Rapport d'étape

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 environnementale ?

établi par Benoit SIMIAN
Député

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

Octobre 2018

ASSEMBLÉE NATIONALE

Rapport d'étape

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 environnementale ?

établi par

Benoit Simian

Député

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

Octobre 2018

Sommaire

Avant-propos de Benoit Simian....3

Résumé....5

1.1. Pourquoi *verdir* le transport ferroviaire ?....5

1.2. Pourquoi maintenant ?....5

1.3. Pourquoi l'hydrogène ?....6

1. La première phase de la mission....8

2. Les raisons du nécessaire *verdissement*....10

3. Les quatre filières industrielles....11

4. La filière de l'hydrogène....13

Conclusion....16

Annexes....19

1. Lettre de mission....20

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....23

3. Les coûts d'électrification des lignes ferroviaires en France....27

4. Les trois technologies possibles pour verdir les matériels roulants ferroviaires en France, hors hydrogène : biocarburants, gaz naturel et batteries électriques....29

4.1. Les trois technologies....29

4.2. Solution à base de carburants liquides ou gazeux....30

4.2.1. Biocarburants....30

4.2.2. Gaz naturel....31

4.2.3. Solutions à base d'électricité....32

5. Les projets de Bombardier pour verdir les parcs français de matériels roulants....36

5.1. Principe et avantages du train à batteries tout électrique....36

5.2. Selon Bombardier, un train adapté qui répond à de nombreux besoins du réseau...37

5.3. Pour Bombardier, une opportunité industrielle évidente 38

6. Les études et projets de la SNCF pour verdir ses parcs de matériels roulants (hors trains à l'hydrogène)....40

6.1. La SNCF : gros consommateur d'énergie mais faible contributeur national aux émissions de CO_2 et de particules....40

6.2. Le *verdissement* par le déclin du Diesel SNCF et l'utilisation de carburants plus propres....41
6.3. Le *verdissement* grâce aux trains bimodes....42
6.4. Des projets de trains hybrides avec batteries pour limiter les investissements d'infrastructure....43

7. La proposition d'Engie pour la production locale d'hydrogène en vue du ravitaillement en hydrogène de dix trains régionaux....45

8. La proposition d'Alstom pour commencer à faire circuler au plus tôt en France des trains à l'hydrogène....47

9. Les études de la SNCF sur les trains à hydrogène....50
9.1. Les trains à hydrogène ne sont pour l'instant pas la priorité de la SNCF....50
9.2. Des contraintes qui l'emportent actuellement sur les avantages....50
9.3. L'hydrogène et la nécessaire mise en place d'un écosystème territorial....52
9.4. La structuration de la SNCF pour développer le train à hydrogène....53

10. Coûts actuels et futurs (achat et maintenance) des piles à combustible. .54

11. Coûts de production et de stockage de l'hydrogène....57
11.1. Coûts de production....57
11.2. Coûts logistiques et coûts de stockage....58

12. Sources de financement pour les projets de train à hydrogène en France 61
12.1. Les financements dédiés au *verdissement* du transport ferroviaire....61
12.1.1. Fonds des contrats de plan État – Région (subventions)....61
12.1.2. Plan Hydrogène du gouvernement....62
12.1.3. Les financements communautaires....63
12.2. L'implication des acteurs industriels dans le domaine de la fourniture du matériel ferroviaire, des infrastructures de production et de stockage de l'hydrogène....65

13. Les trains et trams avec pile à combustible hors de France....67

14. Liste des personnes rencontrées....69

15. Glossaire des sigles et acronymes....72

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 à 2050.

Le ferroviaire figure au premier plan des modes de transports 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 transports, 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 à mi-parcours 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 trois co-rapporteurs 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). À la fin du mois de septembre, nous avions déjà 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.

De ces premiers mois, il ressort déjà des orientations et un cadre dans lequel la mission entend inscrire ses futurs travaux. Après une première phase d'analyse des différentes technologies à disposition pour le verdissement du ferroviaire, qui a abouti à la rédaction de ce pré-rapport, une seconde phase plus *opérationnelle*, centrée sur l'hydrogène, sera mise en œuvre dès le mois d'octobre. Son objectif : rassembler les principaux acteurs de la filière autour d'ateliers thématiques (sécurité, financement, énergie, gouvernance, matériel) afin d'analyser les conditions de mises en circulation de premiers trains à hydrogène.

Trois critères ont d'ores et déjà 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 d'énergie de la ligne ferroviaire. Si la mission n'a pas vocation à se substituer aux travaux des régions en la matière, elle entend bien leur donner un appui et une orientation dans ce défi majeur qu'est la sortie du diesel.

Avec la publication de ce rapport d'étape, 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 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 d'étape est notamment fondé sur les auditions qui ont été conduites dans le cadre de la mission jusqu'au 1er octobre 2018, ainsi que sur les visites at autres entretiens depuis le commencement de la mission en juillet 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 coûteux 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 électrifiés 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 2000[1]. Ainsi, ce sont près de 450 trains qui devront être renouvelées à partir de 2028/2030, et le reste dans les dix années qui suivent.

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 parc[2] par du matériel toujours émetteur, même partiellement, de gaz à effet de serre.

1.3. Pourquoi l'hydrogène ?

Deux familles de technologie 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 iCoradia 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 vite en succès.

> « ***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, 1er février 2018)**

[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.

La capacité à pouvoir susciter et soutenir un premier déploiement d'une flotte significative de train 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 vivant dans les zones urbaines, cette proportion devant passer à 66 % en 2050 d'après l'ONU) inscrit 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, 1er juin 2018)

1. La première phase de la mission

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

- une première phase de la fin de juin à la fin de septembre 2018, qui a conduit au présent rapport d'étape,
- une seconde phase d'octobre 2018 à février 2019, sur une étude de projet.

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. Alors que s'achevait le présent rapport d'étape, seule une partie des réponses avaient été reçues.

Les premières réponses des régions à la lettre du 19 juillet 2018

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 du Centre-Val-de-Loire rappelle les électrifications qu'elle a financée, ses achats de rames bimodes, sa participation aux études concernant l'hybridation des rames bimodes Régiolis. Elle a une grande attention au maintien plusieurs lignes ferroviaires du quotidien. Pour ces lignes, une fois leur avenir « *pérennisé* », la région « *est tout à fait disposée à participer techniquement à une démarche concernant la définition d'une nouvelle plate-forme hydrogène pouvant circuler sur ces lignes, en lien avec des exploitants et des constructeurs de matériel ferroviaire* ».

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* ».

La région de 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* ». La région s'attachera aussi à acheter des rames Diesel moins polluantes, et à rénover les rames actuelles avec des moteurs moins polluants. La région veut aussi étudier les solutions avec des biocarburants et du biogaz. S'agissant

de l'hydrogène, la région a demandé à participer à l'étude que va bientôt commencer SNCF Innovation ; cette démarche, selon la région, « *devrait permettre de cibler les lignes sur lesquelles une expérimentation pourrait être envisagée* ».

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 mutiualisée entre acteurs du transport de biens et de personnes* ».

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 mutulalisation et de partage du financement* ».

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* ».

Les matériels roulants à *verdir*

Durant ses deux phases, la mission porte sur tous les matériels roulants émettant des pollutions soit de gaz à effet de serre, soit de gaz et particules nocives localement (NO_x, CO, SO_2, 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.

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.

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.

- Électrifier les lignes 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 *verdissement* 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**
Biocarburants de première génération	Disponibilité de la technologie / Coût	Mobilisation de la biomasse (et donc bilan environnemental sujet à caution) / Pollution locale	*100 % batteries*	Technologie arrivant à maturité (tirée par le secteur automobile)	Autonomie encore limitée / Long temps de recharge des batteries
Biocarburants de seconde génération	Pollution locale faible / Pas de nécessité de modifier les systèmes de propulsion	Solution non éprouvée industriellement / Bilan énergétique et économique non convaincant	*Hybrides*	Solution disponible	Gains plus ou moins importants en émission de CO_2, selon les profils d'usage, mais ne permettant pas d'atteindre le *zéro émission*
Gaz naturel	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	H_2	Emport massique 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 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 CO_2 sont diminuées de 80 %[3]. Malgré 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*.

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

Les deux dernières technologies 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. Comme la SNCF[45], la société Bombardier estime que le développement de la technologie de l'hydrogène sera précédé du développement de technologies avec batteries, sur laquelle 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 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.)[6]. Mais aujourd'hui, obtenu par hydrolyse, l'hydrogène *vert* 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 ces deux technologies, 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. Les enjeux principaux regardent les cellules et systèmes de contrôle des batteries, les électrolyseurs et les piles à combustible.

---

4 La SNCF (EPIC de tête) a installé un « *plateau-projet* » sur le sujet de l'hydrogène, en y associant tous les services compétents des trois EPIC du groupe public ferroviaire. Mais sur le projet du TER hybride (batteries et Diesel), la SNCF mobilise bien plus (une cinquantaine de personnes).

5 Dans un document remis lors de son audition (et daté le 10 juillet 2018), la SNCF prévoit une phase de développement entre 2018 et 2023, une phase de démonstration entre 2023 et 2030 et une phase de déploiement à partir de 2030.

6 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 de déploiement présenté par le ministre chargé de l'écologie le 1er juin 2018 regarde notamment le déploiement de la production d'électricité par pile à combustible pour les besoins du transport.

