

---

## PRODUCTION ET CONSOMMATION DE L'HYDROGENE RENOUVELABLE

### Sommaire

- 1 – L'hydrogène renouvelable
- 2 – L'hydrogène en chimie industrielle
- 3 – Le combustible hydrogène
- 4 – Hydrogène et électricité renouvelable
- 5 - Conclusion

---

Ces dernières années, se développe de plus en plus l'utilisation de l'hydrogène en sa qualité de meilleur des combustibles respectueux de l'environnement que ce soit en combustion directe ou en combustion électrochimique dans la pile à combustible. Mais aussi, agent chimique réducteur, il est depuis le début du XX<sup>ème</sup> siècle de la première importance en chimie industrielle et pour cela il est produit et utilisé en grande quantité. Cette importance de l'hydrogène se révèle par le déploiement qu'il connaît partout dans le Monde<sup>1</sup>.

Combustible ou destiné à l'industrie chimique l'hydrogène est plutôt difficile et coûteux à stocker en quantités importantes, aussi peut-on considérer que les quantités produites et les quantités consommées restent très voisines.

*Les chiffres cités sont des ordres de grandeur illustrant le texte et en aucun cas ne doivent être considérés comme données de référence.*

### 1. L'hydrogène renouvelable

Existant très peu dans la nature à l'état libre et sous cette forme jusqu'alors peu exploitable (cf.Fiche 3.4), l'hydrogène est obtenu en le dissociant des atomes avec lequel il est combiné. Ceux-ci en revanche sont en grandes quantités ce sont les atomes d'oxygène dans le cas de l'eau et les atomes de carbone dans le cas des hydrocarbures.

Dans le premier cas on procède par électrolyse, un procédé qui n'émet aucun gaz à effet de serre et ne coproduit que de l'oxygène (cf. Fiche 3.2.1). Il permet d'obtenir de l'hydrogène produit sans empreinte carbone aussi il est aujourd'hui décidé d'y avoir de plus en plus recours. Mais cette électrolyse est d'un coût élevé lié à celui de l'électricité qu'elle consomme. Elle ne représente

---

<sup>1</sup> [L'hydrogène dans le monde – France Hydrogène - France Hydrogène \(france-hydrogene.org\)](https://france-hydrogene.org)

actuellement que de 4% de la production mondiale. Elle est toutefois en forte croissance dans le cadre de l'engagement universel de défense de notre environnement. A ce titre, d'autres procédés de production d'hydrogène respectant la neutralité carbone sont expérimentés : dissociation thermo-chimique de l'eau (Fiche 3.2.2) ; photoélectrolyse de l'eau (Fiche 3.2.3) ; traitement de la biomasse (Fiche 3.3.1) ; bioproduction par les organismes biosynthétiques (Fiche 3.3.2).

Quant à la dissociation de l'hydrogène d'avec les atomes de carbone des hydrocarbures fossiles par reformage ou oxydation elle est encore, surtout pour ce qui est de la dissociation du gaz naturel, le procédé de production le plus utilisé (Fiche 3.1.1). De ce fait, les hydrocarbures représentent dans le monde 96% des matières premières productrices d'hydrogène.

Malgré les recommandations de l'ordonnance n°2021-167 du 17 février 2021 relative à l'hydrogène, il est encore aujourd'hui d'usage de lui attribuer une couleur différente suivant la quantité de dioxyde de carbone qui est rejeté pour l'obtenir (Fiche 0.2.). Cela s'applique tout particulièrement pour l'hydrogène produit sans empreinte carbone couramment dénommé « hydrogène vert » comme c'est par exemple le cas de l'entreprise « H2V » (cf. §4) qui a adopté ce terme pour sa dénomination.

