

DÉCIDER AVEC LES SCIENCES



RAPPORT DES ATELIERS



Prix
Démarche
scientifique

QUELLE PLACE POUR L'HYDROGÈNE DANS LA MOBILITÉ DURABLE ?

PROMOTION ELINOR OSTROM
Cycle national 2018 - 2019

AUDITRICES ET AUDITEURS DE L'ATELIER

Laurent BAUDART, fondateur, La Compagnie Baudart

Stéphane BERGAMINI, directeur du transfert de technologie, Société d'accélération du transfert de technologies (SATT) Sud-Est

Vincent BRUNIE, directeur de la recherche, de l'innovation, de la valorisation et de la formation doctorale, Université Paris-Diderot

Marie Françoise CROUZIER, cheffe de la Mission de la pédagogie et du numérique pour l'enseignement supérieur, Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation (MESRI)

Tamer EL AÏDY, chargé de mission numérique, Les Petits Débrouillards

Edouard GEOFFROIS, responsable de programmes internationaux et de challenges, Agence nationale de la recherche (ANR)

Fabienne MARTIN-JUCHAT, professeure des universités, chargée de mission valorisation des SHS, vice-présidence recherche, responsable de la maison de la création et de l'innovation, Université Grenoble-Alpes

Alice RENE, responsable de la Cellule réglementation bioéthique et chargée de mission Éthique scientifique, Centre national de la recherche scientifique (CNRS)

Cécile TOURNU-SAMMARTINO, directrice du département Développement des ressources humaines, Institut national de la recherche agronomique (INRA)

Benoît VINNEMANN, colonel, inspecteur chargé d'études et de mission, Inspection générale de la Gendarmerie Nationale

photo Mélissa HUCHERY/HEST



Ce rapport a été présenté devant les députés et les sénateurs de l'Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques le 6 juin 2019.

photo Shun KAMBE



Le jury de l'IHEST a attribué à ce travail des auditeurs de la promotion Elinor OSTROM, 2018 - 2019, le prix de la "Démarche scientifique".

Les trophées symbolisant les prix attribués aux ateliers sont des œuvres de l'artiste Yann TOMA.

photo Olivier Darignou/HEST



QUELLE PLACE POUR L'HYDROGÈNE DANS LA MOBILITÉ DURABLE ?

1 - RÉSUMÉ

L'hydrogène est un vecteur d'énergie qui suscite un intérêt croissant dans le débat sur la transition énergétique, notamment pour la mobilité. En effet, il peut être produit à partir d'énergies renouvelables puis restituer cette énergie sous forme d'électricité via une pile à combustible, sans émission polluante et pour un coût qui a fortement baissé en quelques années. Cette forme de stockage d'électricité s'apparente ainsi au stockage par batterie, dont les coûts ont aussi fortement baissé et qui bouscule déjà le marché des véhicules à moteur thermique classiques. Même si la technologie hydrogène est encore relativement chère et a un rendement inférieur à celui des batteries, elle est moins lourde à embarquer que ces dernières et offre des performances similaires à celles des moteurs thermiques en termes de temps de recharge et d'autonomie. Ces avantages la rendent attractive pour certains usages, notamment pour les véhicules lourds (trains, camions, bus, engins de chantier, certains navires ou avions) et pour une partie du marché automobile. Elle peut de plus s'hybrider facilement avec le stockage par batterie (véhicule à hydrogène rechargeable) pour offrir des rendements élevés pour les trajets courts. La filière hydrogène est en train de décoller. Le consommateur aura

ainsi bientôt le choix parmi une palette étendue de possibilités de recharge en fonction du type de véhicule : à moteur thermique ou à hydrogène, qui se recharge rapidement mais seulement en stations-service, à batterie, qui se recharge lentement mais pendant le stationnement, ou hybride, offrant les deux possibilités. La frontière entre les différents segments de marché dépendra non seulement de potentielles nouvelles ruptures technologiques et des investissements pour chaque segment, mais aussi de la capacité à créer des synergies entre filières. Les enjeux sont multiples : techniques, politiques, socio-économiques, climatiques et de santé. La France et l'Europe ont des atouts dans cette nouvelle filière industrielle dont le marché prévisible se chiffre en milliards d'euros, et qui peut contribuer à notre indépendance énergétique et à la transition environnementale. Il est donc important, en complément au déploiement en cours de la filière batterie, de maintenir l'effort de R&D, de soutenir les expérimentations dans les territoires, et de renforcer la coordination entre acteurs pour saisir les opportunités qu'offrent cette nouvelle filière de la mobilité hydrogène.

ANIMATION DE L'ATELIER

Philippe ROCHER - Consultant EnR & Maîtrise de l'Énergie, Directeur du Cabinet METROL

PERSONNES RENCONTRÉES

Jean-Luc BARNAY, bureau prévention, Brigade des Sapeur-Pompiers de Paris (BSPP)

Etienne BEEKER, conseiller scientifique en charge des questions énergétiques, France Stratégie

Daniel CLEMENT, directeur scientifique adjoint, Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME)

Patrick CRIQUI, directeur de recherche émérite CNRS, Laboratoire d'Economie Appliquée de Grenoble (GAEL), Université de Grenoble Alpes

Alena FARGERÉ, économiste et analyste, Hydrogène Energie World Business Unit, Air Liquide

Mathieu GARDIES, président, Société du Taxi Electrique Parisien (STEP)

Charles-Antoine GAUTIER, chef du Département énergie, Fédération nationale des collectivités concédantes et régies (FNCCR)

Thomas GOBI, spécialiste du maritime et fluvial, Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible (AFHYPC)

Pascal MAUBERGER, président-directeur général de McPhy

Cédric PHILIBERT, analyste senior, division énergies renouvelables, Agence internationale de l'énergie (AIE)

Xavier PLOQUIN, conseiller en charge de l'énergie, de l'industrie et de l'innovation au cabinet du ministre de la Transition écologique et solidaire

Bruno POUTRAIN, chef de la section doctrine, RETEX et Recherche des Causes et Circonstances des Incendies, Brigade des Sapeur-Pompiers de Paris (BSPP)

Thierry PRIEM, directeur de recherche, Responsable Programme Hydrogène & Piles à Combustible, direction de la recherche technologique, Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA)

Frédéric RAVEL, directeur scientifique Energie Développement durable, Chimie et Procédés, Direction Générale Recherche et Innovation (DGRI) du Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation (MESRI)

Stéphanie THUMERELLE, Responsable Communication Corporate, Relations Extérieures – Stratégie Hydrogène, Toyota France

Alice VEILLEFOSSE, directrice de cabinet du directeur général de l'énergie et du climat, ministre de la Transition écologique et solidaire

Christelle WERQUIN, déléguée générale de l'Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible (AFHYPC)

Adrien ZANOTO, chef de projet User Experience (UX), Air Liquide Hydrogen Energy (H2E)

TABLE DES MATIÈRES

| | | |
|------|---|----|
| 1. | INTRODUCTION | 5 |
| 2. | APPROCHE DU SUJET | 5 |
| 3. | LA TECHNOLOGIE DE L'HYDROGÈNE ET SON APPLICATION À LA MOBILITÉ | 6 |
| 3.1. | L'HYDROGÈNE, VECTEUR D'ÉNERGIE | 6 |
| 3.2. | TECHNOLOGIE DU VÉHICULE À HYDROGÈNE | 6 |
| 3.3. | POSSIBILITÉS D'UTILISATION DE LA TECHNOLOGIE HYDROGÈNE POUR LA MOBILITÉ | 7 |
| 4. | LES TERMES DU DÉBAT | 7 |
| 4.1. | AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE LA TECHNOLOGIE HYDROGÈNE POUR LA MOBILITÉ | 7 |
| 4.2. | INCERTITUDES | 9 |
| 4.3. | DÉVELOPPEMENT DE LA CONTROVERSE | 9 |
| 5. | PLANS DE DÉVELOPPEMENT | 9 |
| 5.1. | FRANCE | 9 |
| 5.2. | EUROPE | 10 |
| 5.3. | ASIE ET ÉTATS-UNIS | 11 |
| 6. | CONSTATS, ÉTONNEMENTS ET RECOMMANDATIONS | 12 |
| 6.1. | CONSTATS ET ÉTONNEMENTS | 12 |
| 6.2. | RECOMMANDATIONS | 13 |
| 7. | CONCLUSIONS | 13 |
| | BIBLIOGRAPHIE | 14 |
| | ANNEXES | 15 |
| | ANNEXE 1 : FONCTIONNEMENT D'UNE PILE À COMBUSTIBLE | 15 |
| | ANNEXE 2 : TABLEAU DE COMPARAISON ENTRE DIFFÉRENTS TYPES DE VÉHICULES | 16 |
| | ANNEXE 3 : TYPOLOGIE DES ACTEURS DE L'HYDROGÈNE | 17 |
| | ANNEXE 4 : SÉCURITÉ ET RÉGLEMENTATION DE LA MOBILITÉ HYDROGÈNE | 18 |

1. INTRODUCTION

La transition énergétique est nécessaire pour garantir un monde durable aux générations futures. Elle est à peine entamée mais s'annonce majeure. Elle est motivée par plusieurs évolutions de fond :

- Les problèmes engendrés par les modes de production et de consommation d'énergie actuels :
 - Réchauffement climatique, lié principalement aux émissions de CO₂ via l'effet de serre ;
 - Problèmes de santé publique liés à la pollution atmosphérique (particules, NOx, etc.) ;
- L'augmentation des coûts d'exploration et d'exploitation des énergies fossiles à l'approche de l'épuisement des réserves, ainsi que l'incertitude sur les réserves d'uranium ;
- La baisse du coût des énergies renouvelables et des possibilités de stockage :
 - Baisse du coût de l'énergie photovoltaïque et éolienne ;
 - Baisse du coût des batteries.