Mais 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 (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 le sujet hydrogène permet de compléter les financements des CPER,
4. la possibilité de mobiliser des moyens du plan 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, si l'hydrogène est une opportunité pour le transport ferroviaire en France, il est aussi une opportunité industrielle à ne pas écarter.

Obtenu par électrolyse[7], l'hydrogène *vert* est encore bien trop cher. Aujourd'hui, les infrastructures d'hydrolyse 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 *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

[7] 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'electrolyse PEM pour *Proton Exchange Membrane* (Proton OnSite aux États-Unis, Hydrogenix au Canada, Areva H2Gen en France, Giner aux États-Unis, ITM Power au Royaume-Uni, Siemens en Allemagne, ThyssenKrupp en Allemagne).

suffisamment bas. Selon le CEA, de nouvelles technologies (hydrolyse 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, Afhypac, audition du 17 juillet 2018)**

Des progrès sont attendus pour ce qui concerne tant les réservoirs[8] (aujourd'hui très chers) que les piles à combustible. Notamment pour ce qui regarde la membrane es piles. Le coût de la membrane se monte à 60 % de celui de la pile tout entière.

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

- l'utilisation intensive du matériel[9], 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 bord[10].

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

> « ***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 *vert* ou de l'hydrogène *gris*[11] est de grande importance. Il y a deux types d'hydrogène *vert* : l'hydrogène obtenu avec l'électricité du mix français (décarboné à plus de 90 %), et l'hydrogène obtenu avec de l'électricité produite par des sources renouvelables (surtout l'éolien et le solaire).

---

8 produit en France par exemple par Stelia Composites

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

10 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

11 L'hydrogène *gris* produit par vaporeformage de méthane émet beaucoup de dioxyde de carbone. 26 % du CO_2 émis par l'industrie française provient de sa production d'hydrogène.

« ***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'Allemagne[12] a fait le choix de l'hydrogène *gris* 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)

[12] 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 *gris,* construite (pour 10 millions d'euros) par *The Linde Group* et financée par l'État fédéral, sera exploitée par *The Linde Group*.

Conclusion

Au terme des nombreuses auditions qui ont été organisées (cf. liste des personnes en annexe), 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 celle de l'hydrogène. Chacune aura son champ de développement. Certainement, chacune fera l'objet de réalisations. 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 de **se concentrer, dans la seconde phase 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, etc.) favorisera le développement en France d'une solide filière industrielle.

La seconde phase de la mission analysera les conditions qui permettraient des premières circulations de trains à l'hydrogène avant 2022. La directrice générale de l'Établissement public de sécurité ferroviaire (ÉPSF) 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 tardait pas trop à engager le procédures, les difficultés pourraient 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.

Pour cet approfondissement, dès octobre 2018, **cinq ateliers** seront formés. Ils analyseront :

- la soutenabilité, notamment financière,
- la gouvernance pour conduire les études et les projets, notamment pour ce qui concerne la participation des différentes parties prenantes à une ou plusieurs sociétés de projet, et la participation des écosystèmes économiques dans les territoires français,
- la sécurité, avec notamment l'autorisation du matériel roulant par l'EPSF, les risques liés à l'hydrogène, etc.
- l'approvisionnement en hydrogène (électrolyse, mutualisation des stations-service, etc.),
- le matériel ferroviaire.

Au terme de la première phase de la mission, il apparaît clairement que les projets à étudier concernant l'hydrogène au cours de la **seconde phase** doivent satisfaire **trois critères**.

Le **premier critère** est de rechercher un **matériel roulant <u>n'émettant aucune pollution locale</u>**. 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 NO_2)

> « ***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 **<u>mutualisation des sources d'énergie</u> entre plusieurs modes de transport**. Pour être économiquement soutenable, 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 <u>entièrement *verte* à terme</u>, à l'issue éventuellement d'une période d'énergie *grise*[13]**. En Basse-Saxe, le choix a été fait d'utilisation d'hydrogène gris (obtenu par vaporeformage), avant l'étape suivante, qui sera celle de la production d'hydrogène par électrolyse à partir d'électricité décarbonée.

[13] 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.

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

Concernant le **financement**, qui sera étudié avec attention 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) soient réorientés vers des programmes de *verdissement* des matériels roulants**. Il importe aussi que le premier fonds constitué à l'occasion du plan Hydrogène annoncé le 1er juin 2018 par le ministre de la transition écologique et solidaire, de 50 millions d'euros, soit réservé aux premières expérimentations de trains à hydrogène. Enfin, les crédits européenns devront être mobilisés.

Benoît Simian

député

Annexes

1. Lettre de mission

Réf. CGEDD N° 012314-01

Le Premier Ministre

0873/18/SG

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 évaluerez 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 ;

.../...

- 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.

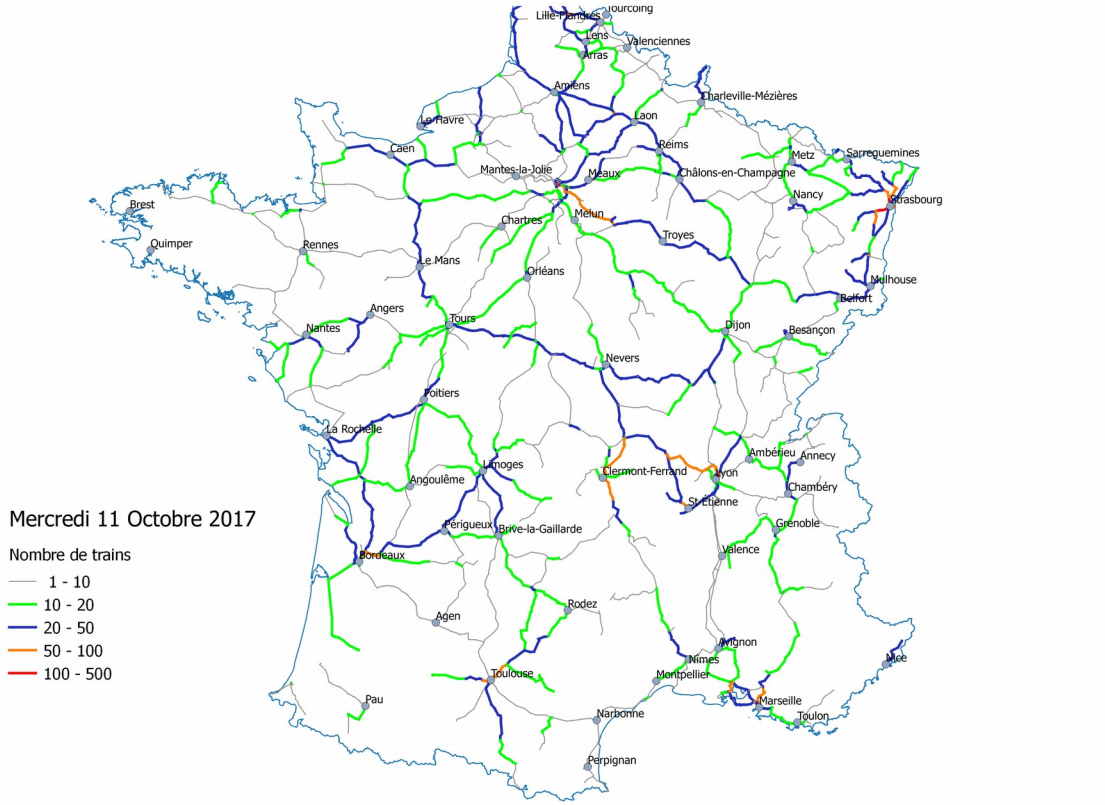

Illustration 1 : carte des circulations d'engins Diesel sur le réseau ferré (source : SNCF Réseau)

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 CO_2, 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 particules[14] 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 CITEPA[15], 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.

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

[15] 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[16]
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 données[17] remises par SNCF Réseau pour la mission, 80 % des trains-kilomètres des trains Diesel pour le fret[18] 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.

