

---

## L'HYDROGENE VERT

### Sommaire

1. **Introduction**
2. **Production de l'hydrogène vert**
3. **Mobilité et hydrogène vert**
4. **L'hydrogène vert et l'autonomie énergétique**
5. **L'hydrogène vert et l'industrie**
6. **L'hydrogène vert et le gaz naturel: le Power-to-gas**
7. **Transport et distribution de l'hydrogène vert**
8. **Le Plan hydrogène et les énergies renouvelables**
9. **Conclusion**

---

**Cette fiche est une synthèse des fiches de la présente rubrique « Tout savoir sur... ». Elle est rédigée à la lumière du « Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique » du Ministère de la transition écologique et solidaire lancé en 2018 et particulièrement renforcé<sup>1</sup> par les choix du « Plan France relance » de septembre 2020. Ce déploiement est prévu à base d'hydrogène produit sans empreinte carbone, de l'« hydrogène vert ».**

*Les valeurs numériques citées sont des ordres de grandeur ayant pour objet d'illustrer le propos. Certaines s'appuient sur de pures hypothèses, aucune ne doit être prise en compte comme une donnée de référence.*

## 1 – Introduction

### Hydrogène vert

Hydrogène produit sans émission de dioxyde de carbone à partir de sources renouvelables et inépuisables que sont les énergies renouvelables et la biomasse.

Les énergies renouvelables, pour l'essentiel le vent et le soleil, sont exploitées sous forme d'électricité obtenue avec les éoliennes et les panneaux photovoltaïques sans émissions de carbone<sup>2</sup>, sans polluants ni particules. Une électricité dite « électricité verte ».

La biomasse est la masse de la matière vivante animale et végétale subsistant en équilibre sur la surface du globe. Elle est en partie constituée d'hydrogène.

### CertifHY

CertifHY, initiative européenne, est un système de certification pour le « carburant<sup>3</sup> hydrogène ». Il représente une étape vers la mise en place d'un marché européen de l'énergie sans empreinte carbone. Bénéficiant d'un financement du FCH-JU (Fuel Cell and Hydrogen Joint Undertaking), CertifHy vise à assurer une meilleure traçabilité de l'hydrogène grâce au mécanisme des « Garanties d'origine »<sup>4</sup>.

---

<sup>1</sup> Nouvelle situation qu'illustre la déclaration du président de l'AFHYPAC Philippe Boucly : « On change résolument d'échelle, on passe des millions aux milliards ».

<sup>2</sup> L'électricité nucléaire bien que produite sans carbone n'est pas renouvelable car elle est obtenue à partir de gisements épuisables de minerais d'uranium.

<sup>3</sup> Terme qui au sens strict est inapproprié puisque l'hydrogène ne contient pas de carbone, il est néanmoins admis lorsqu'il correspond à un fluide qui alimente des moteurs de véhicules.

<sup>4</sup> <http://www.certifhy.eu/>

Deux labels sont attribués :

- Le label « CertifHy Green Hydrogen » dans le cas où l'hydrogène est produit à partir d'énergies renouvelables : biomasse, solaire, éolien, hydraulique etc...
- Le label « CertifHy Low-Carbon Hydrogen » si l'hydrogène est fabriqué à partir de sources non renouvelables mais toutefois considérées comme « faibles » en carbone. Soit celles dont l'impact carbone est 60 % moins élevé que les procédés conventionnels de production par reformage de gaz naturel.

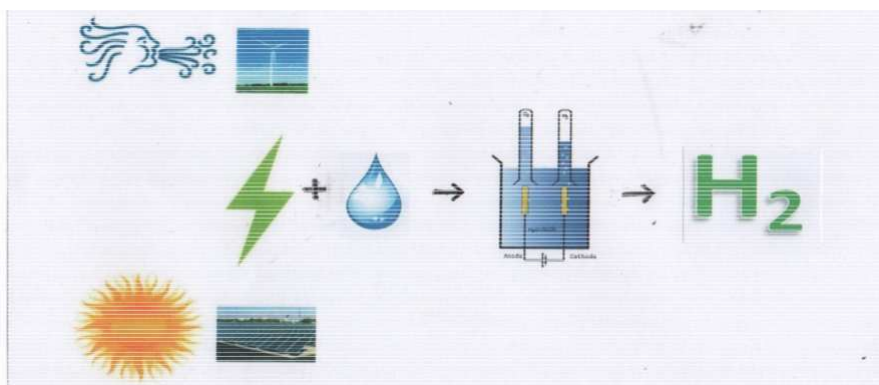
Cette certification est évoquée dans le Plan hydrogène (Mesure 2 de la liste des recommandations):

« Mettre en place dès 2020 un système de traçabilité de l'hydrogène, s'inscrivant dans le cadre européen en cours de discussion».

## 2 - Production de l'hydrogène vert.

S'il fut longtemps considéré que dans la nature se trouvait très peu d'hydrogène à l'état libre sous la forme moléculaire  $H_2$ , ce n'est plus le cas depuis la découverte d'émanations de ce gaz en de nombreux points du globe (cf. Fiche 3.4). En revanche, à l'état combiné, il est très abondant surtout dans l'eau (associé à l'oxygène), dans les hydrocarbures et dans la biomasse (dans les deux cas associé au carbone). Il est de ce fait obtenu en le dissociant de ses composés. Lorsque ceux-ci sont des hydrocarbures d'origine fossile, l'hydrogène est produit par reformage (Fiche 3.1.1), un procédé qui coproduit de grandes quantités de dioxyde de carbone, en masse onze fois plus que d'hydrogène. Aussi, celui-ci à la fois d'origine non renouvelable et obtenu avec beaucoup de carbone n'est pas vert. Comme il est dit plus haut, l'hydrogène vert est celui provenant de l'eau avec des énergies renouvelables ou à partir de la biomasse.

