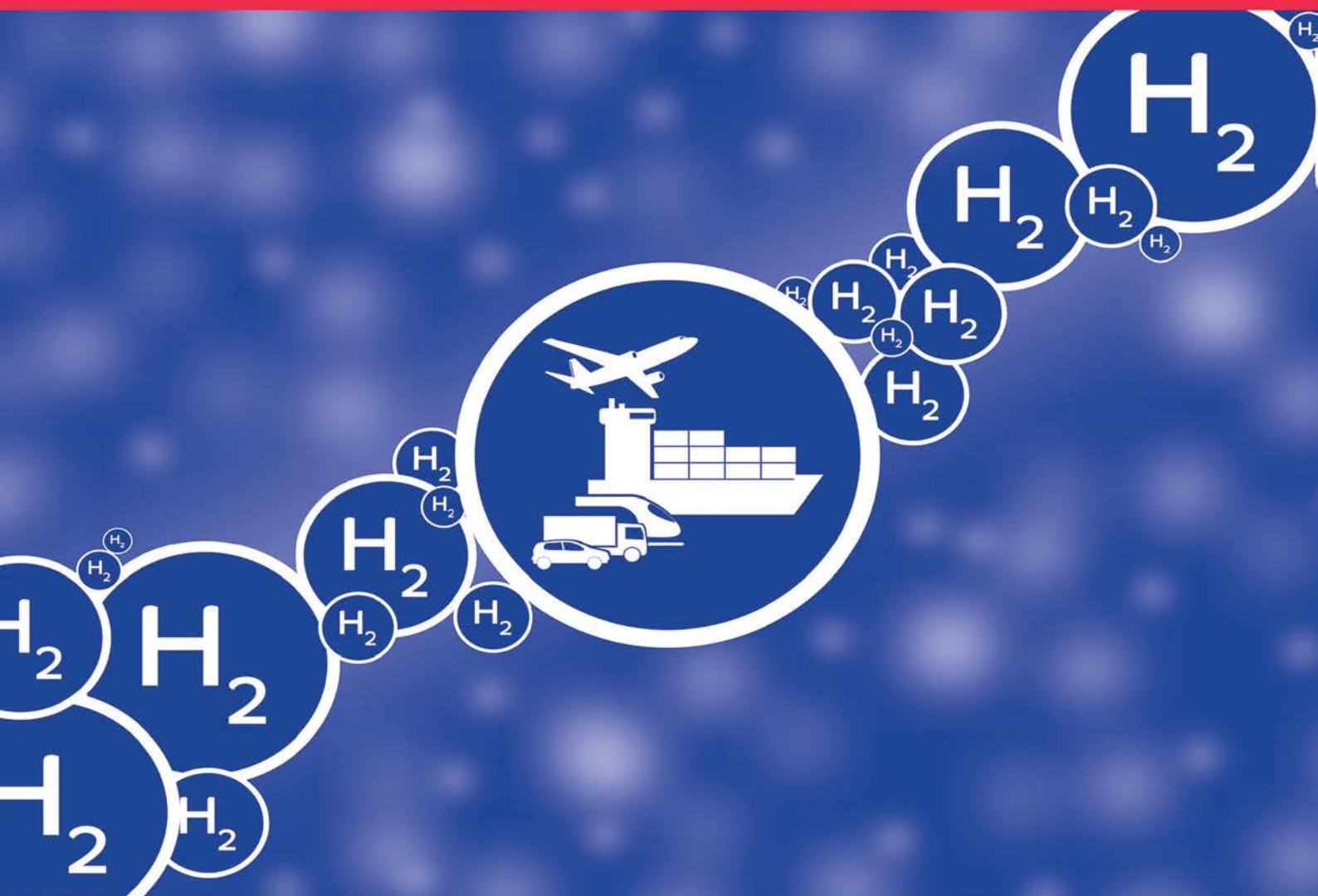


RÉALITÉS INDUSTRIELLES

« Se défier du ton d'assurance qu'il est si facile de prendre et si dangereux d'écouter »
Charles Coquebert, Journal des mines n°1, Vendémiaire An III (septembre 1794)



