POSITION TECHNIQUE DE FILIERE

HYDROGENE ET PILES A COMBUSTIBLE

Février 2020

PLATEFORME FILIERE AUTOMOBILE ET MOBILITES
2 rue de Presbourg, 75008 Paris
www.pfa-auto.fr

Hydrogène et piles à combustible

Table des matières

1 Synthèse et recommandations 2
2 Contexte et motivations 4
3 Une technologie complémentaire à la batterie 5
4 Impact environnemental de la filière hydrogène 9
4.1 Rendement de la chaine énergétique hydrogène 9
4.2 Émissions de CO2 du puits à la roue 10
4.3 Impact environnemental sur l'ensemble du cycle de vie 11
4.4 Économie circulaire et recyclage 11
4.5 Matériaux critiques 11
5 Enjeux marchés 12
6 Challenges à relever 14
6.1 Challenges techniques 14
6.2 Challenge économique : vers la grande série 15
6.3 Un hydrogène propre et compétitif 16
6.4 Un tissu fournisseur à développer 17
6.5 Un accompagnement politique 18
7 ANNEXES 19

1 Synthèse et recommandations

La mobilité hydrogène, par sa complémentarité avec les technologies de stockage de l'énergie par batterie, répond à des besoins du marché, en termes de rayon d'action et/ou de taux d'usage du véhicule élevé. Le véhicule électrique à pile à combustible hydrogène, est une solution « zéro émission » du réservoir à la roue, comme le véhicule électrique à batterie. Ce dernier est déjà déployé depuis plusieurs années alors que le véhicule électrique hydrogène a démarré son déploiement plus récemment.

Même si son rendement énergétique global est moins bon que celui de la mobilité électrique à batterie, la mobilité hydrogène répond aux enjeux de protection de l'environnement (diminution des émissions de CO2) en complément des enjeux de développement des énergies renouvelables et de leurs besoins de stockage, et des enjeux d'indépendance énergétique.

La mobilité hydrogène est par ailleurs une opportunité pour l'industrie française dans un contexte de transition énergétique, par un renforcement du positionnement technologique d'acteurs français sur la scène européenne et internationale.

La PFA identifie des actions de soutien nécessaires au déploiement de cette technologie de mobilité, ainsi que des points de vigilance importants.

Recommandations

1. **Construire un écosystème hydrogène cohérent et un tissu industriel Européen sur l'ensemble de la chaine de valeur**
   L'émergence d'un marché de véhicules à hydrogène est conditionnée par l'existence d'un « écosystème hydrogène » bien plus large que la mobilité, comprenant également la production et les applications pour l'industrie et l'habitat et qui dépend essentiellement des stratégies énergétiques des Etats. Dans ce cadre, la mobilité hydrogène a sa place, mais ne peut être à elle seule le facteur déclenchant d'un déploiement large de l'hydrogène.
   La mobilité H2 est aussi une opportunité pour asseoir des champions industriels français - équipementiers automobiles, équipementiers pour les infrastructures de distribution, énergéticiens - dans cet écosystème.

2. **Contrôler l'impact environnemental de la mobilité hydrogène sur l'ensemble du cycle de vie**
   L'impact environnemental de la mobilité hydrogène devra être évalué sur l'ensemble de son cycle de vie, et comparé aux autres solutions de mobilité.
   Le recyclage ou la revalorisation des composants constitutifs d'un système hydrogène (pile à combustible et réservoir notamment) requiert l'adaptation de la filière existante et nécessite le développement à plus grande échelle des technologies et process associés.

3. **Disposer d'une roadmap technologique et économique pour un hydrogène « décarboné et renouvelable » compétitif**
   La filière de production d'hydrogène doit établir la roadmap technologique et économique, et ses conditions de réussite, pour assurer la transition progressive entre hydrogène carboné (actuellement produit à partir de gaz fossile) vers un hydrogène « renouvelable » (produit à partir d'électrolyse de l'eau et d'électricité renouvelable) à horizon 20 ans.
   Dans cette phase transitoire, l'H2 pourra être « décarboné » indirectement par des procédés de capture et de valorisation du CO2 dans le process de production.
   L'enjeu étant de fournir aux clients de l'H2 décarboné et renouvelable au prix permettant un TCO compétitif dans le marché. Un premier seuil de prix client autour de 7 €/kg (TVA incluse, hors marge) – atteignable selon étude PFA / BIPE-BDO « mix énergétique 2019 » - est un prérequis pour le déploiement au-delà de 1% des ventes mondiales annuelles de VL et VUL à horizon 2035.

4. **Disposer d'une roadmap technologique et industrielle pour abaisser le coût de la technologie, sans compromis avec les cibles de performances**
   Les équipementiers et OEM doivent passer de la petite à la grande série, afin de positionner la technologie à un TCO compétitif.

5. **Construire une politique publique de soutien stable**
   Un soutien public est nécessaire : soutien à la R&D et au déploiement industriel, ainsi qu'à l'achat des véhicules et à l'hydrogène vendu en station pour permettre d'atteindre un TCO compétitif, tant que les volumes ne sont pas suffisants. Il doit s'inscrire dans la dynamique de soutien Européenne.

6. **Démarrer un marché centré sur les véhicules utilitaires / industriels**
   Le marché visé pour un premier déploiement est celui des véhicules utilitaires et des véhicules industriels (par exemple : bus et camions régionaux), pour rationaliser le déploiement des premières infrastructures ; puis dans un 2ème temps celui des véhicules particuliers nécessitant à la fois un taux d'usage optimisé et un fort rayon d'action.

Points de vigilance

- Les technologies de **stockage longue durée** (en particulier stockage dans des cavités géologiques) font l'objet de nombreuses études de faisabilité pour instruire les modèles d'affaires, la limitation des pertes par diffusion à travers les roches ou encore des impacts géochimiques et biologiques.
- Les technologies de **CO2 Capture and Storage** (CCS), étape intermédiaire entre la production de H2 sur base de méthane et l'hydrogène issu de renouvelables devront faire l'objet d'investissements et d'acceptation sociétale.

2 Contexte et motivations

Améliorer la qualité de l'air, réduire les émissions de CO2 et favoriser la transition énergétique. Les transports sont aujourd'hui au cœur de ces trois défis majeurs, que la France, comme d'autres pays a décidé de relever. Face à l'enjeu climatique, le développement des véhicules électriques reste, plus que jamais, une réponse pertinente

La production d'hydrogène décarboné et le développement de son premier marché, la mobilité, répondent concomitamment à plusieurs enjeux majeurs :

- La lutte contre le réchauffement climatique,
- L'amélioration de la qualité de l'air
- Le développement des énergies renouvelables
- La dynamisation des territoires grâce à la création d'écosystèmes hydrogène locaux créateurs de valeur et d'emplois
- L'indépendance énergétique

Le développement de la filière, qui va au-delà de la seule problématique du transport et de la mobilité, va créer ce type de cercle vertueux.

