

---

# Etude de la demande potentielle d'hydrogène renouvelable et/ou bas carbone en France à 2030

---



Association française  
pour l'hydrogène et  
les piles à combustible

## *Résumé exécutif / Synthèse*





## Résumé exécutif

Cette étude répond à la question du potentiel de la demande en hydrogène renouvelable ou bas carbone à 2030 pour l'ensemble des usages sur le territoire français, condition nécessaire, pour que les industriels engagent les investissements dans l'installation de capacités productives sur le territoire national, tandis que la compétition mondiale a démarré.

Le constat est clair, puisqu'il existe un potentiel de marché économiquement accessible, mais que celui-ci ne pourra pas se déclencher sans un soutien **rapide** et **important** de l'Etat. En effet, les investissements ne se feront que s'il existe une visibilité suffisante sur la montée en puissance progressive des marchés, montée en puissance dont la dynamique repose sur le niveau des soutiens publics (mesures réglementaires et de soutien financier).

Il est notamment nécessaire d'investir suffisamment d'ici 2023 dans les capacités de fabrication d'équipements afin d'industrialiser l'élaboration des systèmes de production par électrolyse de grande capacité, ainsi que d'investir dans la production de piles et réservoirs haute pression – clé pour la commercialisation de véhicules H2 à prix compétitif et condition indispensable au déploiement de la mobilité hydrogène.

Cela permettra :

- De réduire le coût de production de la molécule, et de rendre l'hydrogène renouvelable ou bas-carbone économiquement abordable pour les grands secteurs industriels (raffinage, ammoniac) ;
- De favoriser la réalisation de projets par les entreprises françaises permettant de satisfaire à minima la demande d'hydrogène du pays.

L'attention portée aux segments industriels permettra en parallèle de créer des écosystèmes locaux sur lesquels pourront ensuite s'adjoindre les segments à la consommation locale moins intensive (autres secteurs industriels, mobilités de tous types).

Sans ces leviers, les objectifs de la loi Energie-climat (20 à 40% de consommation d'hydrogène décarboné) ne seront pas atteints à 2030, en particulier faute de compétitivité-prix de la molécule d'hydrogène renouvelable ou bas carbone par rapport à l'hydrogène issu de reformage d'énergie fossile.

L'étude établit que le marché potentiel représente d'ici 2030 environ 1Mt d'hydrogène, dans l'industrie, la mobilité et les réseaux, soit le double du marché industriel potentiellement décarbonable en 2019 :

- Certaines industries (sidérurgie, traitement des métaux, verre, microélectronique et peroxyde d'hydrogène) en substitution d'hydrogène « gris » (714kt) ;
- Pour les nouveaux usages de la mobilité : véhicules légers (utilitaires, taxis), poids lourds, chariots élévateurs (266kt).

Le secteur de la sidérurgie, fort de sa stratégie de décarbonation, représenterait à lui tout seul un marché de 700kt si le secteur adoptait un nouveau procédé de production de l'acier par réduction directe du minerai par l'hydrogène. Le potentiel de réduction des émissions de CO2 est estimé à 22Mt par an.

A partir de 2030 un marché encore plus vaste apparaît, représentant un nombre croissant de secteurs-clés :

- Industrie : raffinage, ammoniac (330kt) ;
- Usage chaleur via l'injection d'hydrogène dans les réseaux de gaz naturel (720kt) ;
- Dans la mobilité de forte puissance : ferroviaire, maritime, aéronautique – à condition que le coût de la molécule ait suffisamment baissé grâce à la décarbonation de l'industrie afin de rendre le TCO compétitif.

Pour déclencher le marché dont dépend la compétitivité économique de la production française d'hydrogène renouvelable ou bas carbone, l'étude retient plusieurs leviers.

Dans l'industrie, les principaux leviers identifiés sont les suivants :

- La transposition dès que possible de la directive sur les énergies renouvelables (RED II), qui donne un signal fort pour les raffineries ;
- Un mécanisme de soutien à la production d'hydrogène renouvelable ou bas carbone.

Dans la mobilité, et afin d'amorcer le marché, les principaux leviers identifiés sont des mesures incitatives et réglementaires en faveur du véhicule électrique et aide à l'achat de véhicules à hydrogène.

## • Synthèse de l'étude

### A. Définitions

Le chapitre suivant présente la définition des principaux éléments et concepts utilisés dans ce rapport.

#### Définition de l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone

L'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone correspond à un type d'hydrogène qui peut être produit par différents procédés et différentes sources d'énergie. Les définitions retenues dans le cadre de cette étude sont les suivantes :

- **L'hydrogène bas-carbone** correspond dans cette étude à deux techniques de production bien distinctes, à savoir d'une part l'électrolyse couplée au mix électrique français, et d'autre part le vaporeformage couplé à du captage de carbone :
  - L'hydrogène produit par électrolyse dans la situation bien particulière du mix électrique français est en effet faiblement carboné. Le mix électrique français étant composé à 70% de nucléaire, 11% d'énergie hydraulique, 11% d'autres énergies renouvelables et 8% de gaz naturel. Le facteur d'émission du mix électrique français était en 2016 de 58,5 gCO<sub>2</sub>e/kWh, un des plus faibles au monde. A titre de comparaison le facteur d'émission moyen de l'électricité en Europe était 5 fois plus élevé (295,8 gCO<sub>2</sub>e/kWh)<sup>1</sup>.
  - L'hydrogène produit à partir de ressources fossiles mais associé à un système de captage et de stockage (ou utilisation) du carbone. Il s'agit donc le plus généralement d'un hydrogène gris produit par reformage du gaz naturel dans un SMR (Steam Methane Reformer) et dont le CO<sub>2</sub> aura été capté.
- **L'hydrogène renouvelable** :
  - Il s'agit d'hydrogène produit via électrolyse à partir de sources renouvelables. Cette catégorie englobe alors différentes technologies de production telles que l'électrolyse (à partir d'électricité renouvelable), la méthanisation et le reformage de biométhane, la gazéification ou la thermolyse de biomasse. Cette étude n'aborde pas la question de la définition stricte de la notion d'hydrogène renouvelable, en particulier de la reconnaissance ou non comme renouvelable de l'hydrogène produit à partir d'électricité du mix ou de gaz naturel auxquels seraient attachés des garanties d'origines respectivement d'électricité renouvelable ou de biométhane. Il existe également d'autres procédés moins courants comme la thermolyse à plasma, permettant de réaliser un craquage de la vapeur d'eau sous l'effet d'une forte température.
  - Une sous-catégorie de l'hydrogène renouvelable est **l'hydrogène renouvelable selon les critères de RED2**. La nouvelle Directive européenne sur les énergies renouvelables impose des critères de conformité quant à l'approvisionnement électrique des électrolyseurs utilisés pour la production de carburant renouvelable (hydrogène, carburants de synthèse...) éligible à l'objectif de 14% en 2030 fixé par la Directive et s'imposant aux fournisseurs de carburants. Ces critères imposent l'additionnalité de la source ENR utilisée, un certain degré de synchronicité entre cette source et le profil opératoire de l'électrolyseur, ainsi que l'absence de congestion entre la source et l'électrolyseur.

#### Définition d'un « marché adressable »

Le concept essentiel de cette étude est celui de marché adressable, et est utilisé tout au long de ce rapport.

- **Marché** : Un marché désigne la rencontre d'une offre (proposée sous forme de produits ou de services par un certain nombre d'entreprises) et d'une demande (consommateurs particuliers ou professionnels). Dans le cadre de cette étude, nous nous intéressons au marché potentiel et aux conditions d'atteinte de ce marché. L'hydrogène co-produit, par exemple dans les processus de raffinage, ne rentre pas dans le « marché » de l'hydrogène.
- **Marché techniquement adressable** : Le marché techniquement adressable correspond au plus grand marché techniquement atteignable par l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone. Un marché adressable par la molécule d'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone n'est pas forcément économiquement accessible, si des molécules concurrentes (hydrogène gris, gaz naturel ...) restent moins chères à horizon 2030. Dans le cadre de cette étude, le marché est estimé sur une base annuelle.
- **Marché techniquement et économiquement adressable** : Un marché techniquement et économiquement adressable est un marché techniquement adressable dans lequel les conditions

<sup>1</sup> [www.eea.europa.eu](http://www.eea.europa.eu)

économiques sont réunies pour que le coût de la molécule d'hydrogène renouvelable ou bas-carbone soit suffisamment bas par rapport à celui des molécules concurrentes (exemples : hydrogène gris dans le raffinage, gaz naturel ou biométhane dans les réseaux de gaz naturel).

Une mise en pratique de ces trois définitions sur le secteur du raffinage permet d'éclairer ces dernières :

- Sur l'ensemble de ses processus industriels, ce secteur utilise actuellement en France 330kt d'hydrogène à l'année, dont 200kt sont co-produits et seuls 130kt sont achetés (pour plus de détails, voir section Etat de la demande en Hydrogène en France, et fiche sectorielle sur le Raffinage). Le marché français total de l'hydrogène dans le raffinage est donc de 130kt, aujourd'hui produits sur place via vaporeformage.
- Etant donné que la molécule d'hydrogène renouvelable ou bas-carbone peut se substituer à 100% à l'hydrogène gris utilisé, le marché technique adressable pour l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone est lui aussi de 130kt.
- Cependant, ce marché technique adressable de 130kt n'est pour l'heure par économiquement accessible, du fait du prix relativement trop élevé de la molécule d'hydrogène renouvelable. Le marché techniquement et économiquement adressable est donc pour l'heure de zéro kilotonne, en attendant que le coût de production de l'hydrogène renouvelable baisse suffisamment (voir fiche sectorielle sur le raffinage pour de plus amples détails).

## B. Méthodologie générale de l'étude

Afin de déterminer la taille du marché techniquement et économiquement adressable par l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone en France à horizon 2030, une méthodologie détaillée a été mise en place. Cette méthodologie se base sur trois axes principaux :

- Une segmentation fine des marchés de l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone ;
- Une analyse approfondie des leviers financiers, techniques et réglementaires d'adoption de l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone par sous-segment de demande ;
- Le développement d'un modèle technico-économique permettant de reconstituer des tailles de marché et de consolider des analyses.