*Le premier intérêt de cette ordonnance 2021-167 est d'apporter une terminologie claire et lisible de l'hydrogène. Entre hydrogène vert, bleu, turquoise, jaune ou gris, l'approche souvent ambiguë par les couleurs est abandonnée au profit de définitions privilégiant les attributs environnementaux de l'hydrogène.*

*Respectant un **principe de neutralité technologique**, les catégories proposées mettent en avant la source d'énergie primaire utilisée ou les émissions de gaz à effet de serre associées. La typologie inclut trois catégories :*

- **L'hydrogène renouvelable**, produit à partir de sources d'énergies renouvelables et dont le procédé de production respecte un seuil d'émission d'équivalents de CO<sub>2</sub> émis par kilogramme d'hydrogène produit. Cette catégorie inclut aussi bien l'électrolyse de l'eau utilisant de l'électricité renouvelable (solaire, éolien, hydraulique), que tout autre procédé de production recourant à des énergies renouvelables et « n'entrant pas en conflit avec d'autres usages permettant leur valorisation directe » (pyrogazéification ou thermolyse de la biomasse, vaporeformage de biogaz).
- **L'hydrogène bas-carbone**, produit à partir de sources d'énergies non renouvelables et respectant le même seuil de kgCO<sub>2</sub>eq/kgH<sub>2</sub>. L'électrolyse alimentée par de l'électricité du mix électrique français serait qualifiée, ainsi que les procédés associant des techniques de captage, séquestration ou utilisation du carbone (CCUS) pouvant réduire considérablement les émissions de CO<sub>2</sub> en sortie d'usine.
- **L'hydrogène carboné**, désigne un hydrogène ni renouvelable ni bas-carbone. Sont regroupées ici les productions par des énergies fossiles, telles que l'hydrogène produit par vaporeformage de gaz naturel (environ 11 kgCO<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub>), par gazéification du charbon (20 kgCO<sub>2</sub>/kgH<sub>2</sub>) ou encore par électrolyse alimentée par des mix électriques carbonés. Mais aussi potentiellement des productions à partir d'énergies renouvelables qui ne qualifieraient pas au seuil d'émission. Cela pourrait concerner par exemple de l'hydrogène produit à partir de biomasse ou de biogaz, selon la nature des intrants utilisés et l'empreinte carbone associée, ou encore en fonction des fuites de méthane prises en compte en amont.

*Reste donc à définir par voie réglementaire le seuil d'émission approprié. Un choix qui se fera en lien avec les discussions européennes autour de la taxonomie des investissements durables, choix qui se devra d'être compatible avec un mix électrique décarboné. La méthode de calcul des émissions de gaz à effet de serre des différents procédés de production sera un autre point clef à déterminer.*

## 2. L'hydrogène en chimie industrielle

Pour les besoins de la chimie industrielle (cf. Fiche « L'hydrogène en chimie industrielle » citée ci-dessus) la production mondiale d'hydrogène était de l'ordre de 94 millions de tonnes en 2021 et aujourd'hui voisine les 120 millions de tonnes. Environ 60 % de cette quantité provient du vaporeformage du gaz naturel (méthane), 18 % de l'oxydation partielle du pétrole et 18 % de la gazéification du charbon. Seulement 0,7 % de ces procédés se font avec captage et valorisation du CO<sub>2</sub> c'est pourquoi ces productions sont fortement émettrices de dioxyde de carbone. Les 4 % provenant de l'électrolyse de l'eau, sans ces émissions de gaz à effet de serre – obtention d'hydrogène renouvelable – représente une proportion qu'il est prévu de fortement augmenter tout particulièrement en France avec l'adoption du plan de décarbonation de l'industrie<sup>2</sup>. Lorsque celui-ci aura abouti, la quantité annuelle d'électricité renouvelable nécessaire sera d'environ 50 GWh, un très faible pourcentage de la production totale de cette électricité qui est de 100 TWh (donnée RTE 2022).

Pour l'Europe, une analyse de ce que seraient les besoins en cet hydrogène renouvelable pour l'industrie a été publiée par l'AIE<sup>3</sup>, elle est résumée dans le tableau suivant.