Au cours des 18 derniers mois le contexte hydrogène / piles à combustible a fortement évolué :

- Le Japon, la Chine et la Corée ont dévoilé des roadmaps de déploiement ambitieuses (par exemple : 1 million de véhicules en 2030 en Chine), associées à des plans financiers de grande envergure pour développer l'hydrogène dans la mobilité. Les plans de soutiens nationaux sont doublés dans ces 3 pays par des aides régionales au développement de l'industrie automobile hydrogène.

- En Europe, l'hydrogène est désormais reconnu comme indispensable à la feuille de route énergétique et des procédures sont mises en place pour favoriser l'investissement des États dans leurs industries hydrogène nationales (IPCEI - Important Projects of Common European Interest). L'hydrogène sera également un des piliers du « green deal » que la nouvelle Commission Européenne met en place.

- Les sphères publiques tant européennes (clean vehicle directive, Alternative fuels Infrastructure Directive - AFID) que françaises (CSF – contrat stratégique de filière, plan national hydrogène, loi transition énergétique, ECV - Engagements pour la Croissance Verte, LOM - Loi d'Orientation des Mobilités) considèrent que le véhicule hydrogène est une solution qui trouve sa place au côté du véhicule électrique à batteries pour atteindre les objectifs de décarbonation du transport.

- La filière hydrogène française, présente sur l'ensemble de la chaîne de valeur avec des leaders reconnus, a déjà initié le déploiement sur le territoire de stations et de véhicules essentiellement professionnels (véhicules utilitaires, flottes captives, bus, camions). La structuration de la filière hydrogène est en cours avec ces derniers mois des investissements ou rachats majeurs cote secteur automobile

- La filière a engagé des roadmaps (plans R&D et investissements) claires en faveur de l'industrialisation

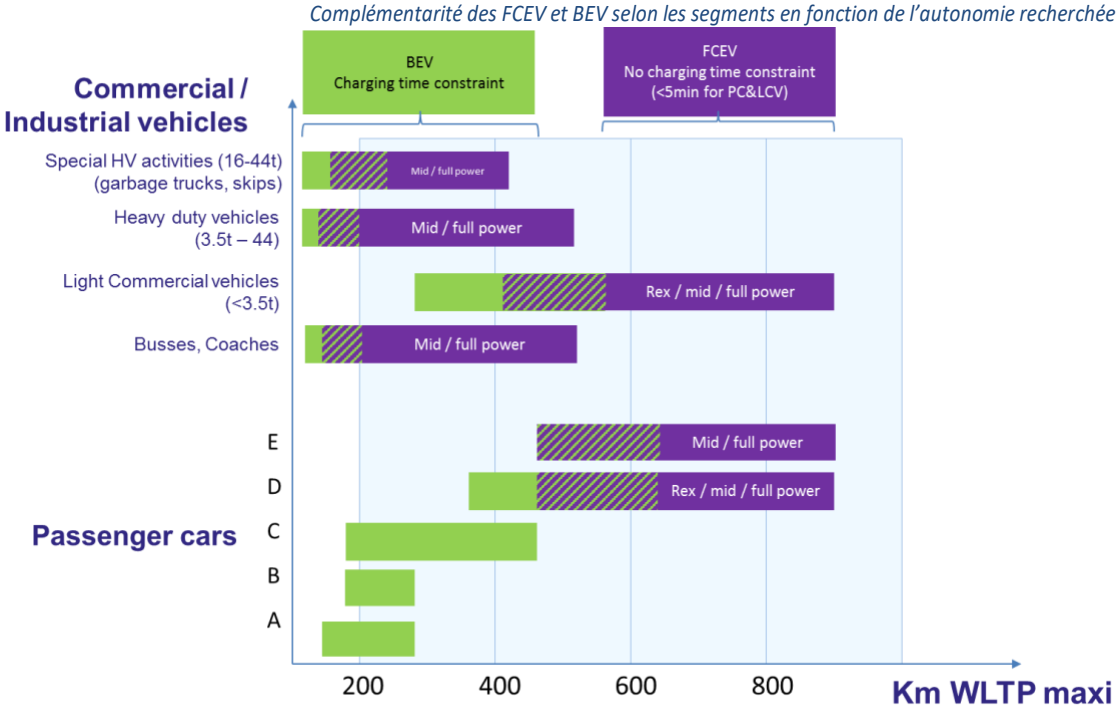
- Le marché (aujourd'hui essentiellement professionnel) – opérateurs de mobilité, collectivités, régions (plus de la moitié des régions françaises ont engagé des feuilles de route de déploiement) – se fait de plus en plus prescripteur d'un besoin de mobilité zéro émission auquel l'hydrogène répond en complémentarité de la technologie batterie

3 Une technologie complémentaire à la batterie

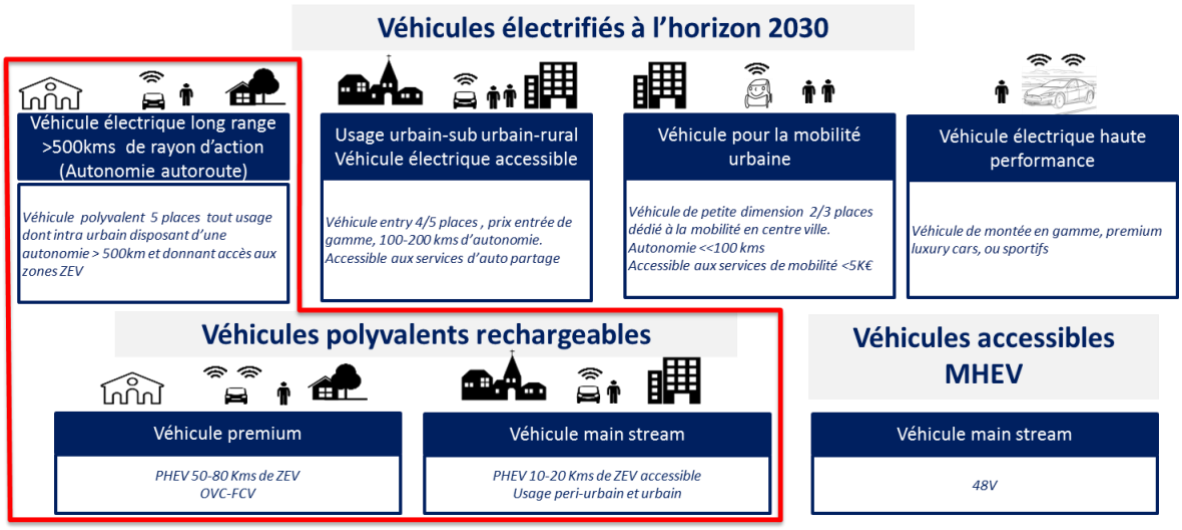
Un véhicule à hydrogène (FCEV) est un véhicule électrique, doté d'une génération autonome d'électricité par Pile à Combustible. Il en reprend de nombreux attributs : aucune émission de CO2, de particules ou de polluants du réservoir à la roue, silence et agrément de fonctionnement. Son intérêt est de permettre un temps de recharge équivalent à celui d'un véhicule à carburant traditionnel (sous réserve d'existence d'un réseau de stations suffisant).