[16] composés organiques volatils non méthaniques

[17] selon les circulations ferroviaires relevées le 11 octobre 2017

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

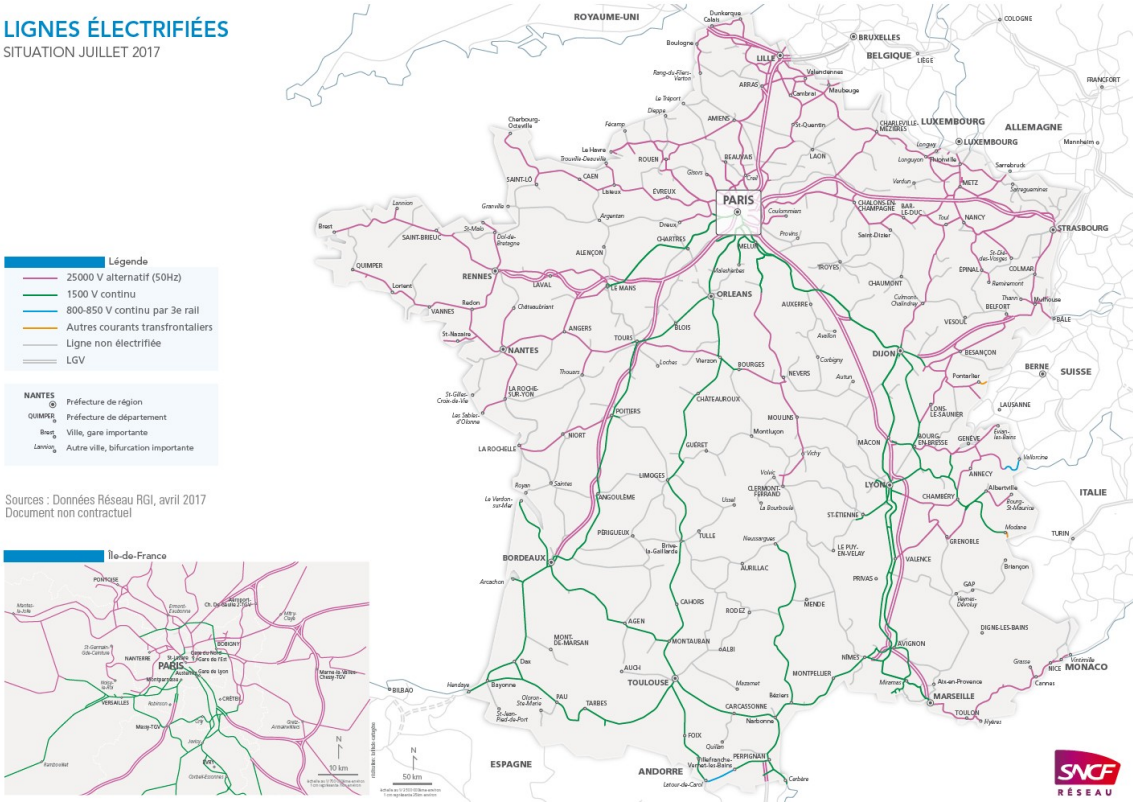

Illustration 2 : carte des lignes électrifiées en France (source : SNCF Réseau)

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.

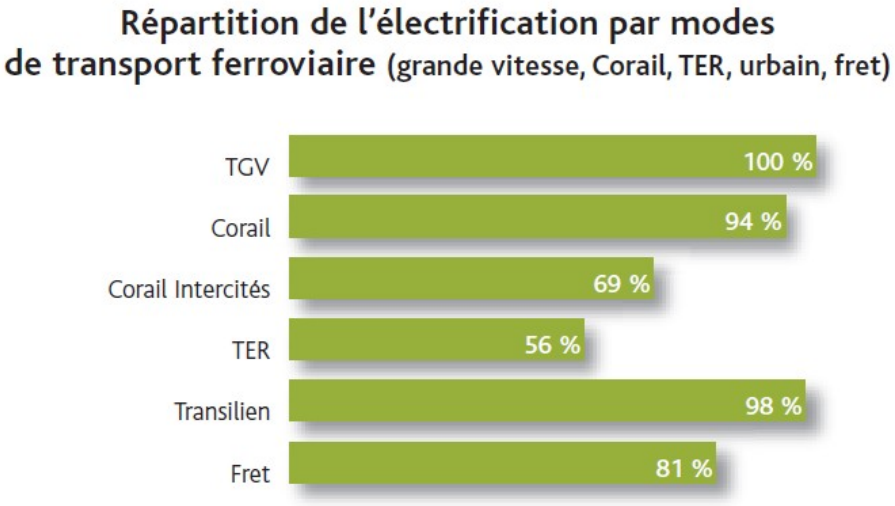

Illustration : électrification par type d'activité ferroviaire (source : SNCF)

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 infrastructure[19] 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 % ;
- 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 %.

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

Hors les travaux relatifs à la gare de Dol-de-Bretagne, ces investissements ont été de 123,5 M€[20], 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.

[20] 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 CO_2 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 CO_2 (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 certains 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 CO_2 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 adaptés 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 n erépondent 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.

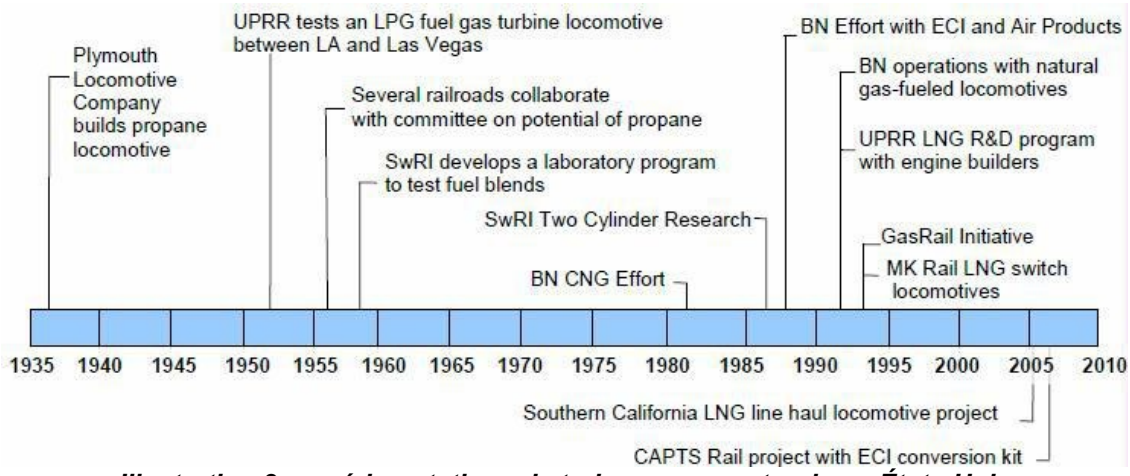

Illustration 2: expérimentations de trains au gaz naturel aux États-Unis

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 mobiles[21], 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.

[21] densités énergétiques massiques faibles, et donc autonomies faibles et coûts importants

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
Prix de l'énergie	0,1 €/kWh	0,1 €/kWh	1,3 €/l	1,3 €/l	10 - 2 €/kg
Coût énergétique de la solution	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/cm^3, 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)**
Pb - acide	40	110	340
NiMH	120	300	1 000
Li-ion	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 meilleures 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/m^3), 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 *verdissement* 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**
Biocarburants de première génération	Disponibilité de la technologie / Coût	Mobilisation de la biomasse (et donc bilan environnemental sujet à caution) / Pollution locale	*100 % batteries*	Technologie arrivant à maturité (tirée par le secteur automobile)	Autonomie encore limitée
Biocarburants de seconde génération	Pollution locale faible / Pas de nécessité de modifier les systèmes de propulsion	Solution non éprouvée industriellement / Bilan énergétique et économique non convaincant	*Hybrides*	Solution disponible	Gains plus ou moins forts en émission de CO_2 selon les profils d'usage, mais ne permettant pas d'atteindre le *zéro émission*
Gaz naturel	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	*H_2*	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 *verdir* 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 CO_2 en fonction du mix énergétique, réduction du bruit, amélioration du confort des voyageurs. Il serait aussi plus économique que les trains Diesel ou H_2.

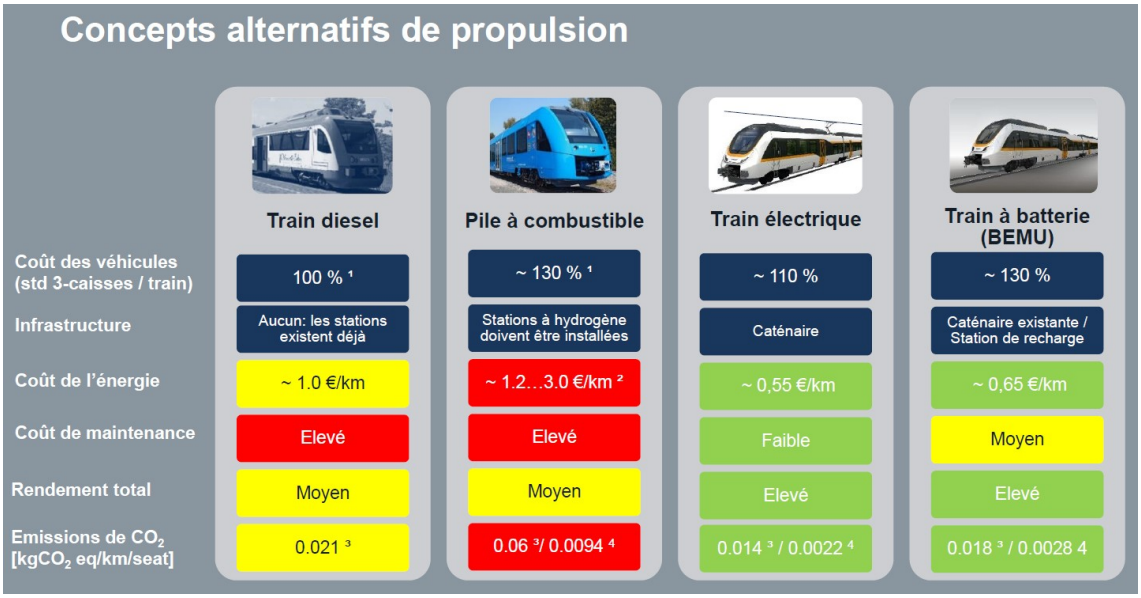

Illustration 2 : concepts alternatifs de propulsion selon Bombardier (source : Bombardier)

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.