	Raffinage pétrolier	Ammoniac	Méthanol	Métallurgie	Chimie	Huiles	Verrerie	Semi-conducteurs	Chimie fine
<b>Exemples d'acteurs</b>									
<b>Besoins en volume</b>									
<b>Source d'hydrogène</b>	Production sur site ou pipeline	Production sur site ou pipeline	Production sur site ou pipeline	Production sur site ou livraison	Production sur site ou pipeline	Production sur site ou livraison	Production sur site ou livraison	Production sur site ou livraison	Production sur site ou livraison
<b>Fourchette de prix</b>	1-2 €/kgH <sub>2</sub>	1-2 €/kgH <sub>2</sub>	1-2 €/kgH <sub>2</sub>	6-7 €/kgH <sub>2</sub> *	2-3 €/kgH <sub>2</sub>	5-6 €/kgH <sub>2</sub> *	5-6 €/kgH <sub>2</sub> *	5-6 €/kgH <sub>2</sub> *	6-7 €/kgH <sub>2</sub> *
<b>Propension à passer à l'hydrogène vert</b>	Pas d'incitations fortes (90 % des quotas gratuits de l'EU ETS)	Pas d'incitations fortes (prix du CO <sub>2</sub> insuffisant et 95 % des quotas gratuits dans l'EU ETS)	Pas d'incitations fortes (prix du CO <sub>2</sub> insuffisant dans l'EU ETS)	Driver économique (production sur site versus SMR + livraison) 95% des quotas gratuits dans l'EU ETS	Pas d'incitations fortes (prix du CO <sub>2</sub> insuffisant et 95% des quotas gratuits dans l'EU ETS)	Driver économique (production sur site versus SMR + livraison)	Driver économique (production sur site versus SMR + livraison) 95% des quotas gratuits dans l'EU ETS	Driver économique (production sur site versus SMR + livraison)	Driver économique (production sur site versus SMR + livraison)
*Dépend de manière significative des volumes et de la localisation				<b>Consommation moyenne d'hydrogène par usine :</b> >10,000 Nm <sup>3</sup> /h (= ~800kg/h)            >1,000 Nm <sup>3</sup> /h (= ~80kg/h)            >100 Nm <sup>3</sup> /h (= ~8kg/h)					

**Tableau 1.** Analyse des besoins et leviers d'utilisation d'hydrogène renouvelable dans l'industrie européenne.

(Analyse EY d'après IEA, *The future of Hydrogen 2019*)

<sup>2</sup> [France 2030 | Accélérer le déploiement de l'hydrogène, clé de voûte de la décarbonation de l'industrie | Gouvernement.fr](#)

<sup>3</sup> Cité dans le document Hydrogène, ADEME, 2019.

Pour la France, l'objectif fixé dans le cadre de la stratégie nationale bas carbone pour l'industrie (note bas de page n°1) est de diminuer en 2030 de 40% les 11 millions de tonnes annuelles de dioxyde de carbone émis aujourd'hui. Cela impose l'installation d'un ensemble d'électrolyseurs d'une puissance totale de 4,5 GW.

### 3. Le combustible hydrogène

En sa qualité de meilleur des combustibles n'émettant ni gaz à effet de serre, ni polluants, ni particules, l'hydrogène peut alimenter :

- tout mode de chauffage industriel, domestique, voire de centrales électriques thermiques (future Fiche 5.1.1) ;
- des moteurs thermiques (Fiches 5.1.1 et 5.1.2) ;
- des piles à combustible pour la mobilité électrique et les unités d'alimentation électriques stationnaires (Fiches 5.2.1 à 5.2.6 et 9.4.1 à 9.4.3).