La segmentation du marché, comme phase préliminaire de l'étude, a permis de cadrer les travaux et d'analyser, sur la base d'une recherche bibliographique approfondie, les segments et sous-segments les plus pertinents à étudier. 52 sous-segments ont alors pu être identifiés et 46 segments ont été retenus comme pertinents :

- Au niveau industriel : 12 sous-segments industriels, incluant à la fois les grands consommateurs d'hydrogène (raffinage, ammoniac...) et les consommateurs de moindre taille (verrière, électronique, agro-alimentaire...) ;
- Au sein des systèmes énergétiques : 4 sous-segments pertinents tels que l'injection d'hydrogène dans le réseau gazier ou la cogénération d'électricité et de chaleur ;
- Au niveau de la mobilité : 30 sous-segments prenant en compte la mobilité routière, la mobilité ferroviaire, la mobilité maritime et fluviale ou bien encore l'aéronautique et la production de carburant de synthèse (valorisable également au sein de l'industrie).

La pertinence de ces sous-segments a été évaluée selon une première pré-analyse des volumes de demande potentielle d'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone à horizon 2030. Les sous-segments présentant le potentiel de consommation le plus important à 2030 ont ensuite été modélisés pour réaliser une analyse quantitative. Les sous-segments de demande en hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone restants ont fait l'objet d'une analyse qualitative à travers les fiches sectorielles présentées en annexe.

Chaque segment a fait l'objet d'une analyse bibliographique, permettant de mobiliser un grand nombre d'informations pour alimenter l'analyse, et les informations obtenues ont ensuite été validées lors d'entretiens avec des entreprises majeures de l'écosystème hydrogène français ainsi que des utilisateurs finaux potentiels. Cette double approche a été mise en place afin d'avoir une collecte de données efficace et une double vérification des différentes hypothèses et données structurantes de notre analyse.

Afin de réaliser une étude la plus exhaustive possible, plusieurs sources ont été utilisées afin d'alimenter le développement du modèle et la rédaction des fiches détaillées. Que ce soit au niveau des sites industriels ou au sein des différents écosystèmes de la mobilité, les consommateurs potentiels d'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone ont pu être interrogés afin de récolter leur vision du marché, les caractéristiques spécifiques à leurs usages ainsi que les freins et les leviers qu'ils ont pu identifier par rapport au développement de l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone. Ces entretiens ont été complétés par l'envoi d'une enquête en ligne auprès des acteurs de la métallurgie, demande fragmentée et donc plus difficile d'accès.

L'analyse quantitative de la demande potentielle en hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone a été réalisée à travers un modèle permettant d'évaluer sur chaque segment l'évolution de la taille du marché adressable par l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone ou renouvelable sur un pas de temps annuel entre 2020 et 2030 en fonction de l'activation ou non des principaux leviers identifiés (réglementaires, économiques, et autres.) et des projections de coûts de production. Plusieurs grandes hypothèses structurantes ont été alors établies au sein du modèle, et détaillées en annexes de ce rapport.

Il est à noter que, dans l'ensemble de l'étude, les éléments récents liés à la crise sanitaire et économique dite du « coronavirus » (également appelé Covid-19) n'ont pas été pris en compte, puisque la majorité des travaux d'analyse ont eu lieu avant cette période.

### Principes de modélisation - Industries et Injection d'hydrogène dans les réseaux de gaz

Dans l'industrie, la modélisation de la demande en hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone a été réalisée pour chacun des segments suivants :

- Le raffinage ;
- L'ammoniac ;

- La sidérurgie ;
- Le traitement des métaux ;
- Le verre ;
- La microélectronique ;
- La production d'HMD ;
- Le peroxyde d'hydrogène.

Sur ces secteurs industriels ainsi que pour l'injection d'hydrogène dans les réseaux de gaz, les recherches bibliographiques et les entretiens réalisés ont permis de déterminer le mode de réflexion qui sera utilisé dans les prochaines années par les acteurs de la demande afin d'envisager la transition vers l'hydrogène renouvelable ou bas-carbone. Pour chacun de ces secteurs, la réflexion est quasi purement économique, et certaines variations de modélisation propres aux secteurs sont expliquées dans les fiches sectorielles de ce rapport.

### Principes de modélisation - Mobilité routière, hors chariots élévateurs

Pour les segments de la mobilité, la modélisation de la taille des marchés adressables pour l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone a été réalisée pour chacun des segments suivants :

- Les véhicules particuliers ;
- Les taxis et VTC ;
- Les VUL type Kangoo ;
- Les VUL type fourgon Renault Master ;
- Les autobus ;
- Les poids lourds 26 tonnes ;
- Les poids lourds 44 tonnes ;
- Les camions spécialisés type Bennes à Ordures Ménagères ;
- Les chariots élévateurs.

Hormis pour les chariots élévateurs, le même principe de modélisation s'applique à tous les segments de la mobilité routière. Ont été recrées par segment la corrélation entre, d'une part, le surcoût total de possession d'un véhicule à hydrogène par rapport aux motorisations concurrentes et, d'autre part, la taille du marché techniquement et économiquement adressable, exprimée en parc de véhicules à hydrogène.

Les données d'entrée servant à créer ces courbes proviennent d'estimations de la PFA, de l'Afhyprac, d'informations collectées lors d'entretiens avec les acteurs du marché, et de la connaissance des marchés de l'hydrogène par EY.

La création de ces courbes de corrélation a rendu possible de mesurer l'impact de leviers tels que, à titre d'exemples, la subvention du prix de l'hydrogène à la pompe, les subventions à l'achat de véhicules, la hausse des taxes sur les autres carburants, ou encore le taux minimal d'hydrogène à la pompe. Ces leviers influent sur la valeur du surcoût de possession des véhicules à hydrogène, des projections de demande en hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone à horizon 2030 ont ainsi pu être recalculées. Les leviers étudiés dans le cadre de cette étude influent uniquement la demande et n'agissent pas sur l'offre. Des leviers réglementaires supplémentaires ont aussi été inclus, tels que les diesel bans et les zones à faibles émissions, qui influent sur les tailles des flottes potentiellement substituables par de l'hydrogène.

Ce principe de modélisation permet de réaliser des analyses de sensibilité relatives aux leviers d'impact sur la demande identifiés dans le cadre de cette étude. Il permet de plus de rendre compte du caractère progressif de la demande en hydrogène en fonction du coût complet de possession (« TCO ») des véhicules.

### Principes de modélisation - Chariots élévateurs

La logique de basculement des flottes de chariots élévateurs n'est pas semblable aux autres segments de la mobilité. Chez ces consommateurs potentiels, le basculement aura lieu de manière plus brutale dès lors qu'un prix-cible de l'hydrogène à la pompe aura été atteint. Cette cible correspond au prix de l'hydrogène pour lequel il est plus rentable d'utiliser des chariots élévateurs hydrogène plutôt que des chariots élévateurs électriques à batterie pour des applications 'indoor' pour un site-type en France.

### Données d'entrée pour toutes les analyses quantitatives

La liste des données d'entrée essentielles est fournie en annexes de ce rapport, dans la section « Hypothèses générales du modèle ». Les données les plus essentielles restent cependant les coûts de production de l'hydrogène, permettant aux industriels de décider ou non de transiter vers l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone, et aux usagers de la mobilité routière de voir baisser suffisamment ou non le coût total de possession de leur futur véhicule.

En termes de production d'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone, de nombreuses pistes très prometteuses existent aujourd'hui. Cette catégorie englobe différentes technologies de production telles que l'électrolyse (à partir de l'électricité renouvelable ou bien issue du réseau électrique français), la méthanisation et le reformage de biométhane, la gazéification ou encore la thermolyse. De nombreux démonstrateurs sont en cours de conception ou de déploiement afin de tester l'ensemble de ces techniques.

Cependant, afin de donner un coût à l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone hors SMR+CCS, et étant donné l'importance des raisonnements économiques dans la transition des divers segments vers l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone, notre modèle s'est concentré sur l'électrolyse, technologie offrant à date la meilleure maturité technique et commerciale ainsi que le plus fort potentiel de réduction de ses coûts de production à horizon 2030 et à grande échelle. Cet aspect méthodologique ne présage en rien d'une préférence des auteurs de l'étude pour cette technologie, le but de cette étude n'étant pas de comparer à 2030 les potentielles technologies de production.

Concernant les électrolyseurs, les travaux réalisés se sont basés sur des électrolyseurs couplés au mix électrique français, sur des tarifs d'électricité légèrement décroissants pour les industries électro-intensives (de 0,056€/kWh en 2020 à 0,046€/kWh), et sur une décroissance forte mais prévisible du coût de CAPEX des électrolyseurs. Le coût de production par électrolyseur passe ainsi, dans ces conditions et avant marge commerciale éventuelle ou exemption de la TURPE, de 6,1€/kgH2 en 2020 à 3,4€/kgH2 en 2030. Pour des raisons de simplification, un seul coût de l'hydrogène via électrolyseur a été imaginé, bien que la filière française en 2030 combinerait très probablement de petits électrolyseurs décentralisés et de très grandes unités de production.

Concernant le processus de production par SMR, les travaux se sont basés sur une légère croissance des coûts de production, ce processus passant avant marge commerciale de 1,6€/kg en 2020 à 2,0€/kg en 2030, du fait d'une possible augmentation du prix du gaz naturel. Par ailleurs, afin de mettre en avant le besoin de soutien public à l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone, un scénario de forte augmentation du prix des EU-ETS a été retenu, ce dernier passant de 24€/tonne de CO2 émis en 2020 à 108 €/tonne en 2030, et augmentant ainsi le coût du SMR d'un euro par kilogramme en 2030. Enfin, et bien qu'encore peu courant, le coût d'un dispositif de captage du carbone sur SMR a été estimé à 1,0€/kgH2 en 2020 et constant sur la période.