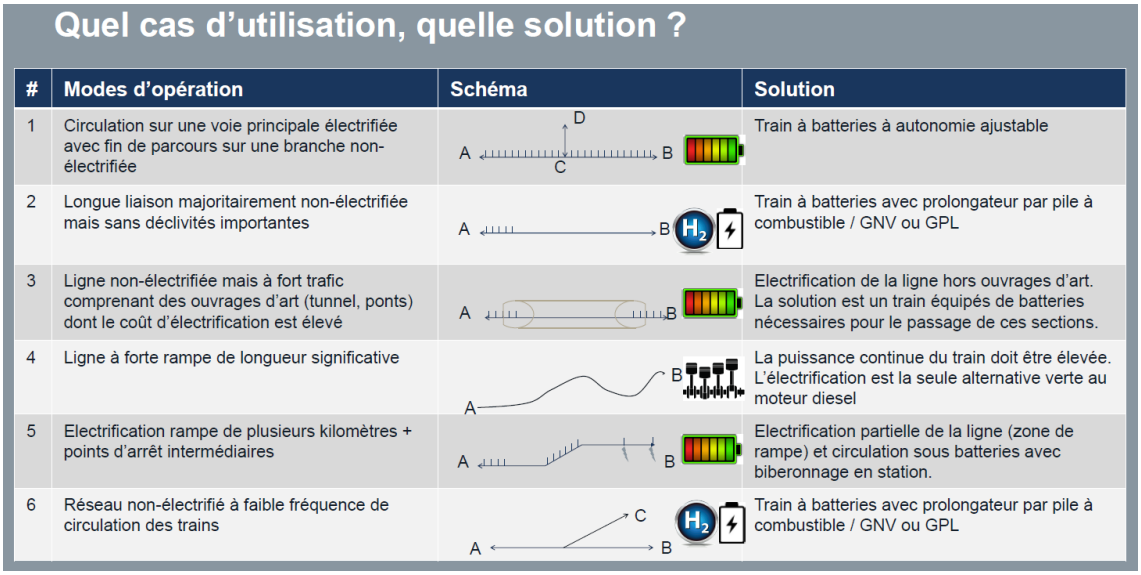

Illustration 3 : solutions selon les types de ligne (source : Bombardier)

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.

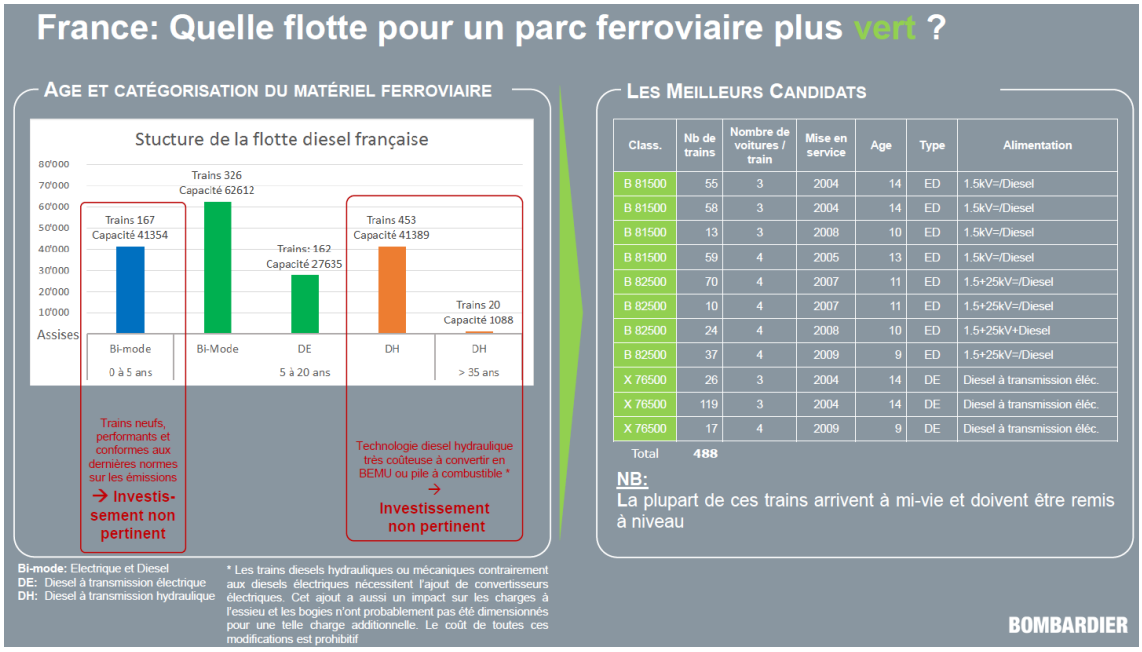

Illustration 4 : solutions de matériel roulant vert (source : Bombardier)

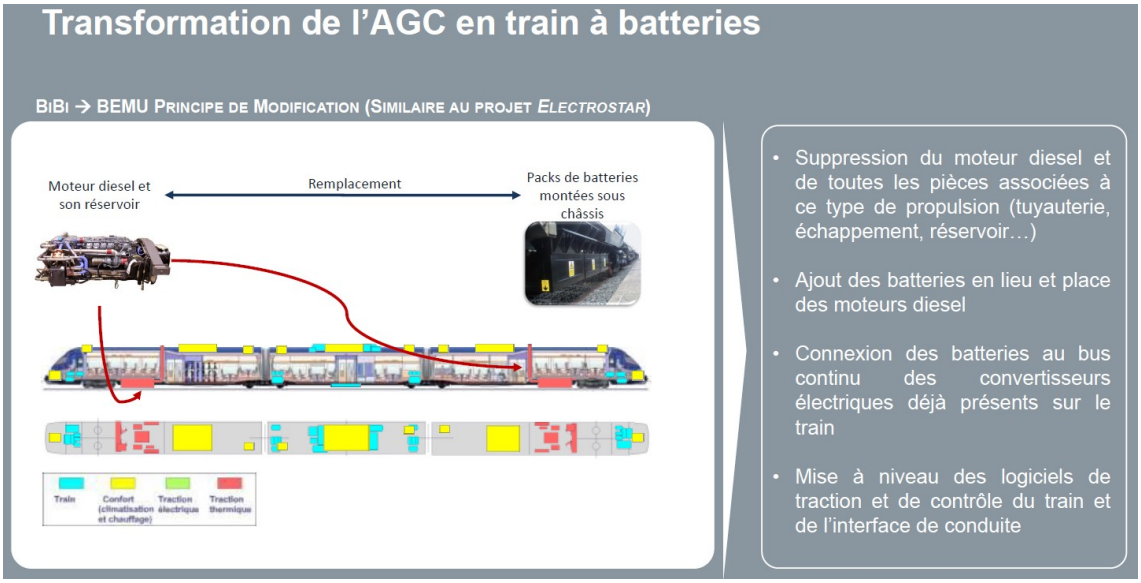

Illustration 5 : transformation d'AGC en train à batteries (source : Bombardier)

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 CO_2 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 1er consommateur d'électricité en France : 2 % de la consommation totale. Le groupe émet 3 millions de tonnes de CO_2 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.

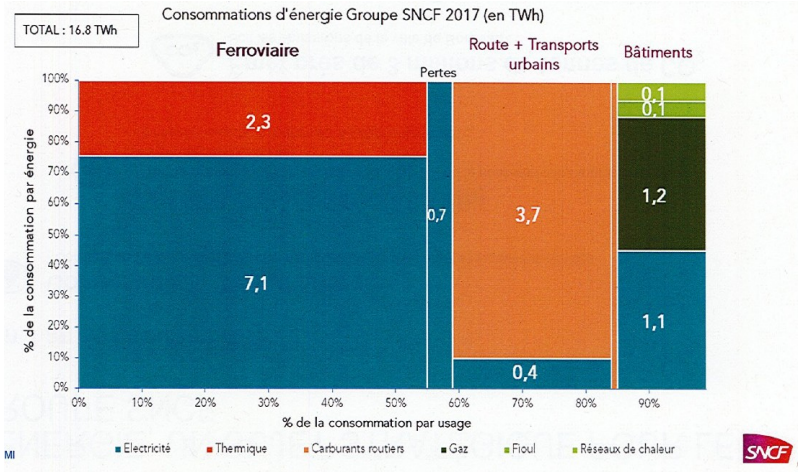

Illustration 1 : consommations d'énergie du groupe SNCF en 2017 en TWh (source : SNCF)

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 CO_2 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.

