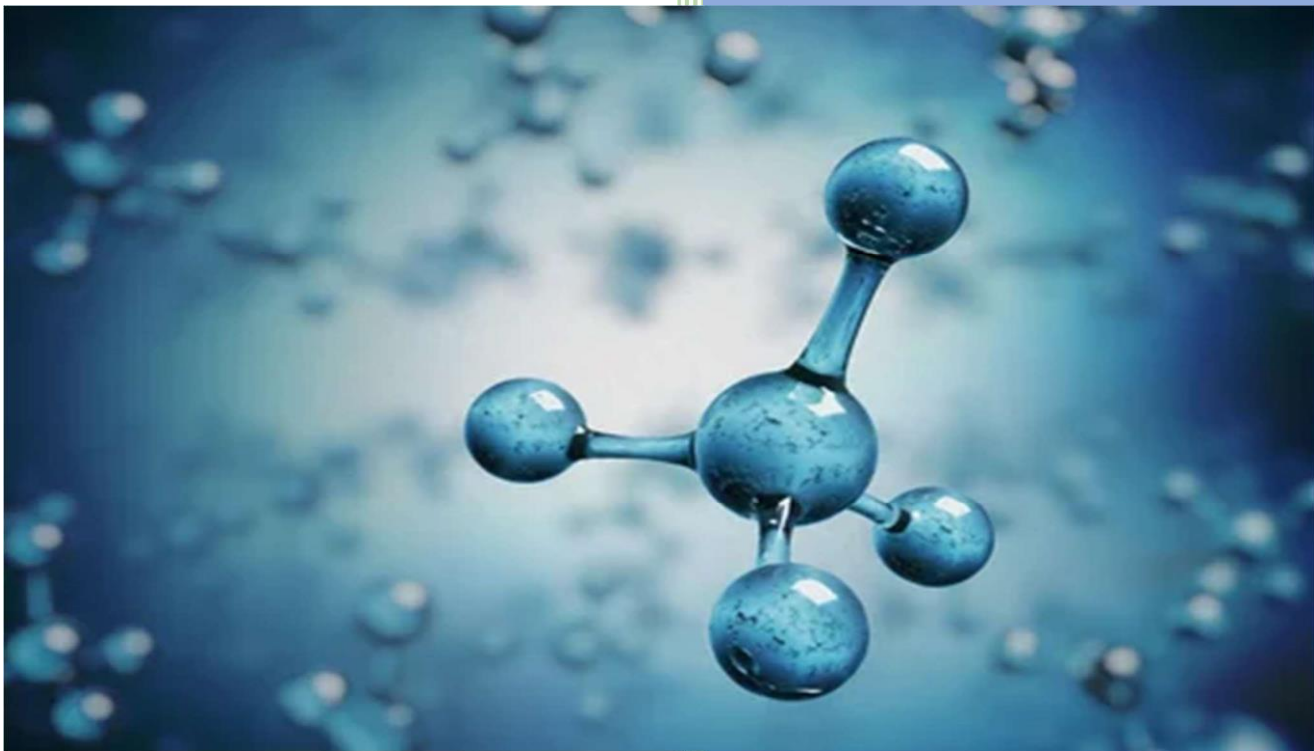




Les enjeux de guerre économique de l'hydrogène



GUICHARD Sébastien
FLORO Kévin
FELICIANO David
KRA Koffi Anicet Nicaise
SALIU Sahindou

Introduction

En tant qu'élément de la politique énergétique, l'idée d'atteindre l'indépendance et l'autosuffisance énergétique fait partie des objectifs de tous les États. Lesdits objectifs ont été défendus en termes de sécurité énergétique en vue, d'une part, de réduire la dépendance à l'égard des pays fournisseurs, dont bon nombre d'entre eux poursuivent des programmes politiques ou militaires agressifs, et d'autre part, dans le cadre d'un engagement visant à atténuer le changement, ainsi que le changement climatique pouvant en résulter¹.

Nous observons actuellement la volonté des États d'agir en toute autonomie, de manière individuelle ou collective, afin de définir différentes politiques énergétiques et de produire de l'énergie au niveau local, en se basant sur le concept de la justice énergétique². Dans la situation économique mondiale qui est de plus en plus fragilisée en raison de nombreux désaccords entre les États, à l'instar du conflit opposant la Russie à l'Ukraine, chaque nation est à la recherche de leviers qui peuvent accélérer leur domination économique sur les autres pays. Pour ce faire, de nombreux pays se sont centrés, au cours de ces dernières années, sur la souveraineté énergétique. En effet, cette dernière figure parmi les leviers les plus brigués. Avec les énergies fossiles à l'exemple du gaz, du charbon, ou encore le pétrole ; et maintenant avec les progrès scientifiques et technologiques, la concurrence en matière d'énergie s'est peu à peu tournée vers les énergies renouvelables à l'instar de l'éolien, le solaire, de l'hydraulique, et il y a peu, de l'hydrogène. Ce dernier offre un intérêt énergétique important, son principal avantage se trouve dans son bilan environnemental.

Le plan stratégique européen pour les technologies énergétiques a été alors créé en 2007 pour accélérer l'introduction sur le marché ainsi que l'adoption d'un système énergétique à faible impact écologique pouvant ainsi permettre de développer des technologies ayant un faible impact carbonique. Il importe de souligner que les principales préoccupations du secteur de l'énergie sont liées non seulement à l'efficacité, à la dépendance et à la sécurité énergétique, mais aussi au prix de l'énergie utilisée. Sans nul doute, la prise de conscience en ce qui concerne les conséquences que peut avoir le réchauffement climatique a amené à un débat mondial se centrant sur la manière de maîtriser les émissions de gaz à effet de serre, sur les stratégies à mettre en place et les actions devant être réalisées en vue de les réduire. Cette situation a amené les acteurs concernés à changer leur mode de production et leur consommation en énergie, en mettant en œuvre divers plans de transition.

¹ Goldthau, A., Sovacool, B.K. 2012. The uniqueness of the energy security, justice, and governance problem. Energy Policy.

² Jenkins, K. 2019. Energy justice, energy democracy, and sustainability : Normative approaches to the consumer ownership of renewables. In J. Lowitzsch (Ed.), Energy transition : Financing consumer co-ownership in renewables.

Table des matières

Introduction.....	2
Liste des abréviations.....	6
1. Le Secteur de l'hydrogène, industries et technologies	8
1.1. Généralités sur l'hydrogène	8
1.2. Histoire de l'hydrogène	9
1.3. Les énergies renouvelables, point de situation	10
1.4. Les différentes couleurs de l'hydrogène	11
1.5. La chaîne d'approvisionnement des technologies hydrogène	13
1.6. La filière de l'hydrogène vert	15
1.6.1. Production d'électricité renouvelable	17
1.6.2 Production d'eau pure	18
1.6.3 Electrolyse de l'eau	19
1.6.4 Compression de l'hydrogène.....	22
1.6.5 Stockage de l'hydrogène	23
1.7 Les différentes formes de l'hydrogène.....	24
1.8 Le stockage à basse pression.....	25
1.9 Le stockage à haute pression.....	25
1.10 Electrolyse à haute température.....	27
1.11. Le transport de l'hydrogène.....	28
2 L'Europe en ordre de bataille, plans de gouvernance étatiques.....	30
2.1 Etat des lieux de la France	30
2.2. Plan de transition énergétique.....	31
2.2.1. Développer les compétences	35
2.3. Projet de loi climat.....	36
2.4 Plan de déploiement de la filière hydrogène.....	36
2.5 Cartographie des ressources françaises	38
2.6 Les acteurs français de l'hydrogène	39
2.6.1 Pouvoirs publics et institutions	39
2.6.2 Les centres de recherche et développement.....	39
2.6.3 Ressources naturelles et énergétiques	40
2.6.4 Entreprises et consortiums industriels	40