Il est donc tout désigné pour contribuer au succès de la transition écologique. Mais comme il est dit dans le § précédent il n'existe pas dans la nature à l'état directement exploitable, il faut le produire. En cela, comme la vapeur d'eau et l'électricité il est un vecteur énergétique, c'est-à-dire une énergie qui n'est pas disponible et demande de l'énergie pour être produite. Pour que de sa production à son utilisation il soit sans empreinte carbone seul est envisageable l'hydrogène renouvelable produit suivant les procédés déjà mentionnés : électrolyse de l'eau, pyrogazéification ou thermolyse de la biomasse, vaporeformage de biogaz, et autres procédés développés dans les Fiches du chapitre 3.

#### Combustion directe : chauffage et moteurs thermiques à hydrogène

##### Chauffage

La combustion directe de l'hydrogène destinée au chauffage industriel relève de procédés encore en cours d'expérimentation et donc il n'est pas possible d'évaluer les quantités qui y seront consacrées tout en sachant qu'elles seront importantes au vu du fonctionnement quasi continu des unités thermiques en question. En parallèle se développe un autre procédé qui est l'adjonction d'hydrogène au gaz naturel, filière dite « Power to gas » (Fiche 9.4.4). Le mélange obtenu, dénommé « hythane », renforce le pouvoir énergétique du gaz naturel tout en diminuant l'émission de dioxyde de carbone.

A noter que dans ce cas d'une utilisation de l'hydrogène en combustion directe il sera tout à fait approprié de recourir à l'électrolyse qui coproduit de l'oxygène directement exploitable pour de l'oxycombustion. On obtiendrait alors le processus cyclique :



qui en faisant appel à une énergie électrique décarbonée : éolienne, photovoltaïque, hydraulique ou nucléaire est écologiquement vertueux. C'est pour cela que sont de plus en plus nombreuses les perspectives actuelles de cet usage de l'hydrogène comme combustible industriel en cimenterie, verrerie, sidérurgie etc. et ce, particulièrement en oxycombustion, procédé qui en plus valorise l'oxygène coproduit lors de l'électrolyse de l'eau.

##### Moteurs thermiques

Pour ce qui concerne les moteurs thermiques c'est à dire les moteurs à combustion interne et à pistons (dits communément « à explosion ») le recours à l'hydrogène en remplacement des carburants habituels est parfaitement envisageable. Un moteur thermique à hydrogène ne change

rien au principe, seules quelques modifications deviennent indispensables (cf. Fiche 5.1.1). Ceci fut fait il y a quelques décennies. Un certain nombre de prototypes de tels moteurs thermiques à hydrogène ont été mis au point un peu partout dans le Monde. Peu à peu ils furent abandonnés devant le succès de la pile à combustible qui présentait les avantages du silence et de l'absence de rejets indésirables en particulier des oxydes d'azote. Toutefois, depuis quelques années, un renouveau d'intérêt pour ce type de moteurs thermiques se fait jour à la fois en Extrême Orient et en Europe. Ils seraient destinés à l'automobile, aux poids lourds, aux bateaux ou encore à des groupes électrogènes (cf. Fiche 5.1.1).

### Turbines aéronautiques

Un cas particulier de moteur thermique auquel l'hydrogène est adapté est la turbine à gaz utilisée en aéronautique : le turboréacteur (cf. Fiche 5.1.2). Il y a un demi-siècle que les premiers essais d'avions à hydrogène avaient été entrepris aux États-Unis et dans les années 1980, les travaux européens dans ce domaine se sont développés en particulier en Allemagne. Le projet le plus ambitieux fut celui du « Cryoplane » qui était l'adaptation à l'hydrogène d'un dérivé de l'« Airbus 300 ». Les avantages de cet aéronef étaient encore insuffisants pour que soit envisagé un stade plus avancé de sa mise en service définitive et ce d'autant que les traînées importantes de vapeur d'eau générées n'étaient pas sans poser problèmes. Néanmoins, en 2020, a été annoncé par ce même constructeur Airbus la mise au point dans la décennie à venir d'aéronefs à turbines aéronautiques à hydrogène. Le premier de ces deux modèles, le *Turbofan*, sera un turboréacteur de configuration classique sensiblement équivalent au A220 ou au A320. Le second, plus futuriste, est un modèle en delta, le *Blended-Wing Body* (BWB), dont l'apparence visuelle pourra être amenée à changer au vu des contraintes de stockage de l'hydrogène.