Dans ce contexte, pour ce qui est de la mobilité, le véhicule électrique apparaît comme une alternative possible au véhicule à essence (ou diesel). Il connaît une croissance rapide, entamée au début des années 2010 (cf. figure 1).

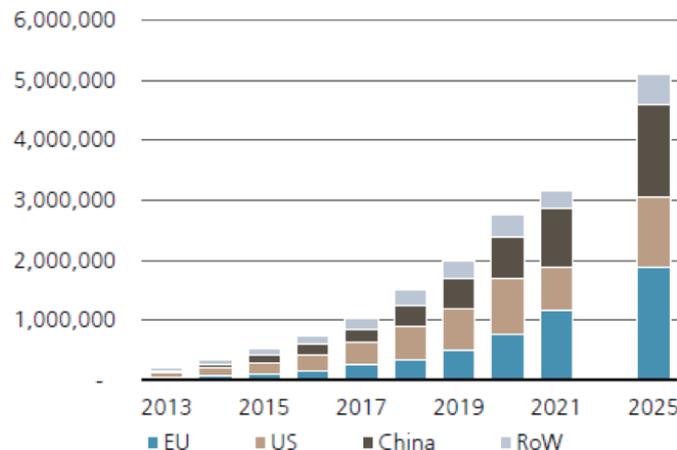


Figure 1: Ventes annuelles de véhicules électriques depuis 2013 au niveau mondial, et estimation à l'horizon 2025 (Source : Global EV Outlook, UBS estimates).

Néanmoins, le véhicule électrique présente l'inconvénient d'être long à recharger. De nombreux travaux de recherche portent sur cette question, mais il n'y a à ce stade pas de garantie qu'ils débouchent sur des solutions complètement satisfaisantes.

2. APPROCHE DU SUJET

Le cycle national de l'IHEST vise à former ses auditeurs aux questions de relations entre science, technologie et société, et notamment à l'analyse des controverses scientifiques et techniques. Le groupe d'auditeurs saisi de la question du rôle de l'hydrogène dans la mobilité durable a effectué une recherche bibliographique et rencontré près d'une vingtaine d'intervenants, afin de :

- S'approprier la problématique : quels sont les faits objectifs et les incertitudes ?

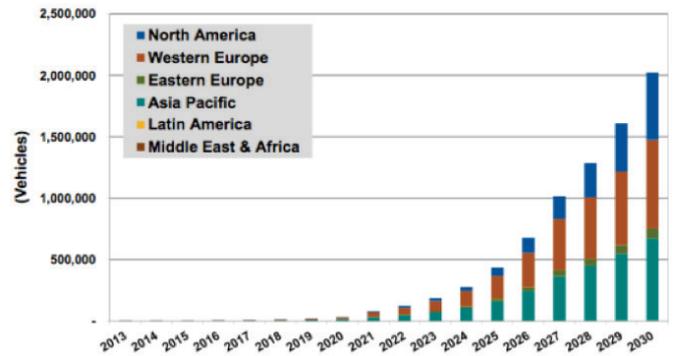


Figure 2 : Évolutions des ventes de véhicules à hydrogène depuis 2013 au niveau mondial, et estimations à l'horizon 2030 (Source : Navigant Research).

Le véhicule à hydrogène, qui ne présente pas cet inconvénient, est ainsi présenté par certains comme une autre alternative possible, promise à une croissance tout aussi rapide dans les prochaines années (cf. figure 2).

Cependant, le véhicule à hydrogène est encore relativement cher et ses détracteurs estiment qu'il aura du mal à s'imposer au-delà de quelques marchés de niche.

Se pose ainsi la question de la place de l'hydrogène dans la mobilité durable. Cette alternative restera-t-elle un serpent de mer ou va-t-elle enfin décoller ? Répond-elle vraiment aux problèmes environnementaux actuels ? Constitue-t-elle une filière industrielle d'avenir à soutenir ? Le cas échéant, quels sont les investissements nécessaires et qui doit les porter ? Quels sont les intérêts des acteurs en présence et les points de blocages ? Quel rôle pour l'État ?

La multiplicité des questions et la complexité des problématiques, qu'elles soient d'ordre politique, économique, sociale, éthique, technique ou scientifique, rendent difficile une capacité d'analyse globale, de coordination (à plusieurs niveaux) et donc de décision. Au-delà de la question du temps de charge et du coût, les débats sur les avantages et inconvénients respectifs des véhicules à batterie, à hydrogène ou à essence portent aussi sur d'autres paramètres : poids, caractère écologique quand on considère l'ensemble de la filière, rareté ou caractère stratégique de certains matériaux nécessaires à la fabrication, changement de comportement sociétal, dangerosité réelle ou perçue, intérêts des acteurs et forces en présence, etc.

- Comprendre les jeux d'acteurs, les points de blocages ;
- Synthétiser les étonnements ;
- Faire émerger des pistes pour aller plus loin.

La question de l'hydrogène énergie avait déjà été traitée par un groupe d'auditeurs du cycle national 2014-2015 de l'IHEST. Il y a eu depuis des évolutions significatives, notamment dans le domaine de la mobilité. Il était donc intéressant d'approfondir la question pour ce domaine particulier.

3. LA TECHNOLOGIE DE L'HYDROGÈNE ET SON APPLICATION À LA MOBILITÉ

3.1 L'HYDROGÈNE, VECTEUR D'ÉNERGIE

L'hydrogène est l'élément atomique le plus présent dans notre univers. Il est très peu présent sous forme moléculaire (H_2) à l'état naturel sur terre. Toutefois, il a une grande capacité à se combiner avec d'autres atomes pour former notamment des molécules d'eau (H_2O), d'hydrocarbures ou des composés organiques (en combinaison notamment avec des atomes de carbone). Son extraction et sa manipulation sont des procédés connus depuis plusieurs siècles. La recombinaison sous forme de molécule de dihydrogène nécessite un apport d'énergie important. Ainsi, l'hydrogène a un fort pouvoir énergétique. Il est par ailleurs inodore, non toxique et extrêmement volatil.

En France et dans le monde, la majorité de l'hydrogène est actuellement utilisé comme intrant dans l'industrie (ammoniac, engrais, raffinage, chimie). Néanmoins, son intérêt dans un futur durable est aussi et surtout celui d'être un vecteur énergétique : l'hydrogène peut en effet servir à emmagasiner de l'énergie (celle qui a servi à le produire) jusqu'au moment où il sera transformé et la libérera.

La production industrielle d'hydrogène peut être effectuée de différentes façons :

- par addition de gaz naturel et de vapeur d'eau surchauffée : le vaporeformage ($CH_4 + 2 H_2O \rightarrow CO_2 + 4 H_2$) ;
- par gazéification du charbon de bois (brûlé dans un réacteur à très haute température) et oxydation partielle des hydrocarbures ;
- par séparation des molécules d'eau via un courant électrique : l'électrolyse ($2H_2O \rightarrow 2H_2 + O_2$).

L'électrolyse est actuellement très minoritaire (quelques pourcents) à cause d'un coût élevé. Néanmoins, elle est la seule qui ne nécessite pas d'être couplée à des procédés de capture et de stockage du CO_2 pour être décarbonée.

3.2 TECHNOLOGIE DU VÉHICULE À HYDROGÈNE

L'utilisation de l'hydrogène dans le contexte mobilité passe très majoritairement par la technologie des piles à combustible (PàC)¹. Une PàC consiste à combiner de l'hydrogène avec l'oxygène de l'air afin de produire de l'électricité (cf. annexe 1).

Dans ce contexte, le stockage de l'hydrogène dans le véhicule est effectué sous forme gazeuse à haute pression (typiquement 700 bars) dans des réservoirs contenant quelques kilogrammes d'hydrogène. Ces réservoirs comportent une enveloppe interne en métal ou polymère qui assure l'étanchéité par rapport aux molécules d'hydrogène. Leur structure résistante est réalisée en fibre de carbone ce qui garantit leur intégrité mécanique et la sécurité par rapport au

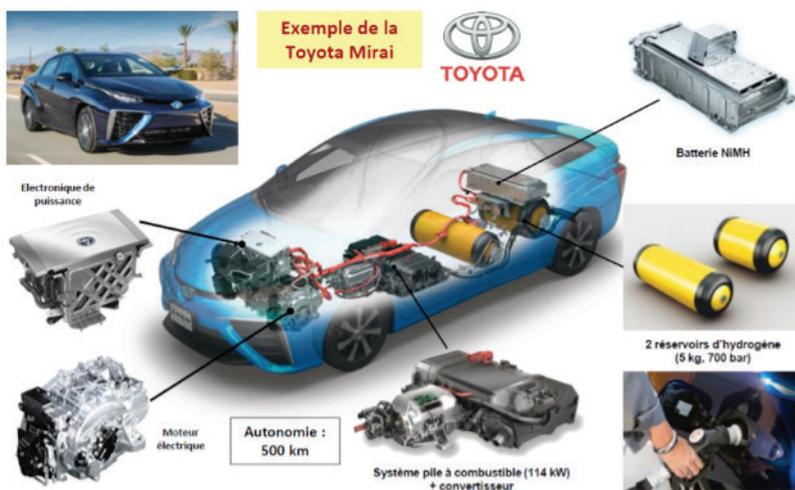


Figure 3 : Éléments constitutifs d'une voiture à hydrogène

risque d'explosion (résistance au feu, aux chocs ...). Une soupape de sécurité (système proche des valves sur réservoirs GPL) permet un relargage rapide du gaz en cas de détérioration du réservoir (cf. annexe 4). Le système à hydrogène (réservoir et PàC) alimente un moteur électrique, en combinaison avec un système de batteries pour avoir un bon couple au démarrage.