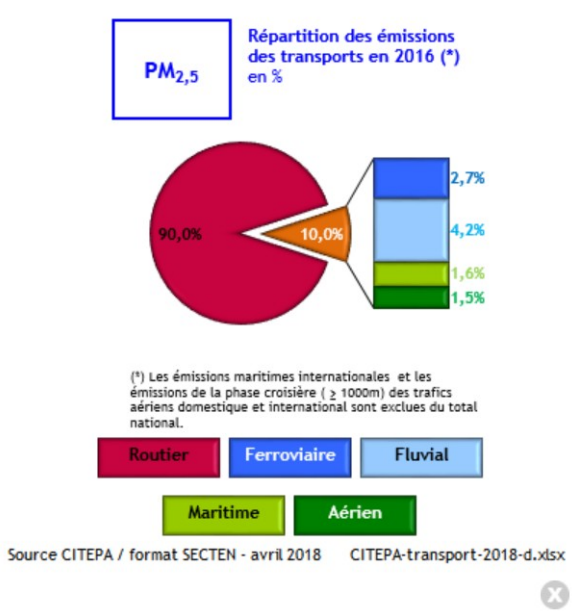

Illustration 2 : pollution des différents modes de transport (source : https://www.citepa.org/fr/activites/inventaires-des-emissions/secten#Contribution_ss-secteurs)

6.2. Le *verdissement* 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.

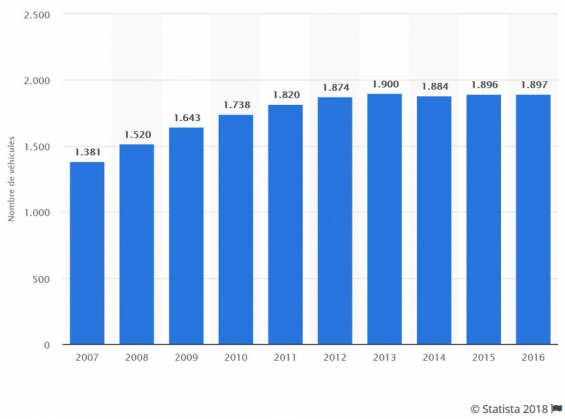

Illustration 3 : nombre total de locomotives Diesel en France de 2007 à 2016 (source : https://fr.statista.com/statistiques/473001/locomotives-diesel-france/)

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 m^3 en 2007 à 158,4 milliers de m^3 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.

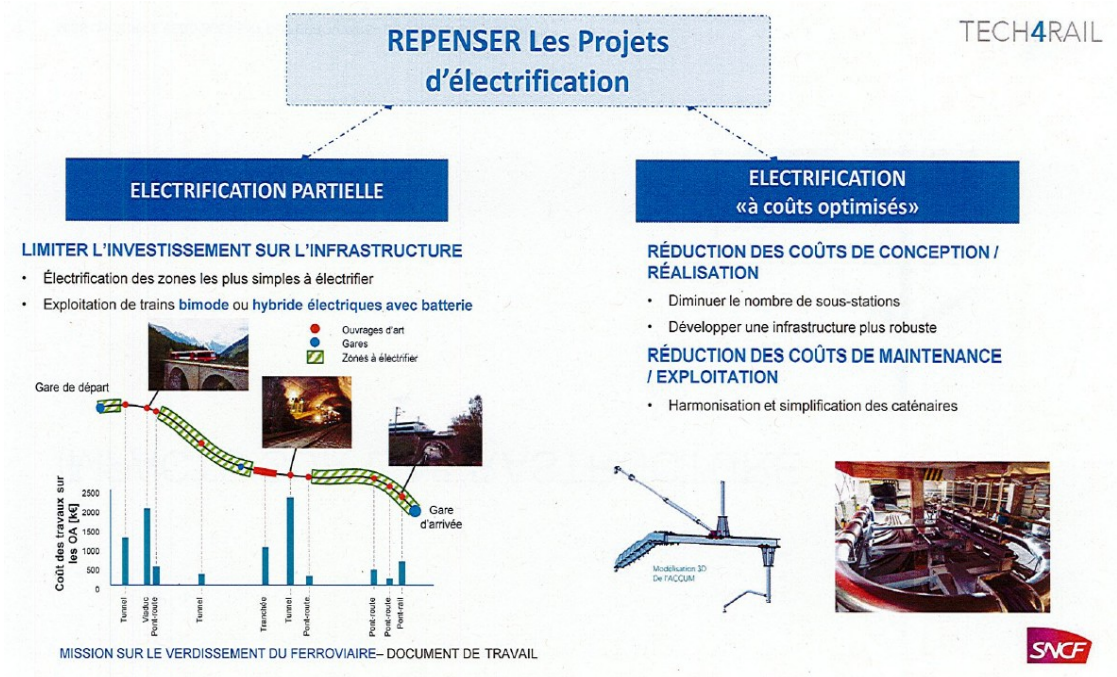

Illustration 4 : limitation des coûts d'investissement (source : SNCF)

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.

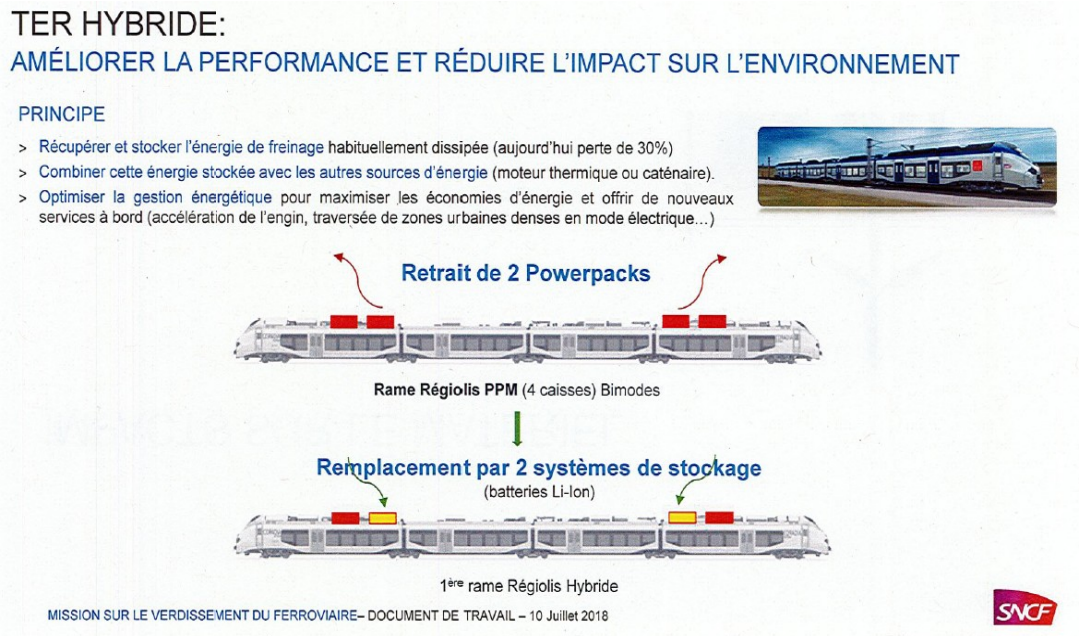

Illustration 5 : TER hybride (source : SNCF)

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 Regiolis 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 Régiolis.

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.

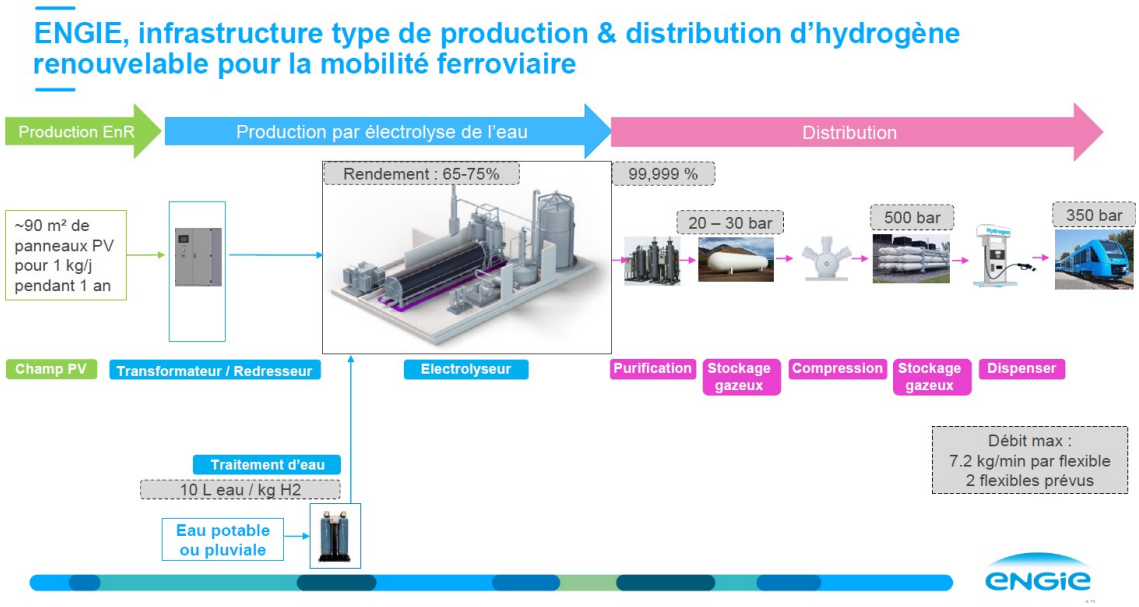

Illustration 1 : production et distribution d'hydrogène pour le transport ferroviaire (source : Engie)

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.