2.6.5 Quelques projets en cours de déploiement	40
2.6.5.1 Dans le transport	40
2.6.5.2 Dans l'industrie	41
2.6.5.3 Les strats-ups et PME innovantes	41
2.6.5.4 Les réseaux et associations professionnelles	41
2.6.5.5 Le secteur du transport pour une mobilité saine	41
3 La stratégie énergétique allemande	43
3.1. Un partenaire conscient de ses intérêts économiques	43
3.2 Une organisation bien fondée	44
3.3 Une stratégie de domination économique	45
3.4. Stratégie de développement Hydrogène	46
3.5. Programme de recherche allemand dans le domaine énergétique	47
3.6. Promotion de recherche – Piles à combustible et technologies de l'hydrogène	47
4. Les partenaires stratégiques de l'Allemagne	49
4.1. La Nouvelle-Zélande	49
4.2. L'Australie	49
4.3. Le Canada	49
5. L'Afrique, un partenaire stratégique déjà convoité	50
5.1. L'hydrogène, un potentiel de développement économique	50
5.2. Des menaces concurrentielles émergentes	51
5.2.1. L'Égypte	51
5.2.2. Le Kenya	51
5.2.3. La Namibie	51
5.2.4. L'Afrique du Sud	52
5.2.5. La Tunisie	52
5.3. Les industries allemandes en première ligne	53
6. Autres projets dans le monde	53
6.1. Le Japon	53
6.2. La Corée du Sud	54
6.3. La Chine	55
6.4. Les Etats Unis d'Amérique	56
6.5. Le Canada	57
6.6. L'Australie	58

6.7. La Russie.....	58
6.8. Le Danemark.....	59
6.9. L'Allemagne aussi associée au projet H2Med	59
6.10. La « Banque européenne de l'hydrogène ».....	59
7. Quelle vision pour la France.....	61
7.1. Isolement de la France	61
7.2. Le pont africain s'écroule.....	62
7.3. La dépendance économique	63
8. Stratégie de souveraineté énergétique.....	63
8.1. Des partenariats africains consolidés	64
8.2. Un littoral français correctement exploité.....	65
8.3. La sûreté globale des industries de l'hydrogène	66
9. Prospective horizon 2030, France-Allemagne.....	67
9.1. Prospective, définition et méthode	67
9.2. La prospective énergétique	68
9.3. Scénario 1 : Domination de la coalition des pays de l'Europe du Nord	68
9.4. Scénario 2 : La France en tête des pays européens de la méditerranée.....	70
Conclusion générale	72
Glossaire.....	73
Bibliographie	76

Liste des abréviations

AEL	Electrolyse Alcaline
AIE	Agence Internationale de l'Energie
ARH	Autorité de Régulation des Hydrocarbures
CEI	Commission Electrotechnique Internationale
CEREFÉ	Commissariat aux Energies Renouvelables et à l'Efficacité Energétique
CO2	Dioxyde de carbone
CREG	Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz
EnR	Energie Renouvelable
FCEVs	Véhicules Electriques à Piles à Combustible
GHG	Gaz à Effet de Serre (GES)
GNC	Gaz Naturel Comprimé
GNL	Gaz Naturel Liquéfié
GNH	Gaz Naturel en Hydrogène
IEA	International Energy Agency
PtX	Power-to-X
AFC	Pile à combustible Alcaline
PV	Photovoltaïque
R&D	Recherche et Développement
SER	Source d'énergie renouvelable
SIG	Système d'Information Géographique
TAG	Turbine à Gaz
TAV	Turbine à Vapeur
TGCC	Turbine à gaz à cycle combiné

VEPC	Véhicules Electriques à Piles à Combustible
Tpd	Tonnes par jour
Tpa	Tonnes par an
TWh	Terawattheure
USD	Dollar américain
M3	Mètre cube
Mtpa	Mégaton par an
MVA	Megavolt Ampère
MW	Megawatt
Km	Kilometre
Ktpa	kiloton par an
kV	Kilovolt
Gm3	Milliard mètre cube
GW	Gigawatt
EUR	Euro

1. Le Secteur de l'hydrogène, industries et technologies

1.1. Généralités sur l'hydrogène

Appelé d'après les mots grecs hydro qui signifie « eau » et gènes voulant dire « formation », l'hydrogène représente plus de 90 % des atomes, ce qui équivaut aux trois quarts de la masse de l'univers.

Il est essentiel à la vie, et est présent dans presque toutes les molécules des êtres vivants. L'élément se produit aussi dans les étoiles et alimente l'univers à travers la réaction proton-proton et le cycle carbone-azote. Selon les experts, les processus de fusion de l'hydrogène stellaire libèrent d'énormes quantités d'énergie lorsqu'ils combinent des atomes d'hydrogène pour former de l'hélium.

L'hydrogène gazeux pur est un élément rare dans l'atmosphère terrestre et tout hydrogène qui pénètre réellement dans l'atmosphère échappe rapidement à la gravité terrestre. Sur la planète terre, l'hydrogène se produit en combinaison avec l'oxygène et l'eau, ainsi que dans la matière organique comme les plantes vivantes, le pétrole et le charbon.

Robert Boyle a produit de l'hydrogène gazeux en 1671 alors qu'il expérimentait du fer et des acides ; toutefois, ce n'est qu'en 1766 qu'Henry Cavendish l'a reconnu comme un élément distinct. L'élément a été nommé hydrogène par le chimiste français Antoine Lavoisier.

L'hydrogène a trois isotopes communs :

- le protium, qui n'est que de l'hydrogène ordinaire ;
- le deutérium, un isotope stable découvert en 1932 par Harold C. Urey ; -
le tritium, un isotope instable découvert en 1934.

La différence entre les trois isotopes se trouve dans le nombre de neutrons que possède chacun d'eux. L'hydrogène n'a pas de neutrons ; le deutérium en a un, tandis que le tritium a deux neutrons. Le deutérium et le tritium sont utilisés comme combustibles dans les réacteurs à fusion nucléaire.

L'hydrogène se combine avec d'autres éléments, formant un certain nombre de composés, y compris les plus courants tels que :

- L'eau (H_2O).
- L'ammoniac (NH_3).
- Le méthane (CH_4).
- Le sucre de table ($C_{12}H_{22}O_{11}$).
- Le peroxyde d'hydrogène (H_2O_2).
- L'acide chlorhydrique (HCl).

L'hydrogène est produit en chauffant du gaz naturel avec de la vapeur pour former un mélange d'hydrogène et de monoxyde de carbone appelé gaz de synthèse, qui est par la suite séparé pour produire de l'hydrogène.

L'hydrogène est utilisé pour fabriquer de l'ammoniac pour les engrais, dans un processus appelé le processus Haber, dans lequel il réagit avec de l'azote. L'élément est également ajouté aux graisses et aux huiles, comme l'huile d'arachide, à travers un processus appelé hydrogénation. D'autres exemples d'utilisation de l'hydrogène comprennent :

- Le carburant de fusée ;
- Le soudage ;

- La production d'acide chlorhydrique ;
- La réduction de minerais métalliques ;
- Le remplissage de ballons.

Les chercheurs ont travaillé sur le développement de la technologie des piles à combustible à hydrogène, qui permet d'obtenir des quantités importantes d'énergie électrique, en utilisant de l'hydrogène gazeux comme source d'énergie non polluante qui peut être utilisée comme carburant pour les voitures et pour bon nombre de véhicules.

L'hydrogène est également utilisé dans l'industrie du verre comme atmosphère protectrice pour la fabrication de feuilles de verre plates ; alors que dans l'industrie électronique, il est utilisé comme gaz de rinçage dans le processus de fabrication des puces de silicium.

Depuis de nombreuses années, les chercheurs étudient l'hydrogène avec grand intérêt, en raison de son potentiel en tant que carburant non polluant. Cet élément est un vecteur énergétique sans carbone, donc lorsqu'on le brûle, on ne produit que de l'eau, ce qui en fait un carburant propre, sans aucune émission.

Néanmoins, l'un des grands problèmes de l'hydrogène carburant est que ce dernier est plus cher que le gaz. Un autre problème avec le carburant hydrogène réside dans le fait que le processus de production d'hydrogène lui-même n'est pas sans pollution. Il est vrai qu'une part importante de l'hydrogène produit provient du gaz naturel, un processus générant du dioxyde de carbone (CO₂).

Les chercheurs ont donc cherché bon nombre moyens alternatifs et plus respectueux de l'environnement de produire de l'hydrogène pouvant idéalement éliminer les émissions de CO₂ du processus.