Hydrogène et décarbonation

UNE SÉRIE DES
ANNALES
DES MINES

FONDÉES EN 1794

NOVEMBRE 2022

Publiées avec le soutien
de l'Institut Mines Télécom

Hydrogène et transport de marchandises par camions

Par Jean-Pierre HAUET

Président du comité scientifique d'Équilibre des énergies

Et Servan LACIRE

Directeur R&D et Innovation de Bouygues Énergies & Services et vice-président du groupe Énergies durables Centrale Supélec

L'hydrogène d'origine électrolytique est susceptible de concourir, aux côtés de l'usage direct de l'électricité, à la décarbonation de l'économie. Le marché des transports professionnels, aussi bien routiers que ferroviaires ou maritimes, est souvent cité comme un débouché potentiel important de l'hydrogène. Une étude réalisée par Équilibre des énergies a évalué le marché potentiel des transports routiers de marchandises et analysé les infrastructures à mettre en place aux horizons 2030 et 2050 pour que ce marché puisse se développer. Celle-ci montre que le marché de l'hydrogène destiné aux camions peut s'ouvrir si des corridors de l'hydrogène sont mis en place au niveau transeuropéen. Mais la concurrence avec les systèmes de route électrique est à prendre en considération.

Comment décarboner le secteur des poids lourds ?

En 2019, les poids lourds ont été à l'origine d'émissions de CO₂ évaluées à 31,5 Mt – dont 98,7 % en provenance des moteurs diesel –, soit 24,7 % des émissions totales du transport routier. Leur décarbonation représente donc un enjeu important, mais, alors que l'option de la mobilité électrique à batteries tend à s'imposer pour les véhicules particuliers et les véhicules utilitaires légers, aucune option ne se dégage actuellement de façon nette pour les poids lourds.

La filière du gaz naturel véhicule (GNV) est mature et de nombreux camions utilisant ce carburant circulent aujourd'hui. Mais le gaz naturel ne permet de réduire les émissions de CO₂ que de 10 à 15 %. Le gaz renouvelable (bioGNV) pourra prendre le relais mais les ressources en sont limitées et les usages du biogaz dans les transports routiers viendront en compétition avec d'autres utilisations. La biomasse agricole, celle issue des cultures intermédiaires en particulier, risque de devoir être réservée prioritairement à la production de carburants durables pour l'aviation (les SAF, ou *sustainable aviation fuels*). Le gaz jouera donc un rôle certain dans la décarbonation des transports, mais il ne semble pas que ce rôle puisse devenir majoritaire⁽¹⁾.

La filière des poids lourds électriques à batteries est en développement. Elle tire parti des progrès très importants réalisés sur les batteries Li-ion destinées aux

véhicules légers ; des modèles de camions électriques à batteries sont en outre déjà disponibles. Tous ont des caractéristiques relativement voisines (voir la Figure 1 ci-après) :

- un poids total en charge allant de 16 à 26 tonnes ;
- un ou deux moteurs d'une puissance totale allant de 100 à 250 kW ;
- un ou plusieurs packs de batteries d'une capacité totale allant de 100 à 200 kWh ;
- une autonomie s'échelonnant de 80 à 250 km ;
- des temps de recharge de l'ordre de 1 à 2 heures au moyen de bornes au standard européen Combo CCS 2.



Figure 1 : Camion électrique e-TGM de 26 t de PTAC – Source : MAN (Group Volkswagen).

Ces véhicules électriques à batteries sont bien adaptés aux transports régionaux, avec un retour à leur base en fin de journée. Leur compétitivité ira en s'accroissant avec la baisse attendue du prix des batteries qui bénéficiera du développement de celles équipant les véhicules légers.

⁽¹⁾ Le cabinet Carbone 4 « Transport routier, quelles motorisations alternatives pour le climat ? », novembre 2020) estime que, dans une hypothèse optimiste, le biométhane ne pourra répondre qu'à 24 % de la demande de transport lourd à horizon 2050.