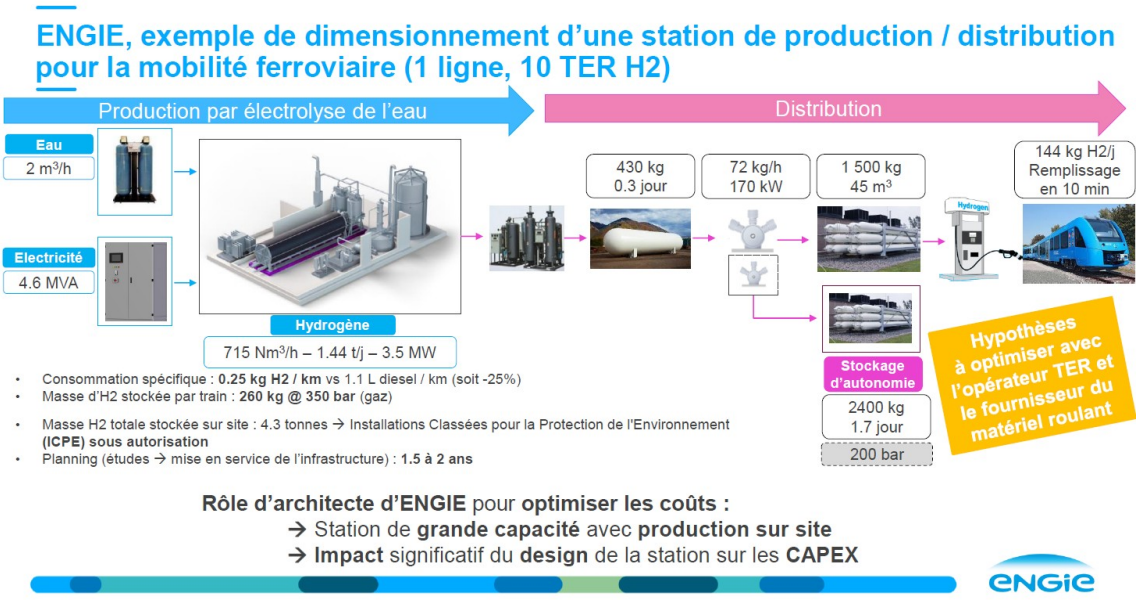

Illustration 2 : station de production et distribution d'hydrogène (source : Engie)

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.

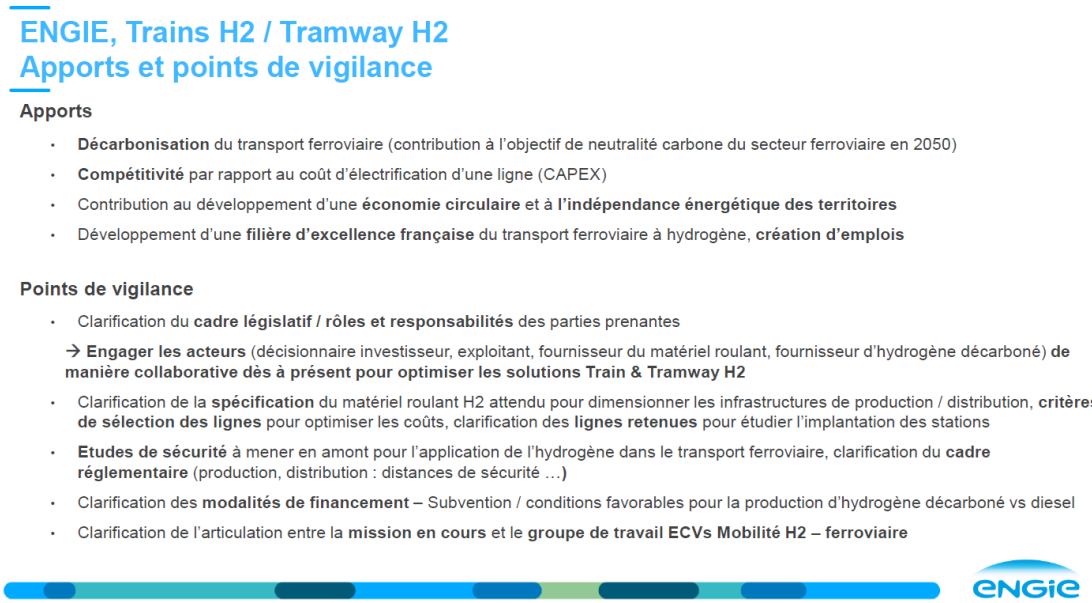

Illustration 3 : points de vigilance en matière de production et distribution d'hydrogène (source : Engie)

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* allemand 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. C'est le sujet de la pollution locale et de la santé publique qui ont pressé 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 qu'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 infractructures 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 Regiolis 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 CO_2 au niveau mondial.

- Concernant le bioGNV, le sujet principal est l'absence de filière qui permette d'avoir du bioGNV) 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 adaaptés 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 Regiolis 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.

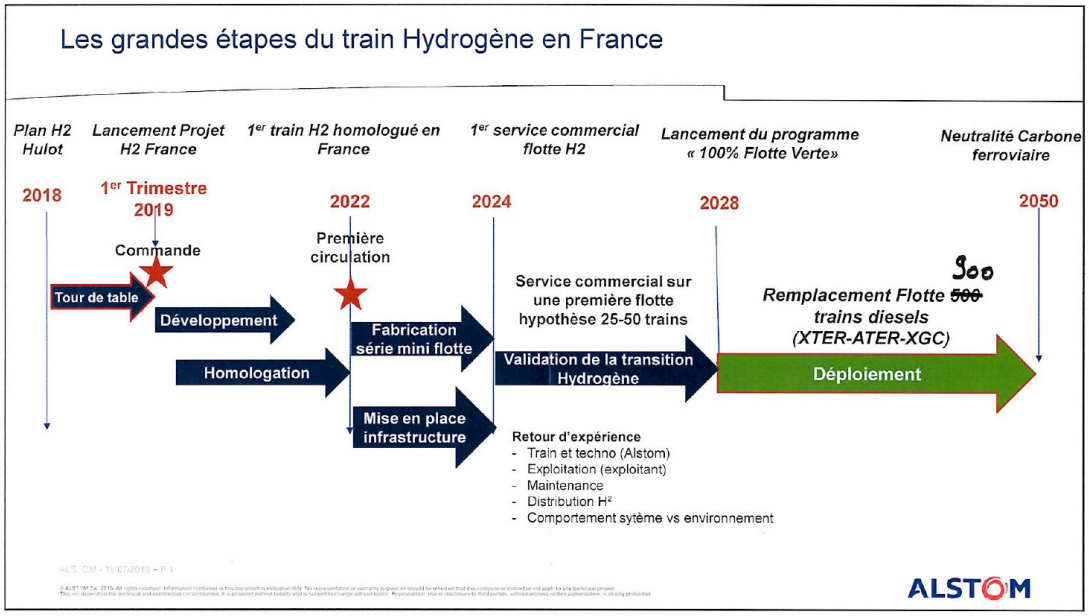

Illustration : planning d'étude et de déploiement du train à hydrogène en France selon Alstom (source : Alstom)

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

Pour la SNCF, le déploiement des trains à hydrogène ne devrait pas intervenir avant au mieux 2030-2035. Cet horizon correspond au 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 ne sont pour l'instant pas la priorité 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* (CO_2, 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 parvenue à maturité. 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 envisage le déploiement des trains à hydrogène uniquement à partir de 2030 ou 2035, avec éventuellement la circulation d'un prototype vers 2025. Le déploiement pourrait correspondre à la fin de vie des packs de batteries sur les trains hybrides dont la durée de vie est estimée à 7 ou 10 ans, et qui pourraient alors être remplacés par des packs H_2.

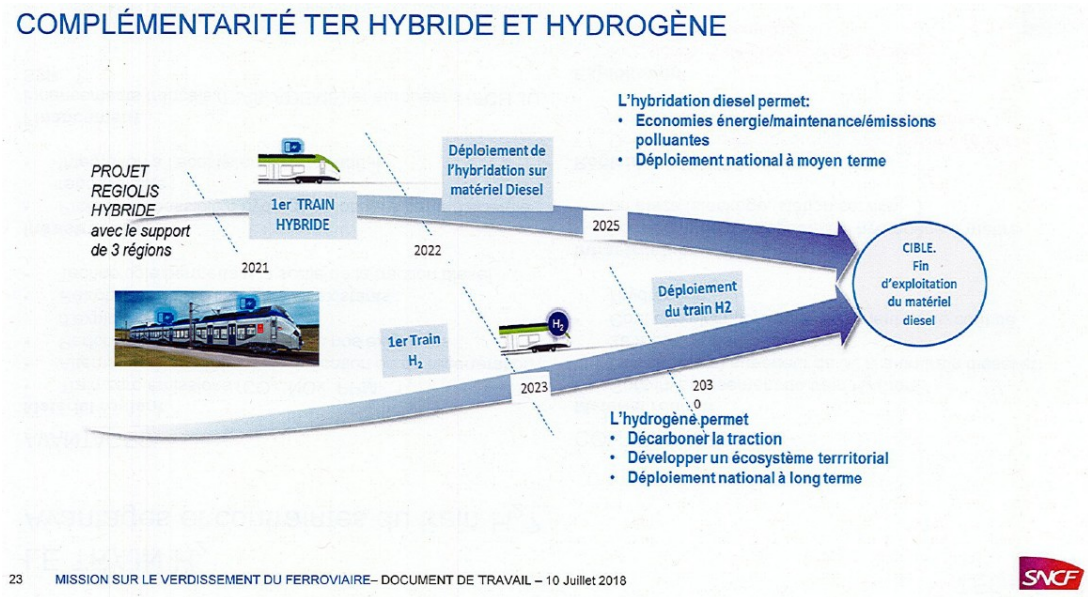

Illustration 1 : déploiement des technologies Hybride et Hydrogène pour les TER selon la SNCF (source : SNCF)

9.2. Des contraintes qui l'emportent actuellement sur les avantages

Les avantages du train H_2 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 H_2 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 H_2 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.