Ainsi, selon ces conditions, les coûts de production de l'hydrogène évoluent de la manière suivante dans notre modèle :

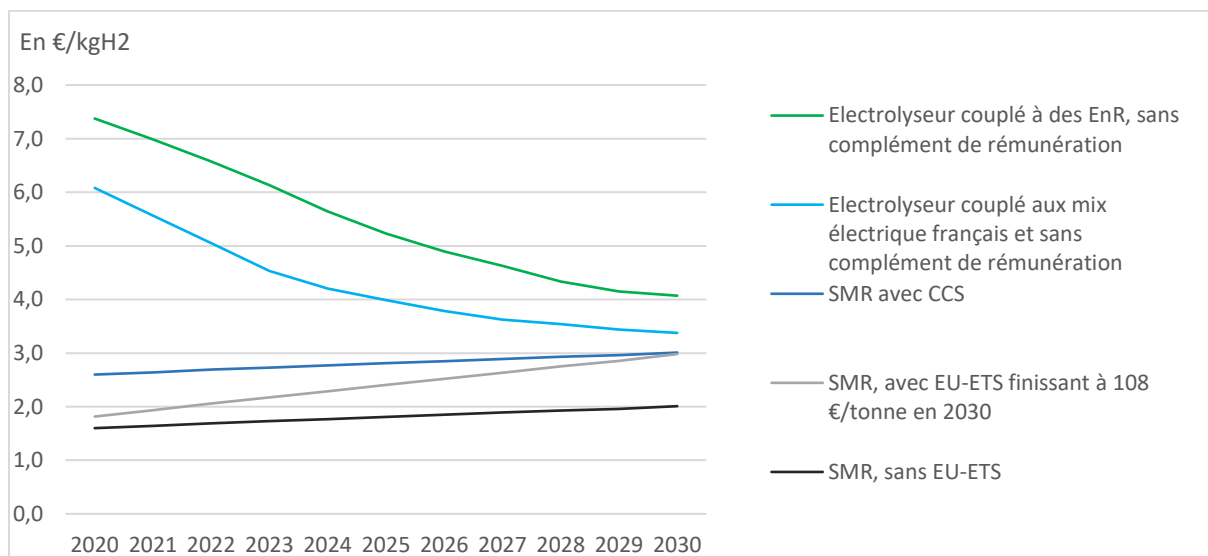


Figure 1: Evolution des coûts de diverses technologies de production d'hydrogène, tels que pris en compte dans le modèle (en €/kgH2)

L'observation de ce graphique nous permet de comprendre que, malgré un scénario d'évolution des EU-ETS en faveur de l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone, le SMR devrait rester la solution de production d'hydrogène la plus compétitive à 2030. Une optimisation du cadre réglementaire pourrait permettre à l'hydrogène renouvelable



## Etude de la demande potentielle en hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone en France à horizon 2030

et/ou bas-carbone de gagner en compétitivité. Comme rappelé en section « Potentiel de l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone en 2030 » de cette synthèse d'étude, cette évolution des coûts de production empêche notamment une forte augmentation de la consommation industrielle, l'ammoniac et ses 220kt de consommation d'hydrogène ou la métallurgie et ses 700kt de consommation ayant alors des difficultés à se décarboner.



## C. Analyse de compétitivité de l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone

Pour chaque segment étudié, nous avons procédé à une analyse visant à identifier les facteurs clés et des leviers de compétitivité de l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone face aux solutions alternatives (selon les segments, hydrogène carboné ou solutions alternatives à l'hydrogène telles que les véhicules électrique, GNV...) du point de vue du client final. Ces leviers ont été analysés a priori de manière spécifiques à chaque secteur même si, a posteriori, une certaine récurrence apparaît dans les secteurs connexes.

### Analyse de compétitivité dans l'industrie

Pour les segments industriels, l'analyse de compétitivité sera effectuée en général par comparaison du coût projeté de production de l'hydrogène renouvelable ou bas-carbone avec le coût de production de l'hydrogène par SMR à partir de craquage de gaz naturel (solution conventionnelle) à un horizon de temps donné. Deux exceptions sont à noter : la première dans le cas des raffineries soumise à RED2 et pour lesquelles l'utilisation d'hydrogène renouvelable (selon les critères de RED2, cf. supra) en lieu et place de l'hydrogène carboné pour la désulfuration des carburants conventionnels pourra constituer une voie de mise en conformité. Dans ce cas, l'analyse de compétitivité a été faite en comparant le coût de production d'hydrogène renouvelable avec le coût de mise en conformité dans un scénario de référence où le fournisseur de carburant opterait pour la production de biocarburants de première génération, qui constitue a priori la solution la plus économique sur le *merit order*. Dans le cadre de procédés nouveaux comme la réduction directe dans le cadre de la production d'acier, impliquant un changement de procédé, l'analyse de compétitivité a été menée au niveau du procédé dans son ensemble face aux procédés classiques.

Enfin, pour les segments industriels étudiés uniquement de manière qualitative, une analyse de compétitivité qualitative a également été réalisée dans les fiches sectorielles dédiées.

### Analyse de compétitivité dans les systèmes énergétiques

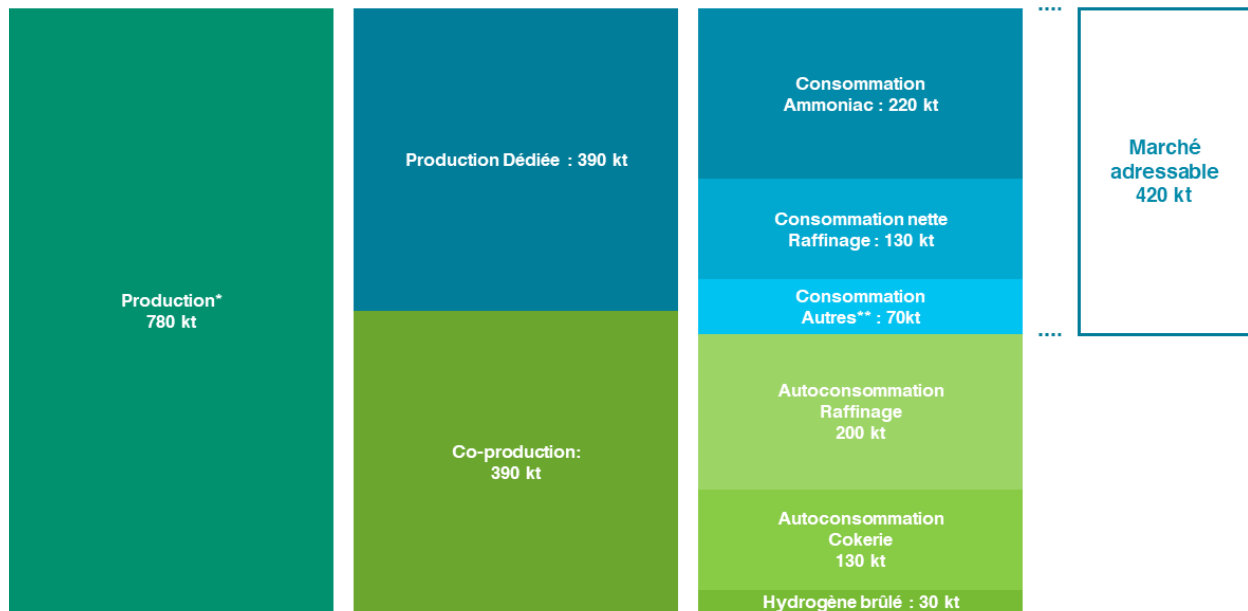
Dans le cas de l'injection, l'analyse de compétitivité a été menée de manière quantifiée en comparant le coût de production de l'hydrogène renouvelable ou bas-carbone avec le gaz naturel ou les autres alternatives vertes selon les scénarios étudiés. La méthanation n'a, elle, été étudiée que de manière qualitative tout comme la cogénération de chaleur et d'électricité.

### Analyse de compétitivité dans la mobilité

Dans le cadre des usages de l'hydrogène pour la mobilité, l'analyse de compétitivité correspond à une analyse comparative des coûts complets de possession (« Total Cost of Ownership », « TCO ») sur des cas d'étude-types par rapport à des solutions concurrentes de référence en utilisant des hypothèses standards. Les solutions concurrentes de référence peuvent donc varier entre la voiture particulière (référence : essence ou diesel) et le poids lourd roulant (référence : GNV). L'électrification des véhicules terrestres, mais aussi fluviaux a notamment été étudiée comme solution concurrente majeure pour l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone, tandis que le GNL et les biocarburants sont des solutions concurrentes majeures à l'hydrogène dans le maritime et l'aéronautique. Cette analyse approfondie sert de base au modèle permettant ensuite de définir le marché adressable et la demande potentielle en hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone. Pour les segments analysés de manière qualitative, une analyse de compétitivité qualitative est réalisée dans chaque fiche détaillée respective.

## D. Etat de la demande en hydrogène en France en 2019

### Estimation de la demande en hydrogène en France en 2019



Sources : HINICIO & EY, 2020 | \*Production : H<sub>2</sub> issu de procédés générant de l'H<sub>2</sub> pur ou en mélange avec d'autres gaz  
 \*\* Dont HMD : 40 kt, Traitement de surface du métal : 10 kt, Peroxyde d'H<sub>2</sub>: 7kt

Figure 2: L'hydrogène en France en 2019 (en kt/an)

#### Vue d'ensemble production / consommation d'hydrogène en France en 2020

En France en 2020 la production d'hydrogène quantifiée dans cette étude est de 780 kt, partagée entre :

- L'hydrogène co-produit et directement autoconsommé dans les procédés de raffinage, de pétrochimie et les cokeries (390 kt/an). Cet hydrogène comprend celui co-produit dans les procédés du chlore (60kt/an), dont une part seulement est valorisée (environ 50%).
- La production dédiée (390kt/an) ;

Valorisée à près de 900 kt lors de précédentes études, la production nationale est estimée à la baisse à la suite de la fermeture de raffineries, unité de production d'ammoniac et de cokeries.

