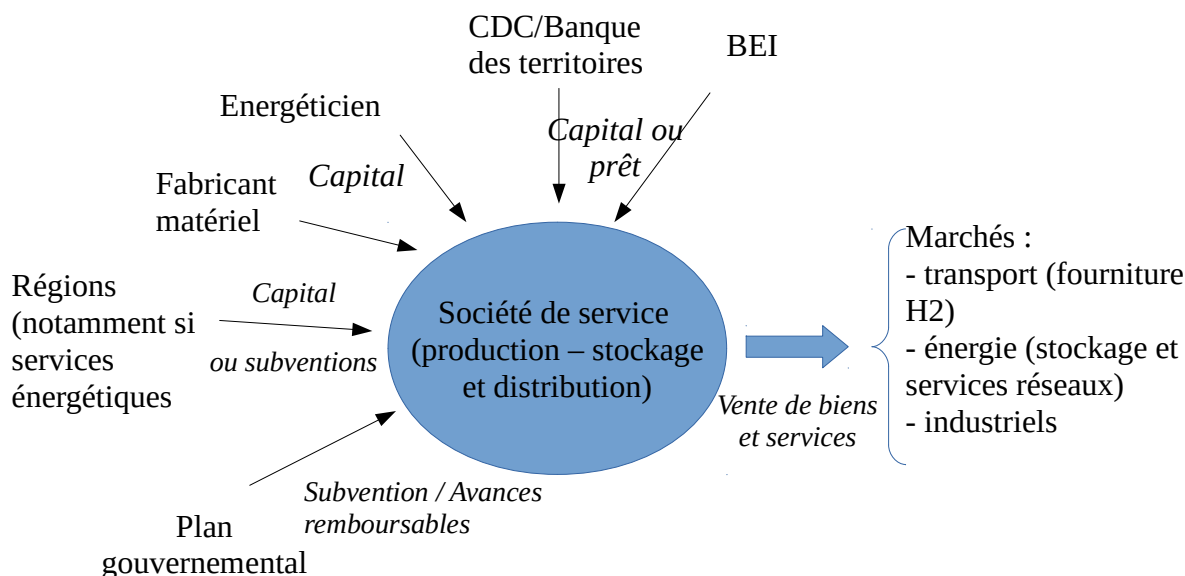


Illustration 5: schéma de principe du financement des stations (source : mission)

Dans ce cadre, le soutien au titre du plan gouvernemental nécessiterait que l'hydrogène produit puisse être a minima gris (issu d'électrolyse à partir d'énergie du réseau), fatal et à terme vert (id est issu de sources de production renouvelables). Le recours à l'hydrogène issu de sources carbonées comme le gaz ou le pétrole ne permettrait pas de faire appel aux financements de ce plan.

A ce stade cependant de la mission,

- **en ce qui concerne le portage des actifs du matériel ferroviaire, le recours à une société de projet ne se justifie que si elle permet d'associer des moyens financiers, techniques et humains provenant d'acteurs différents. Elle pose cependant le problème du délai de mise en œuvre (constitution, négociations contractuelles, etc.). Le recours à un avenant des marchés cadre entre la SNCF, pour le compte des Régions, et Alstom rend cette structure dans un premier temps sans pertinence.**
- **En ce qui concerne le portage des actifs de production, de stockage et de distribution / valorisation de l'hydrogène, il est nécessaire de disposer de projets concrets dont les plans d'affaires auront été équilibrés préalablement (notamment par le recours à des subventions d'amorçage du marché ou des subventions classiques de soutien au transport ferroviaire de personnes).**

14. Les trains et trams avec pile à combustible hors de France

À Qingdao en Chine, des expérimentations ont été conduites avec un tram dont le système de propulsion et de chauffage est alimenté par des piles à combustibles transformant l'hydrogène en électricité. Lancé en 2015, le tram a une autonomie de 100 km. Il circule à une vitesse de pointe de 70 km/h.

Dans le domaine des projets expérimentaux, le projet japonais du *Railway Technical Research Institute* (RTRI) a démarré en 2001. Il a abouti à un prototype nommé *NE Train KuMoYa E995-1 fuel-cell/battery hybrid railcar* (cf. illustration ci-dessous) testé à partir de 2006. Il était équipé d'une pile PEM Nuvera de 120 kWe. L'hydrogène était stocké à 350 bars.



Illustration : locomotive à hydrogène de RTRI au Japon (source : RTRI)

L'expérimentation d'un trolleybus à hydrogène à Dubaï (capacité de 50 personnes) a été lancée sur une distance d'un kilomètre (avec trois arrêts) ; mais il relève, dans sa conception et sa présentation, d'une initiative de type touristique plus que d'une problématique de *verdissement* des transports.

En service commercial, le premier tramway à hydrogène a commencé à circuler à Tangshan (province du Hebei) en Chine en octobre 2017 sur une ligne de 13,8 kilomètres. Le matériel roulant a été construit par la société *China Railway Rolling Corporation* (CRRC). L'autonomie est de 40 kilomètres. La vitesse maximale est de 70 km/h. La capacité est de 336 voyageurs (dont 66 en place assise).

D'autre part, huit tramways à l'hydrogène, capables de transporter 285 voyageurs, commenceront en 2018 leurs circulations commerciales à Foshan (province de Guangdong) en Chine, sur un réseau long de 7 kilomètres (avec dix arrêts et une station-service). Les matériels roulants sont construits par Qingdao Sifang, une filiale de CRRC. L'autonomie de chaque tram sera de 100 kilomètres environ. La distance moyenne qui est parcourue par un tram étant de 15 kilomètres, chaque tram refera son plein d'hydrogène une fois tous les trois parcours.

Hors du domaine des trams, les seuls projets à hydrogène qui ont été mis en œuvre sont relatifs à des trains de mines.

Le prototype LLC - Il est le plus ancien. Il a été développé en 2002 par un consortium piloté par LLC Vehicle Projects en Amérique du Nord, pour la traction d'un train de mines. Il était équipé d'une pile PEM Nuvera de 14 kWe, et d'un stockage d'hydrogène sur hydrures (3 kg d'hydrogène). Ce premier démonstrateur a été suivi d'un second en collaboration avec BNSF Railway et le canadien Railpower Technologies Corp. pour la traction en surface ; il a été nommé *Green Goat 1HH20B* (2009). Il était équipé d'une pile PEM Ballard de 250 kWe. L'hydrogène était stocké sous pression (réservoirs Dynetek).

15. Compte rendu des quatre ateliers du 23 octobre 2018 présidés par le député Benoit Simian

Durant la matinée du 23 octobre 2018 au ministère de la transition écologique et solidaire (à l'hôtel de Roquelaure à Paris), le député Benoit Simian a présidé quatre ateliers avec tous les acteurs de la filière française de l'hydrogène.