### Moteurs fusées

L'utilisation de l'hydrogène dans le domaine spatial est probablement l'application la plus connue en particulier par les moteurs de la fusée Ariane. Dans de tels moteurs-fusées la poussée est produite par l'éjection d'un flux de gaz animé d'une très grande vitesse (cf. Fiche 5.1.2). Ce flux résulte de l'hydrogène et de l'oxygène injectés de façon continue dans une chambre où leur combustion produit des gaz à très haute température et à forte pression (30 à 200 bar). Des gaz s'échappant ensuite à travers une tuyère de détente qui les accélère. Hydrogène et oxygène sont stockés à bord à l'état liquide.

### Combustion électrolytique : la pile à combustible

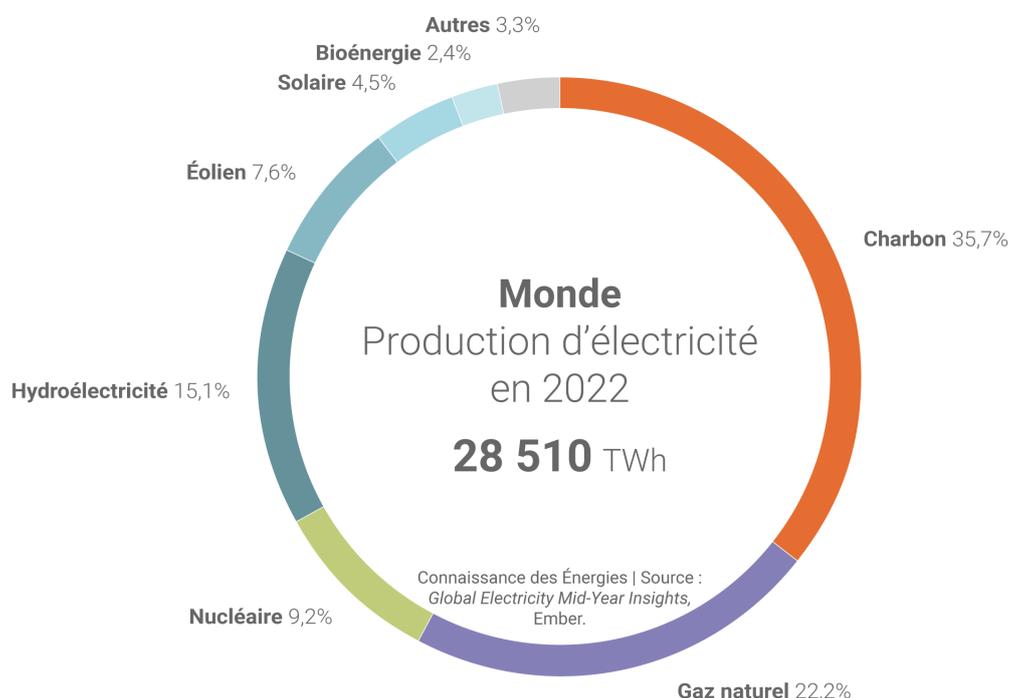
La pile à combustible est le dispositif emblématique de la valorisation de l'hydrogène énergie (cf. Fiches 5.5.1 à 5.2.6). Le large spectre de ses applications couvre l'essentiel de la mobilité électrique. Sur route elle est adaptée de la bicyclette aux poids lourds tout autant qu'à l'automobile et aux véhicules utilitaires et de service. Mais aussi on la retrouve pour la mobilité sur rails, sur l'eau et bientôt en l'air (cf. Fiches chapitres 8 et 9).