La figure 3 illustre ces différents composants. Cette technologie peut être hybridée avec d'autres (véhicule hybride hydrogène / électrique² ou hydrogène / gaz naturel ou biogaz).

¹ La combustion directe de l'hydrogène présente un faible rendement, même si l'hydrogène peut être théoriquement combiné dans un moteur à combustion interne à gaz ou un moteur à combustion hybride essence/hydrogène. BMW, qui avait tenté de développer cette voie, l'a abandonnée.

² Du type Renault Kangoo ZE H2 (véhicule électrique adaptée par intégration d'une PàC, et souvent appelé pour cette raison « véhicule électrique à prolongateur d'autonomie à hydrogène »), produite depuis 2014 et vendue à 200 exemplaires depuis (<https://www.symbio.one/renault-kangoo-ze-reh2/>), ou Mercedes GLC F-CELL, vendue commercialement depuis novembre 2018 (<https://media.mercedes-benz.be/mercedes-benz-glc-f-cell-la-premiere-voiture-electrique-a-pile-a-combustible-avec-technologie-hybride-rechargeable-au-monde/>).

3.3 POSSIBILITÉS D'UTILISATION DE LA TECHNOLOGIE HYDROGÈNE POUR LA MOBILITÉ

La mobilité est un des contextes d'application prometteurs de l'hydrogène. Elle est envisagée principalement dans les transports routiers, notamment pour les véhicules lourds, et ferroviaires, notamment pour remplacer les locomotives diesel sur les voies non électrifiées. Pour le transport aérien, les pistes sont encore au stade expérimental, et plutôt pour des applications annexes (roulage au sol...). Pour le transport maritime et fluvial, il existe quelques projets pionniers mais non finalisés opérationnellement (Navibus à Nantes, YeloH2 à la Rochelle, projet de navette maritime de 200 passagers dans la rade de Toulon).

Actuellement, les types de transport visés (route et rail) sont

constitués majoritairement de flottes captives (flottes collectives de bus, taxi, logistique urbaine). Cela permet d'optimiser l'utilisation de la station de recharge d'hydrogène dès sa mise en service. Le nombre de ces « stations-service » à hydrogène est amené à croître de manière significative. La production est pour l'essentiel centralisée, mais l'hydrogène peut aussi être produit sur place à partir d'énergie solaire ou éolienne avec un système d'électrolyse de l'eau. La distribution se fait principalement en bouteilles sur camions, mais aussi par pipeline. Il existe un réseau de pipeline à hydrogène couvrant le nord de la France (ainsi que la Belgique et une partie des Pays-Bas).

4. LES TERMES DU DÉBAT

4.1 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DE LA TECHNOLOGIE HYDROGÈNE POUR LA MOBILITÉ

Comme les batteries, l'hydrogène comme vecteur d'énergie présente l'avantage par rapport à l'essence de ne pas émettre de CO₂ lors de son utilisation. La production initiale d'hydrogène peut aussi être décarbonée, soit par vaporeformage du méthane combiné à une capture et séquestration du carbone, moins coûteuse à court terme mais moins durable, soit par électrolyse à partir d'électricité d'origine nucléaire ou renouvelable, plus coûteuse à court terme mais durable dans le dernier cas.

L'hydrogène présente aussi des avantages par rapport aux batteries :

- Il a une densité d'énergie massique très élevée : 33 kWh/kg ou 123 MJ/kg soit 3 fois plus que l'essence ou le gazole et 2,5 fois plus que le gaz naturel à poids égal. 5 kg d'hydrogène permettent ainsi d'offrir une autonomie d'environ 500 km alors que pour la batterie il faut plusieurs centaines de kg³.
- Il peut être transféré rapidement dans le réservoir d'un véhicule. Un plein est fait en moins de 5 min, alors que pour la batterie le temps de charge se situe entre 30 min et 20h selon les conditions (charge partielle ou totale, sur station publique de puissance ou sur prise domestique). Plus généralement, il peut être produit à proximité des sources d'énergie primaire (notamment solaire et éolien), notamment pendant les creux de demande en électricité, et être acheminé ultérieurement en fonction des besoins.

Il présente cependant aussi des inconvénients, notamment par rapport aux véhicules à batterie :

- C'est un gaz très léger (~11 m³/kg en conditions normales de température et de pression), ce qui oblige à le compresser fortement pour le stocker dans des volumes raisonnables pour les transports (à 700 bars, 5 kg d'hydrogène occupent un volume d'environ 140 litres, soit 2 à 3 fois le volume d'un réservoir d'essence classique)⁴. Cette compression consomme

3 Aujourd'hui, seuls des véhicules haut de gamme, pour lesquels il est possible d'embarquer beaucoup de batteries de haute qualité, offrent une autonomie équivalente à celle d'un véhicule à essence.

4 L'hydrogène devient liquide à une température extrêmement basse (environ -253°C soit 20 kelvins) et son adsorption dans des solides n'est pas mûre technologiquement. Ces formes de stockage et de transport ne sont donc pas envisageables, du moins à court terme pour la seconde

elle-même de l'énergie (environ 15% de perte pour une compression à 700 bars).

- Son coût de production de manière décarbonée, par électrolyse, est pour l'instant relativement élevé, et le rendement de la chaîne électrolyse – compression – pile à combustible est inférieur d'environ 2 fois à celui du cycle charge-décharge de la batterie⁵. Néanmoins, le rendement augmente si on peut faire usage de la chaleur dégagée (cogénération)⁶. Par ailleurs, il est en progression et est déjà nettement supérieur à celui du moteur à essence.

D'autres inconvénients ne sont pas des caractères différenciants marqués par rapport aux véhicules à batterie :

- C'est un gaz facilement inflammable et explosif. Cependant, grâce à l'expérience industrielle de production d'hydrogène, ancienne (environ 1 siècle) et à grande échelle (60 millions de tonnes par an au niveau mondial), le risque est bien géré. La conséquence est plus la contribution au coût de la technologie que le niveau de risque, qui est globalement équivalent à celui des autres types de véhicules (les véhicules à essence aussi peuvent s'enflammer et les batteries exploser). L'expérience des milliers de véhicules déjà en service et les essais conduits notamment par la Brigade de sapeurs-pompiers de Paris confortent cette analyse. La nature des risques étant différente, la question de l'acceptabilité sociale peut se poser, mais il ne semble pas que ce soit un facteur majeur⁷. Les acteurs de la filière, conscients du précédent du GPL où quelques accidents mal gérés ont donné un coup d'arrêt à la filière, sont particulièrement vigilants envers cet

5 Le rendement de la chaîne complète pour un véhicule à hydrogène est d'environ 40% (électrolyse 80% * pressurisation 85% * PàC 60% * moteur électrique 95%). Celui pour un véhicule à batterie est d'environ 80% (recharge 95% * batterie 95% * convertisseur 95% * moteur électrique 95%). Celui pour un véhicule à moteur à explosion (essence ou diesel) est d'environ 20%.

6 Ainsi, dans un véhicule à batterie le chauffage consomme de l'électricité alors que dans un véhicule à hydrogène la chaleur dégagée par la PàC peut être exploitée.

7 Cf. résultats du projet européen HYACINTH sur l'acceptabilité de l'hydrogène dans les différents pays européens (http://hyacinthproject.eu/wp-content/uploads/2017/12/HYACINTH-D5_2-General-findings-on-public-acceptance_DEF.pdf).

aspect (cf. annexe 4 : sécurité et réglementation de la mobilité hydrogène).

- La production de PàCs dépend d'un matériau rare, le platine (dont la production mondiale est de moins de 200 tonnes par an, et est concentrée aux trois quarts dans un seul pays, l'Afrique du Sud. Il faut actuellement environ 30g de platine pour une PàC de voiture, soit environ 10 fois plus que pour un pot catalytique de voiture à essence sans plomb. Réduire cette dépendance est donc un enjeu de R&D important. Cependant, la production de batterie dépend aussi de matériaux rares, notamment le cobalt. Dans les deux cas, c'est près de la moitié de la production mondiale qui est consommée (pour la production de pots catalytiques dans le premier cas et de batteries dans le deuxième).
- Le réseau de stations de recharges est encore embryonnaire, avec seulement une vingtaine de stations en France. Cependant, la mise en place de flottes captives, pour lesquelles ce n'est pas un inconvénient, permet une augmentation progressive du réseau. L'arrivée prévisible de véhicules hybrides hydrogène-électrique peut aussi faciliter la transition. Par comparaison, les véhicules électriques peuvent aussi souffrir du manque de disponibilité de bornes de recharges, d'autant plus que le temps de recharge les immobilise relativement longtemps. Ceci n'a d'ailleurs pas bloqué le décollage de la filière.