Au total, les émissions de CO<sub>2</sub> liées aux marchés industriels adressables de l'hydrogène représentent en France près de 4 Mt de CO<sub>2</sub> sur un total de 300 Mt à l'échelle nationale selon l'INSEE, soit plus de 1% des émissions totales ; cependant en considérant que les émissions de la sidérurgie (20 Mt<sub>CO2</sub>/an) pourraient être neutralisées en tout ou partie via des procédés novateurs utilisant l'hydrogène, ce dernier pourrait alors permettre de réduire jusqu'à 8% des émissions de CO<sub>2</sub> nationales, voire encore davantage en cas de valorisation du CO<sub>2</sub> des cimenteries par l'hydrogène (e-fuels, méthanation, e-chemicals...). Cette dernière typologie de valorisation du CO<sub>2</sub> par méthanation au sein des cimenteries ou des sidérurgies fait l'objet de nombreuses recherches avec par exemple le projet pilote Jupiter 1000 sur le site sidérurgique d'Ascometal.

#### Hydrogène co-produit et autoconsommé :

Le raffinage (auquel s'associe la pétrochimie) et les cokeries (acier) ont la particularité d'autoconsommer l'hydrogène généré dans le procédé. Néanmoins, dans le cas des raffineries, l'hydrogène co-produit et autoconsommé ne suffit en général pas à alimenter la totalité du besoin, ce qui justifie le recours à une production dédiée par SMR. La totalité des raffineries française se trouvent dans cette situation de déficit net d'hydrogène à l'exception de la Raffinerie des Antilles à la Martinique, exploitée par la SARA, qui est excédentaire. La pétrochimie est également productrice d'hydrogène co-produit. Il est possible de citer les usines de Lyondell Bassell à Berre ou encore de KemOne à Fos-sur-mer qui produisent plusieurs milliers de tonnes d'hydrogène.

Production dédiée d'hydrogène :

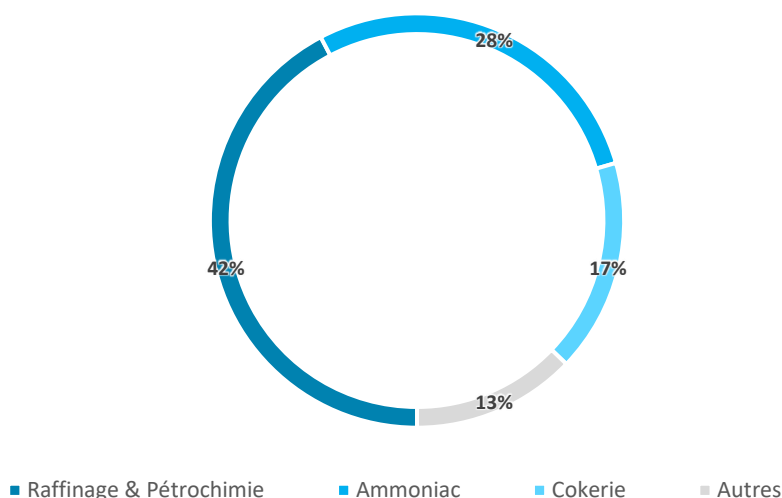
Historiquement en France, la production dédiée d'hydrogène s'est développée pour alimenter les besoins du raffinage (pour couvrir le déficit net évoqué précédemment) et de l'ammoniac, principalement via des capacités de SMR à très grande échelle. Lorsque ces industriels détiennent leurs propres capacités de production dédiées (et non pas de simple co-production), on parle de production « captive » (c'est le cas systématiquement dans le secteur de l'ammoniac). Lorsqu'ils sont alimentés par des moyens de production détenus par un gazier industriel, on parle de production « on-site ». Sur certaines plaques industrielles, des réseaux de canalisation dédiés permettent d'alimenter un ensemble de gros clients industriels à partir de capacités de production centralisées. Il en existe 3 en France (au moins partiellement) : axe Anvers/Mons/Dunkerque, axe Belle-Etoile/Feyzin/Roussillon, et axe Lavera/Fos-sur-Mer).

Dans ce second cas, les gaziers industriels valorisent les capacités résiduelles de leurs SMR pour alimenter les besoins industriels plus faibles sur un modèle centralisé (via des centres de conditionnement et une logistique de transport avec la livraison par camions-remorques ou de cadres de bouteilles).

Il est à noter qu'au total, en prenant en compte à la fois l'hydrogène produit par des capacités dédiées et l'hydrogène co-produit et autoconsommé, le raffinage, l'ammoniac et l'acier représentent à eux-seuls près de 90% de la production totale.

A noter également que d'autres capacités de production dédiées (SMR petite échelle, en général détenu et exploité par un gazier industriel) existent également chez des clients industriels de plus petite taille (par exemple dans la chimie de base) consommant toutefois des volumes trop importants pour envisager une livraison par camion.

**Production d'H<sub>2</sub> en France par segment en 2020 : 780 kt**



Segments	Raffinage & Pétrochimie	Ammoniac	Cokerie	Autres
Production (kt)	330	220	130	100

Figure 3: Marché de l'H<sub>2</sub> en France en 2020

Le terme « d'hydrogène marchand » est quant à lui utilisé chez les gaziers industriels inclut l'ensemble des clients livrés par camions ou alimenté par un petit SMR sur site.

Hydrogène co-produit des procédés du chlore :

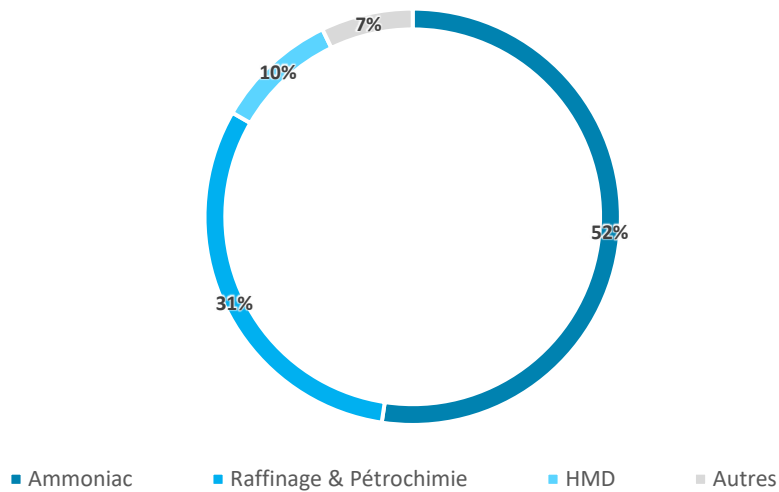
Enfin, une part de la co-production est un reliquat excédentaire d'autres processus industriels (ex : électrolyse Chlore-Alcali) et hydrogène co-produit représente près de 60 kt en France dont seulement une moitié est commercialement valorisée tandis que l'autre est directement brûlée pour générer de la chaleur ou de l'électricité.

Le « marché de l'hydrogène », tel que considéré dans cette étude et potentiellement adressable par des capacités de production d'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone correspond à la consommation alimentée aujourd'hui par les capacités de production dédiées ou des sources d'hydrogène co-produit (procédés du chlore). Ce marché est estimé à 420 kt en France en 2020, distribué de la manière suivante :

- Ammoniac (220 kt ; 52%) ;
- Raffinage (130 kt ; 31%) ;
- Hexaméthylène Diamine, ou « HMD » (40 kt ; 10%) ;
- D'autres applications existent à la marge dans, le traitement de surface des métaux (10kt ; 2%), et plus marginalement dans la chimie avec notamment le peroxyde d'hydrogène (7 kt ; 1%), la production de verre, les huiles & graisses, les semi-conducteurs...

Figure 3 : Marché de l'H<sub>2</sub> en France en 2030

Marché de l'H<sub>2</sub> en France en 2020 : 420 kt



Segments	Ammoniac	Raffinage & Pétrochimie	HMD	Autres
Production (kt)	220	130	40	30

Le modèle français de production et distribution d'hydrogène n'est pas le modèle général : à titre d'exemple les Pays-Bas ont un recours massif aux pipelines ; le méthanol est une activité fortement auto-consommatrice d'hydrogène dans certains pays ; les raffineries en Asie sont plus souvent en excédent net d'hydrogène co-produit ; les Etats-Unis utilisant massivement le *DR* dans la production d'acier ont une co-production associée, etc.

## E. Evolution sur 2020-2030 des marchés adressables dans les segments industriels et dans l'injection et recommandations

### Déclenchement des marchés adressables – Analyses quantitatives

Le graphique ci-dessous présente, sur la période 2020-2030, l'évolution en kilotonnes des marchés techniquement et économiquement adressables par l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone en France sur les segments de l'Industrie et de l'Injection, hors soutien public éventuels. En 2030, le marché total techniquement et économiquement adressable par l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone en France serait potentiellement de 714 kilotonnes. Ce chiffre est à rapporter au volume actuel du marché de l'hydrogène en France, de l'ordre de 780kt.

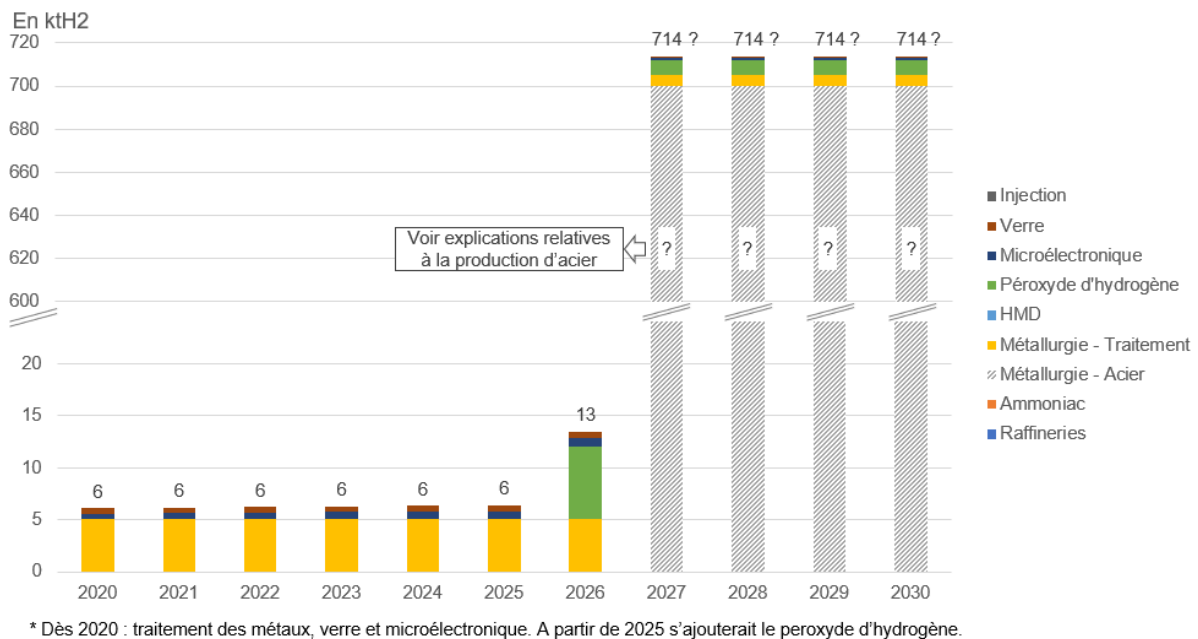


Figure 4 : Volumes des marchés techniquement et économiquement adressables sur 2020-2030, en France, dans l'industrie et l'injection. Attention, afin de rendre les données visibles après 2027, l'échelle des ordonnées a été tronquée entre 20 et 600.