1.2. Histoire de l'hydrogène

En 1671, le scientifique britannique Robert Boyle découvrit l'hydrogène lors de ses expériences où il plongeait différents métaux dans de l'acide. Lorsqu'un métal pur est immergé dans de l'acide, cela provoque un phénomène connu sous le nom de réaction de déplacement simple. Par exemple, si l'on introduit du potassium (K) dans une solution d'acide chlorhydrique (HCl), la réaction suivante se produit :



Le potassium solide, qui est un métal, réagit avec l'acide pour former un sel appelé chlorure de potassium. Les atomes d'hydrogène restants se combinent alors pour former de l'hydrogène gazeux.

Dans un article publié en 1776, un autre scientifique britannique du nom de Henry Cavendish a confirmé que l'hydrogène était un élément distinct. Comme Boyle avant lui, il a observé que cet élément était hautement inflammable. Plus précisément, il réagit rapidement et violemment avec l'oxygène dans une réaction de combustion, produisant de l'eau et dégageant de la chaleur :



Lors de cette réaction, les molécules d'hydrogène et d'oxygène se combinent pour former de l'eau (H₂O). Cette réaction est considérée comme exothermique, ce qui signifie qu'elle génère de l'énergie thermique (sous forme de chaleur ou de feu). Des chercheurs ultérieurs ont découvert que c'est l'hydrogène qui alimente les réactions de fusion nucléaire au cœur de toutes les étoiles. Ces réactions sont responsables de la production de lumière et de chaleur émises par les étoiles, y compris notre Soleil.

Boyle et Cavendish ont observé que l'hydrogène était inflammable et moins dense (plus léger) que l'air. Cela en faisait un choix idéal pour faire flotter des objets tels que des ballons de baudruche. À cet égard, il présentait des similarités avec l'hélium, le deuxième élément le plus abondant et le plus simple. En réalité, l'hydrogène était même plus efficace que l'hélium pour soulever des objets. Il était donc naturel de commencer à envisager des ballons remplis d'hydrogène à des fins de transport. Dès le début des années 1900, de grands dirigeables étaient déjà utilisés pour se déplacer d'un endroit à un autre.

L'engouement pour les dirigeables utilisant de l'hydrogène fut de courte durée. En 1937, une tragédie s'est produite aux États-Unis lorsque le dirigeable allemand Hindenburg a pris feu et explosé à Lakehurst, dans le New Jersey, causant la mort de 36 personnes.

Les concepteurs de dirigeables étaient conscients que l'hydrogène était inflammable et que l'hélium aurait été une option plus sûre. L'hélium était rare et coûteux. Ils ont donc choisi une solution plus économique, mais également plus risquée. Après la catastrophe du Hindenburg, l'utilisation de l'hydrogène comme gaz de sustentation a rapidement été abandonnée. C'est également à cette époque que les avions ont gagné en popularité.

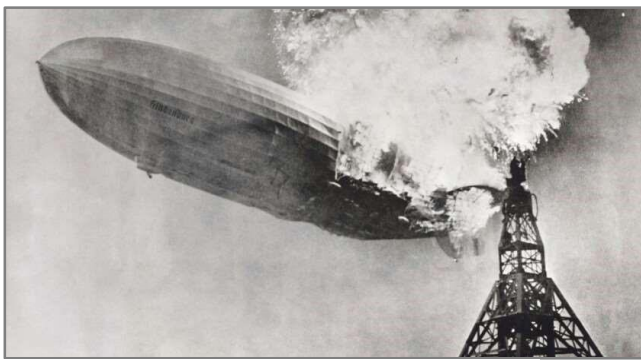


Figure 1 Le crash du Hindenburg, 6 mai 1937
Source : www.20minutes.fr

1.3. Les énergies renouvelables, point de situation

Les énergies renouvelables gagnent en popularité et en compétitivité sur le marché de l'énergie. Selon le rapport *Renewables 2021* de l'Agence internationale de l'énergie, la capacité mondiale d'énergie renouvelable installée a augmenté de 45% entre 2010 et 2020, passant de 1240 GW à 2799 GW.

Les énergies renouvelables, telles que le solaire et l'éolien, ont également connu une baisse significative de leurs coûts au cours de la dernière décennie, les rendant plus compétitives par rapport aux énergies fossiles. Selon le rapport de l'Agence internationale de l'énergie, les coûts de l'énergie solaire et éolienne ont diminué de plus de 80% depuis 2010.

Le déploiement des énergies renouvelables est soutenu par les politiques gouvernementales et les investissements des entreprises. De nombreux pays ont mis en place des politiques d'incitation, telles que des subventions, des tarifs de rachat et des objectifs de production d'énergie renouvelable, ainsi que des taxes sur les émissions de gaz à effet de serre, pour encourager leur adoption. Ces mesures rendent les énergies renouvelables plus compétitives et moins polluantes par rapport aux énergies fossiles.

L'approvisionnement en panneaux solaires pose un problème en raison du manque de disponibilité des matières premières nécessaires à leur fabrication. Les panneaux

photovoltaïques sont composés de silicium, extrait de la silice présente dans les roches et les sables, et leur production et extraction génèrent de la pollution atmosphérique, ce qui entraîne également des coûts.

Une alternative pour obtenir un rendement énergétique plus élevé que les énergies renouvelables, pourrait être l'hydrogène. La production d'hydrogène, généralement réalisée par extraction chimique de combustibles fossiles tels que le méthane, le charbon et les coupes pétrolières, présente un coût compétitif mais entraîne des émissions de CO₂ non biogéniques qui dépassent généralement dix kilogrammes de CO₂ par kilogramme d'hydrogène produit.

L'électrolyse de l'eau permet de produire de l'hydrogène à faible empreinte carbone (liée uniquement aux émissions de CO₂ dues à la production d'électricité), mais avec un rendement plus faible. D'autres méthodes de production d'hydrogène, telles que la réduction chimique ou la thermolyse, sont moins propices à une production industrielle et restent encore expérimentales.

Le dihydrogène est un vecteur énergétique important dans de nombreuses bactéries, où il est produit comme sous-produit de la fermentation et de la fixation de l'azote. La découverte et le développement de méthodes moins coûteuses de production d'hydrogène à grande échelle pourraient accélérer la mise en place d'une "économie de l'hydrogène".

1.4. Les différentes couleurs de l'hydrogène

Il existe différentes couleurs, de l'hydrogène du vert à l'hydrogène rose. L'hydrogène est l'élément le plus abondant dans le monde, étant présent dans 75% de la matière. Il est stockable, léger, et il ne génère pas aucune pollution par lui-même.

Cela en fait un candidat idéal pour devenir une source de carburant. Néanmoins, l'hydrogène ne commence pas comme une source d'énergie, mais comme un vecteur d'énergie. Cela veut dire qu'un processus chimique est nécessaire pour l'extraire et le transformer en carburant. Il existe différentes manières de mener à bien le processus en question, mais malheureusement, celles-ci ne sont pas durables.

C'est là qu'intervient donc le classement des couleurs de l'hydrogène. Il est vrai que c'est un gaz incolore, mais chaque couleur correspond à un processus d'extraction différent. Les trois types d'hydrogène les plus courants sont l'hydrogène gris, bleu et vert.

Couleurs de l'hydrogène			
 H ₂	PROCÉDÉ	MATIÈRE PREMIÈRE	ÉNERGIE
HYDROGÈNE NOIR	Gazéification	Charbon + eau	Combustibles fossiles
HYDROGÈNE BRUN		Charbon brun (lignite) + eau	
HYDROGÈNE GRIS		Méthane + eau	
HYDROGÈNE BLEU	Vaporeformage + captage du CO ₂	Méthane + eau	
HYDROGÈNE JAUNE	Électrolyse	Eau	Électricité nucléaire
HYDROGÈNE VERT			Électricité renouvelable
HYDROGÈNE TURQUOISE	Pyrolyse	Méthane ou biométhane	Électricité (toutes origines)

Figure 2 : Les couleurs de l'hydrogène
Source : Choisir.com

- *L'hydrogène brun*
Il s'agit d'un hydrogène obtenu par gazéification du lignite, une roche sédimentaire intermédiaire entre la tourbe et la houille. Le lignite est un charbon composé de 65 à 75 % de carbone.
- *L'hydrogène vert*
Il ne produit aucune émission durant son cycle de vie puisqu'il utilise des énergies renouvelables dans le processus de production, ce qui en fait une véritable source d'énergie propre.