### 2.1 - A partir de l'eau



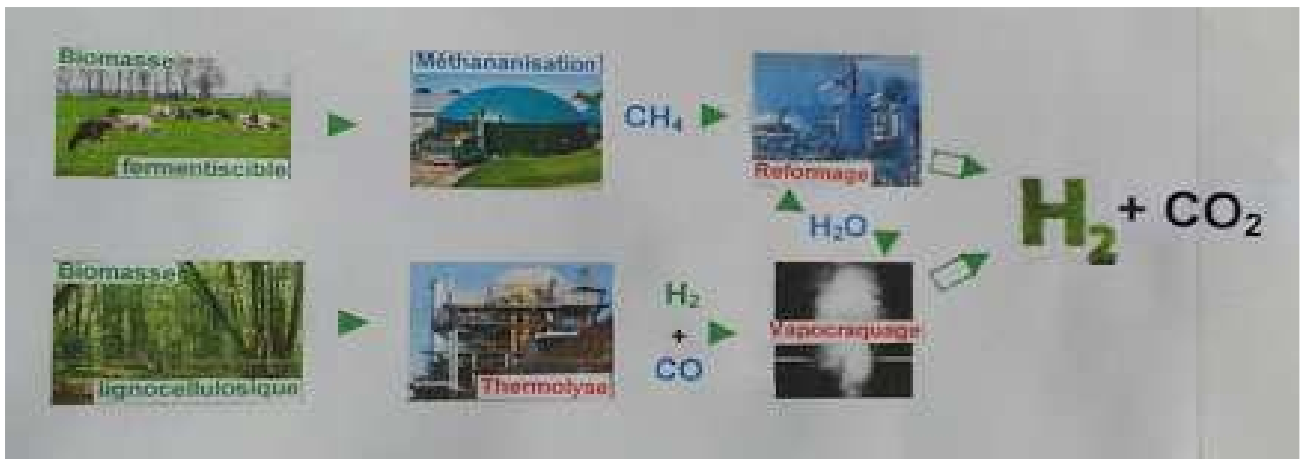
*De l'hydrogène à partir d'eau grâce au vent ou au soleil*

La dissociation se fait par électrolyse (Fiche 3.2.1), un procédé sans émission de gaz à effet de serre, ni de polluants, ni de particules, à base d'électricité renouvelable obtenue elle-même sans carbone (électricité éolienne ou photovoltaïque). L'oxygène coproduit, s'il n'est pas rejeté dans l'atmosphère, peut avoir une utilisation industrielle ou médicale, ou encore alimenter une pile à combustible stationnaire qui, recevant hydrogène et oxygène purs, fonctionnera alors dans les meilleures conditions (cf. § 2.4 ci-après).

Une autre dissociation de l'eau est possible par traitement thermochimique à très haute température, un procédé qui demande des mises en œuvre techniques plus exigeantes que l'électrolyse et inenvisageable en dehors d'une échelle industrielle appropriée.

### 2.2 - A partir de la biomasse

Lorsqu'elle est décomposée, la biomasse est source d'hydrogène car celui-ci, avec le carbone, constitue l'essentiel de sa structure chimique. De ce fait, il n'est pas possible d'obtenir cet hydrogène (bio-hydrogène) sans oxyde de carbone, mono ou di (cf. Fiche 3.3.1). Il est néanmoins considéré comme étant vert parce qu'il provient d'une source renouvelable, qui, d'ailleurs, le plus souvent à base de végétaux, est verte. Quant au dioxyde de carbone coproduit, il convient soit de le capter et le stocker ou de le transformer en méthane de synthèse.



*De l'hydrogène avec des produits de la nature*

Pour l'essentiel la biomasse traitée est issue des déchets :

- fermentescibles, qui sont méthanisables comme les déchets agricoles, agro-industriels, ménagers, ou encore des algues vertes, l'hydrogène étant produit en traitant par reformage (Fiche 3.1.1) le biométhane obtenu ;
- lignocellulosiques, les déchets forestiers, les résidus de taille, certains déchets agricoles. Ils subissent successivement deux traitements thermo-chimiques (Fiche 3.3.1) pour produire de l'hydrogène.

### 2.3 – L'hydrogène naturel (cf. Fiche 3.4)



*De l'hydrogène sortant de terre (roches brûlées par les flammes transparentes)  
Emanation de Nagsasa aux Philippines*

Il reste à établir que les émanations qui ont été mises en évidence présentent un débit à la fois suffisant et régulier et que l'hydrogène qui s'en dégage soit techniquement récupérable et économiquement exploitable.

Etant renouvelable et obtenu sans carbone ni même de dépense d'énergie, cet hydrogène naturel est par essence même de l'hydrogène vert.

### 2.4 - L'hydrogène vert, l'eau et l'oxygène

L'hydrogène vert, lorsqu'il est produit par électrolyse, consomme de l'eau et produit de l'oxygène alors que lorsqu'il alimente une pile à combustible, il consomme de l'oxygène et produit de l'eau. Deux processus complémentaires souvent schématiquement représentés en un cycle liant ces trois éléments à l'énergie.



Ainsi lorsqu'on recourt à l'hydrogène vert, l'eau consommée est restituée et l'oxygène produit qui n'est pas un gaz à effet de serre peut être réutilisé, il s'en suit donc aucun impact sur l'environnement. La réalité est quelque peu différente car ce qui est consommé ou produit ne l'est ni en même quantité, ni au même moment ni au même lieu.