Selon notre compréhension des logiques des différents segments industriels et de l'injection, et selon les conditions d'évolution choisies dans notre analyse quantitative, le marché techniquement et économiquement adressable pour l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone serait faible jusqu'en 2026, et seulement composé des segments suivants :

- le traitement des métaux, d'ores et déjà adressable (5Kt en 2020)
- la microélectronique, d'ores et déjà adressable (0,5Kt en 2020)
- le verre, d'ores et déjà adressable (0,5Kt en 2020)
- le peroxyde d'hydrogène, adressable à partir de 2026 (7kt à cette date)

Ces quatre marchés représenteraient cependant un marché suffisant pour installer une centaine de MW d'électrolyseurs en France (à un facteur de charge de 5500 heures).

A partir de 2027, la production d'acier pourrait représenter un potentiel significatif. Cependant, dans ce segment, la transition vers l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone ne dépend pas seulement du prix de la molécule d'H<sub>2</sub> mais surtout i/ de la maturité du processus de DRI, ii/ de l'évolution du prix de l'électricité, iii/ de l'évolution du prix de la tonne d'acier produite par BF-BOF (inclus coût des EU-ETS). Ces 700kt sont donc plus hypothétiques que les quatre segments industriels précédemment listés.

Par ailleurs, l'ammoniac et le raffinage restent non visibles sur ce graphique car, dans les conditions actuelles du marché français, les type d'hydrogène respectivement requis pour ces segments restent légèrement trop chers à

2030 par rapport aux solutions carbonées (de l'ordre de quelques dizaines de centimes par kilogramme). Ces marchés ne se décarboneraient donc que légèrement après 2030.

### Etat en 2030 des segments industriels et dans l'injection

	Taille du marché techniquement adressable (kt) en 2030	Analyse des coûts de production	
		A 2030, écart en €/kgH <sub>2</sub> restant à combler afin que le secteur envisage l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone plutôt qu'une molécule concurrente (A)	Conclusion à 2030 sur le segment, avant soutien public éventuel
Raffineries	130	0,1	Marché proche de basculer
Ammoniac	220	0,4	Marché assez proche de basculer
Métallurgie - Production d'acier	700	<i>Transition ne dépendant pas d'abord du prix de l'H<sub>2</sub></i>	
Métallurgie - Traitement des métaux	43	0,0	Une partie de ce marché est économiquement adressable depuis 2020 (5kt)
HMD	40	0,2	Marché proche de basculer
Péroxyde d'hydrogène	7,0	0,0	Marché économiquement adressable depuis 2026
Verre	5,2	0,0	Une partie de ce marché est économiquement adressable depuis 2020 (0,5kt)
Microélectronique	1,0	0,0	Marché économiquement adressable depuis 2020
Injection	727	2,1	Marché loin de basculer, avant soutien public

Figure 5 : Situation des segments industriels et de l'injection en France en 2030 et adressabilité à date, Segments classés par ordre décroissant de taille de marché techniquement adressable

Comment lire ce tableau : pour chaque segment, la colonne (A) présente le résultat d'analyses effectuées dans cette étude et visant à déterminer si, à 2030, l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone sera suffisamment bon marché à produire par rapport aux solutions concurrentes. Ces analyses prennent le futur type d'hydrogène demandé (renouvelable ou bas-carbone), le futur schéma d'approvisionnement du segment, et l'évolution du prix des molécules concurrentes. Pour un segment donné, si la valeur présente en colonne (A) est égale à zéro, alors le segment industriel est adressable à 2030 par l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone

En 2030, les raffineries se tourneront vers l'hydrogène renouvelable (RED II) si et seulement si celui-ci coûte au maximum 4,0€/kgH<sub>2</sub> à produire. Or, les projections retenues dans cette étude font état d'une prévision de coût de production de 4,1€/kgH<sub>2</sub> pour ce type d'hydrogène à cette date. L'écart à 2030 est donc de 0,1€/kgH<sub>2</sub>. Les raffineries sont donc presque un marché adressable.

Par ailleurs, trois autres segments majeurs, l'ammoniac, le raffinage et le HMD, représentant au total 360kt, seraient sur le point de basculer en 2030. Un soutien public permettrait de favoriser une transition plus précoce.

Enfin, et comme précédemment expliqué, quatre secteurs de moindre importance pourraient en partie se tourner vers l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone sur la période 2020-2026, représentant 13kt en 2026. Cependant, leur transition ne serait pas complète, certains procédés nécessitant du gaz naturel restant hors de portée de l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone à cette date.

### Leviers et freins dans les secteurs industriels

Le déploiement de l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone dépend de nombreuses conditions, différentes selon les segments envisagés. Plusieurs leviers peuvent également être mis en place pour favoriser ce déploiement. La présentation des leviers et des freins au déploiement de l'hydrogène pour chaque segment permet de mieux comprendre les tenants et les aboutissants spécifiques à chaque contexte. Les leviers et les freins présentés ci-dessous sont donc repartis selon les segments pertinents.

**Pour la plupart des segments industriels**, le coût de l'hydrogène agit comme le principal facteur décisionnel du point de vue du client final. Dans une logique de marché, hors contraintes réglementaires, l'adoption de l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone dans l'industrie ne peut s'envisager à grande échelle que s'il est compétitif avec la solution conventionnelle (hydrogène carboné, ou procédé traditionnel) ou l'alternative concurrente de référence dans le cas de RED2 (biocarburants).

Ainsi, plusieurs leviers et freins ont pu être identifiés, impactant directement la compétitivité économique de l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone par rapport aux solutions concurrentes.

**La directive européenne RED II**, qui sera transposée au plus tard en 2021 en France, structure l'ensemble du secteur du transport en imposant un objectif contraignant de 14% de carburants renouvelables aux fournisseurs de carburants. Si l'utilisation de l'hydrogène en tant que carburant pour la mobilité sera favorisée par cette directive, l'impact le plus important est à attendre dans les raffineries, où la substitution de l'hydrogène carboné par de l'hydrogène renouvelable pour la désulfuration des carburants conventionnels constitue une option relativement accessible en termes de coûts et simple à mettre en œuvre pour les obligés (pas besoin de conversion du parc). Cette directive pourrait également favoriser la production d'hydrogène renouvelable pour la synthèse d'e-méthanol ou d'ammoniac, utilisés comme carburants, en mélange avec les carburants conventionnels dans le cas du méthanol ou dans le maritime pour l'ammoniac. D'autres carburants de synthèse, nécessitant la production d'hydrogène renouvelable comme produit intermédiaire, tel que l'essence, le diesel ou le kérosène de synthèse, constituent également des options de mise en conformité mais semblent plus éloignées dans le 'merit order' car plus coûteuses.

Par ailleurs, **le prix du CO2** est également impactant pour les acteurs industriels exposés au système européen de quotas-carbone EU ETS du fait des émissions liées au processus de vaporeformage ou, pour certains segments, du procédé de production dans sa totalité (acier). La substitution d'hydrogène carboné produite par SMR par de l'hydrogène renouvelable ou bas-carbone (ammoniac, HMD, peroxyde d'hydrogène ...) ou la mise en place d'un nouveau procédé mettant en œuvre la production d'hydrogène renouvelable ou bas-carbone (acier, méthanol) constituent pour ces secteurs des voies de réduction d'émissions de CO2. Ainsi, le prix du carbone, qui sera probablement orienté à la hausse d'ici à 2030, vient directement affecter la compétitivité de l'hydrogène carboné face à l'hydrogène renouvelable ou bas-carbone. Néanmoins, à court-terme, au moment de l'écriture de ce rapport, les prix bas du gaz naturel et des quotas d'EU-ETS ne permettent pas à l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone d'être économiquement compétitif. Même à 2030 et dans le scénario où le prix des quotas EU-ETS serait multiplié par 4 pour atteindre 108€/tonne, des secteurs tels que le raffinage (130kt) l'ammoniac (220kt de marché techniquement adressable) resteraient des marchés hors de portée de l'hydrogène renouvelable ou bas-carbone, du fait d'une compétitivité économique insuffisante. De la même manière, pour les secteurs concernés par des changements, même si l'analyse de compétitivité se fait sur le périmètre du procédé complet, le prix du carbone vient directement affecter la comparaison entre le procédé conventionnel et le nouveau procédé impliquant la production d'hydrogène renouvelable ou renouvelable et bas-carbone. Afin de permettre la transition du marché de l'ammoniac vers l'hydrogène bas-carbone (SMR + CCS) à horizon 2027-2028, un prix minimum de 150€ par tonne de CO2 est recommandé.

**La mise en place de réglementations contraignantes** s'appliquant en aval de la chaîne de valeur (et donc de la production d'hydrogène) et imposant une baisse des émissions liées à la fabrication des produits finaux peut également constituer un levier très puissant permettant de répartir les surcoûts associés dans la chaîne de valeur de manière économiquement efficiente. A titre d'exemple, une réglementation imposant la baisse des émissions liées à la fabrication des voitures entraînerait des réductions dans l'ensemble de la chaîne de valeur, notamment dans la production d'acier et favoriserait l'émergence de nouveaux procédés.