Le FCEV offre la possibilité de décorréler en partie la production et l'usage en fonction des critères économiques et/ou environnementaux locaux. Cette technologie est complémentaire de la technologie de véhicule électrique à batterie (BEV).

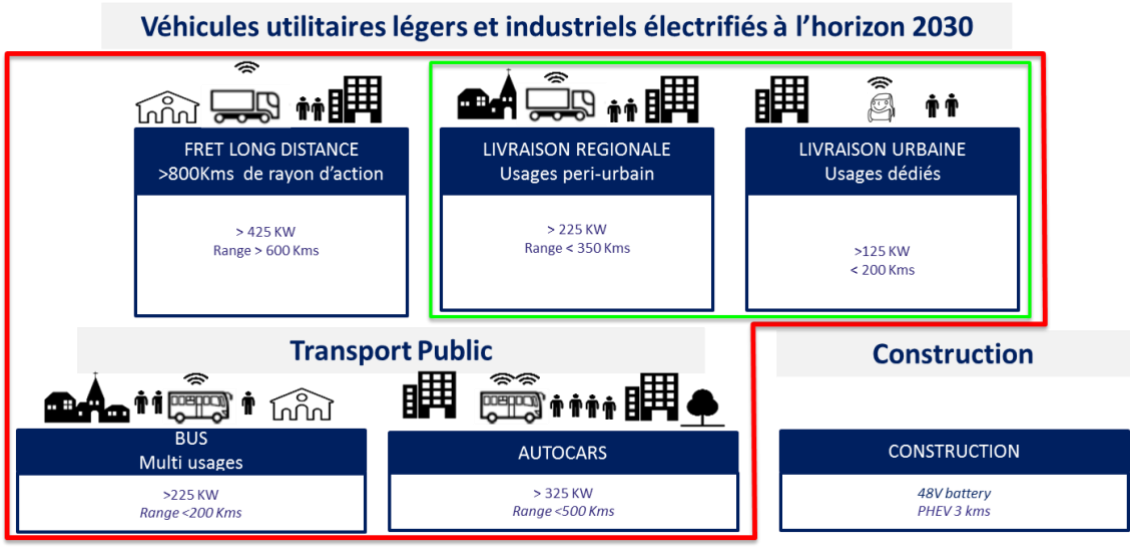
Complémentarité des FCEV et BEV selon les segments en fonction de l'autonomie recherchée



Cas d'usages types pour les véhicules électrifiés légers – périmètre H2 en rouge



Cas d'usages types pour les véhicules électrifiés lourds – périmètre H2 en rouge – périmètre VUL en vert

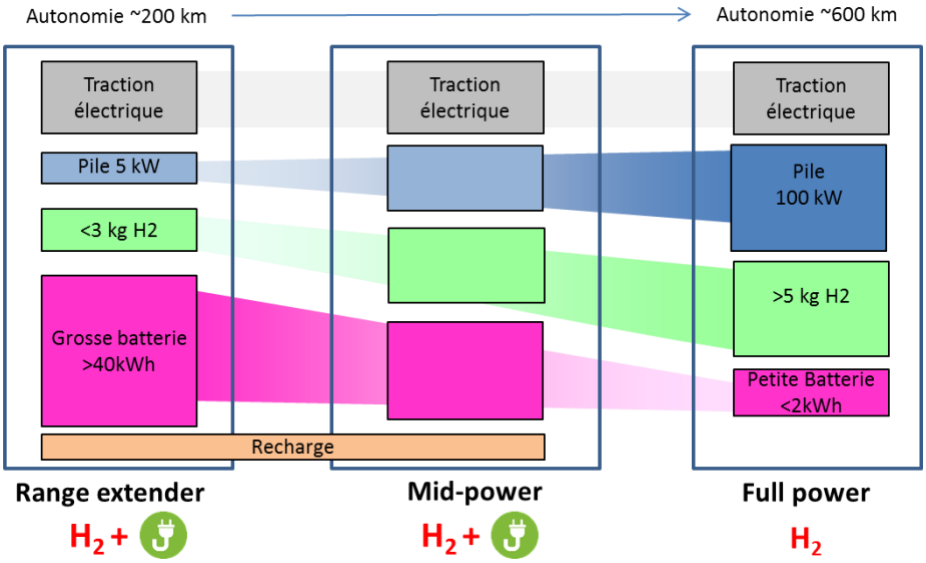


Plusieurs périmètres d'usages peuvent être adressés, moyennant des variations de l'architecture et des dimensionnements du système pile à combustible :

- Full power : permet un usage polyvalent, alimenté exclusivement par un réseau de distribution d'H2
- Range extender : alimenté aussi bien en hydrogène qu'en électricité, permet un usage urbain et périurbain intensif, pour des flottes de type VU (par exemple activité de messageries ou taxi)
- Mid-power : permet un usage polyvalent, alimenté à la fois par un réseau de distribution d'H2 et rechargeable sur le réseau électrique [1], avec un dimensionnement du système fuel cell intermédiaire entre le « range extender » et le « full power ».

[1] Les FCEV utilisant une batterie de capacité significative et présentant la possibilité de recharger sur le réseau électrique sont aussi qualifiés de OVC – FCV (Off Vehicle charging Fuel Cell Vehicle).