### **L'eau à l'origine de l'hydrogène vert**

Concernant la quantité d'eau nécessaire à l'électrolyse, elle est au minimum, valeur théorique<sup>5</sup>, de 9 litres par kg d'hydrogène. Ramenée aux prévisions du plan ministériel précédemment cité, pour ce qui est prévu en 2023, la quantité d'eau annuelle nécessaire à l'électrolyse serait de 0,8 millions de m<sup>3</sup> et en 2028 de 3,2 millions de m<sup>3</sup>. Des quantités infimes devant les 175 000 millions de m<sup>3</sup> de pluies annuelles qui alimentent nos ressources en eau<sup>6</sup>.

*Dans la **fiction** où tous les véhicules particuliers seraient à hydrogène, la quantité d'eau nécessaire à la production par électrolyse des 4.45 millions de tonnes d'hydrogène nécessaires serait d'environ 40 millions de m<sup>3</sup>. Si on y ajoute la n production des 900 000 tonnes d'hydrogène industriel, il faudrait 8 millions de m<sup>3</sup> d'eau soit au total 48 millions de m<sup>3</sup>, un ordre de grandeur toujours minime devant ce que nous recevons par la pluie.*

Quant aux piles à combustible qui fonctionnent à des températures au dessus de l'ambiante, l'eau qu'elles rejettent l'est en grande partie sous forme de vapeur. Sa récupération par un condenseur est à prévoir pour les grosses installations stationnaires et éventuellement pour les gros véhicules utilitaires. Pour les voitures particulières c'est un équipement supplémentaire qui pourrait devenir nécessaire lorsqu'elles seront suffisamment nombreuses pour générer vapeur d'eau et par suite brouillards au dessus des villes. Quoi qu'il en soit l'eau, vapeur ou liquide que rejette l'utilisation de l'hydrogène, se retrouve à plus ou moins long terme dans le cycle général de cet élément.

### **L'oxygène, complément de l'hydrogène vert**

L'électrolyse de l'eau dédiée à l'hydrogène, parce qu'elle produit 4kg d'oxygène par kg d'hydrogène, sera en mesure d'être l'un des moyens de production de ce gaz lorsque se multiplieront les gros électrolyseurs destinés à produire de l'hydrogène vert en grandes quantités pour l'industrie. Oxygène dont il faut rappeler qu'il est d'une nécessité de premier ordre dans l'industrie chimique, agroalimentaire, pharmaceutique, l'industrie du raffinage, de la papeterie tout comme celle de l'élaboration des verres et des métaux ainsi que

<sup>5</sup> Elle peut en fait être plus importante suivant les besoins de refroidissement des annexes de l'électrolyseur.

<sup>6</sup> C'est-à-dire la quantité de l'eau de pluie qui reste au sol et qui représente seulement les 34% de ce qui est reçu, la majorité, 64%, étant immédiatement évaporée.

des installations de désinfection et de blanchiment. S'y ajoute son apport dans les vols spatiaux en sa qualité d'ergol des moteurs-fusées. Mais l'oxygène se retrouve aussi pour les soins médicaux par son rôle d'auxiliaire respiratoire. Enfin, conditionné et stocké parallèlement à l'hydrogène, il peut alimenter de grosses piles à combustible stationnaires.

Cette importante production d'oxygène que va entraîner celle de l'hydrogène vert par électrolyse de l'eau se devra d'induire la mise en place de toute une logistique de récupération de stockage et de distribution de cet oxygène jusque là produit à partir de l'air atmosphérique par séparation PSA<sup>7</sup> ou par refroidissement et distillation. Deux procédés qui exigent de grosses dépenses d'énergie que pourront éviter ces futures unités industrielles d'électrolyse.

*Dans la **fiction** précédente, en remplaçant tout l'hydrogène consommé par de l'hydrogène vert, l'électrolyse de l'eau produirait plus de 21 millions de tonnes d'oxygène par an, de quoi satisfaire bon nombre de besoins industriels et autres.*

Hormis ces productions d'oxygène à grande échelle, les quantités moindres émises par les plus petits électrolyseurs pourront être relâchées dans l'atmosphère et à terme feront partie des quantités prélevées pour alimenter les piles à combustibles des véhicules de la future mobilité hydrogène. Un autre recyclage de la filière hydrogène vert.

### 3 – Mobilité et hydrogène vert



**Des véhicules qui roulent avec le soleil ou avec le vent**

*C'était une utopie  
avec l'hydrogène vert, c'est devenu une réalité.*

<sup>7</sup> Pressure Swing Adsorption, adsorption modulée en pression, procédé de séparation de mélanges gazeux par adsorption sélective par des matériaux microporeux tels que des zéolites ou des charbons actifs.

Une réalité avec des véhicules électriques dont la batterie est rechargée avec de l'électricité verte et, mieux encore, avec des voitures électriques à pile à combustible à hydrogène.

Les fiches du Chapitre 9 consacrées aux applications montrent l'importance de la potentialité de l'hydrogène en tant que source d'énergie pour les véhicules électriques à pile à combustible avec plusieurs avantages sur les véhicules à batterie. Le premier de ces avantages est l'autonomie, 5 à 600 km contre une centaine. Le second est la rapidité de remplissage du réservoir d'hydrogène, quelques minutes, au lieu des 6 à 8 heures nécessaires à la recharge d'une batterie électrique. Le troisième, lui, apparaîtra lorsque les véhicules électriques à batterie et à hydrogène seront devenus nombreux. En effet avec l'hydrogène, il sera possible d'effectuer des réserves pour pallier les affluences aux stations de recharge (périodes de grands départs) ce qui sera impossible avec l'électricité qui connaîtra alors des surcharges de consommation problématiques tant pour la production que pour le réseau de distribution.