Au bilan, la technologie hydrogène est encore relativement chère et a un rendement inférieur à celle des batteries, mais elle est moins lourde à embarquer que ces dernières et offre des performances similaires à celles des moteurs thermiques en termes de temps de recharge et d'autonomie (cf. annexe 2). Elle est plus particulièrement adaptée aux véhicules lourds, qui ont besoin



Figure 4 : Type d'énergie le plus adapté en fonction de la taille et de l'autonomie (et donc du type d'usage) d'un véhicule. (Source : Toyota)

d'une densité d'énergie importante pour soutenir une charge utile élevée⁸, et, à court terme, pour les flottes captives, plus à même de rentabiliser une station de recharge isolée. Ceci explique que les premières applications commerciales qui commencent à se développer soient les trains, les bus ou les taxis. À l'inverse, la batterie est plus adaptée pour les petites voitures citadines. Entre les deux, le véhicule hybride rechargeable, à essence pour l'instant mais à hydrogène demain, offre le meilleur compromis (cf. figure 4). Au-delà de l'application à la mobilité terrestre, la technologie hydrogène est aussi adaptée aux transports maritime et aérien (cf. figure 5).

8 Cf. par exemple « Hydrogen Fuel Cell Future Is Promising for Heavy-Duty Trucks » (<https://www.act-news.com/news/hydrogen-fuel-cell-vehicles/>).



Figure 5 : Type d'énergie le plus adapté en fonction du contexte d'application selon l'Energy Transition Commission (rapport Mission Possible, novembre 2018).

4.2 INCERTITUDES

La principale incertitude sur l'avenir de la filière hydrogène est celle de l'évolution des coûts. Au-delà des effets relativement prévisibles des économies d'échelle et des effets d'apprentissages, l'avenir dépend en partie d'éventuelles ruptures technologiques, par exemple sur le stockage par adsorption dans des solides ou la découverte d'alternatives au platine comme catalyseur. Il dépend aussi en partie de l'évolution des batteries, qui sont partiellement en concurrence. Si celles-ci ont progressé très rapidement au cours de la décennie, il est difficile de prédire si ces progrès vont se poursuivre au même rythme, s'accélérer grâce à des ruptures technologiques, ou au contraire saturer du fait de l'atteinte d'un optimum.

4.3 DÉVELOPPEMENT DE LA CONTROVERSE

Ces incertitudes, couplées aux intérêts variés de différents acteurs, ont conduit au développement d'une controverse. Elle s'est principalement cristallisée autour d'une note d'analyse publiée en 2014 par le Commissariat Général à la Stratégie et à la Prospective (France Stratégie), une institution rattachée directement aux services du Premier Ministre⁹. Selon son auteur, le modèle économique n'est pas viable, la sécurité impossible, la maturité technologique trop faible. Il suggérait en conséquence de stopper le déploiement industriel de la filière, pour se concentrer sur la R&D. La réaction des acteurs économiques, des milieux scientifiques, voire de certains politiques, fut immédiate, certains qualifiant la note d'attaque à charge contre l'hydrogène. Selon l'association française pour l'hydrogène (AFHYPAC), la position de France Stratégie s'appuyait sur « des amalgames, des idées reçues, et des informations erronées ».

Cinq ans après, le rédacteur de la note de France Stratégie maintient son analyse et quelques autres acteurs font part de leur scepticisme^{10,11}. À l'inverse, d'autres font part d'un enthousiasme

9 Etienne Beeker, Y a-t-il une place pour l'hydrogène dans la transition énergétique ?, Note d'analyse France Stratégie N° 15, août 2014 (<https://www.strategie.gouv.fr/sites/strategie.gouv.fr/files/atoms/files/201-08-06na-fs-hydrogene-hd.pdf>)

10 Cf. <https://reporterre.net/La-voiture-a-hydrogene-est-un-miroir-aux-alouettes-de-la-transition-energetique>

11 Cf. <https://www.connaissancedesenergies.org/tribune-actualite-ener>

Cependant, même si ces incertitudes peuvent réduire le marché relatif de l'hydrogène, il est très peu probable qu'elles le bloquent complètement. Un autre facteur d'incertitude dans la concurrence de la filière batterie est la capacité d'adaptation sociale à des temps de recharge relativement longs. La multiplication des bornes de recharge sur les places de stationnement va limiter le problème, mais pour l'instant nombre d'acquéreurs potentiels hésitent à passer à un véhicule qui met des contraintes sur leurs trajets longs, quand bien même cela ne concerne le plus souvent que quelques trajets par an.

renforcé¹². En pratique, les positions et des politiques favorables au développement de la filière hydrogène, et surtout les initiatives concrètes, se développent^{13,14,15}. Néanmoins, étant donné l'incertitude à ce stade et la multiplicité des facteurs, chaque acteur se positionne en fonction d'informations partielles plutôt que par rapport à un cadre de référence commun (cf. annexe 3).

En 2014, la controverse engendrée par le rapport de France Stratégie aurait pu freiner le développement de la filière. Cette vision, se voulant portée par une rigueur d'économie stricte, était assez éloignée des contraintes environnementales et des possibilités concrètes déjà réalisées en France. La question étant située alors en dehors des débats publics, la préoccupation politique n'a pas saisi à cette époque l'importance de cette filière dans la résolution de notre transition écologique et de développement durable. Ce n'est qu'en 2018 que les propositions des débats publics ont convergé et ont pu être reprises dans la décision politique.

[gies/le-duel-batteries-hydrogene-pour-la-motorisation-decarbonee-du-transport-routier](https://www.connaissancedesenergies.org/le-duel-batteries-hydrogene-pour-la-motorisation-decarbonee-du-transport-routier)

12 Cf. <https://bfmbusiness.bfmtv.com/mediaplayer/video/l-hydrogene-c-est-le-nouveau-petrole-des-2020-0404-1151750.html>

13 Cf. <https://fr.media.airliquide.com/actualites/air-liquide-idex-step-et-toyota-creent-hysetco-pour-le-developpement-de-la-mobilite-hydrogene-6b4c-1ba6d.html>

14 Cf. <https://www.zev-chambery.fr/>

15 Cf. <https://www.sncf.com/fr/groupe/newsroom/1er-train-hydrogene-en-2022>

5 PLANS DE DÉVELOPPEMENT

5.1 FRANCE

Un plan ambitieux lancé en 2018

Depuis juin 2018, la France affiche un plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique (« Plan Hulot »)¹⁶. Il reconnaît officiellement le rôle de l'hydrogène dans la transition énergétique, pour d'une part décarboner l'industrie et d'autre part intégrer les énergies renouvelables dans les transports et le chauffage des bâtiments. Il met en avant les forces de la filière

16 Plan présenté par Nicolas Hulot le 1er juin 2018, cf. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/plan-hydrogene-outil-davenir-transition-energetique>

industrielle française, particulièrement présente dans la production d'hydrogène, et présente l'investissement dans cette filière comme une opportunité. Un élément déterminant correspond à l'annonce d'un engagement financier de 100 M€ dès 2019.

La mise en œuvre de ce plan répond à une construction par étapes selon trois axes : la production d'hydrogène par électrolyse pour l'industrie (phase d'amorçage)¹⁷, l'usage de l'hydrogène pour la mobilité en complémentarité des filières batteries via la

17 La production actuelle d'hydrogène repose à près de 95% sur des procédés émetteurs de CO2 (charbon, gaz).

pile à combustible (moyen terme), enfin la valorisation de l'hydrogène comme élément de flexibilité et de stabilisation des réseaux d'énergie (moyen-long terme). Une projection temporelle fixe les objectifs et cibles de ce plan selon les échéances 2023, 2028 et 2040.

En mai 2019, les 11 premiers projets retenus dans le cadre des appels à projets de l'ADEME ont été annoncés¹⁸. Ils portent sur des applications variées (bus, navette maritime, location de voitures, collecte de déchets, flottes d'entreprises et de collectivités, véhicules de chantier...). Ils devraient marquer une nette accélération

18 Cf. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/hydrogene-appel-projets-ecosystemes-mobilite-hydrogene-tres-forte-mobilisation-des-acteurs>

5.2 EUROPE

Une stratégie soutenue et globale

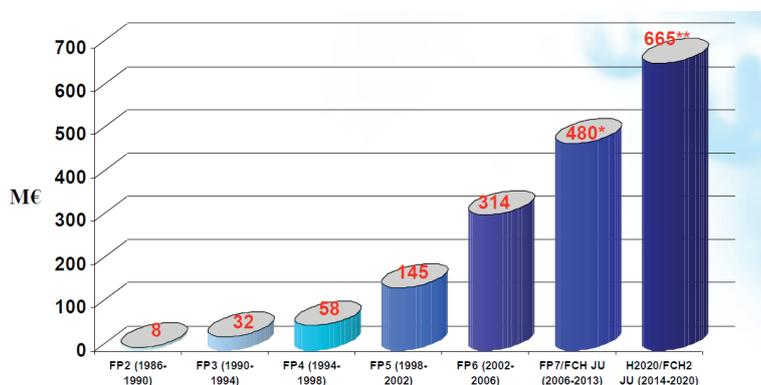
Au niveau européen, les industriels et organismes de recherche de la filière hydrogène sont nombreux (plus d'une centaine) et regroupés autour de l'initiative « Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking (FCH JU)¹⁹, et l'Union européenne accroît son investissement dans la recherche sur l'hydrogène énergie de manière significative, pour atteindre aujourd'hui près de 100 M€/an de soutien à la R&D (cf. figure 6). Environ un tiers du budget est dédié à la partie mobilité. Les projets de territoires ont été identifiés comme une priorité pour l'appel 2019, et 20 M€ leur sont alloués.