Cependant, l'extrapolation des solutions batteries vers des tonnages plus importants (44 t) et les très longs trajets (à un ou deux conducteurs) fait débat. D'un côté, le tonnage des batteries à embarquer pour assurer une autonomie de plusieurs centaines de kilomètres et le temps de recharge de celles-ci peuvent venir pénaliser la rentabilité de l'exploitation. D'un autre, le poids des pièces retirées du véhicule thermique viendra en grande partie compenser celui des batteries, et le temps de recharge pourrait correspondre à la pause de 45 mn obligatoire après 4 h 30 de conduite, surtout si des chargeurs de 600 kW et plus sont développés. Un standard de Megawatt Charging System est d'ailleurs en cours de développement dans le cadre du consortium CharIN. Cependant, le déploiement de bornes de recharge fonctionnant sous 1 250 V et 1 000 A reste un défi. Par ailleurs, le recours à des batteries de plusieurs tonnes pose le problème des matériaux nécessaires à leur fabrication.

Il existe aujourd'hui deux voies permettant de s'affranchir de ces difficultés :

- les solutions de route électrique (ERS : *Electric Road Systems*), qui ne sont pas traitées dans cet article. Parmi celles-ci, les systèmes par rail ou par induction nous semblent les plus prometteurs ;
- le recours à l'hydrogène.

La solution électrique à hydrogène peut en effet constituer une réponse aux interrogations que soulève l'extrapolation des solutions batteries. L'hydrogène est en effet un vecteur énergétique décarboné qui peut être stocké dans des réservoirs que l'on peut remplir en quelques minutes. Si la mise en œuvre de la filière hydrogène se heurte à des difficultés qui font douter fortement de son avenir dans le cas des voitures particulières, ces mêmes obstacles semblent plus facilement surmontables dans le cas des transports professionnels.

Sur le plan technologique et industriel, la filière Mobilité lourde à l'hydrogène est en retard d'une bonne dizaine d'années par rapport à la filière électrique à batteries. L'état de l'art se résume aujourd'hui à quelques opérations pilotes, telles que celle des camions Hyundai opérant en Suisse (voir la Figure 2 ci-dessous). Mais des progrès importants sont en vue, avec à la clé des baisses de prix majeures.

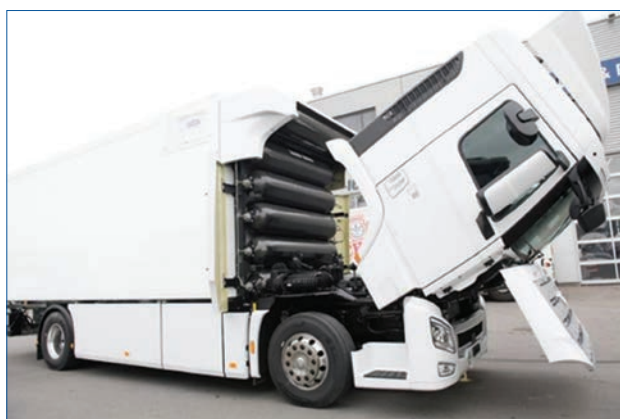


Figure 2 : Camion Hyundai fonctionnant à l'hydrogène – Source : Hyundai.

Les électrolyseurs de grande capacité (avec la production d'un hydrogène d'une pureté correspondant à celle exigée pour les piles à combustible) passeront, pour les équipements de grande capacité, de 1 000 €/kW en 2020 à 375 €/kW en 2050. Sur la même période, le prix des piles à combustible devrait passer de 205 €/kW à 82 €/kW.

Le stockage de l'hydrogène à 700 bars se généralisera avant 2030 (au lieu de 350 bars actuellement) et les prix des réservoirs passeront de 630 €/kW en 2020 à 250 €/kg d'H₂ en 2050. Les camions de transport de l'hydrogène verront alors leur capacité d'export portée de 450 à 1 200 kg dès 2030.

Les rendements iront en s'améliorant, passant pour l'électrolyse comme pour les piles à combustible de 50 % en 2020 à 60 % en 2050.

Cependant, il n'est pas acquis que ces progrès très importants soient suffisants pour convaincre les transporteurs de migrer vers l'hydrogène. Ce dernier présente des handicaps qui peuvent s'avérer rédhibitoires :

- un rendement énergétique de la filière relativement faible, lié à la combinaison entre eux de ceux de l'électrolyse et de la pile à combustible ;
- un volume de stockage qui, même à 700 bars, reste huit fois supérieur à celui du gazole ;
- des règles d'utilisation, comme l'interdiction d'emprunter certains tunnels, qui peuvent limiter l'usage fait des véhicules si des solutions ne sont pas trouvées pour lever ces obstacles.