### **Quelques repères chiffrés**

Une automobile à pile à combustible a besoin au maximum d'un kg d'hydrogène pour parcourir 100 km. D'après le Centre d'observation de la route et l'expertise pour les ventes d'occasion, le kilométrage moyen annuel d'une voiture particulière est de 13 500 km (moyenne pour les véhicules diesel et essence). Pour une voiture à pile à combustible, cela correspond à une consommation de 135 kg d'hydrogène. Sachant que pour produire un kg de cet hydrogène par électrolyse de l'eau il faut 55 kWh d'énergie électrique, la fourniture annuelle nécessaire est de 7,5 MWh par véhicule.

Une éolienne terrestre de 2 à 3 MW fournissant en moyenne par an 4,5 GWh est en mesure d'alimenter 600 véhicules à hydrogène. Une éolienne en mer (off-shore) de 5 MW, peut, elle, produire en moyenne 15 GWh/an, de quoi fournir de l'hydrogène à 2 000 voitures. Mais à ce jour, aucune de ces éoliennes performantes n'est installée au large des côtes françaises. Il est prévu d'en implanter prochainement une soixantaine au large des côtes bretonnes et normandes. Néanmoins dans ce qui suit, ne seront pris en compte que les données correspondant à ce que produisent les éoliennes terrestres les seules actuellement en fonctionnement.

Un module photoélectrique typique de 1,67 m<sup>2</sup> (1 x 1,67 m) d'une puissance crête de 250 W peut fournir en moyenne 0,3 MWh/an ce qui exige 28 modules, soit 47 m<sup>2</sup> de panneaux pour assurer l'alimentation annuelle en hydrogène d'une voiture particulière.

La production d'électricité verte est aujourd'hui de 55,6TWh/an<sup>8</sup> en ne prenant pas en compte l'électricité hydraulique qui, par sa disponibilité et son pouvoir de stockage, est plutôt réservée à la régulation du réseau de distribution. Pour le parc de voitures particulières, le Plan hydrogène n'avance pas de chiffre précis car il fixe son objectif en priorité sur les utilitaires. Il est néanmoins prévisible que dans la décennie à venir apparaîtront quelques milliers d'unités de ces véhicules qui consommeront plusieurs dizaines de GWh d'électricité verte, une quantité de peu d'effet sur la production totale de ce type d'électricité

*Dans la **fiction** où tous les véhicules particuliers seraient à hydrogène vert, ils sont en France 33 millions<sup>9</sup>, il faudrait consommer 242 TWh/an d'électricité verte pour assurer la fourniture de ce combustible. Une consommation qui est la moitié de la production totale nationale actuelle, toutes sources confondues! De quoi se faire une idée des futurs besoins en énergie verte que demandera la mobilité sans carbone. Une projection qui sera différente lorsque la fusion nucléaire deviendra une ressource d'énergie décarbonée quasi illimitée.*

Pour les petits et moyens utilitaires, il est estimé par le Plan ministériel qu'ils devraient être de 5 000 unités en 2022 soit un besoin de 88 GWh<sup>10</sup>, quantité sans incidence notable sur la production d'électricité verte. Une situation qui ne sera guère différente en 2028 avec les 20 000 à 50 000 utilitaires d'alors qui consommeront entre 350 et 880 GWh soit au maximum seulement 2 % de ce qui est actuellement produit en électricité verte.

Pour ce qui est des poids lourds, il en est prévu 200 en 2023 et de 800 à 2000 en 2028, mais ceux-ci étant aujourd'hui à l'état de prototypes en cours de démonstration, il est prématuré d'avancer ce que sera dans plusieurs années leur consommation d'hydrogène et par suite la quantité d'électricité qui leur sera nécessaire. Ce panorama de la mobilité terrestre à hydrogène serait incomplet si l'on ne citait pas les deux roues. Concernant les scooters et motos électriques à pile à combustible force est de constater à la lecture de la Fiche 9.4.4 que,

---

<sup>8</sup> Donnée RTE pour 2019.

<sup>9</sup> Donnée 2018 du Comité Français des Constructeurs d'Automobiles, CFCA.

<sup>10</sup> Valeur obtenue à partir de la consommation moyenne d'hydrogène entre petits et moyens utilitaires à prolongateurs d'autonomie, consommation évaluée par hypothèse à 2kg pour 100 km pour un parcours moyen de 16 000km/an que donne Statista 2018 (<https://fr.statista.com>).

malgré des mises au point d'un certain nombre de prototypes, aucun modèle n'est à ce jour commercialement disponible. Situation regrettable au vu des rejets et de la pollution sonore que les actuels deux-roues à moteur thermique imposent dans le centre des agglomérations. Les vélos à prolongateur d'autonomie à pile à combustible devraient connaître un meilleur sort (cf. Fiche 9.4.4) en particulier en France où sont commercialisés les vélos de la marque Pragma<sup>11</sup>. Ce sont des vélos électriques à prolongateur d'autonomie à pile à combustible à hydrogène permettant de parcourir plus de 100 km et pour lesquels les petites stations de recharge spécialement adaptées<sup>12</sup> pourront être approvisionnées en hydrogène vert lorsque celui-ci verra se déployer sa logistique de distribution. Quel sera le rythme de développement de ces vélos et donc la quantité d'hydrogène qu'ils consommeront? Quoi qu'il en soit, leur faible consommation, 30g/100km, n'affectera en rien la production d'électricité verte.

Quant aux bateaux, trains et avions à piles à combustible (cf. Fiches du chapitre 9) ils sont des prototypes en expérimentation. S'il est impossible d'évaluer les quantités d'hydrogène que leur déploiement exigera, il est évident qu'elles seront importantes.