Illustration 6: ateliers du 23 octobre 2018 au ministère de la transition écologique et solidaire (source : mission du député Benoit Simian)

15.1. Atelier sur la sécurité présidé par Francis Dufour (ÉPSF)

15.1.1. Présentation de Francis Dufour (ÉPSF)

L'ÉPSF a la mission de délivrer les autorisations nécessaires sur le réseau ferroviaire national, en toute région, pour le matériel roulant, les infrastructures ainsi que les opérateurs (exploitants et gestionnaire d'infrastructure). La mission de l'ÉPSF s'étend aussi à l'aspect réglementaire et aux spécifications techniques. L'ÉPSF a enfin une activité de contrôle et d'audit des entreprises ferroviaires et du gestionnaire d'infrastructure.

Le train à hydrogène s'inscrit dans une rupture au regard du matériel roulant. Mais pas seulement. L'intégration d'un nouveau train introduit de nouvelles technologies, et partant de nouvelles contraintes pour la gestion de l'exploitation et des infrastructures).

Le nouveau système est complexe. À quoi s'ajoute l'écosystème global qui est modifié par l'intégration d'une nouvelle technologie.

Il y a deux sujets à discerner : la station-service et toutes les installations fixes (relevant de la réglementation relative aux ICPE), et d'autre part, le matériel roulant. Les enjeux portent sur :

- les difficultés techniques à surmonter et les précautions à prendre,
- les autorisations (qui fait quoi ? que doit contenir le dossier ? comment le système peut-il être autorisé ?),
- le planning, pour être prêt en 2022.

Concernant les autorisations, il existe un système d'autorisation du matériel roulant et des entreprises fixé par des réglementations. Elles sont en cours de changement, notamment avec l'émergence de l'agence européenne, l'ERA, qui va intervenir dans les procédures, notamment en cas de matériel transfrontalier. Il faut bien savoir si les circulations seront cantonnées ou non au territoire national. Cette question peut changer le processus, et augmenter le nombre des services associés à l'instruction. Pour une autorisation au niveau seulement national, il faut compter quatre mois d'instruction. Mais ce délai de quatre mois ne vaut que pour des dossiers complets. La même règle s'applique au gestionnaire d'infrastructure.

Si le trafic reste national, c'est l'ÉPSF qui traitera tout le dossier. Mais s'il y a plus d'un État membre dans l'affaire, le dossier passera entre les mains de l'agence européenne (ERA). Dans un processus, plus il y a d'acteurs, plus c'est compliqué ! Rester à l'échelle nationale permettrait d'aller plus vite.

Au regard du matériel roulant, il y a trois grands domaines dans les processus et procédures d'autorisation :

- les spécifications techniques qui sont des règlements obligatoires,
- les règles nationales (liées au transport ferroviaire, mais aussi aux autres spécificités du train, notamment l'intégration de l'hydrogène), avec très peu d'expérience dans le domaine de l'hydrogène ;
- les organismes d'évaluation (méthodes de sécurité commune), avec l'analyse de risque global (niveau de sécurité du train, son intégration dans le système).

Les gestionnaires d'infrastructure et les exploitants doivent modifier leur système de gestion de la sécurité pour que le train puisse être convenablement intégré, exploité, géré. Il y a un gros travail à fournir de la part de ces opérateurs du transport ferroviaire.

S'agissant du planning, il convient de bien prendre en considération la phase en amont. Elle consiste en la validation d'essais sur le réseau ferré. Le gestionnaire d'infrastructure est directement impliqué. C'est l'ÉPSF qui valide les expérimentations sur le réseau. Cette phase doit être anticipée dans le planning du processus d'autorisation du train. Il y a deux grands champs d'analyses à faire :

- les études qui regardent tous les trains,
- celles qui regardent l'hydrogène spécifiquement, l'hydrogène du train (contraintes), mais aussi l'hydrogène des stations (stockage et approvisionnement).

Aujourd'hui, un type de train à hydrogène a déjà reçu les autorisations nécessaires en Allemagne. Il est bien évident que dans les démonstrations qui seront à faire en France, on s'inspirera de ce qui a déjà été fait en Allemagne (en reprenant les éléments transposables au réseau français). Il faudra utiliser le retour d'expérience des Allemands ; il y a déjà des accords pour transmettre des éléments entre autorités.

Le *risque zéro* n'existe pas. L'objectif est de faire en sorte que le risque soit acceptable, qu'il y ait des couvertures de risques suffisamment bonnes pour que la sécurité soit garantie. Les stations relèvent d'une autre réglementation. De nombreuses procédures seront à revoir : secours des trains, circulation en tunnel, stationnement des trains, etc. Compte tenu des spécificités du train à hydrogène, l'ÉPSF estime que le plus grand risque n'est pas ce qui a trait aux mobiles, mais à l'utilisation de l'hydrogène.

Une tournée de démonstration du train à hydrogène peut être autorisée par l'ÉPSF. Un train allemand à hydrogène peut venir circuler en France sous une couverture de risque bien spécifique.

15.1.2. Interventions / Questions

Michel Neugnot, de la région de Bourgogne-Franche-Comté,

Il est une autre méthode, en partant du principe que tout ce qui n'est pas interdit est autorisé et que l'exception peut être gérée. Il faut regarder par rapport à l'objectif de 2022. L'innovation ne doit pas être regardée par le prisme de ce qui a déjà été accompli, aussi bien sur l'aspect technique que financier. L'innovation est synonyme de rupture. Elle implique une prise de risque de la part de tous les acteurs.

Le train à hydrogène est une déclinaison du train hybride. Le matériel roulant existe (de type Alstom). Le seul changement, c'est celui de l'énergie. Au lieu d'avoir un caténaire, on a des piles à combustible. La partie à vérifier porte sur le changement de l'énergie, et non pas sur l'ensemble de la machine.

Il faut partir sur des procédures d'exception, ne pas partir de la nécessité de savoir si c'est autorisé, mais plutôt si c'est interdit.

Sur la partie relative à la production, il y a en France beaucoup de lieux de production d'hydrogène, même *vert*.

Olivier Delecroix, d'Alstom

L'homologation allemande a été obtenue par écart. On est parti d'un type de train bien connu en Allemagne, qui circule déjà en centaine d'exemplaires et qui est homologué depuis longtemps (Coradia iLint). Ce qui a été fait pour homologuer le train à hydrogène en Allemagne, c'était d'examiner seulement uniquement la partie relative à l'hydrogène, et pas les autres parties connues du train. Ce principe d'homologation par écart peut semblablement être retenu en France, en partant d'un train connu par la SNCF et l'ÉPSF.

Le deuxième principe transposable en France, c'est celui de la réglementation de la technologie de l'hydrogène. En Allemagne, la partie sur l'hydrogène du train était nouvelle ; aucun référentiel n'existait. Pour traiter le sujet, Alstom s'est fait aider par le TÜV, un organisme tiers. Il s'est fondé sur des règlements de base relatifs à l'hydrogène dans l'industrie pour gérer la partie sur la sécurité ; il a présenté à l'EBA (l'équivalent allemand de l'ÉPSF) la dimension relative à l'hydrogène au dossier de sécurité. Cette méthodologie devrait être la même en France.

La bimodalité peut être une spécificité intéressante en France. Elle n'a pas été étudiée en Allemagne ; mais elle semble pertinente pour prendre un coup d'avance au regard des fonctionnalités du train. Le train allemand est monomode. Il fonctionne à

l'hydrogène seulement, même lorsqu'il circule sous caténaire. Un apport du projet français pourrait être d'avoir un train bimode à l'hydrogène : fonctionnement à l'hydrogène, mais avec un pantographe qui permet d'exploiter les passages sous caténaire.