Selon le rapport de l'Agence internationale de l'énergie (AIE) le nombre de véhicules électriques à pile à combustible en circulation à travers le monde totaliserait aujourd'hui plus de 72.000 véhicules. Pour 2030 les prévisions tant californiennes que chinoises prévoient pour leur part chacune un million de ces véhicules à pile à combustible, ce qui à l'échelle mondiale laisse prévoir qu'il pourra en avoir plusieurs millions. Pour cette même échéance la prévision de France Hydrogène est de 300 000

véhicules légers (VUL et taxis), 5 000 poids lourds (bus, autocars et camions), 65 bateaux et navires, et 100 trains<sup>4</sup>.

#### 4. Hydrogène et électricité renouvelable

Pour une production décarbonée par électrolyse de l'eau, des 120 millions de tonnes annuelles d'hydrogène que réclame la chimie industrielle mondiale il faudrait 6 600 TWh d'électricité renouvelable, une quantité qui dépasse le potentiel mondial actuel de ce type d'électricité comme le montre le schéma de la Fig. 1 résumant les différents types de production d'électricité.



**Figure 1.** Répartition de la production mondiale d'électricité

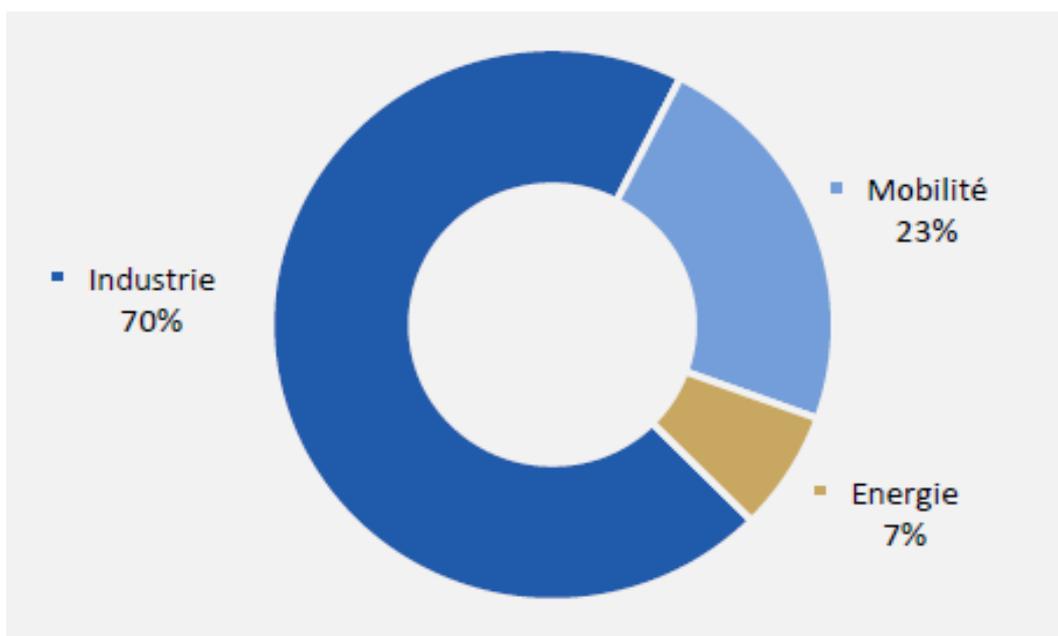
[connaissancedesenergies.org](https://connaissancedesenergies.org)

Ainsi il faudrait presque doubler la production actuelle d'éolien et de solaire qui était de 3 450 TWh en 2022, ou augmenter de 50% la production hydroélectrique de 4 305 TWh en 2022.

Quant à la demande qu'imposeront les plusieurs millions de véhicules prévus en 2030, ce sont annuellement des millions de tonnes supplémentaires d'hydrogène qu'il faudra produire c'est-à-dire quelques centaines voire un millier de TWh d'électricité renouvelable supplémentaire à ajouter à ce que réclame l'industrie.