L'hydrogène vert est fabriqué en électrolysant de l'eau à l'aide d'électricité propre créée à partir d'un surplus d'énergie renouvelable qui provient de l'énergie éolienne et solaire. Le processus engendre une réaction qui divise l'eau en ses composants d'hydrogène et d'oxygène (H et O dans H₂O).

Il en résulte, de ce fait, qu'aucune émission de carbone n'est libérée dans le processus. L'hydrogène vert est une excellente alternative au gris et au bleu ; cependant, pour le moment, le principal défi consiste à réduire les coûts de production de l'hydrogène vert pour en faire une alternative véritablement renouvelable et respectueuse de l'environnement.

Au-delà des trois plus grands types d'hydrogène, il existe une gamme d'autres options de couleur :

- *L'hydrogène bleu*
Il est aussi extrait par le procédé de reformage à la vapeur ; néanmoins, il diffère de l'hydrogène gris puisque les émissions de carbone libérées sont non seulement capturées, mais également stockées, réduisant ainsi les émissions dans l'atmosphère, mais ne les élimine pas.

L'hydrogène bleu est parfois appelé « hydrogène à faible teneur en carbone », parce que le processus de production n'évite pas la création de gaz à effet de serre, il les stocke simplement.

- *L'hydrogène gris*
C'est la forme la plus « sale » de production de l'hydrogène. On utilise ce terme quand il est produit à partir de pétrole ou de gaz naturel par vaporeformage. La tendance est de réduire les émissions de CO₂ par captage, afin de faire passer cet hydrogène du gris au bleu.
- *L'hydrogène noir*
Il s'agit d'un hydrogène obtenu par gazéification du charbon. De toutes les méthodes employées pour produire de l'hydrogène, celle-ci est de loin la plus polluante. Pointée du doigt par les écologistes, elle tend peu à peu à être remplacé par des approches plus respectueuses de l'environnement.
- *L'hydrogène jaune ou rose*
Il est produit par électrolyse de l'eau à partir d'électricité d'origine nucléaire. Ce type d'hydrogène est une des moins polluante mais fait débat, quant aux souhaits de certains pays européens à vouloir pousser leurs voisins vers la sortie du nucléaire.
- *L'hydrogène rouge*
Il est extrait par électrolyse alimentée par l'énergie nucléaire. L'hydrogène rose est également appelé hydrogène violet ou rouge.

- L'hydrogène blanc

L'hydrogène blanc se trouve naturellement dans les dépôts souterrains d'hydrogène géologique. Il est extrait par un processus appelé fracturation, consistant à forer dans la terre et à diriger un mélange à haute pression d'eau, de sable et de produits chimiques vers la roche pour libérer le gaz à l'intérieur. Actuellement, il n'est pas prévu d'utiliser ce type d'hydrogène comme source d'énergie.

Ainsi, face à ces nombreuses formes de l'hydrogène, les pays européens prennent conscience du besoin d'un accord concernant une terminologie uniforme pour distinguer nettement : l'hydrogène renouvelable, l'hydrogène à faible teneur en carbone, ainsi que l'hydrogène d'origine fossile.

1.5. La chaîne d'approvisionnement des technologies hydrogène

La demande pour les technologies de l'hydrogène ne cesse d'augmenter compte tenu de leur potentiel, en vue d'accélérer la transition vers des formes d'énergie plus durables, en soutenant les modèles énergétiques actuels avec leurs variations régionales. L'hydrogène est une source de carburant à zéro émission pour bon nombre de moyens de transports, à l'instar des voitures, des bus ou encore des trains¹.

Il peut être utilisé comme gaz de base pour des industries telles que la chimie, le raffinage et l'acier. D'ailleurs, il s'agit d'une source de chaleur et d'électricité pour les bâtiments, et peut stocker l'énergie produite à partir de sources renouvelables.

L'hydrogène procure des avantages incontestables. Auparavant, il soutenait une transition progressive vers des sources d'énergie à faible émission de carbone, puisque l'hydrogène peut être produit à partir de gaz naturel et d'autres sous-produits non renouvelables.

En outre, il peut être utilisé comme vecteur énergétique ; en d'autres termes, un moyen de stocker de l'énergie qui proviennent de sources renouvelables et autres. À l'avenir, il peut être généré à grande échelle avec une empreinte carbone nulle, en utilisant des énergies renouvelables telles que l'énergie solaire ou éolienne pour séparer l'eau. La chaîne de valeur de l'hydrogène est comme suit :

- Production :

L'hydrogène (H₂) est produit à partir d'une gamme de matières premières et de ressources naturelles. En utilisant des procédés comme le reformage à la vapeur, les entreprises génèrent du H₂ à partir de gaz naturel, de GPL ou de naphta (hydrogène gris).

Bon nombre d'entreprises sont de nos jours en mesure de proposer ce que l'on appelle l'hydrogène bleu, grâce à leurs technologies de captage et de stockage du carbone. En outre, leurs technologies permettent de générer du H₂ à partir de sources d'énergie renouvelables (hydrogène vert).

De nombreuses d'entreprises alignent toujours les matières premières, la capacité de production, les niveaux de pureté et de disponibilité avec les besoins concrets de leurs clients.

¹ MacGrégor, C. 2021. Les chemins vers une transition énergétique résiliente et compétitive. Hors les murs.

■ **Traitement :**

Selon l'application visée, l'hydrogène que les entreprises produisent requiert un traitement supplémentaire. Les étapes typiques comprennent :

- L'élimination des impuretés ;
- La séparation du dioxyde de carbone (CO₂) ;
- La compression et/ou la liquéfaction cryogénique.

Avec un large portefeuille de technologies de processus et d'ingénierie qui sont disponibles actuellement, les entreprises trouvent toujours la solution optimale pour les besoins de la clientèle.

■ **Distribution et stockage :**

Après que l'hydrogène a été traité, celui-ci doit être transporté jusqu'au point d'utilisation. Les entreprises disposent actuellement de l'équipement ainsi que des technologies indispensables, afin de transporter efficacement l'hydrogène gazeux et liquide jusqu'à sa destination ou pour le stocker jusqu'à ce qu'elles en aient besoin.

Ainsi, disposant des technologies adaptées, de nombreuses entreprises travaillent en étroite collaboration avec leurs clients, afin de trouver la solution idéale pour chaque défi de stockage et de distribution.

■ **Applications :**

L'hydrogène est essentiel dans un large éventail de procédés industriels. Sur la base de leurs expertises de bout en bout, les entreprises proposent un riche portefeuille de technologies d'application pour ce gaz léger, en veillant à ce qu'il soit utilisé au mieux dans des industries aussi diverses que la chimie, le raffinage, la métallurgie et le verre.

Le reformage à la vapeur produit initialement du gaz de synthèse, c'est-à-dire un mélange d'hydrogène, de monoxyde de carbone et de dioxyde de carbone. Certaines entreprises proposent des procédés cryogéniques afin de séparer les deux gaz en question après élimination du CO₂.

Les installations d'adsorption modulée en pression sont employées pour obtenir du H₂ à partir de gaz de synthèse riches en hydrogène ou de gaz de raffinerie et de pétrochimie. Les entreprises développent aussi un procédé hybride alternatif où elles combinent les technologies d'adsorption à membrane et à pression modulée (PSA) pour de nouveaux niveaux de flexibilité et d'efficacité dans la production de H₂.

Le système PSA peut également être utilisé en vue d'éliminer ou encore de récupérer le dioxyde de carbone des flux de gaz de procédé dans les usines de gaz de synthèse. Il importe de souligner que le CO₂ peut également être récupéré à partir des fumées des usines d'hydrogène par Post Combustion Capture (PCC).

A noter que le lavage RECTISOL est un procédé physique de gaz acide qui est généralement utilisé en vue d'éliminer séparément le soufre et le CO₂ du gaz de synthèse à des températures inférieures à zéro. L'utilisation d'échangeurs de chaleur bobinés à faible énergie en fait une méthode de purification de gaz particulièrement économique.