Pierre Izard, de la SNCF

Pour atteindre l'objectif de 2022, qui est faire rouler un train pouvant accueillir du public, il va falloir coordonner quatre parties prenantes :

- le constructeur du train,
- le gestionnaire d'infrastructure,
- l'entreprise ferroviaire,
- les territoires, notamment en tant qu'autorité organisatrice des transports.

Les installations de distribution seront intéressantes dès lors qu'elles chercheront à distribuer pour d'autres clients que le transport ferroviaire. Les territoires peuvent guider les choix d'installation. Le travail de coordination est important : stockage, maintenance du matériel, trajets ciblés, manière de présenter les dossiers de sécurité.

Pour trouver le constructeur avant l'été de 2019, préparer les accords et gérer les dossiers de sécurité, il n'y a pas de temps à perdre. Pour tenir les délais de mise en service de premiers trains en 2022, il est nécessaire de passer une commande avec un constructeur (sous forme d'avenant à un contrat existant) dès l'été de 2019.

Sur les unités de production, dans la phase de réalisation, il sera intéressant de pouvoir étudier le calendrier de déploiement des installations qui puissent garantir un hydrogène décarboné. Et cela pour deux raisons :

- se différencier de la situation allemande,
- être un des volets des futures expérimentations.

Franck Dhersin, de la région des Hauts de France

Le port de Dunkerque est un lieu où pourra être produit de l'hydrogène. Le directeur du port est mobilisé sur ce sujet.

Régis Saadi, d'Air Liquide

L'expérience du monde industriel de l'énergie est essentielle pour ce qui concerne les installations fixes. Mais les industriels sont moins au fait des contraintes du matériel roulant.

Pour ce qui concerne l'alimentation des trains par hydrogène décarboné, l'important est d'alimenter les trains avec de l'hydrogène quel qu'il soit de façon à lancer les processus. Il faut savoir qu'en France il y a déjà une production d'hydrogène relativement importante. L'objectif, c'est bien sûr à terme l'hydrogène décarboné.



Benoit Simian @BenoitSimian · 23 oct.

« 2022 est notre objectif pour faire circuler un train #Hydrogène accueillant des voyageurs »

Pierre Izard @SNCF

#MissionTrainHydrogène @Min_Ecologie



Alstom, Elisabeth BORNE, Edouard Philippe et 7 autres



18

40



L'échéance de 2022 n'est pas irréaliste, mais il ne faut pas perdre de temps. L'acte 1 est de décoller ! Il ne faut pas chercher à tout faire d'un coup.

Si la quantité d'hydrogène stockée est supérieure à une tonne, une autorisation, et plus seulement une déclaration, devient nécessaire. Cela exige des études et des procédures (enquête publique, etc.) plus longues. Il faut deux ans ou deux ans et demi pour une instruction.

Jérémy Almosni, de l'ADEME

L'appel à projet sur l'écosystème de mobilité a été lancé par l'ADEME le 10 octobre 2018. L'ADEME estime qu'il permettra de mieux connaître la partie en amont au regard des progrès en cours. Il permettra aussi d'enrichir la réflexion sur le volet réglementaire.

Une étude est prévue avec la SNCF en 2018-2019. Elle comprendra un volet sur l'état de la technologie et la spécification des besoins, une partie sur l'infrastructure et l'hydrogène, et sur l'impact environnemental.

Dans l'appel à projet, une grande attention sera portée aux territoires. Les usages de l'hydrogène seront évalués selon une approche pas seulement économique, mais en prenant aussi en compte les externalités (celles de l'économie circulaire notamment). L'étude devra notamment déterminer les conditions nécessaires pour la pertinence de la technologie de l'hydrogène sur un territoire et pour différents usages.

Pascal Mauberger, de McPhy Energy

L'agglomération de Lens-Béthune a décidé d'équiper une ligne de bus (six bus, bientôt dix) avec un électrolyseur de 500 kilowatts et une station de livraison de 200 kg par jour. L'installation est juste sous le seuil réglementaire d'une tonne de stockage. Pour la déclaration nécessaire, il a fallu moins d'un an entre la notification du marché et l'ouverture de la station (avec électrolyseur et station de recharge).

15.2. Atelier sur l'énergie présidé par Alice Vieillefosse (DGÉC)

15.2.1. Présentation d'Alice Vieillefosse, de la DGÉC

La logique du Gouvernement dans le Plan national Hydrogène, c'est de développer l'hydrogène *vert*, l'hydrogène décarboné pour développer la filière et tout l'écosystème. La logique du plan a été de partir des systèmes existants, parce que l'hydrogène est aujourd'hui déjà utilisé dans les processus industriels. Mais c'est de l'hydrogène *noir*, c'est-à-dire à partir de pétrole en faisant du vaporéformage. Il convient de bien préciser ceci.

- L'hydrogène produit à partir de sources carbonées fossiles (gaz, charbon) est appelé hydrogène noir. Pour tout recours à cet hydrogène, il sera difficile de justifier un soutien au titre du plan national Hydrogène.
- L'hydrogène produit par électrolyse à partir d'électricité du réseau est appelé hydrogène *gris*. Il ne correspond pas à un objectif à terme du plan, mais peut représenter une étape intermédiaire.
- L'hydrogène produit à partir de sources renouvelables décarbonées, appelé hydrogène *vert*, ou issu du recyclage (hydrogène *fatal*), est une cible à terme du plan national.

Autant l'hydrogène *noir* ou *gris* dispose d'un potentiel de marché important avec des grosses installations et des grosses productions, autant le plan national a révélé un vrai potentiel de cet hydrogène sur des marchés plus petits (sans transport et distribution de l'hydrogène). Il peut être compétitif par rapport aux solutions habituelles, mais il faut travailler à augmenter les échelles et le marché de l'hydrogène plus propre. La logique du plan national, c'est donc de développer des systèmes territoriaux (*hub*) d'hydrogène propre, autour d'un industriel éventuellement, où il y aurait une mutualisation des électrolyseurs ou des modes de production propre.

Le Gouvernement veut développer ces écosystèmes par le biais d'appels à projets. Le premier a été publié le 10 octobre. Tous les modes de mobilité sont éligibles, mais avec de l'hydrogène propre (réutilisation d'hydrogène fatal, vaporeformage de biogaz, etc.).

Un deuxième appel à projet va être lancé sur les électrolyseurs. Il représentera donc une opportunité en parallèle du premier appel à projet.

15.2.2. Questions / interventions

Guillaume Desmedt, Air Liquide

Il faut appeler l'attention sur deux points.

- L'électricité décarbonée est une des forces du système national. L'électricité du réseau est en France largement décarbonée.
- La transition d'un train à moteur Diesel à un train à hydrogène (à base d'hydrogène de vaporéformage) réduit déjà les émissions de gaz à effet de serre.

Ivan Faucheux, CGE

La logique du rapport d'étape du député Benoit Simian a été de décorrélérer deux risques principaux :

- le risque lié au matériel ferroviaire,
- le risque lié à l'hydrogène décarboné.