Poids lourds électriques batteries ou poids lourds électriques à hydrogène : le match est indécis

Dans ce contexte, deux scénarios nous sont apparus plausibles :

- un scénario « Haut », dans lequel l'hydrogène s'impose à hauteur de 65 % dans le segment de marché où il semble le mieux adapté, celui des transports de marchandises sur longues distances, notamment dans les transports transeuropéens ; le solde se partageant entre le bioGNV et l'électrique à base de batteries. Dans ce scénario, l'hydrogène prend en parallèle une part de marché de 10 % dans les transports couvrant des distances de moins de 150 km et de 30 % dans les transports sur des distances de 150 à 500 km.
- un scénario « Bas », dans lequel l'hydrogène ne parvient pas à s'imposer de façon majoritaire. Sa part de marché dans les transports sur les distances de plus de 500 km plafonne à 25 % et à 5 % et 10 % dans les deux autres segments de marché.

Dans les deux cas, la croissance n'est pas linéaire et, en 2030, la pénétration de l'hydrogène reste limitée compte tenu des délais de mise en place des infrastructures et de migration des flottes de camions vers l'hydrogène.

En tenant compte de l'évolution du trafic et du progrès technique, ces hypothèses conduisent aux consommations prévisionnelles du Tableau 1 ci-après. Elles impliquent une puissance installée en électrolyseurs allant de 270 à 575 MW en 2030. Rappelons que le plan Hydrogène du gouvernement français prévoit une puissance installée de 6 500 MW dès 2030.

L'équation économique

L'hydrogène pour les poids lourds ne se développera que s'il parvient jusqu'au réservoir du camion à un prix compétitif. Trop d'études se limitent à mettre en évidence pour l'hydrogène un problème de production, dont résulterait la nécessité de construire à grande échelle des électrolyseurs au risque de ne pas trouver de marché pour l'hydrogène qui sera produit.

La question est complexe. L'hydrogène doit tout d'abord être produit et il existe pour ce faire plusieurs filières possibles. Outre une production au niveau local, il peut également être importé. Dans tous les cas, le degré de pureté nécessaire à son utilisation pour les piles à combustible doit être respecté.

Se pose ensuite la question de son transport éventuel, par camions ou par *pipelines* spécifiques à l'hydrogène (hydrogénoducs).

Enfin, il doit être distribué à la bonne pression pour servir au remplissage des réservoirs des camions. Cela implique des installations de stockage et de

distribution, et, éventuellement, de compression ; autant d'infrastructures qui ont un impact significatif sur les rendements et les coûts.

L'étude identifie trois circuits de ravitaillement pour les camions :

- des *hubs* régionaux de grande capacité (de une à plusieurs centaines de MWe) desservant divers marchés (industrie, transports en commun, transport de marchandises et, éventuellement, injection d'hydrogène dans le réseau de gaz naturel) ;
- des stations décentralisées accessibles au grand public, mais avec des capacités beaucoup plus réduites (typiquement de 5 à 20 MWe) et correspondant :
 - soit à des « mini-hubs », c'est-à-dire des stations de production multi-usages (transports en commun, véhicules de service, taxis...), qui seront le plus souvent déployées sous l'égide de collectivités locales ;
 - soit des stations destinées à la recharge itinérante : elles seront situées le long des grands axes de circulation ou installées à proximité des lieux de vie. Ces stations pourront être approvisionnées à partir des *hubs* précités ou dotées de moyens de production propres ;
- des stations installées dans des espaces spécifiques aux transporteurs, notamment dans les dépôts, là où les poids lourds rentrent tous les soirs. Ce sont des installations de puissance comparable à celle des stations décentralisées précitées.

	Scénario Haut		Scénario Bas	
	2030	2050	2030	2050
Besoins en hydrogène (TWh H ₂)	2,5	17,6	1,2	6,7
Consommations d'électricité pour l'électrolyse (TWh)	5,7	36,8	2,8	13,9
Besoins de puissance installée en électrolyseurs (MW)	575	3 850	270	1 400

Tableau 1 : Électricité et puissance électrique nécessaires pour satisfaire les besoins en hydrogène.