Si nécessaire, le CO₂ capturé peut être utilisé pour la récupération assistée du pétrole (EOR), ou introduit dans une usine de purification ou de liquéfaction, dans le but de permettre d'autres cas d'utilisation. Les entreprises proposent aussi des installations de synthèse pour la

production d'ammoniac ou de méthanol convertissant l'hydrogène et l'azote produits, respectivement en flux de gaz de synthèse.

Les produits en question peuvent être appelés ammoniac vert ou méthanol vert, dans la mesure où l'hydrogène vert est utilisé comme matière première. Les usines cryogéniques sont utilisées afin de liquéfier l'hydrogène pour qu'il puisse être transporté et stocké efficacement². Elles refroidissent le gaz volatil jusqu'à moins 253 degrés Celsius afin de créer de l'hydrogène liquéfié. Le processus en question augmente la densité du gaz.

Afin de transporter l'hydrogène jusqu'au point d'utilisation, un réseau de canalisations est probablement la meilleure option, dans la mesure où de nombreux clients sur un site industriel ont besoin d'hydrogène. Plusieurs installations de production peuvent alimenter le réseau et à son tour, celui-ci peut fournir le gaz à plusieurs clients à différents endroits.

Des réservoirs cryogéniques peuvent être fournis afin de stocker l'hydrogène s'il n'est pas utilisé directement. L'hydrogène liquide est efficacement stocké dans des réservoirs isolés sous vide pouvant être installés horizontalement ou verticalement. En ce qui concerne le stockage en vrac d'hydrogène gazeux, les cavernes de sel souterraines sont une option. Le gaz est généralement purifié et comprimé avant de pouvoir être injecté dans la caverne.

Les cavités remplies d'hydrogène peuvent servir de secours pour un réseau de canalisations. Une autre option de transport pour l'hydrogène consiste à le livrer au point d'utilisation sous une forme convertie, c'est-à-dire sous forme d'ammoniac ou encore de méthanol.

L'hydrogène est la clé d'un écosystème de mobilité plus respectueux de l'environnement. Bon nombre d'entreprises fournissent actuellement des concepts et des technologies de ravitaillement hautes performances, et ouvre de ce fait la voie à des infrastructures hydrogène de bout en bout.

Le potentiel de l'hydrogène s'étend bien au-delà de l'écosystème de la mobilité de demain. Les technologies en question sont inestimables dans un large éventail d'applications industrielles.

Par ailleurs, différents projets transfrontaliers sont mis en œuvre au cours de ces dernières années entre le pays européens. A titre d'illustration, les deux opérateurs de transport de gaz CREOS et GRTgaz ont annoncé le fait de vouloir mettre en place un projet de conversion de réseau de gaz transfrontalier au 100 % hydrogène qui relie :

- Le Grand Est (France) ;
- La Sarre (Allemagne) ;
- La frontière Luxembourgeoise.

Le projet en question est appelé : projet mosaHYc. Il a comme ambition d'être non seulement transfrontalier, mais également européen, pionnier en matière de transport transfrontalier de l'hydrogène.

1.6. La filière de l'hydrogène vert

A ne pas en douter, à mesure que les projets de production d'hydrogène se

² Lepercq, T. 2021. Hydrogène : vers une renaissance industrielle de la France ?

multiplieront aussi bien en France, en Allemagne qu'en Europe, la question en ce qui concerne le transport ainsi que des infrastructures deviendra importante³.

En effet, le déploiement de l'hydrogène électrolytique requiert la création d'une infrastructure complexe qui comprend, en plus des capacités de production alimentées par les énergies renouvelables, un réseau de distribution ainsi que de transport qui relie les capacités de production à des sites d'utilisation, et un ensemble de capacités de stockage diversifiées qui sont aussi mises en réseau. Nous entendons par infrastructure alimentée par énergie renouvelable :

- Les fermes éoliennes aussi bien sur terre que sur mer ;
- Les installations photovoltaïques ;
- Ou encore les centrales hydrauliques qui sont ou connectées ou non au réseau électrique.

Tout doit être géré par un système intelligent pouvant ainsi permettre de piloter, et d'améliorer la concordance de l'offre et de la demande. Lorsque nous évoquons le déploiement de l'hydrogène décarboné, nous oublions parfois la question du digital ; néanmoins force est de constater que les deux sont liés. Et de nos jours le digital occupe une place importante.

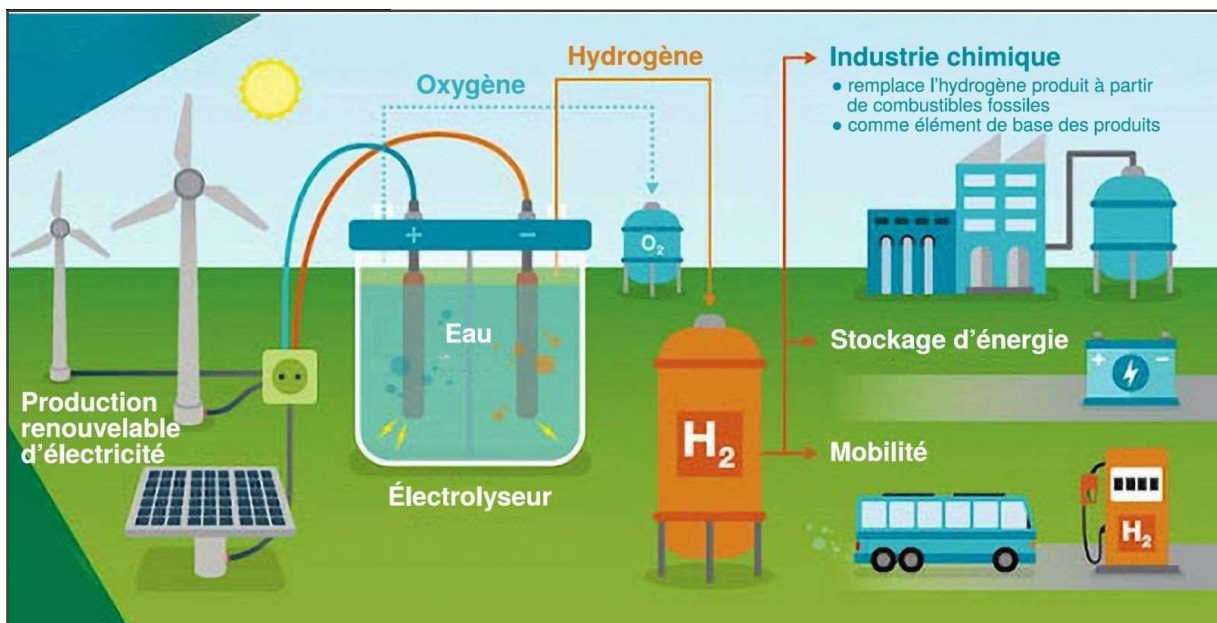


Figure 3 : L'hydrogène décarboné
Source : www.bioenergyinternational.com

La question n'est plus de savoir que le développement de l'hydrogène aura bien lieu, mais à quel rythme et d'après quels modes. L'hydrogène vert offre selon les études plusieurs milliards d'euros pour les filières françaises de matériel électrique d'ici 2030. En effet, le plan hydrogène de la France vise principalement à mettre en œuvre une filière industrielle de la production de l'hydrogène bas Carbone à travers le pays. Pour ce faire, cela implique différents procédés, que nous allons voir ci-dessous.

³ Dame e, O., Cremel, M., Demaie, H., Lemoine, F. 2020. Les enjeux économiques de la filière hydrogène : une solution pour la transition énergétique ? Monde en développement 48.

1.6.1. Production d'électricité renouvelable

L'hydrogène vert est obtenu grâce à l'utilisation d'énergies renouvelables dans sa production. Cela en fait un carburant durable et propre avec un indice de pollution zéro, pouvant être essentiel d'une part en tant que vecteur énergétique ; d'autre part, en tant que matière première.

Sa grande valeur en ce qui concerne la lutte contre le changement climatique se trouve dans sa capacité à se substituer aux énergies fossiles dans des secteurs et des usages jusqu'alors plus difficiles à décarboner, outre son potentiel en tant que système de stockage d'énergie.