Dans le cadre d'un projet phasé, la question est de savoir qui peut s'impliquer dans les différentes phases. Y-a-t-il aujourd'hui une *roadmap* sur la diminution des coûts sur les différentes technologies de production d'hydrogène qui permette de justifier deux phases de projet ?

Jérémy Foglia, Engie

Il y a des perspectives de réduction des coûts qui sont assez importantes d'ici 2030, notamment par le développement de nouvelles technologies (la très haute température), mais aussi par des technologies existantes. On peut donc avoir un haut niveau de confiance à ce sujet.

La question qui se pose, c'est le pragmatisme. Il y a une volonté de réutiliser de l'hydrogène *fatal*, c'est du bon sens. Mais plusieurs interrogations subsistent : sera-t-il situé au bon endroit ? en quantité suffisante ? sur des durées suffisantes ?

À terme, il faut développer l'hydrogène *vert*. La question principale pour la réduction des coûts, c'est celle de l'échelle. Si on ne part pas tout de suite à la bonne échelle, on n'arrivera jamais à une réduction des coûts. Il faut enclencher le cercle vertueux.

Régis Saadi, d'Air Liquide

L'idée de partir avec des actifs existants est pertinente. Elle permet de monter en puissance tout limitant le risque instantané. Il faudra ensuite mettre en place des installations adaptées. Dans le cas du train, c'est un Business Model qui roule ! Le problème de fond, c'est d'enlever le Diesel, soit avec des matériels rendus autonomes, soit en électrifiant ce qui n'est pas réaliste sur le plan économique. La solution alternative qui semble être la meilleure, c'est l'hydrogène. En partant même avec un Business Model qui ne soit pas optimisé, on sait qu'on est tout de suite opérationnel au sens économique. Cela est très important pour la prise de risque des partenaires. On est gagnant dès le début. Et on le sera encore plus quand on aura optimisé les technologies et les actifs.

Pascal Mauberger, de McPhy Energy

Aujourd'hui, la composante principale du coût de l'hydrogène hydroélectrolysé, c'est à hauteur de 70% le coût de l'électricité que vous injectez dans l'électrolyseur. Les 30 % restant, c'est la rentabilité du capital investi et les coûts d'exploitation hors électricité.

Il faut vraiment se poser la question de favoriser de l'électricité accessible sur les trains à hydrogène. Il faut 55 kilowattheure pour faire 1 kg d'hydrogène. Si vous payez votre électricité 60 euros par MWh, vous êtes déjà à plus de 3 euros le kilogramme. Mais si vous avez accès à de l'hydrogène à 30 euros par MWh, ce qui est possible, on est à 1,50 euros par kilogramme.

Raphaël Schoentgen, de Hydrogen Advisors

Aujourd'hui, des écosystèmes se développent en Scandinavie avec 600 bus et de l'hydrogène fourni à 5 euros par kilogramme en prenant de l'électricité achetée sur le réseau (très décarbonée). C'est tout à fait compétitif avec le prix du gazole. On est dans une économie où le *driver* principal n'est plus le coût des électrolyseurs. Il l'a longtemps été, il est vrai. Un électrolyseur de 1 MWh coûtait de 2 à 3 millions d'euros il y a quelques années, près d'un million d'euros il y a un an, aujourd'hui un demi-million d'euros. Ce qui détermine le prix de l'hydrogène aujourd'hui, c'est le prix de l'électricité. La baisse du coût des investissements a fait basculer l'enjeu de compétitivité du modèle d'électrolyse sur le coût de l'énergie, ce qui est un réel changement économique du modèle. Voyez à titre d'exemple au port d'Amsterdam l'électrolyseur de 100 MWh.



Benoît Simian @BenoitSimian · 23 oct.

« Il y a une volonté forte affichée de tous les acteurs de l'#energie sur l'hydrogène » @EDF_RE @airliquidegroup #MissionTrainHydrogène

Guillaume Desmedt, d'Air Liquide

Il existe des *roadmaps* très claires sur une baisse des coûts attendue dès lors qu'on passe à la bonne échelle. Mais l'électrolyseur doit tourner beaucoup, et surtout avec de l'électricité *verte* : c'est de l'énergie renouvelable en Scandinavie. Mais à éviter absolument si c'est du charbon comme en Allemagne. L'enjeu, c'est de mettre les véhicules sur les rails, et de voir si le *bilan carbone* est bien en phase avec la diminution des émissions.

Gautier Chatelus, de la Caisse des dépôts et consignations

Il y a deux temps sur l'énergie dans le projet :



AFHYAC, HDF Energy, Alstom et 7 autres

1 6 11

- le temps de sortir deux premiers trains qui roulent en 2022 avec caractère expérimental (objectif tendu),
- puis généralisation et déploiement.

Pour ce qui concerne l'énergie, il faut être flexible sur la première phase, ne pas avoir trop de contraintes. Il faut penser au facteur temporel, et ne pas être trop exigeant lors de la phase expérimentale.

Damien Cabarrus, d'Alstom

Le train c'est une chose, l'écosystème autour du train, c'en est une autre. Il faut expérimenter en France le train, mais aussi les infrastructures (maintenance, procédures d'exploitation). Le retour d'expérience des Allemands permettra d'enrichir les connaissances en France sur le train. Mais ce n'est pas parce que les Allemands ont réussi un projet qu'on devra développer le même en France.

Il est crucial de ne pas laisser accroire qu'il ne s'agit que de faire rouler quelques trains, mais bien un nombre suffisant pour enclencher, dans la filière, la nécessaire baisse des coûts. Il faut un projet-pilote.

Christelle Rouille, d'ÉDF

L'important, c'est de produire un hydrogène à bas carbone : électrolyseur alimenté lui-même par une électricité bas carbone. Un électrolyseur fonctionne de manière optimale avec 5 000 heures au minimum par an. Aujourd'hui, les parcs éoliens *offshore* fonctionnent au mieux durant 4 500 heures par an. L'équation économique avec des électrolyseurs ne fonctionnant en direct que sur des installations de production d'énergie intermittente est assurément complexe.

Alice Vieillefosse, de la DGÉC

En Allemagne, il est bien des différences entre les Land sur l'hydrogène *vert* et *gris*. Et il n'y existe pas encore de garanties d'origine pour l'hydrogène.

Pierre Izard, de la SNCF

Le sujet de l'économie du système et du Business Model est essentiel. Il est important d'apporter des éléments sur l'évolution des coûts. Le travail du CEA est d'importance. Le point-clef, c'est le prix de l'énergie dans les années qui viennent. De plus, il demeure une interrogation sur la durée d'usage des piles à combustible : il faudra approfondir cette question, et gagner de l'assurance sur la durée de vie.

15.3. Atelier sur le financement animé par Ivan Faucheux (CGÉ)

15.3.1. Présentation d'Ivan Faucheux (CGÉ – ci-après)

Les trois principales questions issues du sujet financement sont celles-ci :

- Quels sont tous les risques du projet ? Peut-on les pondérer ?
- Qui peut prendre ces risques (capacités techniques, financières et stratégie affirmée pour le faire) ?
- Quels acteurs sur la gestion de ces risques (pour envisager le cas échéant des sociétés de projet) ?