Les différentes typologies de FCV (pour véhicules légers particuliers et utilitaires)



Exemples de dimensionnement pour des véhicules légers

	Energie batterie (kWh)	Puissance de la pile (kW)	Quantité d'H2 embarquée (kg)	Caractéristique du système de stockage H2	Exemples de véhicule
Range extender	> 40	5	2	1 tank 350 ou 700 bar	Renault Kangoo ZE H2 Master ZE H2
Mid power	20 - 40	30 – 80	> 4	2 tanks 700 bar	Daimler GLC
Full power	1 - 2 (typage puissance)	100	> 6	3 tanks 700 bar	Hyundai Nexo Toyota Mirai

Exemples de FCV commercialisés : Renault Kangoo ZE H2, Daimler GLC, Hyundai Nexo, Toyota Mirai

Range Extender

Full Power

Mid Power

Full Power

Exemples de dimensionnement pour des véhicules lourds

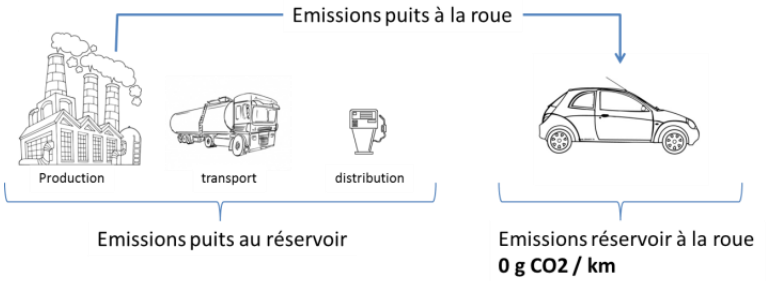
	Energie batterie (kWh)	Puissance de la pile (kW)	Quantité d'H2 embarquée (kg)	Caractéristique du système de stockage H2	Exemples de véhicule
Range Extender	85 - 250	20 - 60	5 – 10	350 bar	Safra Businova (Bus) Dongfeng/Refire (VUL) Fed Ex Workhouse (VUL) Minibus e.Go
Mid to full power	120 250 85 320	100 120 230 240	45 35 21 100	9 réservoirs – 350bar 7 réservoirs – 350 bar 10 réservoirs – 700 bar 700 bar	Solaris Urbino 12 (Bus) Evobus Citaro FC (Bus) Toyota Sora (Bus) Nikola Tre (Camion) Hyundai XCient FC

Toyota Sora, Solaris Urbino 12, Safra Businova, Nikola Tre, Hyundai Xcient

4 Impact environnemental de la filière hydrogène

L'impact environnemental peut être mesuré au travers de 3 indicateurs :

- Le rendement de la filière énergétique (well to wheel /– du puits à la roue) : depuis la production de l'énergie vers sa conversion en mouvement
- L'émission de CO2 (well to wheel)



- L'impact global environnement, sur l'ensemble du cycle de vie (craddle to grave – du berceau à la tombe)

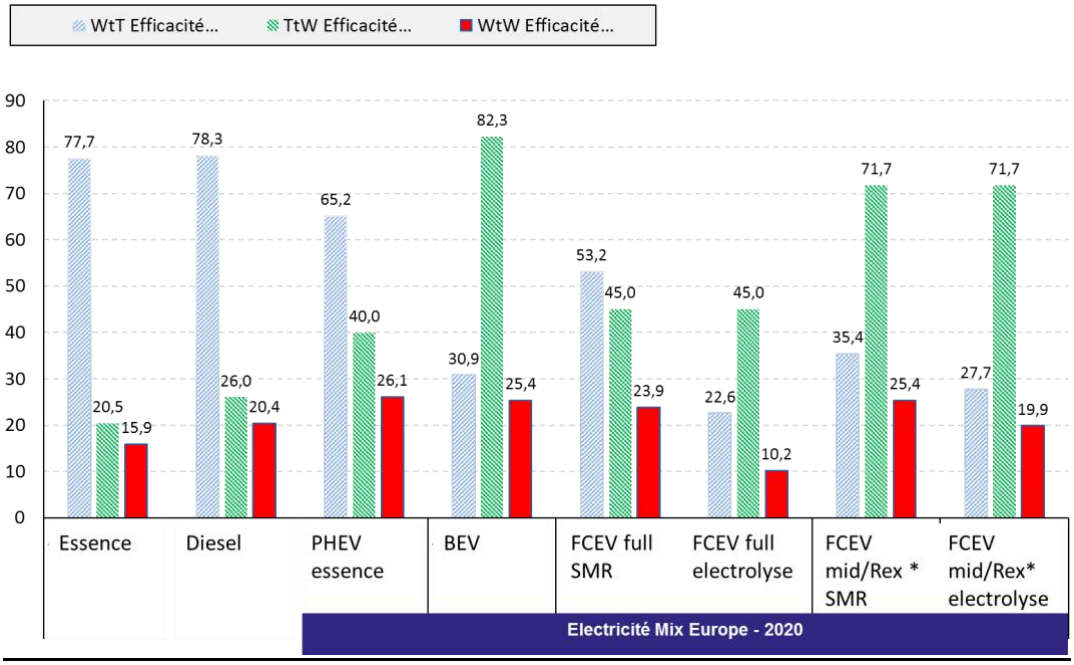
4.1 Rendement de la chaine énergétique hydrogène

La chaine énergétique hydrogène présente un rendement puits à la roue du même ordre de grandeur que les carburants fossiles classiques (diesel, essence), quel que soit le type de production (à partir de gaz ou d'électrolyse sur base d'électricité renouvelable).

Elle est en retrait face à la filière électrique du fait d'une cascade de rendements pénalisante.

Le différentiel de rendement est atténué dans le cas d'une architecture mid-power.

Rendement énergétique du puit à la roue pour différentes énergies primaires
Source : Concawe-Eucar JEC-WtW Study 2014 ; PFA - 2018