19 <https://fch.europa.eu/>

dans le déploiement de véhicules à hydrogène. Le nombre de projets déposés (24) et le volume d'investissement potentiel correspondant (475 M€) ont confirmé l'intérêt et l'ambition de la filière. Le ministre de la transition écologique et solidaire, François de Rugy, a affirmé vouloir continuer à accompagner les territoires dans ces expérimentations pour développer une filière industrielle d'avenir sur le sol français. Un deuxième appel à projets de l'ADEME sur les écosystèmes de mobilité hydrogène est en cours ainsi qu'un autre sur la production et fourniture d'hydrogène décarboné pour des consommateurs industriels, doté d'un budget de 50 M€.

Ce programme européen FCH JU s'articule autour de 5 axes :

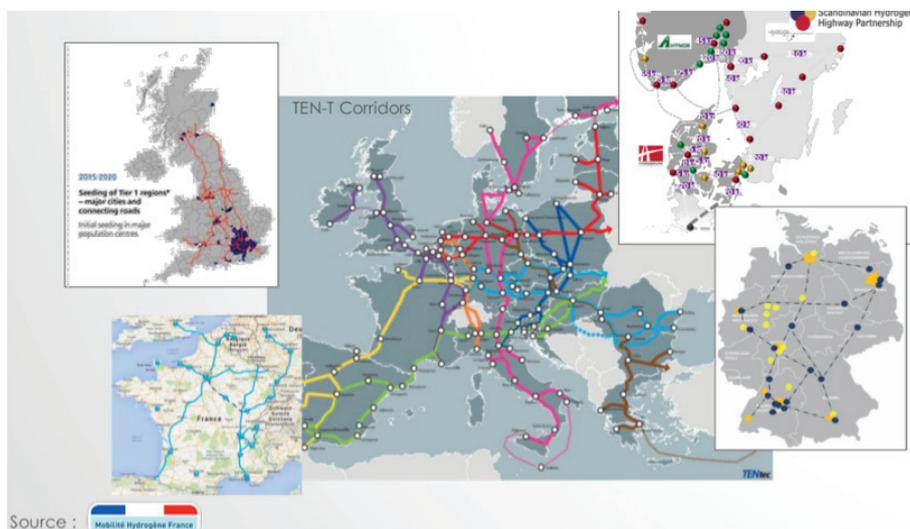
- Diminuer le coût des systèmes à PàC pour le transport tout en accroissant la durée de vie,
- Diminuer les coûts et améliorer la performance des PàC pour la production d'électricité,
- Diminuer les coûts et améliorer la performance de l'électrolyse de l'eau,
- Démontrer à grande échelle la faisabilité de l'utilisation de l'hydrogène pour soutenir l'intégration des renouvelables dans les systèmes énergétiques,
- Réduire l'utilisation des matériaux critiques.



* 470 mill EUR implemented by FCH JU + about 10 mill EUR already spent from EU 2007 budget, before FCH JU in place
 ** 665 mill EUR only to be implemented by the FCH2 JU + additional budget from EU programmes for low TRL (basic research) and structural funds/smart specialisation

Figure 6 : Evolution des budgets consacrés à la technologie hydrogène dans les programmes cadres européens. Le budget pour la période 2014-2020 est de 665 M€.

Figure 7 : Projets de réseaux hydrogène dans les pays européens leaders pour l'hydrogène (Royaume-Uni, France, Allemagne, pays scandinaves). L'objectif du projet Hydrogen Mobility Europe (<https://h2me.eu>) est d'atteindre à terme une interconnexion de l'ensemble des pays européens (carte au centre).



Ce programme soutient notamment le regroupement d'initiatives mobilité existantes afin de créer un réseau hydrogène européen (cf. figure 7).

France, Allemagne, Royaume-Uni et pays scandinaves leaders en Europe

Aux côtés de la France, plusieurs pays européens sont avancés. L'Allemagne a ainsi mis en service le premier train commercial à hydrogène au monde en septembre 2018²⁰. Elle est aussi de loin de pays européen le mieux équipé en stations à hydrogène, avec 64 stations en avril 2019, et a un déploiement ambitieux afin de passer à 100 d'ici la fin de l'année et 400 en 2023. Mercedes a lancé en novembre 2018 le premier véhicule hybride hydrogène-électrique de série au monde²¹. Cependant, début 2019, Volkswagen,

²⁰ Cf. <https://www.alstom.com/press-releases-news/2018/9/world-premiere-alstoms-hydrogen-trains-enter-passenger-service-lower>

dont le marché est orienté vers les plus petits véhicules, a décidé de se tourner résolument vers le véhicule à batterie et a convaincu BMW et Mercedes de focaliser la stratégie nationale sur ce type de véhicule. Le Royaume-Uni a développé récemment une stratégie hydrogène, incluant le déploiement de stations de recharges mais aussi de flottes de taxi, de véhicules pour la sécurité civile, des bus, trains et un ferry²². Les pays scandinaves sont également en pointe sur le sujet²³. Le Danemark a notamment ouvert une formation spécialisée sur l'hydrogène et les PàC dans le cadre d'un master sur l'énergie²³.

²¹ Cf. <http://www.fchea.org/in-transition/2019/2/11/united-kingdom-fuel-cell-industry-developments>

²² Cf. <http://www.scandinavianhydrogen.org/>

²³ Cf. <https://www.en.aau.dk/education/master/energy-engineering/specialisations/fuel-cells-and-hydrogen-technology>

5.3 ASIE ET ÉTATS-UNIS

En Chine, 30 000 dollars d'aide par voiture

Déjà pionnière en matière de voiture électrique, la Chine s'est lancée dans un vaste programme de mobilité hydrogène en 2016^{24,25}. Le nombre de véhicules à hydrogène en circulation dans le pays a dépassé le millier en 2018, et l'ambition est de passer à 5 000 en 2020, 50 000 en 2025 et un million en 2030. Pour cela, le gouvernement chinois a mis en place un système d'incitations très poussé. Sur la période 2016-2020, la subvention pour l'achat d'une voiture hydrogène s'élève à 200 kRMB (~30 k\$), celle pour un bus et un camion à 300 ou 500 kRMB (~45 ou 75 k\$), et celle pour la construction d'une station de recharge est de 600 000 dollars. Ces chiffres élevés montrent une volonté politique forte sur le sujet.

Un Japon volontaire mais retardé par les coûts

Le Japon croit en l'hydrogène. Comme le nucléaire auparavant, l'hydrogène est présenté au Japon comme un moyen de décarboner le secteur énergétique. Pour mémoire, 93% des besoins d'énergie primaire du pays sont actuellement couverts par les importations. Pour casser la dépendance du pays aux énergies fossiles, le gouvernement japonais soutient les industriels qui tentent de bâtir l'une des premières « sociétés de l'hydrogène ». L'État a ainsi promis de prendre en charge une importante partie du coût des nouvelles stations de recharge d'hydrogène que va déployer dans le pays le nouveau consortium « Japan H2 Mobility », composé d'Air Liquide et 10 grandes entreprises japonaises issues de différentes industries et de la finance. Son objectif est de construire 80 nouveaux sites de recharge d'ici 2021, en complément à la centaine de stations déjà opérationnelles, et d'étendre le réseau à 320 stations en 2025 et 900 en 2030.

Mais il faut pour cela faire baisser les coûts de construction et d'exploitation de ces stations qui ne sont visitées qu'une ou deux

²⁴ Cf. Hydrogen Fuel Cell Vehicle Technology Roadmap (<http://www.ihfca.org.cn/file/FCV%20Tech%20Roadmap.pdf>);

²⁵ Cf. présentation « Hydrogen Energy Country Overview: China » par Jimmy Li (National Institute of Clean-and-low-carbon Energy, China Energy Investment Corporation) au US DOE International Hydrogen Infrastructure Workshop 2018 (<https://www.energy.gov/sites/prod/files/2018/10/f56/fcto-infrastructure-workshop-2018-4-li.pdf>).

fois par jour et sont toutes dans le rouge. En raison de spécificités réglementaires drastiques au Japon, les coûts de construction et d'exploitation des stations de recharge à hydrogène sont beaucoup plus élevés qu'en Europe et aux États-Unis et peuvent causer une absence de retour sur investissement. Actuellement, la construction d'une station coûte entre 400 et 500 millions de yens (3 à 4 millions d'euros), soit quatre fois plus qu'une station à essence conventionnelle. Le gouvernement et le consortium espèrent pouvoir diviser ce prix par deux d'ici 2020. Parallèlement, l'arrivée sur le marché de nouveaux véhicules à hydrogène devrait permettre d'approcher un modèle économique plus rentable. Le succès de la stratégie japonaise en faveur de l'hydrogène impose néanmoins de diviser par plus de 3 son coût de production d'ici à 2030²⁶. Le projet a ainsi pris du retard : fin janvier 2018, l'archipel comptait seulement 101 stations et 2 400 véhicules, l'immense majorité étant composée de berlines Mirai, loin des 900 stations et 800 000 véhicules visés en 2030, pour un marché de 1 000 milliards de yens (7,7 milliards d'euros).