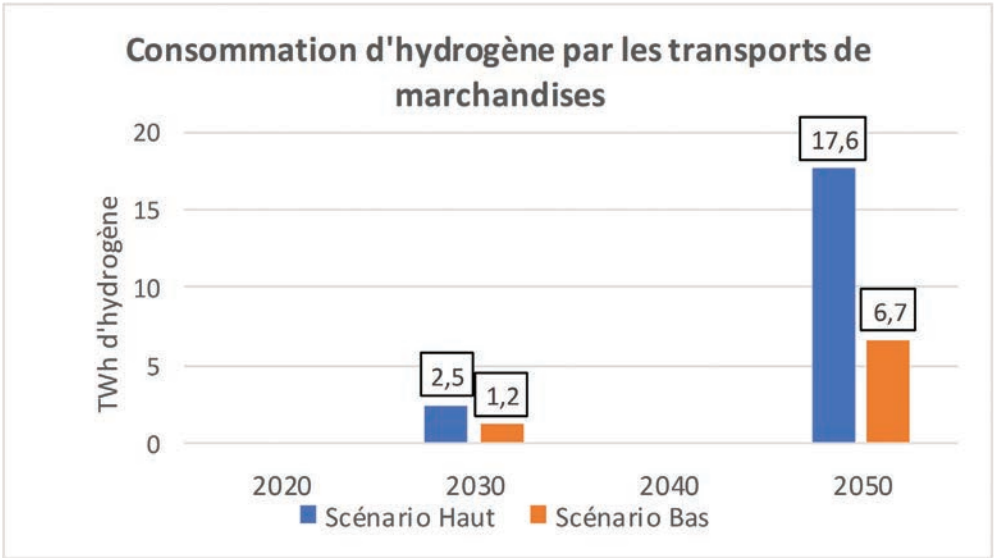


Figure 3 : Perspectives de consommation d'hydrogène par le transport routier de marchandises dans les scénarios Haut et Bas.

Des hypothèses ont été faites sur la durée de vie des divers équipements et sur l'évolution de leurs prix. Les facteurs essentiels sont le prix des électrolyseurs et surtout celui de l'électricité. Il est supposé que les *hubs* régionaux pourront être alimentés en électricité à un prix moyen de 60 €/MWh (HTVA)⁽²⁾, ils fonctionneront en base et pourront être interruptibles en cas de tension sur les réseaux ; ils afficheront un taux moyen de disponibilité de 90 %. Les stations décentralisées devront cependant accepter un prix de l'électricité plus élevé, estimé à 75 €/MWh (HTVA).

Le prix de revient de l'hydrogène produit dans les *hubs* pourrait alors passer d'environ 7,0 €/kgH₂, dans les conditions 2020, à 4,9 €/kg en 2030, voire moins pour des *hubs* adossés à des sources d'électricité renouvelables bon marché. Dans les stations décentralisées de 10 MWe, le prix de revient passerait de 8,9 €/kg (conditions 2020) à 6,2 €/kg en 2050. À noter cependant, qu'il pourrait s'avérer plus avantageux, jusqu'à une certaine distance et pour de petits volumes, d'approvisionner les stations par camions à partir d'un *hub*. Les seuils de basculement vers une production locale ont été estimés, dans les conditions 2030, à 150 km et 1 200 kgH₂/jour, correspondant à 3,3 MWe, soit un camion de ravitaillement par jour.

Ces perspectives seront-elles suffisantes pour provoquer la migration du transport routier de marchandises vers le vecteur hydrogène ? Des calculs complets relatifs aux coûts totaux de possession ont été réalisés pour la filière électrique hydrogène ainsi que pour la filière électrique batteries, en prenant, comme référence, la filière diesel. Les résultats moyennés sur la base de la répartition du trafic entre les différents modes de ravitaillement listés précédemment sont résumés dans le Tableau 2 ci-après.