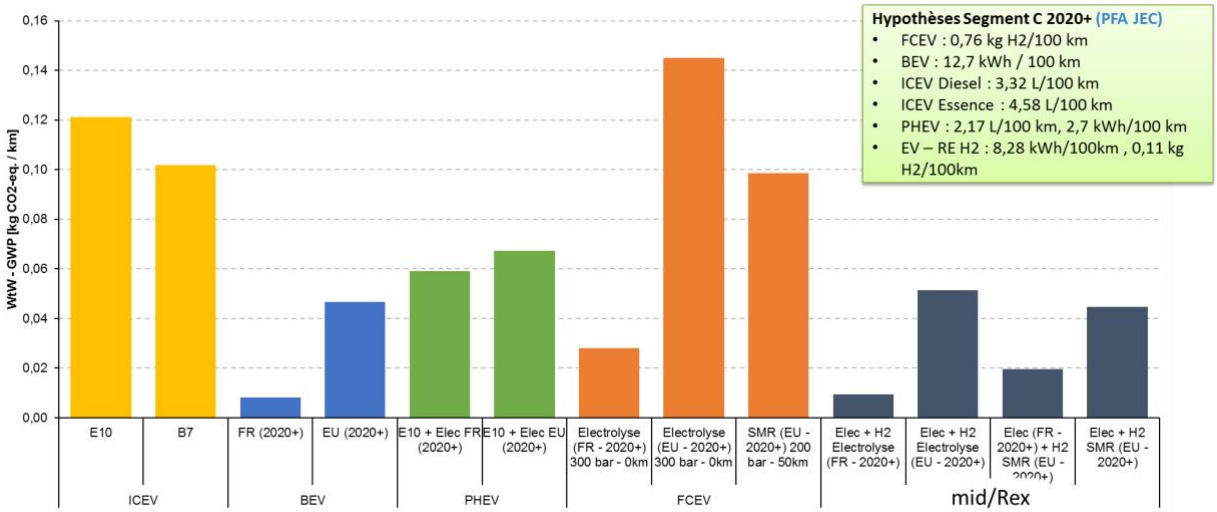


4.2 Émissions de CO2 du puits à la roue

Un véhicule pile à combustible n'émet à l'échappement ni particules, ni polluants, ni CO2 à l'usage du réservoir à la roue. Par contre, dans un bilan puits à la roue, ses émissions de CO2 sont variables selon le mode de production et d'acheminement de l'hydrogène.

Les émissions pour le BEV sont également dépendantes du mix de production d'électricité.

Émissions CO2 du puits à la roue calculées pour la France et l'Europe pour différentes chaines de traction pour un véhicule de segment C. Source : Synthèse de travaux réalisés par la filière et des partenaires extérieurs



Pour un véhicule rechargeable, les émissions seront dépendantes de son dimensionnement (rapport batterie / système hydrogène) et donc dépendra à la fois de l'origine de l'hydrogène consommé et de l'origine de l'électricité.

Pour un FCEV full power utilisant un hydrogène produit classiquement par vaporeformage de méthane on observera des émissions CO2 comparables à celle d'un véhicule à motorisation thermique.

L'usage d'un hydrogène fabriqué par électrolyse sous réserve d'un mix électrique favorable (cas français) permet de réduire encore ces émissions avec un optimum obtenu pour de l'hydrogène produit à partir d'énergies renouvelables.

La disponibilité d'un hydrogène décarboné est indispensable pour garantir un impact environnemental des véhicules à hydrogène limité.

Le besoin d'une harmonisation de la qualification de l'origine de l'hydrogène entre la position de la Commission Européenne (Directive RED2) et les travaux menés dans le cadre de CertifHy[2] est nécessaire afin d'assurer une visibilité aux industriels utilisateurs de cet hydrogène.

[2] CertifHy : projet supporté par le FCH-JU pour les garanties d'origine pour l'hydrogène vert et l'hydrogène faiblement carboné

4.3 Impact environnemental sur l'ensemble du cycle de vie

L'enjeu environnemental du FCEV se situe notamment au niveau de la production d'hydrogène, là ou pour le BEV les enjeux sont principalement reportés sur la fabrication de la batterie et sur l'origine de l'électricité

L'analyse du cycle de vie est un élément essentiel pour jauger l'impact environnemental d'un véhicule en étudiant différents indicateurs d'impacts sur l'air, sur l'eau et sur les ressources.

Plusieurs analyses sont en cours à ce jour (décembre 2019) et feront l'objet d'une mise à jour de cette note.

4.4 Économie circulaire et recyclage

En fin de vie du véhicule, plusieurs options de recyclage des réservoirs d'Hydrogène en fibre composites sont en cours d'évaluation.

Les systèmes de stockage de l'hydrogène utilisant des réservoir haute pression – type 4 – qui sont conçus pour la durée du véhicule, dans l'état actuel des connaissances ne présentent pas de dégradation des fonctionnalités au cours du temps. Il est donc légitime d'envisager de réutiliser ces réservoirs pour un nouvel usage. Des contrôles, dont les modalités sont encore à définir, devront probablement être effectués pour en garantir ce nouvel usage.

Pour la 2ème vie d'un réservoir on peut donc envisager :

- Réutilisation pour stockage stationnaire – seconde vie :
- L'utilisation des réservoirs dans une application moins contraignante ayant une pression de fonctionnement inférieure pourrait être une option. On peut parler dans ce cas d'une seconde vie des réservoirs. Ceci imposera une certification type pour application stationnaire, différente de la certification véhicule. Toutefois, ce modèle technico-économique n'a jamais été évalué.
- Recyclage du réservoir
- L'objectif ultime de la fin de vie du composant est le recyclage et la revalorisation de la fibre de carbone. Des techniques de recyclage à fort potentiel sont à l'étude telles que le broyage et la réutilisation en tant que charge dans une matrice similaire ou la calcination pour récupération de la fibre longue. La fibre de carbone recyclée, dont les propriétés mécaniques sont inférieures à la fibre neuve pourra être aussi réutilisée dans des applications moins contraignantes (pièces mécaniques simples). La filière de recyclage des réservoirs haute pression se mettra en place progressivement en parallèle du déploiement massif des véhicules hydrogène

Concernant le système pile à combustible et plus particulièrement le stack, le développement d'une filière de recyclage est à mettre en œuvre.

Cependant les matériaux constitutifs (métal) devraient faciliter le recyclage. La collecte est classique (ce n'est pas un déchet dangereux) et sur l'assemblage membrane électrode (AME) le recyclage des catalyseurs (Pt) pourrait se faire au travers de la filière existante de recyclage des pots catalytiques (filière très efficiente), le platine pouvant être récupéré et réutilisé à plus de 95%[3]

4.5 Matériaux critiques

Le platine est le seul matériau critique [4] intervenant dans la conception des systèmes fuel cell. Une vigilance est à avoir sur la concentration de la production (Afrique du Sud et Russie) et les critères de responsabilité sociale et environnementale. Cf. position technique PFA spécifique.

La problématique de matériaux critiques sur les autres constituants de la chaine de traction (batteries en particulier) est identique à celle des véhicules électriques à batteries.