Il faut insister sur :

- l'enjeu d'aller vite, en raison de la concurrence technologique vive avec les batteries,
- la nécessité d'associer plusieurs marchés, l'expérience en la matière montrant la difficulté de faire tenir un modèle économique sur les seuls revenus de la vente d'hydrogène,
- les risques de trafic et de volume associés au transport ferroviaire qui resterait dans une telle expérimentation.

Il existe trois grands types de financement.

- France : ADEME, achat de prestation de transport ferroviaire par l'AOT.
- Europe : fonds européens directs.
- Privé : BEI, CDC, fonds d'infrastructure comme Meridiam, des privés qui veulent faire bouger les lignes dans le cadre de la transition énergétique, mais veulent un Business Plan équilibré.

En méthode, il convient de commencer par du subventionnel pour équilibrer le plan d'affaires, puis passer à des innovations organisationnelles, et enfin, en fonction des risques à supporter et des garanties résiduels à prendre, voir quels acteurs privés peuvent se positionner.

15.3.2. Questions / interventions

Benoît Simian, député

Il faut avoir de l'attention aux OFP. Là où seraient positionnées les stations, ne faudrait-il pas réfléchir à une utilisation future pour une locomotive pour le fret à hydrogène ? Avoir un temps d'avance dans l'hydrogène pour être les premiers en matière de *fret hydrogène*.

Olivier Delecroix, d'Alstom

Il existe encore une inconnue sur la pertinence et la faisabilité du *fret hydrogène* : le problème de la puissance. Aujourd'hui, Alstom est en étape de faisabilité. Il y a en France un pilote (port de Fos). Mais il faut être raisonnable, et ne pas tenter de couvrir trop de matériel roulant à la fois. L'expérience allemande rend confiant pour les TER. Il faut être prêt pour le renouvellement prochain des trains Diesel (1 000 rames) en deux phases, dont la première en 2028. Réussir avec l'hydrogène aujourd'hui permet de fiabiliser une alternative économique crédible au Diesel en 2028 avec le renouvellement. Il existe sur ce sujet pour Alstom un réel *focus* sur le train de voyageurs.

Deux remarques sont à faire sur le risque.

- La bimodalité est un moyen technique de maîtriser le risque financier. Même si la filière de l'hydrogène s'effondrait, le train bimode conserverait une valeur résiduelle garantie (celle du train électrique).
- L'amortissement des coûts de développement est un sujet important. Il y a deux façons d'aborder le problème. Il y a d'un côté la vision allemande : les coûts de la phase de développement sont finalement assez faibles, parce qu'il y a des promesses de commande en nombre). L'autre vision est celle avec laquelle ont été traités les trains hybrides : il consiste à financer en tant que telle la phase de développement, et ensuite avoir des trains qui n'intègrent pas cette phase.

Damien Cabarrus, d'Alstom

Le train de fret resterait dans le cadre du train de fret local, et pour une zone géographique très localisée.

Michel Neugnot, de la région de Bourgogne-Franche-Comté

Le COI débattu de la priorisation des investissements. S'agissant de l'avenir d'un ensemble de lignes, les lignes de desserte fine du territoire, on sait que le Diesel sera interdit dans les prochaines années. Il faut une solution alternative à l'électrification. Il faut tenir compte des efforts financiers à réaliser aujourd'hui, en perspective avec le renouvellement du marché dans les vingt prochaines années. Il faut préparer l'avenir. Toutes les régions seront impactées fortement.

Florian Tillous-Borde, d'Engie

Le risque de volume est clef. C'est une question qui devra être discutée avec les régions pour voir quel niveau de garantie peut être apporté en termes de volume.

Sur le risque opérationnel et technologique, la technologie de l'électrolyseur n'est pas un problème. C'est surtout une question de design, de dimension. Le risque est plutôt sur la pile à combustible. L'Allemagne permettra un fort utile retour d'expérience.

Concernant les OPEX, l'électricité sera une valeur-clef. C'est de 50 % à 70 % du coût. L'hydrogène *fatal* est moins cher, mais il faut le purifier et le transporter, ce qui engendre un coût additionnel non négligeable à intégrer.

Sur le financement, il y a des appels à projets, c'est une bonne nouvelle, et un réel appétit sur le marché des banques et des fonds. La rentabilité attendue est réelle. Mais elle n'est pas à 4 ou 5 ans, elle est sur du plus long terme. Sur le schéma de financement, il faut être sur un schéma *agile* : il faut voir si des acteurs publics prennent part au projet (subventions, garanties).

Alexis de Pommerol, de Meridiam

Meridiam est présent dans les infrastructures depuis 2005, et a lancé en amont de la COP 21 en 2015 un fonds dédié à la transition énergétique.

Meridiam est confiant dans la capacité de financement d'un pilote ou même d'un projet avec une durée de vie plus conséquente. L'ensemble des acteurs est capable d'obtenir les autorisations nécessaires. Certes, des projets encore innovants sur des échelles de temps longues, mais on n'est plus dans le prototype de laboratoire. On est prêt à s'investir avec des industriels.

Damien Havard, de Hydrogène de France

Il faut apporter des assurances sur les piles à combustible, la question de la fiabilité se concentrant sur les stacks. En cas de défaillance, il est possible de garder la pile, et de ne changer que le cœur. Ce point est techniquement validé sur les voitures, les bus, les camions. Le train va suivre au niveau technologique.

15.4. Atelier sur la gouvernance animé par Hervé de Tréglodé (CGEDD)

15.4.1. Présentation de Hervé de Tréglodé (CGEDD)

La question fondamentale, c'est celle-ci : quelle organisation pour réussir le pari de 2022 ? Le délai est très important. L concentrons-nous sur les TER. Beaucoup de régions sont intéressées, leurs réponses sont très positives, avec des degrés variables dans l'identification des lignes.

Ayons la plus grande attention au choix des lignes ferroviaires. Les principales conditions du bon choix sont un trafic suffisant, un profil de ligne adapté, un intérêt pour le *zéro émission*, un stockage pas trop difficile et une mutualisation possible. L'analyse est urgente. Il faut pouvoir passer les commandes des matériels roulants à l'été de 2019.

Les formules possibles :

- un premier organisme pour des études générales ? Est-ce vraiment utile ?
- Une structure nationale de pilotage ? ou bien une organisation par région ? Avec le TER, la place des régions est centrale. Les régions sont AOT.
- Quelle place donner aux trois grands acteurs nationaux, à savoir l'État, les AOT et la SNCF ?

Dernière question : comment associer les industriels et financiers présents ? Quand faire appel à eux ? Comment procéder au choix des lignes ?

15.4.2. Questions / interventions

François-Xavier Olivieri, d'Engie

Autre axe d'analyse : agira-t-on avec une seule région ou avec plusieurs régions ? En termes de commande publique, cela va avoir un impact important, car on peut imaginer des commandes groupées par plusieurs régions réunies. Cela va être très dimensionnant du choix *agile* qui va être fait.