Il convient de souligner que l'hydrogène vert est obtenu par le biais d'un processus d'électrolyse alimenté par des énergies renouvelables, à l'instar de l'éolien ou du solaire. L'électrolyse consiste à utiliser un courant électrique afin de décomposer la molécule d'eau en oxygène et en hydrogène par des électrodes.

Lorsque nous devons le transformer en énergie, l'hydrogène ayant été stocké dans des réservoirs spécifiques est alors acheminé vers une pile à combustible. Là, il se lie à nouveau avec l'oxygène de l'air et de l'électricité est donc obtenue. De ce fait, le seul sous-produit du processus est l'eau, donnant un système durable et propre, où aucun CO₂ n'est émis afin de produire de l'énergie.



Figure 4 : Site industriel de production

Source : www.lefigaro.fr

Sans nul doute, l'hydrogène vert va être l'un des protagonistes de la transition énergétique à venir, que les économies mondiales, plus spécifiquement la France et l'Allemagne, se doivent de mener, dans le but d'atteindre la neutralité carbone, mais aussi lutter contre le changement climatique.

À cette fin, il va être d'une importance capitale d'éliminer les émissions dans les utilisations actuellement difficiles à électrifier, là où l'hydrogène vert revendique son potentiel du fait de tous ses avantages inhérents :

- C'est une énergie propre : le seul déchet que l'hydrogène vert génère est l'eau.

- C'est une énergie renouvelable : l'hydrogène vert utilise des ressources naturelles qui ne sont pas épuisées.
- Il est stockable : l'hydrogène vert peut être comprimé et stocké dans des réservoirs ad hoc pendant une longue période.
- Il est transportable : car l'hydrogène vert est un élément léger, les réservoirs d'hydrogène comprimé permettent une manipulation plus facile que les batteries au lithium, puisqu'ils sont plus légers, ce qui facilite par conséquent le transport.

1.6.2 Production d'eau pure

Notre planète a désespérément besoin de solutions énergétiques beaucoup plus propres. Même si les sources d'énergie propre et durable dont nous disposons, telles que la production d'énergie éolienne, solaire et hydraulique, peuvent considérablement éviter la consommation de combustibles fossiles ou les émissions de CO₂, ces derniers ont des limites critiques.

Les demandes énergétiques croissantes dans le monde ne vont être satisfaites que par les combustibles fossiles, à moins que d'autres sources puissent être développées, dans le but de fournir efficacement de l'électricité à la demande, ou stocker de l'énergie.

Ainsi, dans la recherche de sources d'énergie propres et durables, un leader important semble être l'hydrogène, qui, en tant que composant élémentaire de l'eau, implique déjà la technologie de purification de l'eau dans le processus.

Sans nul doute, l'hydrogène peut être considéré comme un carburant parfait ou comme un moyen de stocker de l'énergie ; puisqu'il est léger et est extrêmement abondant, ne produisant aucune émission de combustion nocive. Utilisé dans une pile à combustible à hydrogène, il peut générer de l'électricité ou, avec un catalyseur de réaction, il peut créer de la chaleur. Par ailleurs, il incombe également de mentionner que l'eau purifiée est cruciale pour assurer un processus d'électrolyse efficace et fiable lors de la production d'hydrogène vert.

L'eau d'alimentation pour la production d'hydrogène vert doit être purifiée avant d'être acheminée vers l'électrolyseur. Si une eau d'une pureté incorrecte est utilisée, l'électrolyseur pourrait s'encrasser ou se dégrader, et sa sortie pourrait être compromise.

En règle générale, l'eau purifiée afin de générer de l'hydrogène gazeux par électrolyse est produite par osmose inverse, qui est ensuite « polie » avec des cylindres échangeurs d'ions à lit mixte, ou une électrodéionisation continue. Néanmoins, il est crucial que le prétraitement de l'eau d'alimentation soit correct pour empêcher l'électrodéionisation continue de s'encrasser après une courte période de fonctionnement. Il existe de nombreuses technologies de prétraitement, comme :

- Filtration des particules.
- Adoucisseurs d'eau.
- Dosage antitartre.
- Les charognards organiques.

- Systèmes de dégazage.
- Filtres à charbon actif granulé.

Les processus de prétraitement requis sont déterminés par la quantité de solides dissous totaux dans l'eau, les matières organiques, les particules, le chlore et le dioxyde de carbone.

1.6.3 Electrolyse de l'eau

La production d'hydrogène vert n'est pas uniquement sans carbone, celle-ci peut se réaliser indépendamment du réseau.

L'énergie créée grâce à l'utilisation de l'eau, qui n'émet pas de carbone et est indépendante du réseau électrique est possible avec l'hydrogène. Néanmoins, certains individus se demandent si la production d'hydrogène est une utilisation efficace de notre eau, en particulier dans les régions du monde frappées par la sécheresse.

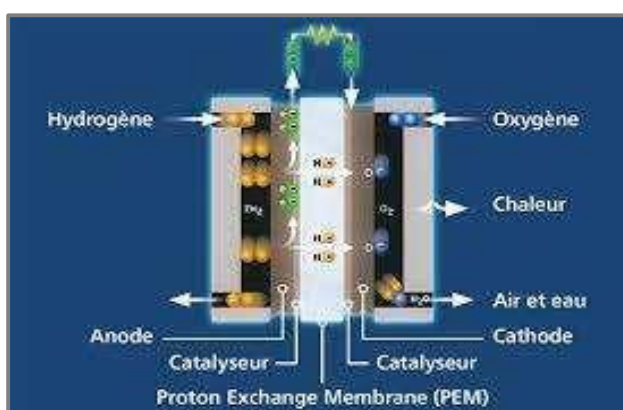


Figure 5 : Pile à combustible

Source : www.lerepairedesmotards.com

Si nous voulons aider le monde à lutter contre le changement climatique, la production d'hydrogène est une utilisation efficace de l'eau. L'eau est la vie. S'assurer que les communautés ont accès à l'eau pour boire et vivre est de la plus haute importance. L'eau est utilisée par de bon nombre d'industries, afin de :

- Cultiver des aliments.
- Produire de l'essence.
- Fabriquer de l'acier.
- Fabriquer d'autres produits.

Le processus que nous utilisons pour fabriquer de l'hydrogène, appelé électrolyse, se produit dans un électrolyseur et utilise de l'eau. Néanmoins, les électrolyseurs n'augmentent pas notre consommation d'eau, ils remplacent d'autres technologies qui peuvent utiliser plus d'eau à long terme.

A titre de précisions, l'électrolyseur est une machine électrochimique qui convertit l'eau en hydrogène et en oxygène gazeux. L'eau et l'électricité sont alors acheminées vers un électrolyseur et, suivant le type d'électrolyseur utilisé, l'eau est par la suite convertie par des réactions électrochimiques :

- En protons.
- En ions hydroxyde.
- En ions oxygène.

Au fur et à mesure que les protons, les ions hydroxyde ou encore les ions oxygène terminent leurs réactions électrochimiques respectives, ils libèrent de l'hydrogène et de l'oxygène gazeux de l'eau.

Les électrolyseurs n'utilisent aucun produit chimique, mais uniquement de l'eau et de l'électricité. Durant l'utilisation d'énergie renouvelable, aucun dioxyde de carbone ou matière particulière n'est émis pour produire de l'hydrogène et de l'oxygène gazeux par électrolyse.

Comme le montre la figure ci-dessous, l'hydrogène est capté, transporté et stocké pour être utilisé par industrie qui cherche à réduire son empreinte carbone. L'oxygène produit est libéré dans l'air. Il est prévu que les électrolyseurs vont fournir des gigatonnes d'hydrogène vert alors que le monde passe progressivement des combustibles fossiles aux combustibles renouvelables.