Enfin, **la mise en place d'un complément de rémunération** pour les producteurs d'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone. Cette mesure, en se basant sur un complément minimum de 1,5€/kgH2, aurait tout d'abord pour mérite d'améliorer suffisamment la compétitivité de l'hydrogène renouvelable ou bas-carbone face à l'hydrogène carboné afin de rendre économiquement adressable les marchés de raffinage (130kt) et de l'ammoniac (220 kt) avant 2030.

### Leviers et freins dans les secteurs énergétiques

**L'injection d'hydrogène renouvelable dans les réseaux de gaz constitue l'une des voies nécessaires pour l'atteinte d'un objectif final de gaz 100% vert à l'horizon 2050.** A 2030, la traduction de l'objectif « politique » de 10% de gaz vert dans le réseau en objectif contraignant pour le secteur serait un premier levier important. Dans ce cadre, l'injection d'hydrogène renouvelable **serait une voie de mise en conformité en concurrence avec les autres gaz verts (gaz de décharge, biométhanisation...).** En l'absence d'un tel objectif contraignant, dans une logique purement économique, l'évaluation de la compétitivité de l'hydrogène renouvelable ou bas-carbone se fera par rapport au prix du gaz naturel auquel s'ajoute le prix de CO<sub>2</sub>. Quel que soit le scénario, la mise en place d'un tarif d'injection semble être un levier nécessaire qui a déjà prouvé son efficacité sur la filière méthanisation. Celui-ci se justifie par la nécessité d'initier des premiers projets d'ampleur industrielle dans la décennie à venir afin que l'hydrogène puisse jouer pleinement son rôle post-2030 vers l'objectif de 100% gaz vert en 2050, en complémentarité des autres filières et sur une base économiquement autoporteuse. A noter enfin que l'augmentation de la limite réglementaire permettant l'injection d'hydrogène, en fonction des possibilités techniques ressort comme une condition nécessaire à la mise en œuvre technique de la solution.

**L'usage de l'hydrogène comme vecteur de stockage intermédiaire d'énergie** (solution de « Power-to-power » ou de « ré-électrification ») **trouve sa pertinence dans des conditions de très forte pénétration des ENR,** lorsque des besoins de stockage long-terme (semaine, mois) apparaissent. C'est le cas par exemple pour certaines typologies de sites isolés ou micro-réseaux caractérisé par un gisement ENR fortement variable, où le stockage sous forme d'hydrogène (pour le stockage long-terme), en combinaison avec des batteries (pour le stockage de court-terme) ressort dès à présent comme solution la plus économique pour une alimentation 100% ENR en remplacement de groupes électrogène diesel. Selon RTE, la façade Manche est également un exemple particulièrement intéressant qui pourrait s'avérer pertinent pour le développement d'électrolyseurs pour des services aux réseaux (notamment avec le développement de l'éolien en mer et de la centrale nucléaire de Flamanville). Pour ce segment spécifique, la volonté des collectivités locales (ou d'utilisateurs finaux, telles les compagnies minières) de recourir à des solutions 100% ENR, traduite par exemple par des Appels d'Offres dédiés, constitue le levier central. Pour les mêmes raisons, l'objectif très ambitieux d'autonomie énergétique des ZNI à 2030 pourrait également constituer un levier important vers la fin de la période, lorsque les taux d'introduction d'ENR deviendront très importants créant ainsi des besoins de stockage à long-terme. Par ailleurs, de manière plus marginale, le durcissement des contraintes d'émission de polluants ou de bruit (en-dessous des niveaux de performances atteignables avec des groupes fonctionnant au GNL) est un levier puissant en milieu urbain ou portuaire pour favoriser l'adoption de solution à pile à combustible, en remplacement des groupes électrogènes utilisés sur les chantiers ou dans l'événementiel, même si ces contraintes s'appliquent sur au point d'utilisation et n'imposent pas a priori l'utilisation d'hydrogène renouvelable ou bas-carbone.

**La cogénération de chaleur et d'électricité à partir d'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone** est une solution techniquement viable mais très peu développée en France, que ce soit au niveau résidentiel et tertiaire ou encore industriel. Le coût du gaz est un levier très important tandis que le cadre réglementaire (notamment la norme RT2020) et la volonté politique de développement de solutions à l'échelle de sites industriel ou d'un éco-quartier intégrant la production locale d'énergie renouvelable et le besoin de stockage apparaît comme un deuxième levier indispensable pour permettre le déploiement de la cogénération en France alors que les choix énergétiques sont aujourd'hui orientés vers d'autres solutions comme l'électricité ou la biomasse.



## F. Evolution sur 2020-2030 des marchés adressables dans les segments de la mobilité et recommandations

### Déclenchement des marchés adressables

Selon notre compréhension des logiques des différents segments, notre méthodologie et les conditions d'évolution choisies dans notre analyse quantitative, la taille du marché techniquement et économiquement adressable pour l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone connaîtrait une croissance exponentielle sur tous les segments considérés, hors chariots élévateurs, à partir de 2028-2029.

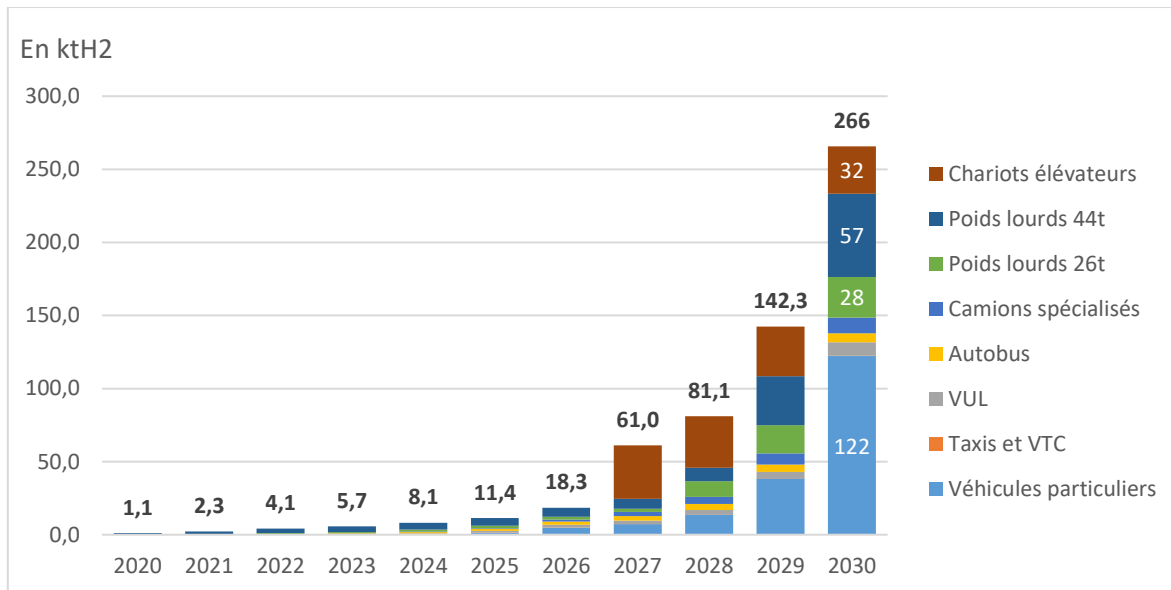


Figure 6 : Volumes des marchés techniquement et économiquement adressables sur 2020-2030, en France, dans la mobilité routière.

Ainsi modélisée, la mobilité à hydrogène représenterait un marché adressable de 266kt en 2030. Les véhicules particuliers, avec 122kt, représenteraient alors presque 50% du marché adressable de la mobilité routière. Une telle taille de marché adressable s'explique par l'augmentation de la compétitivité financière des véhicules particuliers à hydrogène, portée par une baisse attendue de leur coût d'acquisition moyen (de 75K€ en 2020 à 56K€ en 2030) et par une baisse du prix à la pompe (jusqu'à 6,7€/kg pour de l'hydrogène à 700 bar, en 2030 en moyenne en France). La forte augmentation entre 2028 et 2030 de la taille du marché adressable des véhicules particuliers s'explique par la logique utilisée par la demande : plus l'écart de coût total de possession est faible, plus l'hydrogène pourra se massifier et s'offrir au plus grand nombre. Cette logique vaut également pour d'autres segments, tels que les poids lourds.

Les poids lourds 26t et 44t, avec 85kt au total, représenteraient eux plus de 32% du marché adressable, portés par une baisse de 25% entre 2020 et 2030 de leurs coûts d'acquisition et par un hydrogène à la pompe à 350 bar chutant jusqu'à à 5,0€/kg en 2030.

Les chariots élévateurs, autre segment importants mais raisonnant de manière économiquement binaire tels les segments industriels, pourraient transiter vers l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone à partir de 2027, lorsque les motorisations à hydrogène deviendraient moins chères que celles à batteries. Ce segment pourrait représenter 32kt d'hydrogène en 2030, soit 12% du marché adressable total de la mobilité. La légère décroissance de ce marché adressable, visible sur le graphique, est basée sur une décroissance légère du besoin de chariots élévateurs, attendue par les acteurs de la logistique.

Les secteurs du ferroviaire, de l'aéronautique, du maritime, et du fluvial ainsi que les engins spéciaux n'ont pas été analysés de manière quantitative dans le cadre de cette étude. Ce choix s'explique par un développement de la demande potentielle sur ces segments qui devrait se produire à grande échelle aux alentours de 2030, comme en attestent les premiers projets-pilote en cours de déploiement tout du moins pour le maritime, le fluvial et le ferroviaire.

### Courbes prix-volumes pour la mobilité en 2030

Etant donné que ces segments, sauf chariots élévateurs, ne raisonnent pas de manière économiquement binaire mais bien plus selon une comparaison des TCO prenant également en compte des aspects qualitatifs, le raisonnement en termes de coût-cible de production ne semble pas le plus pertinent. La méthodologie d'analyse réalisée sur les segments industriels et l'injection n'a donc ici pas été reconduite car, malgré l'importance du prix de l'hydrogène à la pompe dans le développement des marchés, d'autres critères importants rentrent en ligne de compte.