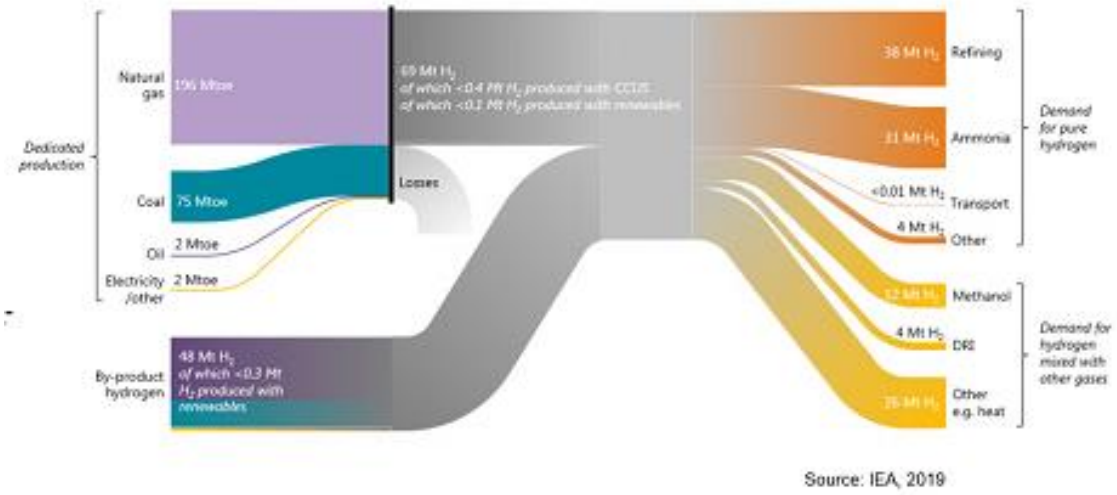
[3] Source : Umicore

[4] Matériau sensible = définition à mettre

5 Enjeux marchés

Dans le domaine du transport, la demande H2 est encore très limitée et représente aujourd'hui moins de 1% de la consommation mondiale de l'hydrogène qui est essentiellement liée à la consommation dans le domaine industriel.

Répartition production / consommation d'H2 par secteur, IEA 2019



Le marché mondial actuel est essentiellement un marché d'amorçage basé sur des véhicules utilitaires, des bus, des camions ; et sur des marchés de niche pour des véhicules particuliers « full power », dont le prix de vente facial (primes déduites) est supérieur à 50 000€. Il circule à l'heure actuelle environ 20 000 véhicules particuliers répartis entre le Japon, la Californie, la Corée du Nord et l'Europe, 1000 véhicules utilitaires et 500 bus essentiellement en Europe et en Chine. En France, le marché a démarré par les utilitaires et les flottes de taxis.

Ce marché est actuellement entre autres limité par le nombre de stations délivrant de l'H2 (35 stations en France à fin 2019 dont 16 publiques).

Le plan français de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique, présenté en juin 2018, prévoit le déploiement d'écosystèmes territoriaux de mobilité hydrogène sur la base notamment de flottes de véhicules professionnels soutenues par une infrastructure adaptée :

- 5 000 véhicules utilitaires légers et 200 véhicules lourds (bus, camions, TER, bateaux) ainsi que la construction de 100 stations, alimentées en hydrogène produit localement à l'horizon 2023 ;
- de 20 000 à 50 000 véhicules utilitaires légers, 800 à 2000 véhicules lourds et de 400 à 1000 stations à l'horizon 2028.

La revue à la baisse des investissements dédiés impose de la vigilance quant à la stabilité des engagements.

La filière automobile dans son contrat stratégique de filière 2018-2022 intègre explicitement l'objectif de création d'une filière hydrogène française compétitive pour développer les usages en mobilité.

En complément, ont été signés en juin 2019 :

- Le premier contrat du Comité Stratégique de Filière concernant les nouveaux systèmes énergétiques (l'hydrogène se retrouvant au cœur de ces systèmes)
- Un Engagement pour la Croissance Verte (ECV) relatif à la production d'hydrogène décarboné pour l'industrie
- Un ECV relatif à la mobilité routière dans lequel les industriels s'engagent à développer de nouveaux véhicules et composants hydrogène, des nouvelles stations de distribution d'hydrogène, mais aussi à déployer la mobilité hydrogène au travers d'écosystèmes territoriaux avec des objectifs quantifiés d'introduction de véhicules et de stations de recharge. De son côté, l'État prendra des dispositions législatives et réglementaires pour faciliter le déploiement des infrastructures et des véhicules hydrogène.

Différents inducteurs peuvent faire évoluer le marché vers une pénétration plus importante de la technologie pile à combustible :

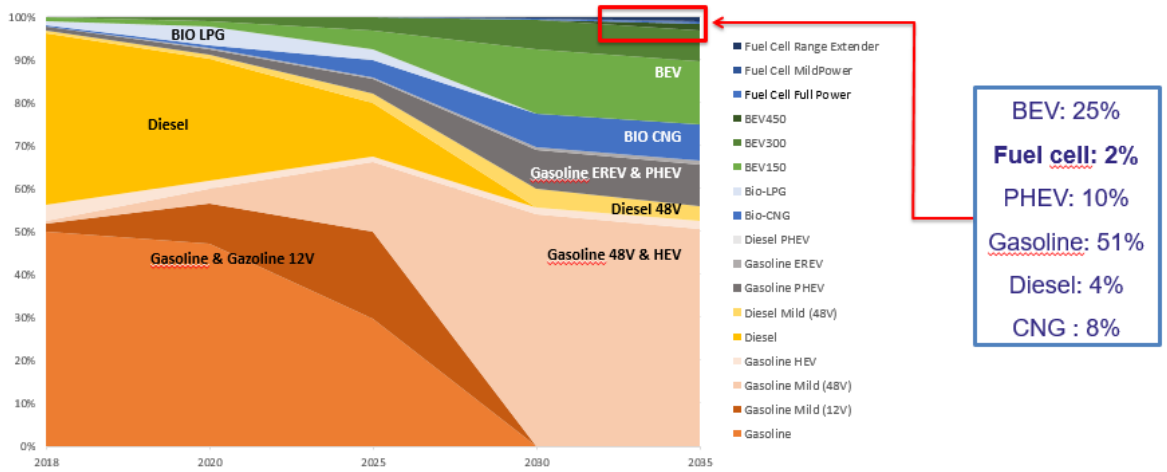
- Des stratégies Étatiques favorisant le vecteur hydrogène pour la mobilité, dans un écosystème global
- Des évolutions de réglementation réservant l'accès à certaines zones à des véhicules zéro émission
- Une acceptation sociétale favorisant le vecteur hydrogène.

La pénétration du marché est majoritairement impactée par le coût total de possession (TCO – Total cost of ownership), en particulier

- Le prix de la technologie (à l'achat ou sous forme de loyers)
- Le prix de l'H2
- Le coût d'entretien
- La valeur résiduelle du véhicule

A l'amorçage, un potentiel de marché important peut trouver sa place au travers de solutions range extender ou mid-power offrant une synthèse plus intéressante notamment d'un point de vue économique.