Ces résultats montrent que pour les transports régionaux (moins de 500 km), la filière électrique à batteries restera la mieux placée, et ce quel que soit

l'horizon de temps ; à l'exception, cependant, de cas d'usage pour lesquels l'hydrogène aurait un avantage concurrentiel marqué, tel qu'une utilisation 24h/24. Cette filière bénéficiera de la baisse du prix des batteries et de la mise en place en masse des infrastructures de recharge associées au développement de la mobilité électrique pour les véhicules légers.

Pour les longues distances, le camion à hydrogène peut s'imposer si la mise en place des électrolyseurs et des premières installations de distribution bénéficie de subventions et si le coût de l'électricité utilisée pour produire l'hydrogène reste modéré. Mais l'écart ne sera pas forcément décisif : la filière batteries et la filière hydrogène présentent toutes deux des avantages et des inconvénients ; il est possible qu'en fonction des politiques publiques et des percées technologiques réalisées, l'une ou l'autre des deux solutions parvienne à s'imposer. Cela justifie de faire le choix, *a posteriori*, entre les deux scénarios « Haut » et « Bas », sans qu'il soit possible de dire aujourd'hui, lequel l'emportera.

L'écosystème hydrogène et le problème des infrastructures

L'hydrogène, à la différence de l'électricité, n'est pas une forme d'énergie d'application universelle. Son usage est assujéti à de fortes contraintes ; son développement doit donc être organisé par filière en prenant en compte toutes les infrastructures nécessaires pour le produire, le transporter, le stocker, le distribuer et l'utiliser.

Dans le cas des poids lourds, les entreprises de transport n'investiront dans l'hydrogène que si les infrastructures nécessaires sont disponibles ou en passe de l'être. Une partie d'entre elles sera de leur responsabilité : ce sont les installations de production et de stockage susceptibles d'être construites sur leurs propres sites. Elles pourraient assurer 25 % de l'approvisionnement en 2030 et 40 % en 2050.

Le complément sera apporté par les *hubs* et par les stations décentralisées (les mini-*hubs* ou les stations de distribution installées le long ou à proximité des voies rapides et des autoroutes). Leur nombre à

En €/km	Trafic régional			Trafic longues distances		
	2020	2030	2050	2020	2030	2050
Camions diesel	0,666	0,784	-	0,614	0,657	-
Camions électriques à batteries	0,719	0,527	0,499	1,101	0,783	0,740
Camions à hydrogène	0,978	0,787	0,696	0,926	0,793	0,631

Tableau 2 : Évolution du coût total de possession en €/km pour les différentes motorisations. Dans chaque colonne, la case correspondant à la solution la plus économique a été tramée en rose. Il est supposé que la filière diesel sera mise en extinction par voie législative d'ici à 2050.

l'horizon 2050 se situera entre 30 et 100 stations. Si le scénario Haut s'impose, les stations-services dédiées à l'hydrogène se généraliseront et pourront assurer un ravitaillement tous les 100 km au plus. Si le scénario Bas l'emporte, ces stations seront alors localisées uniquement le long des axes les plus fréquentés (voir la Figure 4 ci-après).

C'est sur ces axes qu'il faut concentrer en priorité l'effort de développement. Une étude approfondie d'un ensemble de tronçons autoroutiers de plus de 750 km faisant partie du réseau des Autoroutes du Sud de la France et à fort trafic de poids lourds (trafic régional, national et international) a été réalisée. Il a été tenu compte de la souplesse qu'offre, en phase de démarrage, la possibilité d'alimenter les stations-services à partir des *hubs*. Le nombre, l'importance et le positionnement de ces stations ont été déterminés en fonction de l'évolution du trafic et de façon à éviter des files d'attente trop longues en station.

Un des avantages majeurs de l'hydrogène est la progressivité qu'il offre au regard du déploiement des stations, ce que l'on ne retrouve pas avec d'autres solutions comme l'ERS. L'étude précitée a montré qu'il était possible de bâtir des schémas de développement progressifs et réalistes des infrastructures de production et de distribution de l'hydrogène, en soulignant le fait qu'à terme la plupart des stations comporteront leurs propres moyens de production desservis par le réseau de distribution ou le réseau de transport de l'hydrogène (voir la Figure 5 de la page suivante). Le réseau électrique jouera un rôle essentiel dans ce développement. C'est en effet grâce à lui qu'un schéma d'équipement progressif des grands axes de circulation peut être élaboré. C'est la raison pour laquelle, hormis pour les réseaux locaux propres à chaque *hub*, n'a pas été retenue l'hypothèse d'un réseau de distribution de l'hydrogène alimentant les stations. Un tel réseau nécessiterait un gros effort d'investissement,