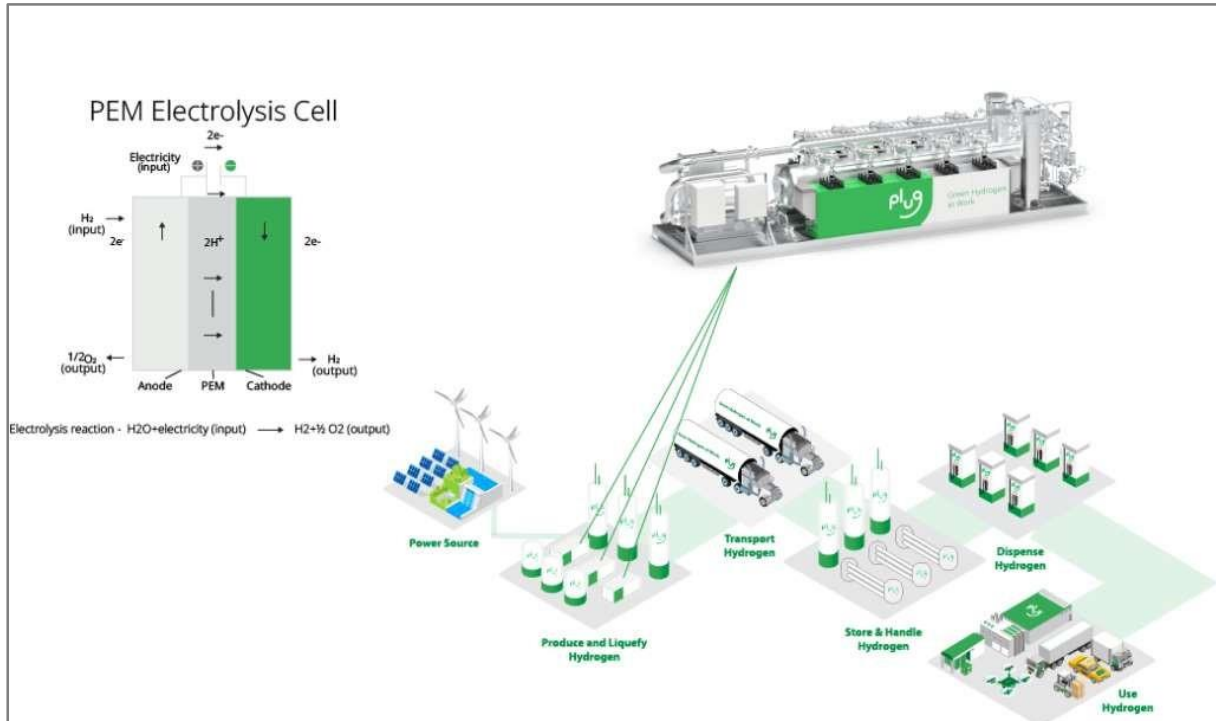


Figure 6 : Processus d'électrolyse

Source : www.pemteco.com

Le processus d'électrolyse utilise de nombreuses sources d'eau, afin de produire de l'hydrogène. L'eau industrielle, qui peut inclure l'eau municipale ou l'eau souterraine, est la

source d'eau généralement utilisée dans l'électrolyse. A l'inverse de l'eau potable, l'eau industrielle est utilisée dans diverses industries, notamment :

- Les raffineries de pétrole.
- Les fonderies.
- Les industries qui produisent des aliments, du papier, mais également des produits chimiques.

Avant d'être utilisée dans le processus d'électrolyse, l'eau industrielle passe par différentes phases de filtration en vue d'assurer une pureté maximale. Nous pouvons comparer ceci à un filtre à eau que l'on utilise à la maison afin de nettoyer l'eau du robinet. Le processus de filtration est comme un filtre à eau où celle-ci est purifiée en plusieurs étapes pour éliminer les ions tels que le calcium, le magnésium ainsi que d'autres minéraux ne pouvant pas être utilisés pendant l'électrolyse.

Ceci est illustré dans l'image ci-après :

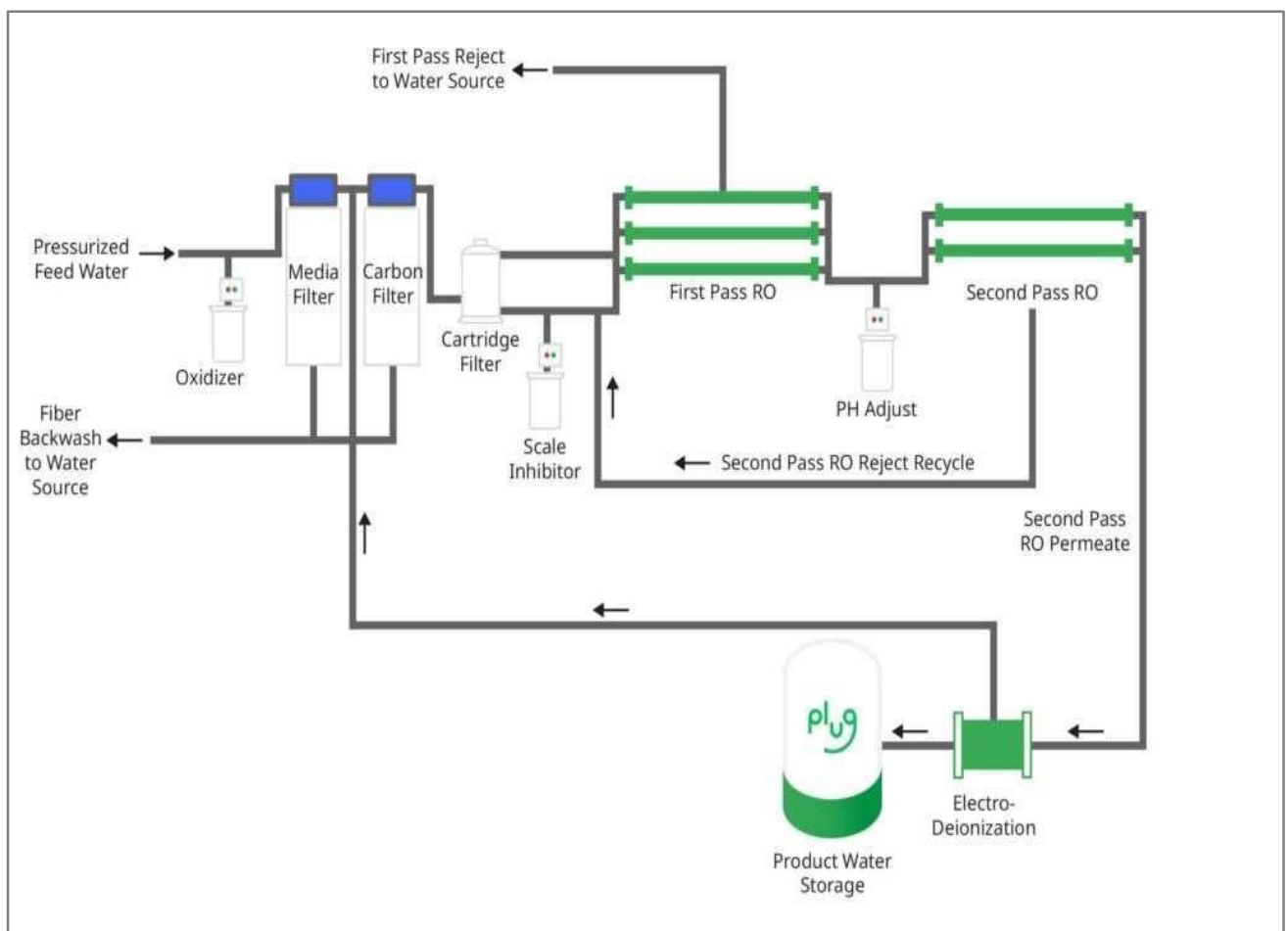


Figure 7 : Processus schématique de l'électrolyse

Source : www.plugpower.com

L'eau utilisée afin de produire de l'hydrogène doit être aussi pure que possible. Après la production d'hydrogène, l'excès d'eau est par la suite recyclé afin d'être utilisé pour d'autres besoins, ce qui assure que le processus d'électrolyse consomme le moins d'eau possible.

1.6.4 Compression de l'hydrogène

L'hydrogène est produit à des pressions relativement basses et il doit être impérativement comprimé avant le transport. De nombreux compresseurs, utilisés de nos jours pour la compression de l'hydrogène gazeux, peuvent être des centrifuges ou volumétriques. Ces derniers peuvent être alternatifs ou rotatifs.