Le scénario de référence PFA pour les véhicules légers (sur un modèle tiré par le TCO) conduit à une part de marché mondiale de l'ordre de 2% en 2035 (sous hypothèse de prix d'H2 à 7.3 € / kg TTC).



Une des conditions de réussite majeure des différents plans – français ou internationaux - repose sur leur stabilité et leur capacité à accompagner les filières industrielles dans la durée.

6 Challenges à relever

6.1 Challenges techniques

Quelle que soit la cible de véhicules envisagés (VP, VUL, Bus, Camions…) il reste des verrous à lever sur les systèmes hydrogènes en termes de maturité, d'intégration et de coût.

Challenges techniques sur les composants et process de fabrication d'un système pile à combustible hydrogène.

Maitrise
Progrès nécessaires
Points durs

	Maturité	Intégration	Coût	Verrous
Stack				
Assemblage membrane electrode				Coût, Humidification intégrée, Catalyseur[5], température de fonctionnement
Plaque bipolaire				
Intégration des cellules – Stackage		↗		Capacitaire industriel, Robotisation du Process
Humidification externe				
Durabilité		n.a.		>7000h pour applications automobiles
Système pile à combustible				
Compresseur	↘	↘	↘	Compromis coût / perfo / encombrement
Tuyauterie hydrogène				
Recirculation hydrogène				Pompe, éjecteur, injecteur
Gestion thermique (échangeur / ventilateur)				Dimensionnement et intégration critiques sur « full power »
Pompes				
Filtration d'air				Capacité d'absorption vs pics de pollutions + fréquents
Contrôle / commande				
Capteurs	↗	↗	↗	
DCDC				
Système de stockage de l'hydrogène				
Réservoir	↗		→	Coût, process, masse, facteur de forme
Tête de bouteille	↗	↗	→	Coût, Compacité, Intégration de fonctions
Ligne de remplissage – Safety	↗	↗	→	Disponibilité raccord 700 bars
Adaptation du système				
Intégration géométrique du système	↗	↗	↗	
Gestion thermique	↗	↗	↗	

↗ → ↘ = évolution par rapport à 2017

Les développements futurs de la technologie devront en priorité porter sur :

- Une forte réduction des coûts (concerne l'ensemble des briques technologiques, en particulier : AME[6], réservoir, compresseur, DCDC, management thermique)
- L'intégration du système pile à combustible et du réservoir dans les véhicules, sans concession sur la sécurité, l'habitabilité
- La gestion thermique, en particulier pour les architectures « full power », sans concession sur la durabilité du système, l'aérodynamique ou l'attractivité du style extérieur (un axe d'amélioration étant l'augmentation de la température de fonctionnement)
- L'amélioration du rendement et de la durabilité des systèmes

[5] Une diminution de la quantité de platine est visée pour diminuer le coût de la technologie. Un déploiement large de la technologie pourrait conduire à une tension sur l'approvisionnement du matériau.

[6] AME : Assemblage Membrane / Electrode

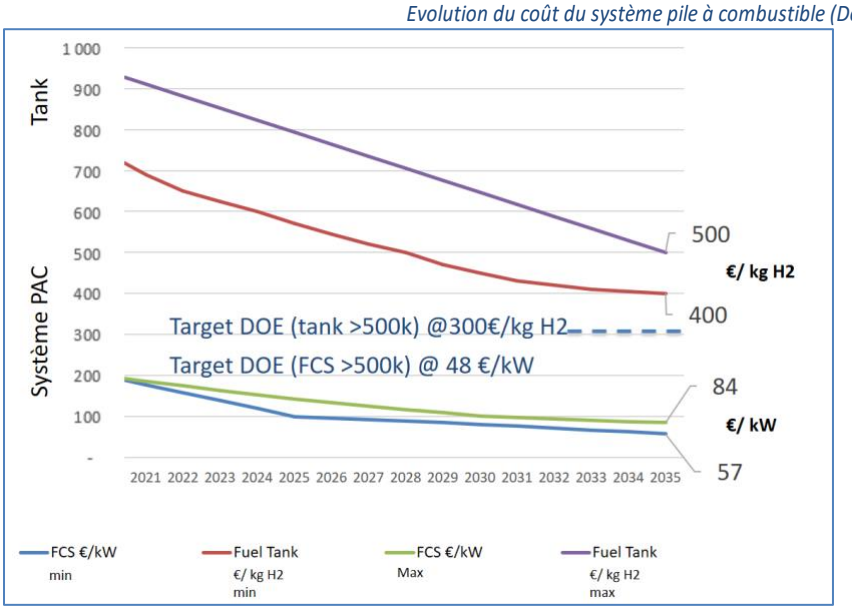
6.2 Challenge économique : vers la grande série

Pour les chaines de tractions pile à combustible hydrogène le challenge économique réside essentiellement dans la capacité de la filière à passer de la petite série à la grande série : passage de l'échelle du laboratoire à l'échelle de la production de masse en usine. L'effet volume est très significatif dès lors que l'on sera en mesure de dépasser pour les systèmes automobiles des volumes supérieurs à 10 000 unités par an.

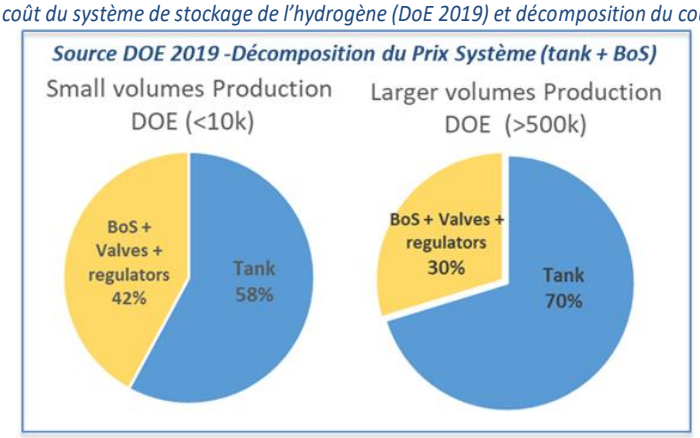
La filière estime un coût compris entre 57€/kW et 84€/kW à horizon 2035 pour des volumes compris entre 100.000 et 500.000 unités par an. La vision DoE (Department Of Energy – US) plus optimiste (ci-dessous) indique pour 2025 un coût compris entre 32€/kW et 42€/kW pour les mêmes volumétries.

Sur le stockage d'hydrogène embarqué, la filière estime un coût à horizon 2035 de 400€/kg pour des volumes de 100.000 à 500.000 unités par an, le DoE

Evolution du coût du système pile à combustible (DoE année 2018)



Évolution du coût du système de stockage de l'hydrogène (DoE 2019) et décomposition du coût (Strategic Analysis Inc.)