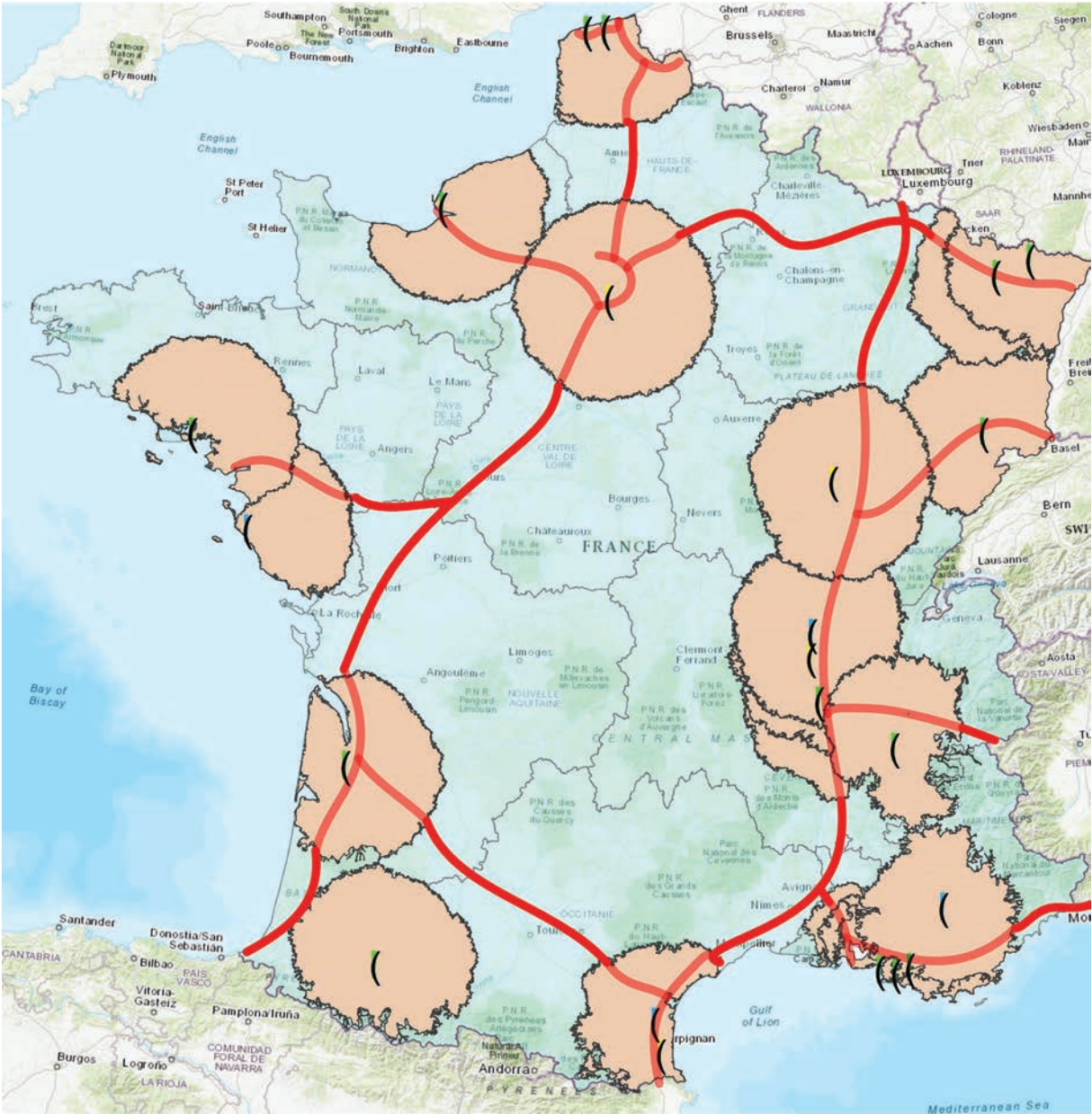


Figure 4 : Zones de desserte potentielle à partir des *hubs* hydrogène et segments d'autoroute à desservir de façon prioritaire par des stations décentralisées (Nota : le positionnement des *hubs* résulte d'informations communiquées par France Hydrogène).