Chaque autorité organisatrice doit gérer le matériel roulant, l'énergie, le service. Pour répondre au délai de 2022, il est judicieux que les trois briques soient unies pour délivrer un service plutôt que de segmenter, ce qui créerait un risque sérieux de décalage du délai.

Le partage de risque plus clair permet une amélioration de la rentabilité du projet.

Pierre Izard, de la SNCF

La SNCF est capable, car c'est juridiquement licite, de porter à travers le contrat Régional (avec Alstom) le développement d'une pré-série. Si un tel choix est fait, il convient de se retrouver avec les régions pour savoir qui veut s'y associer, puis définir avec elles un cahier des charges. Il s'agit juridiquement de créer un objet de plus dans la série des trains Régional, dans la commande qui existe déjà.

Michel Neugnot, de la région Bourgogne Franche-Comté

Il faut dissocier le court terme sur la pré-série et la suite. Un sujet important, c'est la maintenance du matériel. Comme on est sur un produit nouveau, il serait plus judicieux que le constructeur assume la maintenance. Comme un suivi est nécessaire et qu'on est dans l'innovation, il est préférable ne se pas multiplier les acteurs durant la première phase : le constructeur se verrait confier le suivi et la maintenance le temps du lancement.

Sur le moyen et long terme, Régions de France avait lancé une association dédiée au matériel roulant. Se pose la problématique de l'acquisition du matériel. Les régions doivent acquérir de manière mutualisée un savoir-faire dans les dix prochaines années.

Sur le problème de l'argent : il est rare, il faut donc l'utiliser plus intelligemment qu'avant. Les investissements sont sur 35 à 40 ans. Les régions financent cela avec de l'emprunt. Mais la durée d'amortissement du matériel n'est pas en phase avec la durée de remboursement de l'emprunt : cela vaut aussi bien pour le matériel que pour

les lignes. Il faudrait voir pour un financement avec l'intervention de l'État pour la bonification d'emprunt à 40-50 ans. Cela permettrait aux régions de ne pas dégrader leur ratio, et de garder une capacité d'investissement. C'est une piste à explorer avec la ministre chargée des transports.

Gautier Chatelus, de la Caisse des dépôts et consignations

Gouvernance et financement sont deux questions liées. Il y a deux modes de gouvernance.

- Le mode traditionnel. On se met dans le cadre de Régiolis. Des régions se mettent d'accord, et achètent des trains à hydrogène.
- La solution alternative. On passe par une société de projet, on lance un marché de partenariat (solution assurément envisageable), procéder par appel d'offres. Aujourd'hui, un seul consortium est en mesure de répondre ; le risque commercial est donc limité. Cela permet de mieux étaler les forces sur la durée, mieux rentabiliser les premières rames, vrai sujet de structuration du financement. Il ne serait alors pas nécessaire que les régions soient directement dans la société de projet (gouvernance moins complexe, agilité).

Ceci renvoie à la question d'être sûr que la seule solution aujourd'hui soit de passer par des marchés existants.

La partie relative à l'approvisionnement de l'hydrogène peut être soit dans la société de projet, soit en dehors. Ensuite, on peut agir par appel d'offre une fois qu'un endroit a été ciblé pour une production d'hydrogène.

La question-clé : les régions peuvent-elles se réunir et dire en six mois si elles sont en capacité d'acheter des trains, de savoir sur quelles lignes les faire fonctionner et dimensionner en conséquence le besoin en matériel ? Dans une société de projet, les régions ne seraient que donneurs d'ordre.

Michel Dulerm, de la région d'Occitanie

Le problème de la dette est difficile pour les collectivités territoriales. Quel est l'argent que peuvent mettre les régions ? l'État ? la SNCF ? Le problème du co-financement reste déterminant, pas seulement sous la forme de prêts remboursables.

Le deuxième aspect concerne les fonds européens. Compte tenu des montants, l'Europe semble être un co-financeur difficilement évitable. Mais elle a ses propres processus de conditions et d'acceptation de financements, et de contrôle à posteriori.

Le financement européen pourrait-il se satisfaire de la gouvernance mise en place dans le projet-pilote français ?

Régis Saadi, d'Air Liquide

S'agissant du financement, la première chose à faire, c'est un appel à manifestation d'intérêt technique auprès des régions. Le recensement des volontés régionales, mais surtout de leurs volumes en termes d'usage de l'hydrogène est fondamental. Une fois les régions engagées, et en capacité de dire sur quelles lignes elles peuvent s'engager sur un déploiement de matériel ferroviaire hydrogène, il y aura un *panel* de solutions réalisables pour mutualiser les risques sur l'ensemble des territoires qui voudront s'engager avec les industriels associés. Une fois cela fait, on sera capable d'aller chercher des financements et des structures adaptées.

Raphaël Schoentgen, de Hydrogen Advisors

Sur l'usage des fonds européens, il est nécessaire de rappeler que l'hydrogène ne fait partie des priorités techniques que depuis peu.

D'autre part, tous les fonds pour les transports à l'échelle européenne ne sont pas pleinement utilisés. Il reste encore des opportunités de financement.

Il faut avoir des commandes suffisamment massives pour réduire les coûts, pour réduire la différence de prix entre hydrogène et diesel.

Il faut compter sur l'intérêt des financements privés. Il est tout à fait possible de mobiliser des acteurs pour financer l'industrie de l'hydrogène : ne pas les considérer reviendrait à perdre une capacité significative de financement.

Benoît Simian, député

La bonne solution de gouvernance exige de travailler par le biais d'avenants et sur plusieurs territoires. Il faut adapter la stratégie à la desserte fine du territoire. L'électrification est très coûteuse, ne l'oublions jamais.

Trois conclusions apparaissent sortir du débat sur la gouvernance :

- Il faut avoir un appel à projet.
- Grand est assurément l'enjeu qui s'attache à partager les risques.
- Apparaît nécessaire un solide soutien de l'État aux régions.

Benoit Simian @BenoitSimian · 23 oct.

« Le contrat @AlstomFrance avec les @Regionsdefrance doit permettre de faire circuler le 1er train #Hydrogène français 🇫🇷 » Pierre Izard @SNCF @Min_Ecologie

Comment ça marche

La pile à combustible
Elle produit l'alimentation électrique du train et des équipements à bord grâce à la réaction chimique entre l'hydrogène et l'oxygène présent dans l'air ambiant.

L'hydrogène
Stocké dans deux réservoirs pressurisés, le gaz sert de combustible à la pile.

Les batteries
Elles permettent de stocker l'électricité produite et celle générée par l'énergie cinétique du train lors des phases de freinage.

Moteur
Permet l'accélération et le freinage. L'énergie générée au freinage est récupérée puis redistribuée aux batteries.