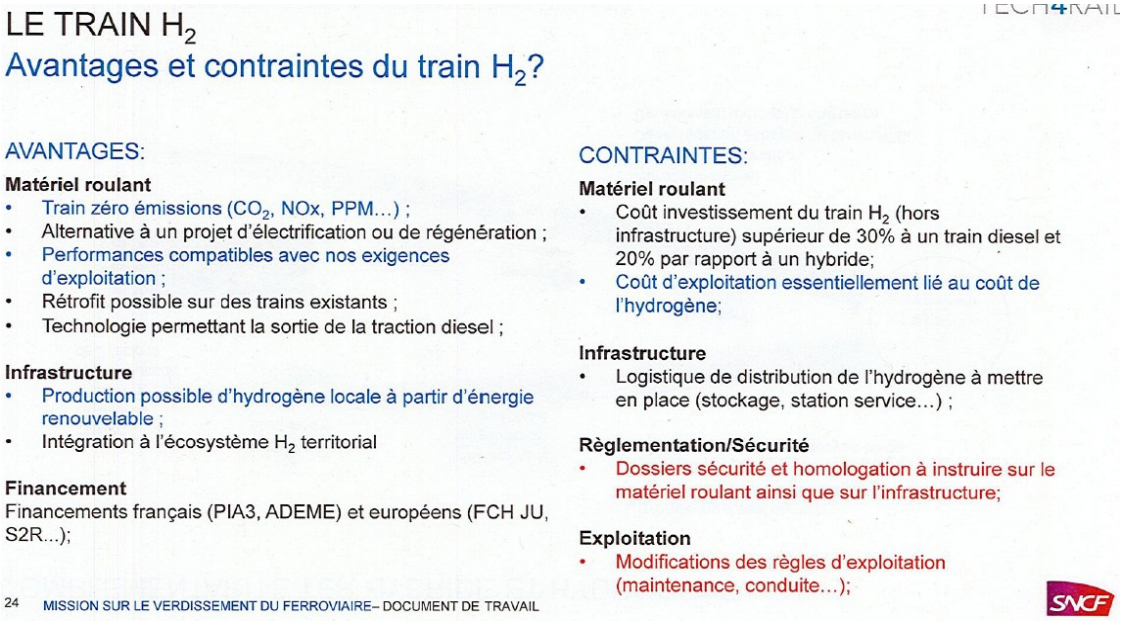

Illustration 2 : avantages et inconvénients du train H_2 selon la SNCF (source : SNCF)

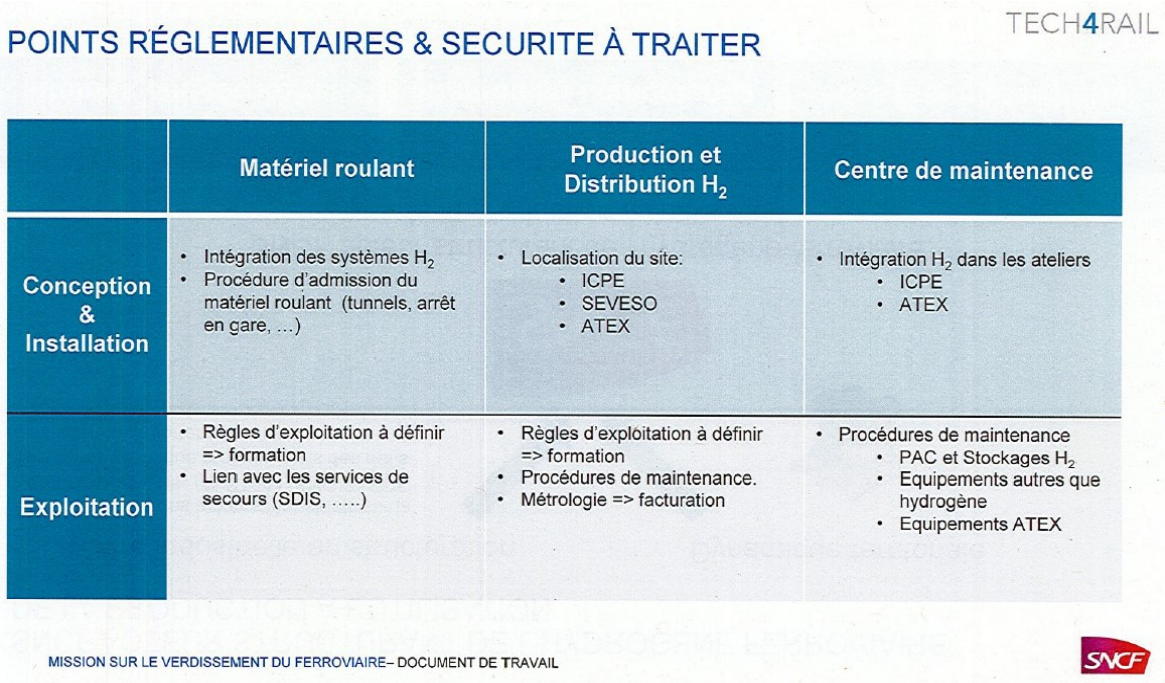

Illustration 3 : questions préalables à dénouer selon la SNCF (source : SNCF)

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 nécessite[22]. 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.

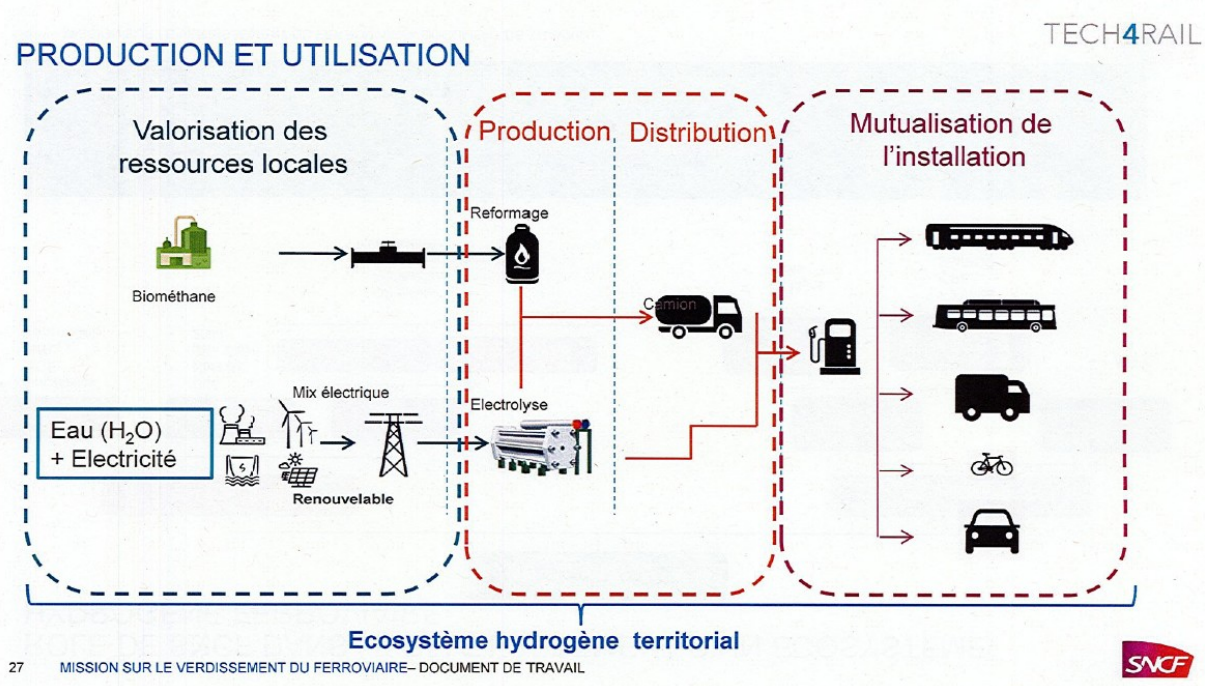

Illustration 4 : construction d'un écosystème territorial pour l'hydrogène selon la SNCF (source : SNCF)

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.

[22] 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. 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 (en platine) qui accélèrent les réactions entre les gaz.

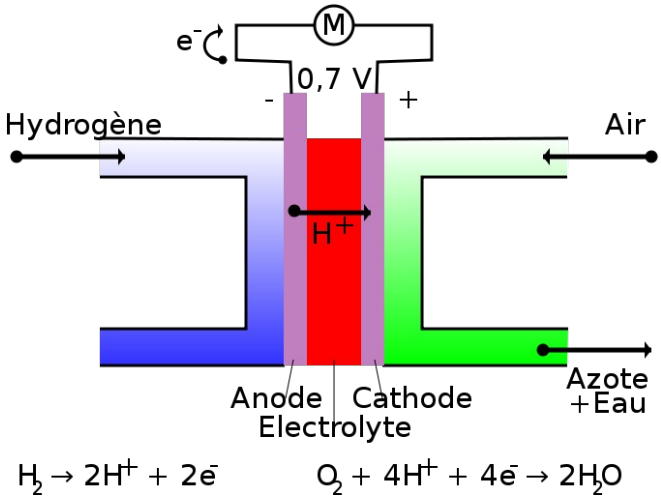

Illustration 1 : schéma de principe d'une pile à combustible

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 (H2) 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 2015[23]) :

- 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.