Si le Japon, en quête d'indépendance énergétique, se positionne fortement dans la course à la mobilité hydrogène, il pourrait rapidement se laisser distancer par la Chine.

La Corée du Sud fait le pari de la voiture hydrogène

Le gouvernement sud-coréen a décidé d'investir plus de 2 milliards d'euros dans le cadre d'un vaste plan destiné à bâtir une « économie de l'hydrogène »²⁷. Ce plan prévoit la mise en circulation de 80 000 véhicules à hydrogène et le déploiement de 310 stations d'ici à 2022. L'État travaille également en concertation avec les collectivités locales pour faire croître la flotte de bus à hydrogène. Un objectif de 2 000 bus d'ici 2022 a été fixé tandis que l'ensemble des 820 autocars des forces de l'ordre du pays seront remplacés par des véhicules à hydrogène.

²⁶ Monica Nagashima, « Japan's Hydrogen Strategy and Its Economic and Geopolitical Implications », Études de l'Ifri, Ifri, Octobre 2018 (https://www.ifri.org/sites/default/files/atoms/files/nagashima_japan_hydrogen_2018_.pdf)

²⁷ Cf. <https://english1.president.go.kr/BriefingSpeeches/Speeches/110>

Somie Kim, directrice de l'activité Hydrogène Énergie en Corée du Sud au sein du groupe Air Liquide, estime que « la réduction des émissions de CO2 et de particules fines est un enjeu à la fois économique et de santé publique. Si l'hydrogène fait ses preuves dans le domaine de la mobilité, son développement dans d'autres secteurs de l'énergie n'en sera que plus rapide et facile ! ». Le Président de la Corée du Sud estime que « cette économie nouvelle devrait en outre permettre la création de 200.000 nouveaux emplois d'ici 2030 ».

États-Unis

George W. Bush en 2003 avait lancé « Nos scientifiques et nos ingénieurs surmonteront les obstacles qui empêchent les voitures à hydrogène de passer du laboratoire à la rue ». Dès l'année suivante, la Californie, alors dirigée par Arnold Schwarzenegger, répondait favorablement à cet appel en se donnant d'ambitieux objectifs : 1,5 million de voitures à hydrogène en circulation en 2025. Elle investit ensuite près de 1,5 milliard de dollars sur dix ans pour développer la recherche sur la pile à combustible. Aujourd'hui, les premières voitures sont en circulation aux États-Unis. Ironie de l'histoire, aucune d'entre elles ne bat pavillon américain. Le Tucson Fuel-Cell a été lancé par le sud-coréen Hyundai, la Mirai par le japonais Toyota et la Clarity Fuel Cell par un autre constructeur japonais, Honda. Les constructeurs nationaux, Ford, General Motors et Chrysler, sont encore en retrait et misent sur la

voiture électrique qui bénéficie également de bonnes infrastructures. Cependant la Californie continue à croire à l'hydrogène et a mis en place des incitations à l'achat, dont un bonus deux fois plus élevé que celui prévu pour la voiture électrique. Elle investit également dans les infrastructures de distribution. Si la Californie soutient donc activement le développement de l'hydrogène tout en poursuivant son œuvre en faveur des voitures électriques, elle a jugé impossible de se fier aux seuls acteurs privés et considère qu'il appartient aux pouvoirs publics de prendre en charge l'investissement, afin d'éviter de tomber dans le grand paradoxe de la poule ou de l'œuf qui gèle le développement : les voitures ne se vendent pas par manque d'infrastructures, et les infrastructures ne se développent pas par manque de voitures en circulation.

D'autre part, Air Liquide a annoncé en novembre 2018 la construction aux États-Unis d'une unité de production d'hydrogène liquide destinée au futur marché du véhicule à pile à combustible en Californie. Selon le groupe, environ 40.000 véhicules sont attendus en Californie en 2022. « Ces nouveaux engagements permettront de répondre aux besoins croissants du marché de la mobilité hydrogène en Californie et contribueront au déploiement des véhicules électriques hydrogène, ainsi qu'à l'expansion de ce marché dans l'ensemble de cet État », a expliqué Air Liquide dans un communiqué²⁸.

²⁸ Cf. <https://fr.media.airliquide.com/actualites/air-liquide-annonce-la-construction-de-la-1ere-unite-de-production-de-grande-taille-dhydrogene-liquide-destinee-aux-marches-de-lhydrogene-energie-f239-1ba6d.html>

6. CONSTATS, ÉTONNEMENTS ET RECOMMANDATIONS

6.1 CONSTATS ET ÉTONNEMENTS

Des enjeux multiples pour une filière en phase de décollage

Le sujet est multiple et les dimensions politique, sociale, économique, écologique, de santé publique sont à prendre en compte et à analyser de façon conjointe, même si la question des coûts est centrale. Comme attendu pour cette filière qui est encore en phase de décollage, le paysage est mouvant et le réseau d'acteurs en développement (cf. annexe 4).

Des modèles économiques à consolider et affiner

En particulier, des modèles de transition incluant l'hydrogène pour la mobilité sont développés par quelques acteurs (ADEME, CEA, AFHYPAC, Energy Transitions Commission, etc.), mais ne sont pas encore largement diffusés et discutés. La complexité des modèles nécessite pourtant leur confrontation et leur élaboration collaborative. En fonction de la présence d'hydrogène fatale²⁹ ou non, de sources d'énergie renouvelables, de flottes captives éligibles à l'expérimentation, de volonté territoriale pérenne ou de dynamiques de collaboration public-privé, il est possible d'affiner des scénarios d'expérimentation hydrogène, afin de libérer tout le potentiel de la filière, en synergie avec les autres filières.

L'hydrogène mobilité porté par le besoin plus large de stockage d'énergie

En termes d'utilisation des énergies renouvelables, par nature

²⁹ Une énergie est dite fatale si elle est produite de toute manière dans un processus dont ce n'est pas l'objectif premier.

intermittentes, l'électrification longue échelle afin de les répartir et les utiliser au moment de leur production ne suffit pas : on ne peut les exploiter de façon optimale sans stocker le produit de ces énergies, notamment sous forme d'hydrogène vecteur. Cela concerne l'ensemble de la filière de l'hydrogène et plus particulièrement la partie mobilité qui, une fois la filière hydrogène existant, n'est pas le facteur le plus coûteux à mettre en place (une fois des électrolyseurs et PàC optimisés, des solutions de stockage long terme maîtrisées, la question particulière de la distribution grand public liée à la mobilité ne semble en effet pas le facteur le plus limitant).

Une production d'énergie en grande partie décentralisée

La technologie hydrogène étant par nature en grande partie décentralisée, comme les énergies renouvelables en général et contrairement aux filières classiques (pétrole, nucléaire), la nature des interventions de l'État doit s'adapter à cette donne et soutenir les initiatives locales et faciliter leur mise en réseau sans les contrôler directement. Les temps de cycles sont aussi potentiellement plus courts. L'habitude des cycles industriels longs dans le domaine de l'énergie et les raisonnements mono-filières ne doivent pas étouffer l'innovation. Il y a un besoin d'expérimentation, et le mieux pourrait être l'ennemi du bien.

Une filière française et européenne forte

La filière de l'hydrogène a progressé rapidement ces dernières

années, notamment grâce à l'action fédératrice de l'AFHYPAC. Air Liquide est un leader mondial avec très peu de concurrents, Engie s'oriente résolument vers les énergies nouvelles, Alstom construit des trains à hydrogène, Symbio FCell produit des PàC pour tous types de véhicules, McPhy une large gamme d'électrolyseurs, le CEA joue un rôle moteur, l'ADEME investit, EDF également, Total l'envisage, etc. La France est donc aujourd'hui en bonne position sur l'ensemble de la chaîne de production et d'exploitation de l'hydrogène énergie. L'Allemagne et les pays scandinaves ont également développé activement des compétences, et l'initiative FCH JU a permis de faire émerger une filière forte au niveau européen.

Une opportunité à saisir

La France et l'Europe possèdent des atouts dans une grande partie de la chaîne de valeur (train hydrogène Alstom, électrolyseur, R&D PAC...) même si dans le domaine de l'automobile, les seuls modèles à hydrogène disponibles sont asiatiques (japonais ou coréens). Il y a ainsi une opportunité à saisir, qui coïncide avec l'urgence croissante à traiter les problèmes climatiques, d'environnement et de santé publique. Soutenir fortement la filière alors qu'il n'y a pas de garantie de succès est un risque, mais ne pas la soutenir est aussi un risque, celui de rater une opportunité

importante.

Si le plan national de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique apparaît comme une avancée, l'incertitude des financements qui lui sont liés donne l'avantage de fait à la filière batterie ou pour le moins s'en remet à la puissance économique des acteurs en présence. Ne pas vraiment choisir serait un choix par défaut où toute prétention à la souveraineté serait abandonnée.

Quelle que soit l'évolution exacte de la technologie hydrogène pour la mobilité, il semble que les scénarios extrêmes dans un sens ou dans l'autre (basculement complet vers une « économie de l'hydrogène » ou au contraire arrêt complet de la filière) sont à exclure. Si l'on peut parler de niches à court terme, celles-ci peuvent se développer significativement, et les industriels tablent sur des marchés de plusieurs milliards voire dizaines de milliards d'euros dès 2030³⁰. Il y a aussi un consensus sur le fait que l'effort de recherche doit être maintenu et renforcé.