Coradia iLint
Constructeur : Alstom
Vitesse max : 140 km/h
Autonomie : 1 000 km

Elisabeth BORNE, Philippe Duron, Anne-Laure Cattelot et 7 autres

1 24 40

Liste des participants

Ateliers du 23 octobre

Noms	Prénoms	Entités
ALMOSNI	Jérémie	ADEME
BERLAND	Cédric	CONSEIL RÉGIONAL PACA
BOUCLY	Philippe	AFHYPCAC
BOURGOIN	Fabrice	RCVL
CABARRUS	Damien	ALSTOM
CHAPLOTTE	Jean-Michel	CONSEIL RÉGIONAL BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ
CHATELUS	Gautier	CDC – BANQUE DES TERRITOIRES
CHAUVET	Frédéric	SNCF INNOVATION ET RECHERCHE
CONNAN	Guillaume	CONSEIL RÉGIONAL DE NOUVELLE AQUITAINE
COURTOIS	Christian	SNCF RÉSEAU
DELECROIX	Olivier	ALSTOM
de POMMEROL	Alexis	MERIDIAM
DE SMEDT	Guillaume	AIR LIQUIDE
de TRÉGLODÉ	Hervé	CGEDD
DHERSIN	Franck	CONSEIL RÉGIONAL DES HAUTS-DE-FRANCE
DHORNE	Antoine	DGITM
DOLLÉ	Philippe	CONSEIL RÉGIONAL DU GRAND EST
DUFOUR	Francis	ÉPSF
DULERM	Michel	CONSEIL RÉGIONAL D'OCCITANIE
FAUCHEUX	Ivan	CONSEIL GÉNÉRAL DE L'ÉCONOMIE
FAUVEL-BANTOS	Mercedes	ENGIE
FOGLIA	Jérémy	ENGIE
FREMONT	Antoine	IFSSTAR
GARDIES	Mathieu	HYPE
HAVARD	Damien	HDF
IZARD	Pierre	SNCF
JABET	Antoine	GROF
LAMALLE	Danièle	CONSEIL RÉGIONAL DE BOURGOGNE-FRANCHE-COMTÉ
LEDUC	Ann-Laure	CONSEIL RÉGIONAL DES PAYS-DE-LA-LOIRE
LEFEBVRE	Rémi	CONSEIL GÉNÉRAL DE L'ÉCONOMIE
MARQUES	Arnaud	CONSEIL RÉGIONAL DE NOUVELLE AQUITAINE
MAUBERGER	Pascal	McPHY ENERGY
NEUGNOT	Michel	CONSEIL RÉGIONAL DE BOURGOGNE FRANCHE-COMTÉ ET RÉGIONS DE FRANCE
OLIVIERI	François-Xavier	ENGIE
PERENNES	Patricia	RÉGIONS DE FRANCE
POCHEZ	Rémi	DGITM
ROUILLE	Christelle	EDF PULSE CROISSANCE
SAADI	Régis	AIR LIQUIDE
SCHOENTGEN	Raphaël	HYDROGEN ADVISORS

Noms	Prénoms	Entités
SERRI-COMBE	Pierre	CEA
TILLOUS-BORDE	Florian	ENGIE
VIEILLEFOSSE	Alice	DGEC
WERQUIN	Christelle	AFHYPAC

Présentation Atelier Financement



Mission verdissement du ferroviaire Atelier financement

23 octobre 2018 – Ivan FAUCHEUX



Sommaire

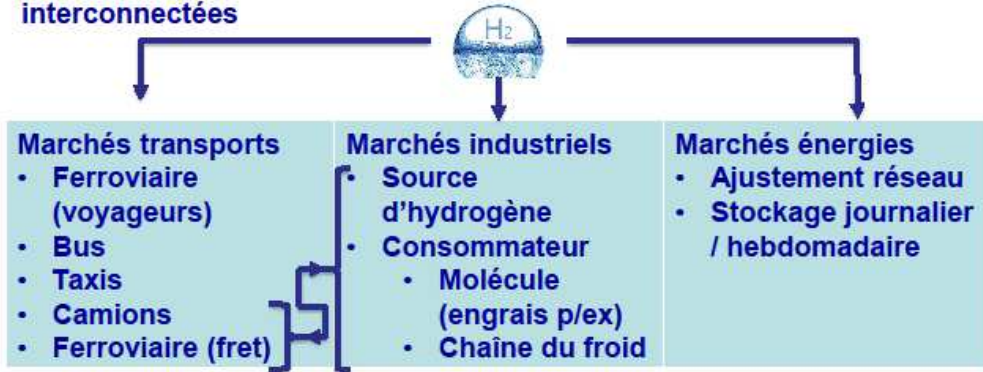
- ❖ **Enjeux du financement**
- ❖ **Risques trafic / volume**
- ❖ **Risques opérationnels**
- ❖ **Valeur des actifs à terme : risque marché**
- ❖ **Quels schémas**

Enjeux du financement

❖ Technologie qui n'est pas encore sur le marché

- Des risques spécifiques (cf. infra)
- En concurrence avec les batteries : enjeu de descente de coûts rapide pour éviter d'être « sorti du marché » → la rapidité est parfois plus génératrice de valeur que la recherche des performances optimales

❖ Expérience : peu d'opérations qui tirent de la seule performance de l'hydrogène l'essentiel des revenus – hors contexte zones non interconnectées



Risques volumes

❖ Pour le matériel ferroviaire, les principaux enjeux d'un volume suffisant sont

- Amortir les coûts de développement et de certification sur une série assez longue
- Avoir au moment du renouvellement de la flotte un retour d'expérience permettant une bancabilité naturelle de la technologie
- Mise en commun du risque entre les acteurs

❖ Pour les installations de production et stockage

- Avoir des volumes suffisants pour avoir des coûts d'emblée « raisonnables »
- Avoir des marchés complémentaires pour permettre que deux fois plus de volume ne soit pas équivalent à des capacités deux fois plus grandes, mais bien deux fois plus d'utilisation (ou des rémunérations très élevées pour des services très occasionnels).

Risques opérationnels

❖ Fiabilité du matériel et tenue dans la durée des performances

- *Train : fiabilité des piles et des réservoirs*
- *Électrolyse / récupération d'H2 fatal dans un premier temps : fiabilité des systèmes*
- *Stockage : fuites ?*

❖ Maîtrise des OPEX

- *Maintenance du matériel*
- *Taux d'indisponibilités pour opérations de maintenance*

Risque de valeur à terme

❖ Si l'hydrogène est un marché naissant, en regard d'actifs à durée de vie longue (matériel ferroviaire, installations de stockage et de distribution, installations de production), quel est le modèle économique ?