### Leviers et freins – Segmentation qualitative des segments

**Pour les segments de la mobilité**, l'analyse a permis de faire émerger deux grandes typologies de segments, présentant des comportements spécifiques et des freins et leviers différents.

Plusieurs segments étudiés **dépendent fortement des investissements et des choix des institutions publiques nationales et/ou locales** :

- Dans la mobilité routière : les autobus et les camions spécialisés de type camions bennes ;
- Dans la mobilité ferroviaire : principalement le transport de passagers géré par les régions ;
- Dans la mobilité fluviale : les flottes de bateaux et les zones portuaires propriétés des collectivités.

L'émergence de l'hydrogène dans ces segments ne peut se faire de prime abord que dans le cadre de stratégies et politiques énergétiques volontaristes de la part des collectivités publiques, orientées sur les bénéfices sur le long-terme et s'éloignant par conséquent d'une logique purement économique ou réglementaire. **Les choix politiques des collectivités et la prise en compte de l'hydrogène dans les appels d'offre et l'élaboration de projets sont, à ce titre, les leviers principaux pour favoriser le déploiement de l'hydrogène sur ces segments.** L'organisation de la commande publique est un levier particulièrement puissant permettant de grouper les achats et de massifier les commandes de flottes. Afin de lancer les marchés de la mobilité, le rôle de la commande publique est donc très important. Le contexte récent lié au Coronavirus et les annonces du gouvernement concernant le plan de relance du secteur automobile a permis de mettre en avant le rôle des acheteurs publics, dont l'État, qui accéléreront le renouvellement de leurs flottes de véhicules. Le Gouvernement a notamment annoncé l'adoption d'une circulaire relative aux flottes de véhicules imposant un objectif de 50 % de véhicules électriques, hybrides ou à hydrogène pour les acheteurs publics.<sup>2</sup> Cependant, l'obligation de respecter les objectifs de la LTECV peut être contreproductif dans certains cas, notamment si les rythmes de renouvellement des flottes s'avèrent trop rapides et que des solutions plus matures tels que le GNV sont alors privilégiées. A noter d'ailleurs que ce type d'approche en faveur du bien public n'est pas spécifique à l'hydrogène et a été prônée avec succès dans d'autres secteurs de l'économie tel que dans le ferroviaire passager en France. Ce dernier secteur n'est pas « rentable » aujourd'hui sur des critères purement financiers mais crée une valeur sociétale et fournit un service public justifiant l'effort financier réalisé de la part des pouvoirs-publics.

Au contraire, d'autres segments seraient moins sensibles aux choix énergétiques des collectivités publiques et se **développent principalement sous l'action d'acteurs privés.**

Les segments concernés sont les suivants :

- Dans la mobilité terrestre : les véhicules particuliers, les taxis et VTC, les VUL, les chariots élévateurs, les poids lourds, les engins de chantier ;
- Dans la mobilité maritime et fluviale : les flottes commerciales de bateaux et de navires ;
- Dans la mobilité aéronautique : l'aviation et les aéroports ;
- Dans la mobilité ferroviaire : le fret ou sur sites industriels/logistiques.

Même si ces segments sont concernés par plusieurs leviers comme la mise en place de politiques publiques (Zones à Faibles Emissions, diesel ban.), **la logique économique prévaut** généralement pour ces segments gérés en grande majorité par des acteurs privés. Cependant, le degré de profondeur de l'analyse et d'impact de la logique économique varie selon les catégories de segment :

1. Les gestionnaires de flottes de poids lourds, voire les gestionnaires de grandes flottes de véhicules utilitaires légers, les transporteurs de personnes ou de marchandises dans le fluvial, le maritime, ou encore l'aéronautique et les propriétaires de chariots élévateurs ont **une approche économique purement rationnelle (TCO), en anticipation des contraintes réglementaires (diesel ban, zones faibles**

<sup>2</sup> [https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions\\_services/covid19-soutien-entreprises/DP-Plan\\_soutien\\_automobile26052020.pdf](https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/covid19-soutien-entreprises/DP-Plan_soutien_automobile26052020.pdf)

**émissions, interdiction du thermique...)** à venir pour choisir la solution de mise en conformité la moins couteuse permettant de répondre à leur besoin (électrique, GNV, H2... selon les usages). Ces réglementations peuvent être locales, nationales ou appliquées dans le cadre d'une directive européenne. Il s'agit d'anticiper et de réduire les coûts futurs dans une démarche de gestion du risque réglementaire. L'échelle temporelle de gestion du risque réglementaire et de son anticipation est très différente selon les segments, en fonction du modèle de possession du véhicule (leasing Vs en propre), de la durée de vie des véhicules en flotte (exemple : 3 ans pour certains opérateurs de camions, 30 ans pour des exploitant de bateaux). Pour cette raison, les incitations financières permettant de réduire le TCO (subventions, réductions de charges...) sont les plus efficaces sur ces segments dans une approche court terme. Au-delà de ces deux facteurs de premier ordre, les leviers suivants peuvent également jouer un rôle pour l'adoption des solutions hydrogène :

- **Les enjeux liés aux ressources humaines, de santé et de sécurité** peuvent également constituer un levier d'adoption dans certains segments spécifiques. A titre d'exemple, les solutions à hydrogène permettant au personnel de s'affranchir des opérations de manutention des batteries, très éprouvantes pour l'organisme, et ainsi contribuer à réduire les TBS (troubles musculo squelettiques). A ce titre, la mise en place de chariots à hydrogène peut simultanément réduire la pénibilité du travail des opérateurs ainsi que la récurrence des absences pour maladie entraînant des déficits de personnels pour les opérateurs concernés. Ceci est également vrai dans le monde des poids lourds avec l'absence de vibration et de bruit que peuvent apporter en général les motorisations électriques face aux motorisations thermiques traditionnelles.
  - Enfin, **les leviers liés aux enjeux de communication et d'image** influencent également les décisions des opérateurs. La communication d'une entreprise sur ses actions environnementales est de plus en plus scrutée par les différentes parties prenantes. Pour certains acteurs, ces enjeux de communication sont essentiels afin de démontrer ses engagements liés aux impacts sur l'environnement, notamment en ce qui concerne la qualité de l'air et le changement climatique.
2. **En revanche, d'autres secteurs développés principalement sous l'action d'acteurs privés et particuliers ont une dépendance plus forte à la compétitivité économique.** Les utilisateurs de véhicules particuliers, les flottes de taxis, ou les véhicules utilitaires légers pour des acteurs moins professionnalisés comme les artisans sont attentifs aux prix des différentes motorisations. Par conséquent, **les potentielles subventions permettant d'améliorer la compétitivité économique des solutions hydrogène s'avèrent des leviers très efficaces.** Le TCO est donc une variable importante, mais le choix du type de motorisation ne se fait pas strictement sur la solution la plus compétitive. En effet, **la sensibilité de l'acheteur aux enjeux environnementaux** peut provoquer l'éclosion de flottes de véhicules alors même que celles-ci restent moins compétitives. **Les changements de réglementations sont des leviers efficaces** entraînant une certaine anticipation de la part des acheteurs. Les particuliers peuvent anticiper les « diesel-ban » ou une hausse des prix du diesel et se reporter sur d'autres motorisations, tandis que les taxis peuvent anticiper l'instauration de zones à faibles émissions. L'impact de la réglementation est cependant plus difficile à estimer que pour la catégorie suivante de segment.

### Leviers et freins – Analyse qualitative par segment

Afin de quantifier plus précisément l'impact potentiel de différents leviers sur la taille des marchés adressables de la mobilité routière, des simulations ont été réalisées en prenant des valeurs-test jugées raisonnables. Les leviers considérés ont été :

- Le taux minimal d'hydrogène renouvelable ou bas-carbone à la pompe : L'augmentation de la proportion d'hydrogène renouvelable ou bas-carbone minimale induit un prix de l'hydrogène supérieur à la pompe puisque ce dernier est fonction des prix de l'hydrogène par SMR et par électrolyse. Ce levier augmente donc les volumes d'hydrogène renouvelable ou bas-carbone consommés par véhicule, mais réduit la taille totale du marché adressable en augmentant le TCO de la mobilité routière hydrogène.
- La hausse des taxes sur l'essence, le diesel et le GNV ;
- Un complément de rémunération pour la production d'hydrogène renouvelable ou bas-carbone, hors SMR+CCS ;
- Des subventions sur le prix de l'hydrogène à la pompe :
  - hors chariots élévateurs ;
  - pour les chariots élévateurs ;
- Des subventions à l'achat de :
  - véhicules particuliers, Taxis/VTC, VUL type Kangoo ;
  - VUL type Fourgon ;
  - poids lourds 26t ;

- poids lourds 44t ;
  - autobus ;
  - camions spécialisés.
  - bateaux et navires
- La mise en place de Zones à Faibles Emissions, appliquée dans les dix communes françaises les plus peuplées (Paris, Marseille, Lyon, Toulouse, Nice, Nantes, Montpellier, Strasbourg, Bordeaux, Lille). La zone concernée n'est toutefois pas la banlieue de ces villes, mais bien seulement la zone intra-muros. En cas de déclaration de Zones à faibles émissions, les usagers qui y sont soumis ont le choix entre une motorisation électrique à batterie non hybride ou une motorisation hydrogène (ou hybride hydrogène selon les segments).
  - La mise en place d'un diesel ban, appliquée dans les dix communes françaises les plus peuplées (Paris, Marseille, Lyon, Toulouse, Nice, Nantes, Montpellier, Strasbourg, Bordeaux, Lille). Là encore, la zone concernée n'est toutefois pas la banlieue de ces villes, mais la zone intra-muros. En cas de Diesel Ban, les usagers des diesel soumis à cette restriction se reportent soit sur l'essence pour les véhicules légers, soit sur le GNV pour les véhicules lourds et les VUL type fourgon. En effet, ce sont les motorisations aux cas d'usages les plus similaires au diesel.
  - La mise en place des zones ECA, notamment celle en cours de création en Méditerranée (dont la mise en place est programmée pour 2022) ont un rôle majeur dans le secteur maritime comme levier de réduction des émissions de polluants atmosphériques.