Les consommations d'électricité verte pour les besoins de la mobilité hydrogène sont donc à moyen terme en état d'être supportées par la production actuelle. Comme à l'avenir il est prévu d'augmenter cette production à un rythme soutenu, le déploiement de la mobilité à hydrogène pour les gros véhicules devrait être assuré. En revanche, moins facile à prévoir ce que seront les besoins pour les très gros consommateurs que seront les bateaux et les trains. Pour ces derniers est à considérer le faible rendement de la chaîne électrolyse - pile à combustible par rapport à la quantité d'électricité qu'elle exige devant celui de l'alimentation directe par caténares. A cela s'ajoute l'importante logistique qu'imposeront les grandes quantités d'hydrogène nécessaires à l'alimentation de ces trains. Peut-être le seul cas où le recours à l'hydrogène n'est peut-être pas le plus pertinent.

#### 4 - L'hydrogène vert et l'autonomie énergétique

Etre en site isolé et s'éclairer, se chauffer, se rafraîchir et faire fonctionner son équipement électrique avec le soleil et le vent est devenu possible grâce aux modules d'autonomie énergétique comme ceux que proposent en France les sociétés ATAWAY<sup>11</sup> et POWIDIAN<sup>13</sup>. L'énergie captée par une éolienne et/ou des panneaux photovoltaïques est stockée à court terme par des batteries et à plus long terme par une chaîne hydrogène comportant un électrolyseur, un stockage en bouteilles haute pression, et se terminant par une pile à combustible fournissant l'électricité. Ces unités d'une capacité de quelques kW à plusieurs dizaines de kW sont capables d'assurer l'autonomie énergétique d'une ou de plusieurs habitations.



Unité d'autonomie énergétique ATAWAY



Unité d'autonomie énergétique POWIDIAN

Des situations particulières pouvant permettre l'autonomie énergétique par l'hydrogène vert:

- L'habitat pavillonnaire et des petites agglomérations rurales

<sup>11</sup> Pragma Industries à Biarritz [www.pragma-industries.com](http://www.pragma-industries.com) > mobilite-douce

<sup>12</sup> ATAWAY au Bourget-du-Lac en Savoie <http://atawey.com/fr/produit.html>

<sup>13</sup> Powidian à Chambray-les-Tours en Indre et Loire. <http://powidian.com/fr/>

La fourniture annuelle d'électricité verte par une éolienne, en moyenne 4,5 GWh, est en mesure d'assurer l'alimentation d'environ 900 à 1 000 foyers<sup>14</sup> à condition de compenser son intermittence et son instabilité. Ce peut être par le réseau de distribution ou, restant dans le contexte énergie verte, par une chaîne de stockage d'énergie à hydrogène du type précédent. L'ensemble d'un tel équipement est envisageable au niveau d'un regroupement d'habitats en zone pavillonnaire ou dans un village.

Dans le même esprit, une unité collective de fourniture d'électricité peut être implantée en répartissant des panneaux photovoltaïques sur les toitures. Une solution très possible puisque la consommation moyenne annuelle d'une habitation, 5 à 15 MWh<sup>15</sup>, peut être assurée par 30 à 90m<sup>2</sup> de panneaux. Mais il faut compenser l'alternance jour-nuit et, là encore, pour rester dans le contexte d'énergie verte, devient nécessaire une chaîne collective de stockage d'énergie à hydrogène tout comme une mise en réseau (smart grid) de ces unités de production électrique.

- Les exploitations agricoles

Particulièrement adaptées à l'installation de panneaux photovoltaïques, les toitures des bâtiments agricoles, hangars, granges, étables présentant des surfaces de plusieurs centaines de m<sup>2</sup>, voire plus, peuvent fournir plusieurs dizaines de MWh annuels d'électricité verte assurant la totale indépendance énergétique de l'exploitation. Ceci, bien sûr, toujours via la mise en œuvre d'une chaîne d'autonomie énergétique dont une partie de l'hydrogène pourra alimenter les engins et machines agricoles, tracteurs, moissonneuse lorsque ceux-ci seront disponibles avec un équipement à piles à combustible. Et plus encore, pour les exploitations équipées de méthaniseurs la possibilité grâce à l'hydrogène de valoriser le dioxyde de carbone fatal en le transformant en méthane de synthèse.

- Les entreprises

Pour l'artisanat et l'industrie, de grandes toitures sont également disponibles pour le photovoltaïque et, avec le même recours à l'hydrogène, peuvent rendre tout/ou partie de l'entreprise énergétiquement indépendante dans le respect de l'environnement. Comme pour les exploitations agricoles, ces entreprises productrices d'hydrogène vert pourraient alimenter leur propre flotte de véhicules à pile à combustible.

## 5. - L'hydrogène vert et l'industrie



*De l'hydrogène pour le raffinage, l'ammoniac, les matériaux etc.*

Avant d'être ce combustible aux nombreuses vertus environnementales, l'hydrogène fut, et est encore, une matière première de l'industrie pour le raffinage des produits pétroliers (désulfuration), pour l'agrochimie (synthèse de l'ammoniac), la chimie de base (méthanol) et la sidérurgie (agent réducteur voire combustible). Il est aussi utilisé dans l'industrie alimentaire (stabilisation des huiles et des graisses) dans celle du verre (polissage par procédé oxy-hydrogène), de la parfumerie et du cosmétique (saturation des graisses par hydrogénation), tout comme dans les entreprises utilisant le soudage (par chalumeau ou arc électrique).

Pour satisfaire ces demandes, il faut chaque année produire en France 920 000 t d'hydrogène par reformage d'hydrocarbures en particulier de méthane (cf. Fiche 3.1.1) avec l'inconvénient majeur d'émettre 11,5 millions

<sup>14</sup> En prenant en compte la consommation moyenne par foyer de 5 MWh/an établie par RTE pour 2019. Pour une éolienne, le chiffre est une équivalence mais ne signifie pas qu'elle pourrait seule fournir cette électricité à ce nombre de foyer de manière permanente en raison de son fonctionnement instable et intermittent.