Les principaux points d'effort doivent porter sur la diminution des différents coûts système – stockage H2 et pile, et en particulier sur certains composants clés : assemblage membrane / électrode, compresseur / ligne d'air, DCDC.

L'effet volume est à activer, basé sur une transition entre phases et industrialisation à plus grande échelle.

6.3 Un hydrogène propre et compétitif

La question du coût de l'hydrogène et de son origine carbonée / décarbonée est essentielle dans l'écosystème hydrogène.

Le prix de vente de l'hydrogène doit être compatible d'un coût à l'usage compétitif pour les clients et d'un business model équilibré pour la chaine industrielle amont.

Les principaux inducteurs de coût de l'hydrogène sont :

- Le type de production : vapo-reformage de gaz (éventuellement couplé à du CCS[7]), électrolyse centralisée ou sur site
- Le coût de l'énergie primaire : électricité ou gaz
- L'amortissement des investissements
- Le type de transport : sous forme gazeuse / liquide, par camion, par pipe-line, faiblement ou fortement compressé
- Le type de stockage associé (en surface, en cavités)
- Coûts de distribution (entre autres dépendant du dimensionnement et du taux de charge des stations)
- Les scénarios de taxation et de marge

Les prix actuels se situent entre 10 et 14 €/kg.

L'étude PFA / BIPE-BDO « mix énergétique 2019 » montre qu'un coût de l'hydrogène décarboné possible délivré au client pourrait se situer en scénario central autour de 7.3 €/kg H2 (TVA incluse, hors marge) à horizon 2035.

Par exemple, pour un VP embarquant 5 kg d'H2, avec une consommation de 0.9 kg/ 100 km, un plein est de l'ordre de 36.50 € (TVA incluse, hors marges).

Le caractère décarbonné et renouvelable de l'hydrogène devra être conforme aux directives européennes en la matière.

Une roadmap de production / stockage / distribution d'hydrogène vert et compétitif est à soutenir.

Un focus particulier doit être mené sur la problématique de stockage longue durée, à la fois sur les solutions et faisabilités technologiques et sur les conditions économiques

[7] CCS : Carbon Capture and Storage

6.4 Un tissu fournisseur à développer

Capacité des acteurs (connus de la PFA) actifs et potentiels sur les technologies piles à combustible à hydrogène

		France	Europe
Stack	Assemblage membrane électrode		
	Plaque bipolaire		
	Assemblage / packaging du stack		
Système PàC	Compresseur		
	Tuyauterie Hydrogène (injection, purge)		
	Gestion thermique (échangeur / ventilateur)		
	Recirculation H2 (active / passive)		
	Filtration d'air		
	Contrôle / commande		
	Capteurs		
	DCDC		
Stockage H2	Réservoir		
	Tête de bouteille		
	Ligne de remplissage - Safety		
Intégration système	Constructeurs, intégrateurs		
Economie circulaire	Economie circulaire, recyclage		

acteurs positionnés — acteurs potentiels — Peu ou pas d'acteurs identifiés

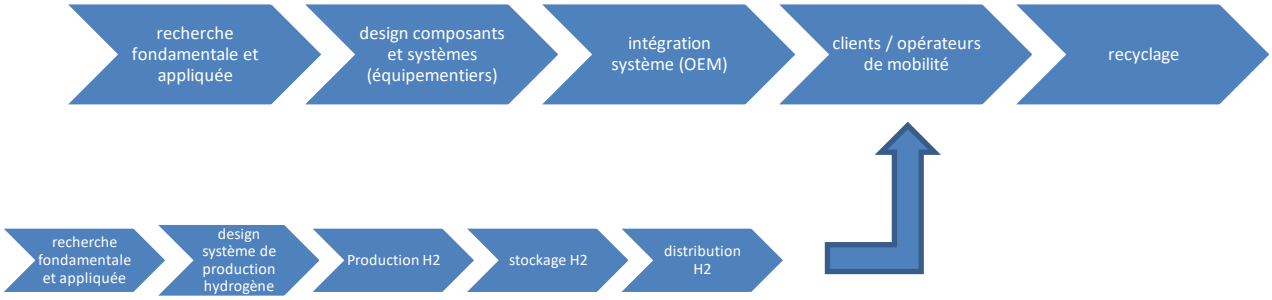
Afin d'accompagner les développements futurs de la technologie des compétences clés sont à développer et renforcer au niveau Français et Européen, en particulier les compétences qui permettrons :

- le développement d'AME au meilleur niveau de performance
- le développement de technologie de compresseur à un coût compatible d'une production de masse
- le développement de composants pour la ligne de remplissage HP sans compromis sur la sécurité
- le développement de l'économie circulaire qui reste à construire et évaluer

6.5 Un accompagnement politique

Des financements en accompagnement à la R&D, au déploiement des infrastructures et des véhicules sur la totalité de la chaine de valeur doivent être pris pour permettre de passer à l'échelle industrielle.

Chaîne de valeur hydrogène



Un soutien public est nécessaire :

- soutien à la R&D et au déploiement industriel, sur l'ensemble des chaines de valeur (amont et aval)
- soutien à l'achat des véhicules et à l'hydrogène vendu en station pour permettre d'atteindre un TCO compétitif, tant que les volumes ne sont pas suffisants.

Ces soutiens doivent s'inscrire dans la dynamique de soutien Européenne.

7 ANNEXES

Consommation des véhicules utilisée pour les calculs de rendement énergétique et pour les émissions CO2 au km.

Technologie	Energies	Conso fossiles (L/100km)	Conso élec (kWh/100km)	Conso H2 (kg/100km)
ICEV	E10	4,6		
	B7	3,32		
PHEV	E10+ Elec Eu/Fr	2,17	2,7	
EV			14	
FCV Full Power				0,9
FCV mid Power	H2 + Elec Eu/Fr		10,9	0,094

Source : PFA 2019

Document rédigé avec la contribution des équipes suivantes :

Mathieu BANCELIN	PLASTIC OMNIUM
Paul WOUTERS	
Beatrice LACOUT	
Valérie BOUILLON-DELPORTE	MICHELIN
Antoine DUCLOUX	
Samuel CLOT	
Robert LASSARTESSES	RENAULT
Catherine GIRARD	
Jean-François GIROUX	VALEO
Jean-Bernard LEPAGE	FAURECIA
Nicolas LECLERE	GROUPE PSA
Christian MAUGY	
Jean-Luc BROSSARD	PFA