Scénario Haut à horizon 2030.



Scénario Haut à horizon 2050.



Scénario Bas à horizon 2030.



Scénario Bas à horizon 2050.

Figure 5 : Schémas de développement possible d'un réseau de stations hydrogène le long des autoroutes du sud de la France.

sans rentabilité immédiate, alors que le réseau électrique est déjà en place, quitte à le renforcer lorsque cela s'avérera nécessaire.

La migration vers l'hydrogène ne se fera pas sans une coordination forte. Par ailleurs, la route électrique reste en embuscade

On a vu que l'avantage économique des solutions hydrogène est fragile, même pour le trafic sur longues distances. Ces solutions nécessiteront des investissements en infrastructures importants que l'étude a évalués, en scénario Haut, à 2,5 milliards d'euros sur quinze ans. Ces investissements devront être soutenus à hauteur d'environ 1 milliard d'euros par les pouvoirs publics (l'État, les régions et l'Europe). En parallèle, l'hydrogène devra bénéficier, en termes d'approvisionnement en électricité, d'une exemption au regard de la taxe intérieure (droit d'accise sur l'énergie).

Mais surtout, ces investissements devront être coordonnés, encore plus que ce que l'on s'efforce de faire pour les stations de recharge rapide des véhicules électriques disséminées le long des autoroutes.

Il est donc recommandé que, dès à présent, soit mise en chantier l'élaboration de schémas directeurs d'implantation des installations de production et de distribution de l'hydrogène destiné aux poids lourds. Des formules de concessions ou de partenariats public-privé devront être imaginées, car il est peu probable que l'investissement privé soit suffisamment enclin à anticiper une demande qui mettra plusieurs années à se développer.

Ces schémas directeurs devront être conçus dans une vision européenne, le marché visé étant pour une grande part celui des grands flux de fret routier européens. Dans cette optique, un choix difficile devra sans doute être fait entre la solution hydrogène et l'une ou l'autre des solutions de route électrique. Peut-on en effet envisager de réaliser une double infrastructure permettant de supporter deux solutions qui seront, s'agissant des poids lourds, en concurrence ? Les éléments dont nous disposons sur la route électrique sont encore insuffisants pour nous prononcer.

Pour progresser sur l'hydrogène, nous proposons que soit portée au niveau européen l'idée de la création de corridors, ce qui consisterait à implanter des installations de recharge en priorité sur les grands axes empruntés par les grands transporteurs européens. Cette réflexion devrait s'inscrire dans le cadre des travaux portant sur

le réseau transeuropéen RTE-T, avec comme objectif de permettre aux sociétés de transport d'investir à leur tour dans des camions à hydrogène dès que ceux-ci seront disponibles sur le marché et d'amorcer ainsi la migration des transports lourds vers la solution hydrogène.

Le projet de règlement AFIR (Alternative Fuels Infrastructure), proposé le 14 juillet 2021 par la Commission européenne, va dans ce sens, puisqu'il prévoit l'obligation pour les États membres de l'Union européenne d'équiper le réseau transeuropéen de transport de stations de distribution d'hydrogène espacées au plus de 150 km et offrant une capacité de délivrance de 2 t/jour d'hydrogène gazeux comprimé à 700 bars. Il préconise également que chaque nœud urbain soit doté d'une station de distribution d'hydrogène.

Remerciements

Ont contribué au recueil d'informations et aux discussions : Air Liquide, Faurecia, France Hydrogène, FM Logistic, FNTR, LHYFE, Plastic omnium, RTE, STEF, Volkswagen Group France ainsi que la Commission de régulation de l'énergie (groupe Prospective). Toutefois, les conclusions de l'étude telles que restituées dans cet article n'engagent que ses auteurs.

Une synthèse de l'étude est disponible en ligne sur le site d'Équilibre des énergies à l'adresse suivante : www.equilibredesenergies.org