<sup>15</sup> Sans chauffage électrique ou avec. Donnée Sélectra 2020 <https://selectra.info/energie/guides/conso/consommation-moyenne-electricite/maison>



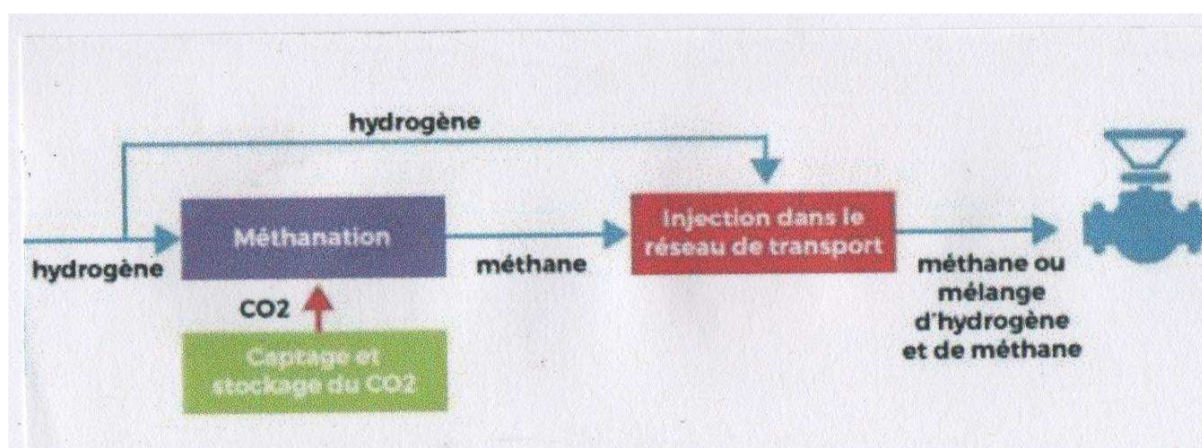
de tonnes de dioxyde de carbone. Une atteinte à l'environnement qui peut être évitée en remplaçant cet hydrogène carboné par de l'hydrogène vert. C'est ce que prévoit le Plan ministériel sur le déploiement de l'hydrogène en créant une «Filière industrielle française décarbonée». Un projet dont la mise en oeuvre peut être immédiate car elle fait appel à des technologies matures et à des équipements disponibles sur le marché. Existent en particulier de gros électrolyseurs alcalins et PEM (cf. Fiche 3.2.1) d'une puissance de 20 à 100 MW pouvant fonctionner en moyenne 6 000 h par an et produire jusqu'à 10 000 t d'hydrogène. Les objectifs de ce projet prévoient :

- 10 % d'hydrogène décarboné dans l'hydrogène industriel d'ici 2023;
- entre 20 à 40 % d'ici 2028.

Cela implique, dans un premier temps, de dédier 5 TWh/an d'électricité renouvelable à cette production d'hydrogène pour l'industrie puis de multiplier ce chiffre par un facteur de deux à quatre en 2028 et de mettre en oeuvre des dizaines des plus gros électrolyseurs..

Une éolienne terrestre qui fournit en moyenne 4,5 GWh/an assure la production de 82 t d'hydrogène, ce que peuvent également permettre 2,5 ha de panneaux photovoltaïques. Pour l'objectif 2023, il faudra ainsi un millier d'éoliennes et par la suite plusieurs milliers ou, à partir du photovoltaïque seul, 2 800 puis de 5 000 à 9 000 ha<sup>16</sup> de panneaux. En fait, plutôt que l'une ou l'autre, ce sont ces deux sources qui devront être mises à contribution dans un mix d'électricité verte dédié à l'hydrogène en réservant l'électricité hydraulique, comme il a été dit plus haut, à la régulation du réseau de distribution.

## 6.- L'hydrogène vert et le gaz naturel: le Power-to-gas



*De l'hydrogène et/ou du méthane de synthèse dans le réseau de distribution de gaz*

Exposé dans la Fiche 9.5, le Power-to-gas est une autre valorisation de l'hydrogène consistant soit à le mélanger au gaz naturel - mélange dénommé hythane<sup>17</sup> - pour en améliorer le pouvoir énergétique soit à le combiner à du dioxyde de carbone pour produire du méthane de synthèse (opération dite de méthanation<sup>18</sup>, cf. Fiche 9.5). Deux processus qui parallèlement assurent le stockage de l'énergie électrique. L'adjonction d'hydrogène au gaz naturel est favorisée si l'unité d'électrolyse voisine un gazoduc du réseau de distribution voire une réserve souterraine. Ce dernier cas est, lui, idéal puisque la conversion de cette électricité renouvelable en hydrogène est un stockage sous forme de combustible directement utilisable. L'opération «GRHYD» en Hauts de France (cf. Fiche 9.5) expérimente ce processus en injectant 20 % d'hydrogène dans le gaz naturel distribué localement, une démonstration dont les retours sur expérience devraient permettre la généralisation du procédé.

*Une nouvelle fiction: quel serait l'impact sur la production d'électricité renouvelable si cette adjonction de 20% d'hydrogène concernait l'ensemble du gaz naturel distribué? La consommation annuelle de gaz est*

<sup>16</sup> Pour ce qui est de l'occupation au sol, ces surfaces doivent être réduites d'environ 30% en prenant en compte l'inclinaison des panneaux (le plus souvent voisin de 45°).

<sup>17</sup> Marque déposée aux USA pour la proportion fixe de 80-20 mais qui ne l'est pas en France donc autorise l'utilisation du terme quelque soient les proportions.