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

[23] étude de France Stratégie

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.

11. 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 intégrant une taxe CO_2 de 86,2 €/tonne, la parité H_2 est atteinte avec un prix au kilogramme de 2,03 €. En tenant compte du rendement des moteurs thermique (40 %) et du moteur électrique, la parité au gazole de l'hydrogène (60 %) se situe plus vraisemblablement vers 3 €.

11.1. 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 (H_2O). 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 thermochimique 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 CO_2 par kg d'H_2 produit (41 % de la production nationale),
- puis vient l'oxydation partielle des hydrocarbures, émettant 13 kg de CO_2 par kg d'H_2 produit (40 % de la production nationale)
- enfin la gazéification du charbon peut générer près de 20 kg de CO_2 par kg d'H_2 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'hydrolyse 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'hydrolyse, 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'hydrolyse sont aujourd'hui à maturité : l'hydrolyse alcaline de l'eau utilisant une anode et une cathode dans un bassin, et l'hydrolyse par membrane à échange de protons[24] (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'hydrolyse 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

[24] dite PEM (*Proton Exchange Membrane*)

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 optimisé pour amortir le coût d'investissement, que de façon marginale.

Selon ÉDF, dans le cadre de son audition lors de la mission, un électrolyseur du mode alcalin de 50 MW, alimenté en électricité du mix français[25], 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 approvionner une cinquantaine de TER.

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

11.2. 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).

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

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 demeurent marginaux.

Le tableau ci-dessous donne les coûts tels que reconstitués dans le cadre de la mission, sur la base d'un compresseur de 750 Nm^3/h (23 kg/heure), d'un système de stockage de 1 000 kg (soit 4 pleins pour un train consommant 0,25 kg H_2/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)[26] :

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 : Ilustration 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'Afhypac)

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 ou 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 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.

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

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 er 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.

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

D'un point de vue économique, le financement de l'électrification du 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 élevées 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'opportunité 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 liés 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.

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

12.1.1. 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 électrifiés 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 rentablilité économique ou socio-économique est insuffisante.

Nouvelles Régions	Projet	Coût Total	Etat	Région	Départements	Union Européenne	Autre Financeur Non-Specifie	Autres Financeurs	Sncf	Sncf 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 : dégaement 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 de 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.

12.1.2. 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.

12.1.3. Les financements communautaires

12.1.3.1. 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 passagerset 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.

12.1.3.2. 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 émarger, pour les territoires européens, à ce dispositif.

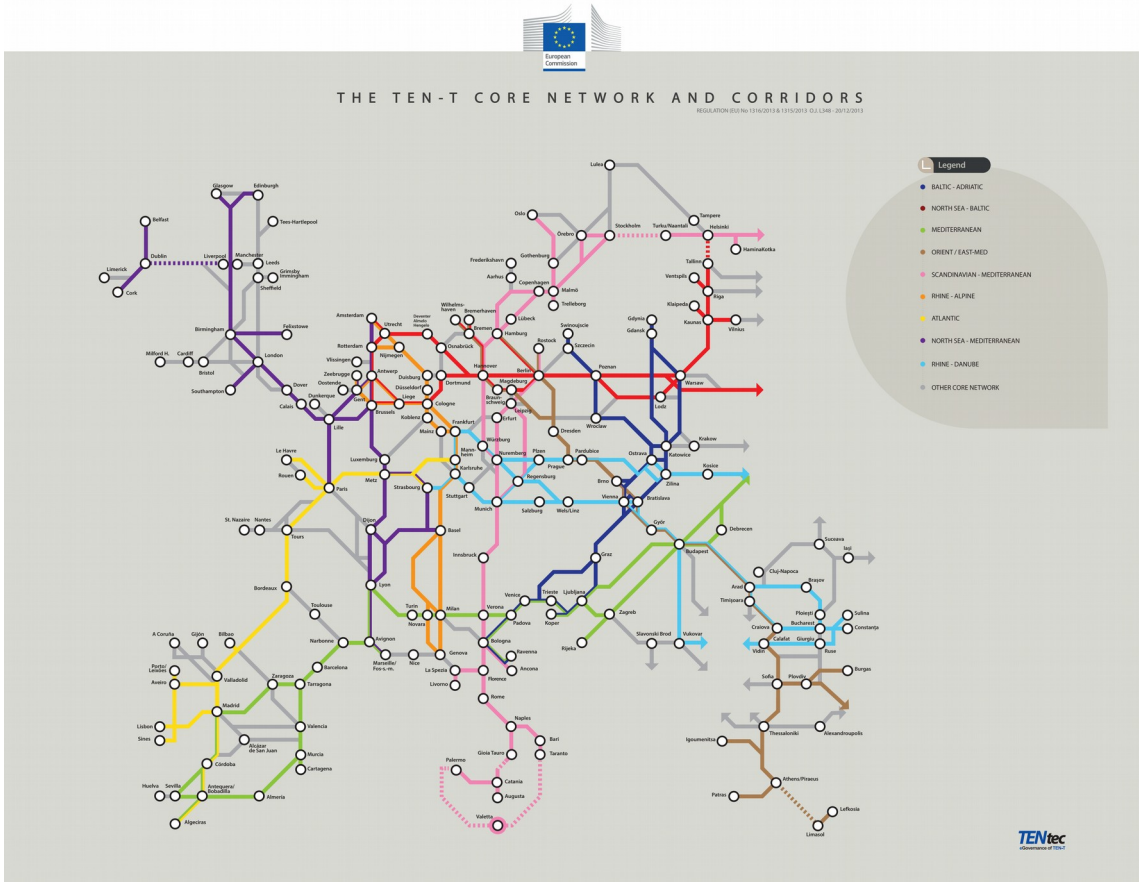

Illustration 3 : carte des réseaux européens (source : UE)

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

La BEI et la CDC n'ont pu être entendues à ce stade de la mission. Mais l'on sait combien sont importants pour la filière de l'hydrogène les financements d'infrastructures innovantes afin de réussir la transition énergétique. 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 cs 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 hydrogène[27].

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

12.2. 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 évoqués 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'hydrogène[28],
- 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 habituellementdans 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 pouvoir renvoyer notamment aux dispositifs du plan hydrogène du gouvernement.

[28] 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.

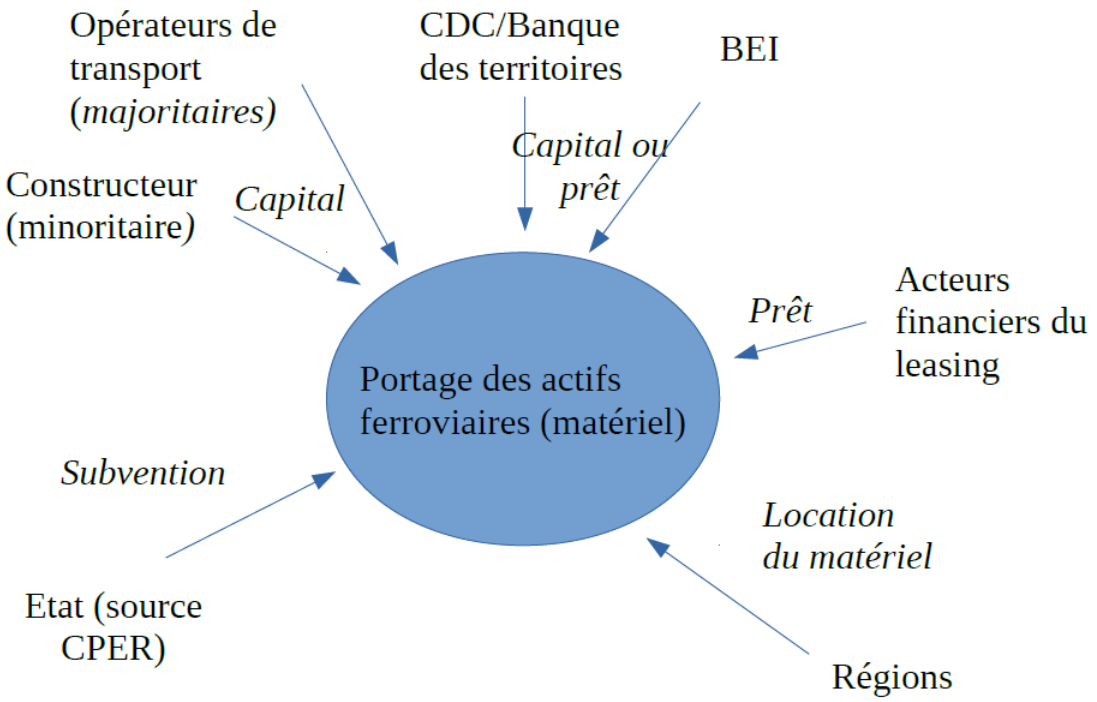

Illustration 4: schéma de principe du financement (source : mission)

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.

13. 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 Dubai (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).

14. 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 transporstset 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 transports et la mobilité	04/09/18

Nom	***Prénom***	***Organisme***	***Fonction***	***Date de rencontre***
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

15. Glossaire des sigles et acronymes

Signes et acronymes	***Signification***
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

Site internet du CGEDD : « Les derniers rapports »