³⁰ Voir par exemple l'accord Michelin - Faurecia qui table sur un marché de 15 G€ en 2030 (cf. <https://www.lesechos.fr/industrie-services/automobile/michelin-et-faurecia-creent-un-champion-francais-de-lhydrogene-999459>) ; Le marché automobile mondial est supérieur à 1000 G€.

6.2 RECOMMANDATIONS

Poursuivre le soutien à la filière comme prévu dans le plan national hydrogène publié en 2018³⁰, avec notamment :

- L'affirmation de l'opportunité de **développer une nouvelle filière industrielle**, dont le marché prévisible se chiffre en milliards d'euros et qui peut contribuer à notre indépendance énergétique. Alors que sur la batterie l'Europe essaie actuellement de rattraper le temps perdu, sur l'hydrogène, elle a **l'opportunité de partir avec un temps d'avance**.
- Le **soutien à des projets multi-acteurs de R&D publique et privée à hauteur d'environ 100 M€ / an**, en développant la part dédiée aux **projets multi-filières (multisectoriels) et multi-usages**, comme cela est fait au niveau européen (FCH JU). Il est important de maintenir un **effort le plus régulier possible sur plusieurs années**, sans à-coups³¹. L'objectif est autant l'optimisation globale que la recherche de ruptures technologiques.

Renforcer la coordination entre acteurs, et en particulier :

- -Renforcer la coordination entre acteurs publics (ministères en charge de la recherche, industrie, écologie, santé, a minima; collectivités; Commission européenne) et politiques entre eux et avec le privé et les citoyens, **en tenant à jour une feuille de route interministérielle**, en formalisant un réseau de référents sur le sujet **coordonnées par un conseil ou un coordinateur national**, et en renforçant les

canaux de communications existants avec le niveau européen, qui couvre bien l'ensemble de la stratégie avec des budgets significatifs (environ 100 M€ /an).

- Organiser le partage d'information et notamment la **remontée d'information de terrain (territoires régionaux), avec des indicateurs partagés et l'élaboration conjointe de modèles de prévision**, pour tirer pleinement parti des expérimentations locales qui se multiplient.

Développer le débat science et société sur le sujet hydrogène/mobilité :

- Un débat plus large sur la transition énergétique serait un cadre naturel pour évoquer le sujet de l'hydrogène pour la mobilité. Il doit impliquer l'ensemble des composantes de la société en étant éclairé par des données objectives et l'intervention de scientifiques, qu'ils soient experts du sujet technique ou des aspects économiques ou sociologiques. Ce débat doit s'accompagner d'une réflexion plus large sur la manière de vivre en société et de se déplacer. L'existence de courants en faveur de la décroissance, du zéro déchet, de la redécouverte de l'association positive « bonheur/frugalité », de l'attitude « colibri », etc., laisse imaginer qu'une conscience est en train de naître. Il faut probablement s'appuyer dessus pour faire rimer technologies vertes et mobilités douces.

En résumé, il faut **saisir l'opportunité du développement de la filière hydrogène dans laquelle la France et l'Europe sont en bonne position mondiale** et accompagner sa dynamique, en soutenant la recherche, le développement et les expérimentations locales, et en facilitant leur mise en réseau.

³¹ Le chiffre de 100 M€ reste très raisonnable au regards des investissements globaux en R&D dans le domaine de l'énergie (environ 1 G€ rien que pour le secteur public, cf. <https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/SNRE%20vf%20d%C3%A9c%202016.pdf>) ou de l'automobile (5,8 G€, cf. <https://www.entreprises.gouv.fr/secteurs-professionnels/industrie-automobile-france>).

7. CONCLUSIONS

Le sujet de l'hydrogène suscite des débats passionnés où les émotions recouvrent parfois les aspects factuels de la question posée. Cependant, à l'heure où il est envisagé d'interdire la vente de véhicules à hydrocarbures en France dès 2040, il semble clair que c'est **une technologie qui fera partie du bouquet de solutions pour réussir la transition énergétique et la mobilité durable.**

Cette mixité énergétique est une évidence que les citoyens n'ont pas encore intégrée... C'est aussi **une opportunité industrielle** majeure. Il reste donc non seulement à poursuivre la R&D, développer les expérimentations de terrain et renforcer la coordination entre acteurs et filières, mais aussi à mettre en place le débat public.



BIBLIOGRAPHIE

- ADEME** ; Trajectoires d'évolution du mix électrique 2020-2060 - Synthèse de l'étude ; Octobre 2018
- AFHYPAC** ; Réponse à la note France Stratégie du 26 août 2014 ; Septembre 2014
- AFHYPAC** ; H2 Défi national et Enjeux territoriaux ; Septembre 2018
- AFHYPAC** ; Développons l'Hydrogène pour l'économie française, étude prospective ; Mai 2018
- ANCRE** (Alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie) ; scénario « loi de transition énergétique pour la croissance verte » ; Février 2017
- CESE** ; Avis du CESE sur l'article 1er du projet de loi relatif à l'énergie ; Février 2019
- CESE** ; Comment accélérer la transition énergétique ? Avis sur la mise en œuvre de la loi relative à la transition énergétique pour la croissance verte (LTECV) ; Février 2018
- CGE & CGEDD** ; Filière hydrogène-énergie ; Rapport au ministre de l'économie, de l'industrie et du numérique, à la ministre de l'écologie, du développement durable et de l'énergie ; Septembre 2015
- Commission de développement durable et de l'aménagement du territoire sur le projet de loi de finance pour 2019** ; Avis N°1285 / Recherche et enseignement supérieur : recherche dans les domaines du développement durable, de la gestion des milieux et des ressources.
- CNDP** Commission Nationale du Débat public ; Compte rendu du débat Public sur la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie ; Août 2018
- CNDP** Commission Nationale du Débat public ; Bilan de la présidente sur le débat Public sur la Programmation Pluriannuelle de l'Énergie ; Septembre 2018
- Commissariat Général à la stratégie et à la prospective**, France stratégie (Etienne Beeker) ; Note d'analyse : Y a-t-il une place pour l'hydrogène dans la transition énergétique ? ; Août 2014
- Energy Transitions Commission** ; Mission Possible (atteindre la neutralité carbone dans les secteurs les plus difficiles à décarboner d'ici le milieu du siècle) Synthèse du rapport ; Novembre 2018
- FNCCR** ; Guide pratique déployer les stations hydrogène dans votre territoire ; 2018
- Hydrogen Council** ; How hydrogen empowers the energy transition; Janvier 2017
- Hydrogen Council** ; Hydrogen scaling up ; Novembre 2017
- IEA** International Energy Agency (Philibert C.); Renewable Energy for Industry ; 2017
- IHEST** ; Rapport d'étonnement de l'atelier : Quelle place pour l'hydrogène dans la transition énergétique ; 2015
- McKinsey** ; *A portfolio of power-trains for Europe: a fact-based analysis* ; 2010
- Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire** ; Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique ; Juin 2018
- Ministère de la Transition Ecologique et Solidaire** ; Décision du 30 novembre 2018 consécutive au débat public sur la révision de la programmation pluriannuelle de l'énergie ; Novembre 2018
- OPECST** ; Rapport L'HYDROGÈNE : VECTEUR DE LA TRANSITION ÉNERGETIQUE ? Décembre 2013

ANNEXE 2 : TABLEAU DE COMPARAISON ENTRE DIFFÉRENTS TYPES DE VÉHICULES

Le tableau ci-dessous compare selon différents critères les véhicules à essence, électrique et à hydrogène, ainsi que les combinaisons essence-électrique (hybride rechargeable) et hydrogène-électrique.

| | | Essence | Hybride essence-électrique | Electrique | Hybride hydrogène-électrique | Hydrogène |
|--|------------------------------|-----------------------------|--|--|--|--|
| Type | Stockage énergie | Réservoir | Réservoir + batterie | Batterie | Réservoir + batterie | Réservoir |
| | Motorisation | Moteur à combustion interne | Moteur à combustion interne + Moteur électrique | Moteur électrique | Pile à combustible + Moteur électrique | Pile à combustible + Moteur électrique |
| Marché | Véhicules en circulation | 1,3 milliard | 2 millions | 4 millions | Quelques centaines | 12 000 |
| | Ventes annuelles | 80 millions | 1 million | 2 million | Quelques dizaines | 3 000 (2019) 30 000 (2020) |
| | Taux de croissance | Stable | > 50% | > 50% | >> 100% | >> 100% |
| Exemples (prix d'achat, hors bonus éventuel), poids et autonomie | Haut de gamme (~ 70 000 €) | BMW X5 Volvo XC90 | BMW X5 Volvo XC90 | Tesla Model S, Jaguar I-Pace, Audi e-tron | Mercedes GLC F-CELL | Toyota Mirai, Honda Clarity |
| | Poids | ~2100 | ~2200 | ~2300 | ~1800 | ~1800 |
| | Autonomie | 1000 km | 900 + 50 km | 500 km | 400 + 50 km | 600 km |
| | Milieu de gamme (~ 35 000 €) | Audi A4 | Toyota Prius, Hyundai Ioniq, Volkswagen Golf GTE | Nissan Leaf, Hyundai Ioniq, Volkswagen ID.3, Peugeot e-208 | Renault Kangoo ZE H2 | À venir |
| | Poids | ~1300 | ~1400 | ~1500 | ~1400 | |
| | Autonomie | 900 km | 900 + 200 km | 300 km | 200 + 100 km | |
| | Entrée de gamme | Peugeot 108 (10 000 €) | À venir ? | Renault Zoe (23 000 €) | À venir ? | À venir ? |
| | Poids | ~900 | - | ~1300 | - | - |
| | Autonomie | 800 km | - | 300 km | - | - |
| Temps de recharge | En station | 3 min | 3 min / 10 mn | 30 min | 5 min / 10 mn | 5 min |
| | À domicile | - | - / 2-4h | 10h | - / 2-4h | - |
| Emissions polluantes | CO2 / an | 800-3000 kg | Intermédiaire | - | - | - |
| | NOx / an | 100-400 g | Intermédiaire | - | - | - |
| Matériaux spéciaux (% production mondiale utilisée) | Platine | ~3 g (~50%) | | | | ~30 g (~50%) |
| | Lithium | - | | ~10 kg (30-40%) | | |
| | Cobalt | | | ~5 kg (40-50%) | | |



ANNEXE 3 : TYPOLOGIE DES ACTEURS DE L'HYDROGÈNE

Les principaux acteurs français impliqués sont nombreux et présentés ci-dessous.