<sup>18</sup> A ne pas confondre avec la méthanisation qui est l'obtention de méthane par fermentation anaérobie de déchets.

actuellement équivalente à 451 TWh<sup>19</sup> (soit 40 Gm<sup>3</sup> <sup>20</sup>). Il faudrait dédier 40 TWh/an d'énergie électrique à cette opération, chiffre qui donne l'ordre de grandeur du potentiel de stockage d'électricité que représente le Power-to-gas.

L'hydrogène peut convertir en méthane de synthèse le dioxyde de carbone fatal rejeté par l'industrie, les chaufferies et les centrales thermiques tout comme celui que produisent les unités de méthanisation de déchets fermentescibles d'origine urbaine, industrielle ou agricole. Ce processus de méthanation est en quelque sorte un recyclage du dioxyde de carbone émis par l'ensemble de nos activités. Deux expériences de démonstration sont en cours en France: Jupiter 1000 à Fos dans les Bouches-du-Rhône et Methycente à Céré-la-Ronde en Indre et Loire (cf. Fiche 9.5). D'après la réaction chimique de synthèse du méthane, réaction dite de Sabatier, il faut prévoir 180 kg d'hydrogène pour convertir une tonne de dioxyde de carbone ce qui demande 10 MWh d'électricité.

*En poursuivant dans l'imaginaire: quelle serait la quantité d'électricité permettant de produire la totalité du gaz consommé en méthane de synthèse? 930 TWh/an, une valeur peu réaliste, près du double de la production d'électricité actuelle toutes sources additionnées. Seraient alors recyclés plus de 90 millions de tonnes de dioxyde de carbone! Chaque pourcentage de cette quantité d'électricité donne une évaluation du pouvoir de stockage et/ou du pouvoir de conversion énergétique du Power-to-gas.*

Comment acheminer l'hydrogène vert du lieu de sa production à celui de son utilisation, station de recharge pour véhicules, industrie ou autre?

## 7.- Transport et distribution de l'hydrogène vert

Mettre l'hydrogène à disposition :

- pour la mobilité, se fait par des stations de distributions sur le modèle des stations-service de carburants ;
- pour les autres usages se fait par des unités de stockage.

Dans les deux cas une alimentation qui demande de transporter l'hydrogène.

Sous sa forme gazeuse, pour être acheminé l'hydrogène demande à être comprimé donc contenu dans des réservoirs qui devant résister à la pression ont un poids élevé (de l'ordre de 25 fois celui de l'hydrogène contenu) et ce, malgré les récents progrès en matière de matériaux composites. Sous sa forme liquide, il exige des enceintes cryostatiques de hautes performances avec l'inconvénient d'une ébullition permanente qui demande une évacuation continue de l'hydrogène gazeux qui se dégage.

Dans l'attente que soient disponibles les gros utilitaires et les poids lourds à hydrogène les camionnages précédents se feront avec les carburants fossiles actuels de quoi, en partie, amoindrir les vertus environnementales de l'hydrogène vert ! Une justification au développement de ce type de véhicules.



Camionnage de bouteilles de gaz comprimé



Camionnage d'hydrogène liquide

<sup>19</sup> Donnée GRTgaz 2019.

<sup>20</sup> En prenant en compte la valeur moyenne de 10 kWh/m<sup>3</sup> de gaz (valeur comprise entre le haut et le bas pouvoir calorifique).

Plutôt que transporter l'hydrogène lorsque il n'est pas envisageable de rapprocher la source d'électricité de l'électrolyseur, de la station de distribution ou de l'usine, le transport de l'électricité reste une bonne alternative. Mieux encore, le gazoduc<sup>21</sup> est le transport le plus adapté même s'il nécessite un assez lourd investissement (cf. Fiche 4.1) et de ce fait reste plutôt à prévoir pour les grosses quantités à transporter régulièrement. Une remarque: le mélange hydrogène gaz naturel, l'hythane, peut également être un moyen de transport car la séparation de ces deux gaz se fait aisément, et rend possible le fait de prélever de l'hydrogène sur un réseau de gazoducs transportant de l'hythane.



*Gazoduc*

Pour la planification ministérielle du déploiement de l'hydrogène en question, se posera le problème du choix de la localisation des sources de production et du transport. Concernant la mobilité :

- En zone urbaine, il est inenvisageable d'adjoindre aux stations de recharge une éolienne ou une étendue de panneaux photovoltaïques. Il reste à installer soit un électrolyseur alimenté en électricité verte ou à approvisionner la station par livraison d'hydrogène comprimé, voire d'hydrogène liquide et pourquoi pas, par gazoducs;
- En zone périurbaine ou rurale et le long des axes routiers, deviennent possibles des stations assorties de leur électrolyseur alimenté par une éolienne et/ou un champ de panneaux solaires.
- L'implantation d'électrolyseurs auprès des usines utilisatrices avec, si nécessaire, transport d'électricité verte depuis les sources ou, mieux encore, concentration usines et électrolyseurs auprès d'éoliennes et/ou de panneaux photovoltaïques;
- L'implantation d'électrolyseurs auprès des sources d'électricité verte avec transport de l'hydrogène par gazoducs ;
- Pour l'injection d'hydrogène dans le réseau de gaz naturel, il est à rapprocher le plus possible la production du maillage des canalisations de transport ou d'une réserve souterraine ;
- Pour la méthanation, en zone industrielle, produire l'hydrogène au voisinage de sources d'électricité renouvelable et/ou d'émission de dioxyde de carbone fatal et, à défaut, le produire avec de l'électricité acheminée. Dans un secteur où sont des méthaniseurs, le plus souvent en territoires ruraux, là encore, l'alimentation par des lignes électriques reste une bonne solution. Quant à la collecte du dioxyde de carbone, gaz facilement liquéfiable donc transportable, elle est aussi possible et dans tous les cas préférable au transport de l'hydrogène.