Pour ce qui est de la France, sur la base des plans gouvernementaux de soutien, les objectifs d'utilisation de l'hydrogène décarboné en 2030 ont été établis par France Hydrogène. La consommation à prévoir est de 680 000 t suivant la répartition que schématise le graphique de la Figure 2.

<sup>4</sup> [La mobilité – France Hydrogène - France Hydrogène \(france-hydrogene.org\)](https://france-hydrogene.org)



Traitement Xerfi/Source France Hydrogène

**Figure 2.** Hydrogène décarbonée en France en 2030

Atteindre cet objectif demande d'installer 6,5 GW d'électrolyse alimentée par de l'électricité renouvelable. Il en faudra une quantité de 37,5 TWh, valeur équivalente à la production actuelle d'électricité d'origine éolienne qui est de 38,1 TWh (donnée RTE 2022), ou encore deux fois celle de l'électricité solaire, 18,6 TWh (donnée RTE 2022) ou encore 75% de l'hydroélectricité, 49,6 TWh (RTE 2022). Des chiffres qui montrent combien cet engagement hydrogène 2030 demande soit qu'il y soit consacré une grande part de l'électricité renouvelable ou que la capacité de production de celle-ci soit très notablement augmentée. S'y ajoute que pour atteindre cet objectif doit émerger une importante filière d'électrolyse. En cela trois entreprises s'engagent.

- McPhy, une entreprise spécialiste d'équipements de production et distribution d'hydrogène lance un programme de développement industriel d'électrolyseurs alcalins de nouvelle génération et de grande capacité, avec une gigafactory installée à Belfort.
- Elogen conçoit et produit des électrolyseurs PEM (à membrane échangeuse de protons). En particulier cette entreprise s'attache à développer des unités de forte puissance pour l'industrie de demain. Projets qui seront mis en oeuvre dans la future gigafactory en cours d'installation à Vendôme.
- Genvia dans une usine implantée à Béziers se propose de construire des électrolyseurs haute température (opérant sur la vapeur d'eau par un électrolyte solide en oxyde céramique) ayant une performance permettant d'atteindre un rendement énergétique voisin de 80%. Des unités de production d'hydrogène qui se verront de préférence installées dans le voisinage d'industries génératrices de chaleur facilitant la production de vapeur d'eau.

Ces électrolyseurs seront à même d'équiper les importants projets d'implantations de grosses unités de production d'hydrogène renouvelable - de 100 MW et plus – en divers points l'hexagone comme ce que projette « H2V »<sup>5</sup> dans les prochaines années à Dunkerque, à Fos, à Thionville, à Valenciennes ainsi qu'à Saint-Clair-sur-Rhône et Port-Jérôme.

<sup>5</sup> Entreprise filiale du groupe SAMFI-INVEST développe et construit des gigafactories de production d'hydrogène renouvelable qu'elle dénomme hydrogène vert.

## 5. Conclusion

Force est d'admettre que la réussite de la transition écologique ne se fera pas sans l'hydrogène - il faut dire sans l'hydrogène renouvelable – mais pour cela deux impératifs sont à respecter :

- Construire et implanter des électrolyseurs de toutes capacités. A l'échelle mondiale cela veut dire une capacité de puissance de l'ordre du TW et pour la France de 5 à 10 GW ;
- Disposer d'importantes ressources en électricité produite sans émission de carbone, à savoir dans le Monde une quantité annuelle avoisinant les 8 000 TWh et en France près de 40 TWh. Ce qui revient à dire qu'il faudra dédier à la production d'hydrogène la plus grande part de cette électricité actuellement produite ou alors en doubler la capacité.

En d'autres termes s'imposent à la fois des choix politiques très déterminés et l'engagement de très conséquents investissements financiers tant publics que privés.

---