De par leur complexité de modélisation, d'autres leviers n'ont pas fait l'objet dans cette étude d'analyse quantitative, mais pourraient cependant également accélérer la transition vers la mobilité à hydrogène :

- Le Clean Mobility Package (dont fait partie la Clean Vehicles Directive) est un ensemble de mesures notamment relatives aux normes d'émissions de CO2 ou aux appels d'offres publics d'achat de véhicules propres.
- L'Eurovignette vise au paiement d'une taxe pour les poids lourds qui est fonction du nombre d'essieux et de leurs émissions.
- Le système de bonus/malus en fonction du niveau des émissions a été ajouté en 2020 dans la Loi de Transition Energétique.

Levier	Donnée modifiée	Donnée proposée	Proportion d'augmentation de la taille à 2030 des marchés adressables de divers segments de la mobilité routière en fonction de la mise en œuvre de leviers dès 2020.										Augmentation de la demande totale (Kt)		
			Véhicules Particuliers	Taxis et VTC	VUL	Autobus	Camions spécialisés	Poids lourds 26t	Poids lourds 44t	Chariots élévateurs	Augmentation de la demande totale (Kt)	Augmentation de la demande totale (%)			
<b>Taux minimal moyen d'H2 décarboné à la pompe</b>	Taux minimal	50%	88%	>100%	>100%	>100%	>100%	88%	55%					<b>194</b>	<b>19,8%</b>
<b>Hausse des taxes sur les carburants fossiles</b>	Essence	% de croissance sur 2020-2030	30%	>100%										<b>193</b>	<b>19,7%</b>
	Diesel	% de croissance sur 2020-2030	30%	76%	58%	84%	25%	42%	61%	96%				<b>178</b>	<b>18,2%</b>
	GNV	% de croissance sur 2020-2030	30%					16%		11%				<b>11</b>	<b>1,1%</b>
<b>Complément de rémunération pour la production d'hydrogène renouvelable ou bas-carbone, hors SMR+CCS</b>	€/kg H2	1,5	23%					16%	19%	29%				<b>52</b>	<b>42,6%</b>
<b>Subventions sur le prix de l'H2 à la pompe</b>	Hors chariots élévateurs	€ par KgH2	2,0	>100%		32%	47%	77%	>100%	>100%				<b>319</b>	<b>32,6%</b>
	Pour chariots élévateurs	€ par KgH2	2,0											-	<b>0,0%</b>
<b>Subvention à l'achat de véhicules</b>	VP, Taxis/VTC, VUL type Kangoo	€/ véhicule	5 000	>100%	>100%	74%								<b>363</b>	<b>37,1%</b>
	VUL type Fourgon	€/ véhicule	5 000			26%								<b>2</b>	<b>0,2%</b>
	Poids lourds 26t	€/ véhicule	25 000						>100%					<b>58</b>	<b>5,9%</b>
	Poids lourds 44t	€/ véhicule	25 000							>100%				<b>303</b>	<b>30,9%</b>
	Autobus	€/ véhicule	25 000				>100%							<b>7</b>	<b>0,7%</b>
	Camions spécialisés	€/ véhicule	25 000					94%						<b>10</b>	<b>1,0%</b>
<b>Zones Zéro Emission</b>			28%	>100%	>100%	12%			22%	80%			<b>120</b>	<b>12,2%</b>	
<b>Diesel Ban</b>													<b>0</b>	<b>0,0%</b>	

Figure 7 : Proportion d'augmentation de la taille à 2030 des marchés adressables de divers segments de la mobilité routière en fonction de la mise en œuvre de leviers dès 2020.

Le tableau ci-dessus permet de mesurer l'impact indépendant de chacun des leviers précédemment listés sur la taille à 2030 du marché adressable de chaque segment de la mobilité routière. L'analyse a été réalisée en considérant la mise en place des leviers dès 2020. Les données proposées pour les leviers ont été sélectionnées selon les retours des différents acteurs comme étant les plus pertinentes.

La lecture de ce tableau se fait de la manière suivante : pour un levier donné, les colonnes des segments de la mobilité renvoient l'augmentation à 2030 de la taille du marché adressable de ce segment, par rapport à une situation où aucun levier n'aurait été enclenché. Exemples :

- Une subvention de 5000€ à l'achat d'un VUL de type fourgon décidée dès 2020 entrainerait à 2030 une augmentation de 26% du marché adressable des VUL de type fourgon pour les motorisations hydrogène, par rapport à une situation sans aucun levier enclenché.
- La mise en place dès 2020 d'une subvention à la pompe de 2,0€/kg abaisserait d'autant le prix à la pompe et augmenterait de plus de 100% les marchés adressables des véhicules particuliers et des poids lourds 26 et 44 tonnes, ainsi que, dans une moindre mesure, celles d'autres marchés (VUL, autobus, camions spécialisés).

Il est à noter qu'une cellule blanche indique un impact inférieur à 10% pour un levier et un segment donnés. Par ailleurs, les impacts supérieurs à 100% sont seulement indiqués comme étant « >100% », afin de ne pas focaliser l'attention sur certains grands impacts en particulier et afin de davantage de mettre en avant la capacité de plusieurs leviers à ne serait-ce que doubler la taille de divers marchés adressables.

Comme le présentent ces résultats, les principaux leviers permettant d'augmenter la taille du marché adressable de la mobilité routière à hydrogène sont les suivants :

- Avec une subvention de 5000€ par véhicule soit environ 6% du coût d'acquisition moyen du véhicule, les subventions à l'achat de véhicules légers (véhicules particuliers, taxis et VTC, VUL type Kangoo), augmentent le marché adressable de ~350kt ;
- Avec une subvention de 25000€ par véhicule soit environ 8-9% du coût d'acquisition moyen du véhicule, les subventions à l'achat de poids lourds 44 tonnes, augmentent le marché adressable de ~300kt ;
- Avec une réduction de 2,0€/kgH<sub>2</sub> hors complément de rémunération éventuel, les subventions sur le prix de l'hydrogène à la pompe pour tout véhicule hors chariots élévateurs augmentent le marché adressable de ~300kt ;

D'autres observations et commentaires peuvent être formulés sur les résultats d'analyse de sensibilité obtenus, afin de mieux les appréhender :

- Les compléments de rémunération ne permettant d'apporter que 50kt au marché adressable total, car leur impact sur le prix final à la pompe est diminué par la proportion d'hydrogène gris à la pompe ;
- Les chariots élévateurs ne sont impactés par aucun levier car cette demande répond à un raisonnement purement économique, et car cette étude estime que le marché sera techniquement et économiquement adressable à 2030 sans aucun levier nécessaire ;
- Contrairement aux zones à faibles émissions, le diesel ban n'a pas d'effet positif sur les motorisations à hydrogène car le modèle transfère alors les motorisations diesel vers des motorisations essence, puis compare les motorisations à hydrogène aux motorisations essence ; Ce transfert ne change rien à la moindre compétitivité économique de l'hydrogène face à une solution thermique existante.

## G. Conditions de déploiement sur l'ensemble des segments.

La présentation de ces différents leviers, parfois très spécifiques à certains secteurs, permet de définir les conditions optimales de déploiement de l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone en France. Au-delà des considérations spécifiques à chaque segment, certains facteurs ressortent de manière transverse comme critiques à l'adoption de l'hydrogène renouvelable ou bas-carbone. **Le calendrier est crucial car la filière hydrogène constitue un pilier indispensable d'une décarbonation accrue de notre économie à l'horizon 2050. Pour être au rendez-vous post 2030 dans les ordres de grandeurs nécessaires, il convient dès à présent de créer les conditions permettant d'accélérer le déploiement et le passage à l'échelle de la filière hydrogène dans la fenêtre 2020-2023.**

Pour cela, les leviers suivants devront être activés :

- **L'industrialisation de systèmes d'électrolyse de grande-capacité** est à la fois nécessaire pour créer les effets d'échelle permettant de **réduire les coûts** et pour être en mesure de **répondre à l'échelle aux besoins des secteurs industriels** à plus fort potentiel (raffinerie, acier, ammoniac...). Il s'agit ici d'un enjeu industriel majeur au niveau mondial et la France, qui compte dans ses rangs plusieurs équipementiers, a l'opportunité de favoriser l'émergence de futurs champions industriels et de gisements d'emplois. Ce volet doit constituer un des axes prioritaires d'action au niveau national dans un contexte global d'accélération en Europe et dans le monde vers la construction de « giga-factories » permettant de fournir les premiers projets de grande échelle, attendus avant 2025. Dans ce cadre, il apparaît essentiel de favoriser le développement d'un marché captif de projets de grande échelle, en particulier dans l'industrie (notamment dans les raffineries dans l'optique d'une mise en conformité des fournisseurs de carburants à RED2). A noter que certains secteurs de la grande industrie tels que l'acier constituent des gisements de demande considérables à long-terme pour l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone, qui peut devenir un contributeur important à leur décarbonation, mais nécessite de la mise en œuvre de nouveaux procédés. Pour ces secteurs, les premiers projets de démonstration à grande échelle sont nécessaires avant 2025 pour être en mesure de s'inscrire dans une trajectoire de long-terme
- **L'industrialisation de la production de piles à combustible et de réservoirs haute-pression** est également clé pour la commercialisation de véhicules hydrogène à prix compétitif, condition indispensable au déploiement de la mobilité hydrogène. Dans ce cadre, il s'agit d'orienter l'action publique vers les projets de grande échelle permettant de créer des effets de volume sur les commandes et de la visibilité pour les industriels. A ce titre, le maintien des aides à l'achat et autres incitants permettant de réduire le coût d'adoption du point de vue de l'utilisateur est essentiel. Ces réductions de coûts auront des bénéfices sur d'autres segments potentiellement utilisateurs de piles à combustibles tels la cogénération ou la production d'électricité. Ici aussi, il s'agit d'un enjeu industriel mondial et la France compte dans ces rangs plusieurs champions potentiels, futurs générateurs d'emplois.
- **La mise en place d'un dispositif de garanties d'origines** est une mesure nécessaire pour garantir la traçabilité de l'hydrogène renouvelable et/ou bas-carbone et permettre la monétisation de leur valeur-ajoutée environnementale.