## **8. - Le Plan Hydrogène et les énergies renouvelables**

Intimement liés, hydrogène vert et énergies renouvelables le deviennent plus encore avec le «Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique» pour lequel ce rapprochement doit devenir le fondement d'un cercle économique et environnemental vertueux. Hydrogène pour lequel, comme il est dit § 1, est prévue la mise en place d'un système de traçabilité. Ce plan d'actions comporte 3 axes :

- Production d'hydrogène par électrolyse pour l'industrie ;

---

<sup>21</sup> Aussi dénommé hydrogénéoduc.

- Valorisation par des usages de la mobilité sur la base notamment de flottes de véhicules professionnels ;
- Stabilisation des réseaux énergétiques sur le moyen-long terme avec implantations d'unités de production dédiées.

En résumant les évaluations correspondant aux objectifs de ce plan, on obtient le tableau suivant regroupant les consommations annuelles d'électricité verte à prévoir, exprimées en TWh/an ainsi que les équipements en éoliennes ou panneaux photovoltaïques correspondants

	Mobilité	Industrie	Power-to-gas (hythane à 20% H <sub>2</sub> )	Total	Equipements
Echéance 2022	~ 0,1	5	Fraction de 40 TWh non prise en compte dans le total ci-contre*	5,1	1 150 éoliennes ou 2 850 ha de panneaux photovoltaïques
Echéance 2028	0,9	20	Id°	20,9	4 650 éoliennes ou 11 600 ha de panneaux photovoltaïques

\*L'addition d'hydrogène dans le gaz naturel n'est pas prévue dans les prévisions chiffrées du plan

En 2019, la production totale d'électricité renouvelable éolienne photovoltaïque et biomasse s'élevait, rappelons-le, à 55,6 TWh (10,3% de la production totale). Si dans un premier temps ce qu'exige la mobilité reste une quantité relativement réduite de cette production, les consommations ultérieures conduiront à y ajouter une large part dédiée à toutes les applications de l'hydrogène. Une production qui devra encore être augmentée puisqu'il est prévu de réduire à 50% la part d'électricité d'origine nucléaire. Cela implique de disposer annuellement d'une surproduction de 80 TWh d'électricité verte, soit ce que produisent 18 000 éoliennes terrestres<sup>22</sup> ou 45 000 ha de modules photovoltaïques. De plus, pour inclure cette électricité verte au réseau de distribution, en raison de son instabilité et de son intermittence, il faut disposer de nombreuses sources de compensation que sont les actuelles centrales hydrauliques et surtout de futures centrales thermiques<sup>23</sup> pourtant incompatibles avec le respect de l'environnement. Une situation de contradictions que ne connaîtrait pas la production d'électricité renouvelable seulement dédiée à l'hydrogène car celle-ci, au contraire, représente à la fois un mode de régulation, de mise en réserve et de valorisation de cette énergie.

## 9 - Conclusion

L'hydrogène vert est le vecteur d'énergie irremplaçable et du plus haut intérêt pour la sauvegarde de l'environnement. Il est le facteur incontournable de la réussite de la transition énergétique - transition écologique - car il est en mesure d'éliminer les nuisances environnementales de la mobilité et de l'industrie à base de combustibles fossiles tout en apportant une significative amélioration au stockage de l'énergie. En cela, il contribuera de manière déterminante à ce que soient atteints les objectifs des plans «Climat air énergie territoriaux»<sup>24</sup> mais à la seule condition de prévoir, pour le produire, une part de plus en plus importante de l'électricité issue des énergies renouvelables. Ce qui, avec la décision de diminuer la part d'électricité nucléaire, implique, dans un avenir immédiat, un choix politique déterminant en faveur d'un important développement de ces énergies.

oooooooooooooooo

<sup>22</sup> Donnée à revoir en fonction de la production fournie par les éoliennes off-shore qu'il est prévu d'installer.

<sup>23</sup> Hormis les centrales thermiques à combustible nucléaire dont il est question de diminuer le nombre.

<sup>24</sup> Les Plan Climat Air-Énergie Territorial (PCAET) sont des outils de planification ayant pour but sur un territoire donné d'atténuer le changement climatique, de développer les énergies renouvelables et de maîtriser la consommation d'énergie. Leur généralisation est devenue obligatoire à l'ensemble des intercommunalités de plus de 20.000 habitants en 2019, et l'est depuis 2017 pour les intercommunalités de plus de 50.000 habitants.

## **Sources :**

- «Plan de déploiement de l'hydrogène pour la transition énergétique» Ministère de la transition écologique et solidaire, juin 2018.  
[https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Plan\\_deploiement\\_hydrogene.pdf](https://www.ecologique-solidaire.gouv.fr/sites/default/files/Plan_deploiement_hydrogene.pdf)
- « France relance »  
[https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions\\_services/plan-de-relance/annexe-fiche-mesures.pdf](https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/plan-de-relance/annexe-fiche-mesures.pdf)
- Fiches de la présente rubrique «Tout savoir sur l'hydrogène et les piles à combustibles» du site [www.afhypac.org](http://www.afhypac.org)
- Panorama de l'électricité renouvelable au 31déc. 2019, RTE, Syndicat des Energies renouvelables, ENEDIS, ADEeF. <https://www.enedis.fr/sites/default/files/panorama-EnR-T4-2019.pdf>
- Bilan gaz 2019, GRTgaz <https://www.grtgaz.com/fileadmin/medias/communiques/2020/fr/Bilan-gaz-2019.pdf>
- Connaissance des énergies, [www.connaissancedesenergies.org](http://www.connaissancedesenergies.org)
- Transport de l'hydrogène [www.liste1.e-monsite.com/medias/files/3-transport-de-l-hydrogene.pdf](http://www.liste1.e-monsite.com/medias/files/3-transport-de-l-hydrogene.pdf)