- Les Ministères : Ministère de la transition écologique et solidaire (MTES), Ministère de l'enseignement supérieur, de la recherche et de l'innovation (MESRI)
- France Stratégie, organisme d'études et de prospective, d'évaluation des politiques publiques et de propositions, rattaché au premier ministre administrativement appelé commissariat général à la Stratégie et à la Prospective. En lien avec le haut conseil pour le climat.
- L'ADEME : L'Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) participe à la mise en œuvre des politiques publiques dans les domaines de l'environnement, de l'énergie et du développement durable. Elle met ses capacités d'expertise et de conseil à disposition des entreprises, des collectivités locales, des pouvoirs publics et du grand public, afin de leur permettre de progresser dans leur démarche environnementale.
- Les organismes de recherche : CEA, CNRS, CNAM
- L'alliance nationale de coordination de la recherche pour l'énergie : ANCRE
- L'AFHYPAC : L'Association Française pour l'Hydrogène et les Piles à Combustible (AFHYPAC) fédère les acteurs de l'hydrogène et des piles à combustible en France : entreprises, laboratoires et instituts de recherche, pôles de compétitivité, collectivités territoriales et associations régionales.
- Les sociétés de l'énergie : Air Liquide, Alstom, EDF, Enedis, Engie, McPhy (top 5 des sociétés sur la chaîne entière de production d'hydrogène), Symbio FCell, Total...
- Les constructeurs automobiles : Peugeot, Renault

Leur positionnement ainsi que celui de quelques constructeurs automobiles étrangers est synthétisé ci-dessous.

Légende colorée : Chercheurs ; Institutions d'État ; Elus/gouvernement ; Industriels ; Société civile

| POUR | PASSIF | INDECIS | CONTRE |
|---|---|--|------------------|
| CEA, CNRS, CNAM ANCRE ADEME MTES Air Liquide, Engie, McPhy, Alstom, Symbio FCell, Total, AFHYPAC Constructeurs japonais, coréen, EDF (depuis 2018) | BERCY, Assemblée Nationale, Sénat Public, presse Paradoxe (même si globalement pour la transition énergétique, question de l'hydrogène peu cou- verte) | Constructeurs français, allemands Enedis, EDF (position plutôt favo- rable depuis 2018 après un posi- tionnement historique défavo- rable) | France Stratégie |

Légende colorée : Chercheurs ; Institutions d'État ; Elus/gouvernement ; Industriels ; Société civile



Les normes de sécurité du véhicule à hydrogène et des infrastructures apparaissent comme l'un des premiers enjeux de l'acceptabilité de la mobilité hydrogène.

L'hydrogène est couramment produit et utilisé, depuis des décennies, dans l'industrie chimique et pétrochimique, et encadré par des règles de sécurité adéquates. Ainsi, les risques industriels apparaissent peu ou prou maîtrisés. La question posée est celle de la sécurité pour une utilisation décentralisée, dans de petites installations fixes ou mobiles, par de petites entreprises avec accès au grand public³².

En France, la timide arrivée des véhicules à hydrogène n'a eu qu'un impact limité sur l'évolution de la réglementation. En sus des règles d'homologation classiques pour les véhicules thermiques et des règles liées à l'électrification du système de propulsion, les véhicules à pile à combustible sont soumis à des règlements européens spécifiques, comme le règlement CE 79/2009 et sa directive d'application 406/2010³³. Pourtant, en France, le corpus réglementaire n'a jusque très récemment concerné que les installations classées pour la protection de l'environnement et dont la vocation était essentiellement industrielle. En 2015, l'ADEME avait certes diffusé largement un guide d'information sur la sécurité des véhicules à hydrogène et des stations-service de distribution d'hydrogène, mais il aura fallu attendre le 22 octobre 2018 (trois ans après l'installation de la première station de distribution à Paris) pour que soit signé le premier arrêté qui réglemente les installations classées soumises à déclaration pour le transfert d'hydrogène dans les réservoirs de véhicule terrestres.

L'absence de réglementation claire sur les véhicules hydrogène n'a pas représenté un obstacle majeur au déploiement des démonstrateurs. Grâce à des associations comme l'AFHYAPAC, les porteurs de projets de démonstrateurs n'ont pas hésité à prendre des risques financiers pour faire la preuve sur le terrain que les moyens de transport à hydrogène pouvaient cohabiter avec les moyens de transports plus traditionnels. L'arrivée des taxis Hype à Paris illustre ce dynamisme. L'installation de la station de distribution d'hydrogène du pont de l'Alma, pilotée par Air Liquide avec le soutien la mairie de paris, n'a pas été sans poser de question mais offrait des garanties de sécurité suffisamment convain-

³² L'industrie utilise de l'hydrogène à des pressions en général entre 200 à 300 bar, alors que les véhicules à hydrogène embarquent de l'hydrogène à 700 bar ; le mauvais entretien, l'usure, ou des accidents de véhicules sont des facteurs de risque plus prégnants dans ces configurations nouvelles.

³³ Ces deux règlements imposent notamment d'apporter la preuve de la sûreté de fonctionnement du système hydrogène.

cantes pour être *in fine* autorisée par la préfecture de police. Les démonstrateurs se sont faits ainsi de plus en plus nombreux dans les territoires.

En effet, le risque semble bien maîtrisé. Pour les sapeurs-pompiers, professionnels des risques technologiques, il ne faut pas tomber dans les fantasmes du risque lié à l'explosion. La manipulation de l'hydrogène présente un certain nombre de dangers sérieux qu'il ne faut pas nier, néanmoins une bonne connaissance de ces dangers a permis une conception sûre des systèmes utilisant l'hydrogène. Désormais, les véhicules sont en effet équipés de capteurs capables de détecter une micro fuite et de couper instantanément le système de distribution de l'hydrogène, les réservoirs en matériaux composites offrent une structure qui supporte des efforts mécaniques de forte intensité et enfin des thermo-fusibles permettent de libérer rapidement et sans risque d'explosion l'hydrogène en cas d'échauffement du véhicule.

Le risque d'incendie par propagation dans un espace confiné comme un parking souterrain a été parfaitement identifié par les sapeurs-pompiers de Paris. Pour eux, le risque lié à l'hydrogène les concerne bien plus lors des interventions³⁴ qu'il ne concerne les simples usagers qui la plupart du temps évoluent en milieu ouvert en sécurité. De fait, les préconisations sont particulièrement strictes concernant les véhicules hydrogènes. Le guide de l'ADEME préconise en effet de faire stationner les véhicules à l'air libre, dans des espaces non couverts. Il ne s'agit cependant que d'une recommandation de la part de la Direction Générale de la Sécurité Civile, l'arrêté du 25 juin 1980³⁵ ne comportant pas à ce jour de dispositions spécifiques aux véhicules hydrogènes.

Aujourd'hui, les démonstrateurs habituent peu à peu les français à la présence de véhicules à PàC sur les routes et dans les agglomérations. C'est cette cohabitation, bien plus que les discours officiels qui les rassurera définitivement. Toutefois, il serait opportun d'accompagner cette innovation d'une réglementation qui de fait tranquillise les citoyens mais aussi sécurise le concept (cf. GPL).

³⁴ Les militaires de la Brigade des sapeurs-pompiers de Paris (BSPP) considèrent que le danger d'un véhicule à PàC ne vient pas du véhicule lui-même mais de son comportement dans un incendie. À proximité de véhicules en feu dans parking couvert, un pompier ne sait pas à quel type de véhicule il a affaire et ne peut donc anticiper sur les effets produits. Il peut ainsi se mettre en danger en fonction des types de rayonnement.

³⁵ Arrêté du 25 juin 1980 portant approbation des dispositions générales du règlement de sécurité contre les risques d'incendie et de panique dans les établissements recevant du public (ERP).





Pour en savoir plus
www.ihest.fr

Institut des hautes études pour la science et la technologie
Ministère de l'Enseignement supérieur, de la Recherche et de l'Innovation
1 rue Descartes, 75231 Paris cedex 05, France

L'IHEST est un établissement public à caractère administratif, sous la tutelle des ministères en charge de l'éducation nationale, de l'enseignement supérieur et de la recherche, prestataire de formation enregistré sous le n° 11 75 42988 75. Ses formations sont référencées dans Datadock.