- *Amortissement sur une durée de vie théorique (20 ans) : permet de baisser le coût mais portage des actifs (et du risque de dépréciation économique) par le propriétaire,*
- *Amortissement accéléré sur la durée des contrats d'utilisation (mi- vie par exemple), mais les prix de location et de vente seront alors supérieurs.*

❖ Même problématique pour l'amortissement des coûts de développement

❖ Une valeur résiduelle des actifs (et un marché de seconde main) ne sont pas à ce stade envisageables, mais s'ils existent à terme

- *Une clause de retour à meilleure fortune pour celui qui a pris le risque de dépréciation accélérée (surtout si acteur public) ou de la première série ?*

Deux questions sous-jacentes

- ❖ **Qui veut stratégiquement prendre certains des risques énumérés et a les moyens techniques et humains de les gérer ?**
- ❖ **Quels groupes d'acteurs sont alignés en intérêt sur ces gestions particulières de risques ?**

16. Liste des personnes rencontrées

Nom	Prénom	Organisme	Fonction	Date de rencontre
Delecroix	Olivier	Alstom	vice-président Sales & Marketing pour la France	05/07/18
Cabarrus	Damien	Alstom	responsable des affaires publiques pour la France	05/07/18
Don	Rainer	Alstom	Directeur de produit et de projet (Coradia Lint/DTS & Spec.)	05/07/18
Schwab	Wolfram	Alstom	vice-président pour la R&D et l'innovation	05/07/18
Legay	Yannick	Alstom	directeur technico-commercial	05/07/18
Delcourt	Vincent	SNCF – Direction Innovation & Recherche	directeur du projet Tech4rail et responsable Cluster Énergie	10/07/18
Desnost	Carole	SNCF – Direction Innovation & Recherche	directeur	10/07/18, 24/07/18 et 25/09/18
Commère	Claire	SNCF – Direction Énergie	directrice Stratégie Énergie – Business & Mobilités Multimodales	10/07/18
Menuet	Olivier	SNCF – Direction Énergie	directeur Énergie et président de SNCF Énergie	10/07/18
Nion	Laurence	SNCF – Secrétariat général du groupe – Affaires publiques	conseillère parlementaire	10/07/18 et 24/07/18
Bouyer	Laurent	Bombardier Transport France	président	10/07/18
Gachet	Benoît	Bombardier Transport	directeur des ventes, du marketing et des produits	10/07/18
Espié	Sophie	Bombardier Transport France	responsable des relations internationales	10/07/18
Tréméac	Yann	ADEME – Service Transports et mobilité	chef de service adjoint	10/07/18
Le Naour	François	Association française de l'hydrogène et des piles à combustible (Afhypac)	vice-président	17/07/18
Werquin	Christelle	Association française de l'hydrogène et des piles à combustible (Afhypac)	déléguée générale	17/07/18
Serre-Combe	Pierre	CEA - Liten	chef du programme des technologies de	17/07/18

Nom	Prénom	Organisme	Fonction	Date de rencontre
			l'hydrogène	
Gardies	Mathieu	Hype	président	17/07/18
Poupart-Lafarge	Henri	président-directeur général	Alstom	19/07/18
Chauvet	Frédéric	SNCF		24/07/18
Poupard	François	Ministère chargé des transports	directeur général des infrastructures, des transports et de la mer	24/07/18
Delache	Xavier	Ministère chargé des transports - DGITM	sous-directeur des études et de la prospective	24/07/18
Ouvrard	Anne-Emmanuelle	Ministère chargé des transports - DGITM	sous-directrice de la sécurité et de la régulation ferroviaires	24/07/18
Michel	Laurent	Ministère de la transition écologique et solidaire	directeur général de l'énergie et du climat	24/07/18
Vieillefosse	Alice	Ministère de la transition écologique et solidaire	directrice de cabinet du directeur général de l'énergie et du climat	24/07/18
Ploquin	Xavier	Cabinet du ministre de la transition écologique et solidaire	conseiller en charge de l'énergie, de l'industrie et de l'innovation	24/07/18
Vinot	Emmanuel	Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar)		24/07/18
Candusso	Denis	Institut français des sciences et technologies des transports, de l'aménagement et des réseaux (Ifsttar)		24/07/18
Fauvel-Bantos	Mercédès	Engie	déléguée aux relations avec le Parlement	24/07/18
Azalbert	Michèle	Engie – Hydrogen Business Unit	Chief Executive Officer	24/07/18
Le Goff	Soizic	Engie – Hydrogen Business Unit		24/07/18
Foglia	Jérémy	Tractebel Engie	Chef de projets pour les gaz verts	24/07/18
Tarrier	Franck	Ministère de l'économie et des finances – Direction générale des entreprises (DGE)	sous-directeur des matériels de transport, de la mécanique et de l'énergie	04/09/18
Neugnot	Michel	Régions de France	président de la Commission sur les	04/09/18

Nom	Prénom	Organisme	Fonction	Date de rencontre
			transports et la mobilité	
Pérennes	Patricia	Régions de France	conseillère pour le transport ferroviaire	04/09/18
Rousse	Florence	Établissement public de sécurité ferroviaire (ÉPSF)	directrice générale	04/09/18
Cébulski	Laurent	Établissement public de sécurité ferroviaire (ÉPSF)	directeur des autorisations	04/09/18
Mages	Vincent	Air Liquide – Direction des affaires européennes et internationales	directeur adjoint	11/09/18
De Raphélis-Soissan	Pierre	Air Liquide – Business development Europe Hydrogen Energy	directeur	11/09/18
Bodard	Étienne	BlueStar Strategies		11/09/18
Havard	Damien	HDF	président	11/09/18
Charrier	Sylvain	HDF	directeur du développement outre-mer	11/09/18
Chabanel	Matthieu	SNCF Réseau	directeur général adjoint	25/09/18
Courtois	Christian	SNCF Réseau – Direction de l'ingénierie et des projets	chef du département de la traction électrique	25/09/18
Loy	Véronique	ÉDF	directrice adjointe des affaires publiques	25/09/18
Rouillé	Christelle	ÉDF New Business	directrice de la stratégie	25/09/18
Courtier-Arnoux	Estelle	GRDF	analyste du marché du gaz	25/09/18
Jabet	Antoine	GRDF	analyste du marché du gaz	25/09/18
Oheix	Muriel	GRDF	responsable des relations institutionnelles	25/09/18
Mauberger	Pascal	McPhy	président-directeur général	02/10/18
de Récy	Élodie	Banque européenne d'investissement (BEI)	responsable du bureau de représentation du groupe BEI en France	09/10/19
Ménard	Laurent	Secrétariat général pour l'investissement	directeur de la stratégie de l'investissement et du financement européen	09/10/18
Chatelus	Gautier	Banque des territoires	directeur adjoint au Département des	09/10/18

Nom	Prénom	Organisme	Fonction	Date de rencontre
			infrastructures et du transport	
Aubouin	Pierre	Banque des territoires	directeur du Département des infrastructures et du transport	09/10/18
Touati	Julien	Meridiam	Corporate Development Director & Partner	16/10/18
de Pommerol	Alexis	Meridiam	Senior Investment Director	16/10/18

17. Glossaire des sigles et acronymes

<i>Signes et acronymes</i>	<i>Signification</i>
AGC	autorail à grande capacité
BEI	Banque européenne d'investissement
BEMU	Battery Electric Multiple Unit
CAPEX	capital expenditure
CCTN	Comptes des transports de la Nation
CDC	Caisse des dépôts et consignations
CEA	Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
CEF	Connecting Europe Facility
CITEPA	Centre interprofessionnel technique d'études de la pollution atmosphérique
COVNM	composés organiques volatils non méthaniques
CPER	contrat de plan État-Région
DGITM	Direction générale des infrastructures, des transports et de la mer
EMNR	engins mobiles non routiers
GNL	gaz naturel liquéfié
IFTÉ	installation fixe de traction électrique
INEA	Innovation and Networks Executive Agency
PAC	pile à combustible
PM	particulate matter
RTRI	Railway Technical Research Institute
SNCF	Société nationale des chemins de fer français
TER	train (ou transport) express régional
TET	train d'équilibre du territoire