- *Les compresseurs à piston* utilisent un moteur à entraînement linéaire, afin de déplacer un piston ou un diaphragme d'avant en arrière.
Le mouvement en question comprime l'hydrogène, en réduisant le volume qu'il occupe. Les compresseurs à pistons sont les compresseurs les plus couramment utilisés pour les applications nécessitant un taux de compression élevé.
- *Les compresseurs ioniques* sont similaires aux compresseurs alternatifs ; néanmoins, ils utilisent des liquides ioniques à la place du piston.
Les compresseurs en question ne nécessitent pas de roulements ni de joints, deux des sources courantes de défaillance des compresseurs à piston. Les compresseurs ioniques sont aujourd'hui disponibles aux capacités et aux pressions requises dans les stations de ravitaillement en hydrogène.
- *Les compresseurs rotatifs* se compriment par la rotation d'engrenages, de lobes, de vis, d'aubes ou de rouleaux.

La compression de l'hydrogène est une application difficile pour les compresseurs volumétriques, du fait des tolérances serrées qui sont indispensables en vue d'éviter les fuites.

- *Les compresseurs centrifuges* sont perçus comme le compresseur de choix pour les applications de pipeline, en raison de leur débit élevé, et de leur taux de compression modéré.
Les compresseurs centrifuges font tourner une turbine à grande vitesse afin de comprimer le gaz. Les compresseurs centrifuges à hydrogène doivent fonctionner à des vitesses de pointe beaucoup plus rapides que celles des compresseurs à gaz naturel, afin d'atteindre le même taux de compression, du fait généralement du faible poids moléculaire de l'hydrogène.

Les alternatives à la compression mécanique qui sont aujourd'hui au stade de la recherche et du développement comprennent l'usage de réactions électrochimiques, d'hydrures métalliques et de liquides ioniques.

- *Les compresseurs électrochimiques* emploient des membranes échangeuses de protons flanquées d'électrodes, et d'une source d'alimentation externe en vue d'entraîner la dissociation de l'hydrogène à l'anode et sa recombinaison à des pressions plus élevées à la cathode.

1.6.5 Stockage de l'hydrogène

Le stockage de l'hydrogène peut se concevoir comme une technologie habilitante clé pour l'avancement des technologies de l'hydrogène ainsi que des piles à combustible dans des applications telles que :

- Le transport.
- L'énergie portable.
- L'énergie stationnaire.

Il convient de souligner que l'hydrogène a l'énergie par masse la plus élevée de tous les carburants ; néanmoins, sa faible densité à température ambiante peut se traduire par une faible énergie par unité de volume, nécessitant de ce fait le développement de méthodes de stockage avancées, qui ont un potentiel de densité d'énergie plus élevée.

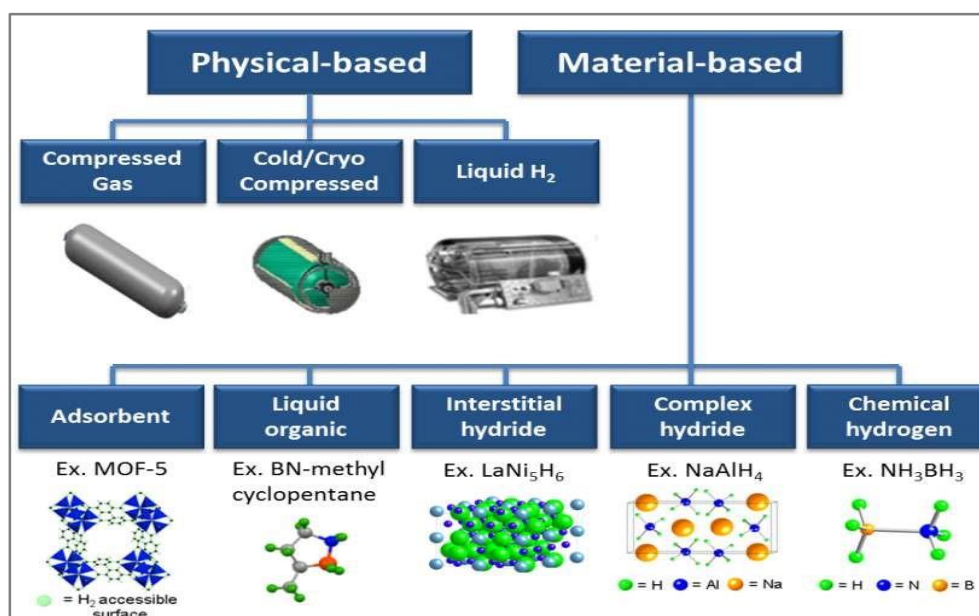


Figure 8 : Fonctionnement du stockage de l'hydrogène
Source : www.hydrogeneurope.eu

Comme le montre la figure ci-dessus, l'hydrogène peut être stocké sous forme de gaz ou de liquide. Le stockage de l'hydrogène sous forme de gaz requiert souvent des réservoirs à haute pression, c'est-à-dire une pression du réservoir de 350 à 700 bars.

En ce qui concerne le stockage de l'hydrogène sous forme liquide, il requiert des températures cryogéniques, dans la mesure où le point d'ébullition de l'hydrogène à une pression atmosphérique est de -252,8 ° C. L'hydrogène peut également être stocké à la surface des solides ou à l'intérieur des solides.

Par ailleurs, le stockage d'hydrogène à haute densité est un défi pour les applications fixes et portables, et reste un défi important pour les applications de transport.

En ce sens, les options de stockage actuellement disponibles demandent généralement des systèmes à grand volume pouvant stocker l'hydrogène sous forme gazeuse. C'est moins un problème pour les applications stationnaires, où l'encombrement des réservoirs de gaz comprimé peut être moins critique.

Néanmoins, les véhicules à pile à combustible nécessitent suffisamment d'hydrogène afin de fournir une autonomie de plus de 500 km, avec la possibilité de faire le plein rapidement et facilement. Alors que certains véhicules électriques légers à pile à combustible à hydrogène ayant cette autonomie ont émergé sur le marché, elles s'appuieront sur le stockage à bord de gaz comprimé, à l'aide de réservoirs composites à grand volume et haute pression. Les grands volumes de stockage requis peuvent avoir moins d'impact pour les véhicules plus gros ; cependant, fournir un stockage d'hydrogène suffisant sur les plateformes légères reste un défi.

1.7 Les différentes formes de l'hydrogène

L'hydrogène peut exister sous différentes formes d'état en fonction des conditions de température et de pression. Voici les principales formes d'état de l'hydrogène :

Hydrogène gazeux (H_2) : L'hydrogène gazeux (H_2) est la forme prédominante de l'hydrogène dans des conditions de température ambiante et de pression atmosphérique normale. Les molécules d'hydrogène gazeux sont composées de deux atomes d'hydrogène qui sont chimiquement liés. À température ambiante, cet hydrogène est léger, incolore, inodore et présente une grande inflammabilité.

Hydrogène liquide (LH_2) : L'hydrogène peut être refroidi à des températures extrêmement basses (-253 °C) pour le transformer en hydrogène liquide (LH_2). À cette température, il prend l'apparence d'un liquide transparent et volatil. Le stockage de l'hydrogène sous forme liquide offre une densité énergétique considérablement plus élevée que celle de l'hydrogène gazeux, mais cela requiert l'utilisation de technologies de refroidissement complexes.

Hydrogène solide : Lorsqu'il est exposé à des températures extrêmement basses et à des pressions élevées, l'hydrogène a la capacité de se solidifier et de prendre différentes formes polymorphes solides. Ces formes solides d'hydrogène présentent des caractéristiques physiques et chimiques distinctes, et elles font l'objet de recherches en tant que méthodes potentielles de stockage de l'hydrogène.

Hydrures : Les métaux ont la capacité de former des composés appelés hydrures en se combinant avec l'hydrogène. Les hydrures peuvent prendre diverses formes, allant des hydrures métalliques aux hydrures d'hydrogène adsorbés sur des matériaux poreux. Ces hydrures sont utilisés pour le stockage de l'hydrogène, offrant ainsi une densité énergétique supérieure.

Hydracides : L'hydrogène est capable de former des liaisons chimiques avec d'autres éléments, créant ainsi des composés connus sous le nom d'hydracides. Par exemple, l'acide chlorhydrique (HCl) est un hydracide constitué d'un atome d'hydrogène lié à un atome de chlore. Ces hydracides peuvent être utilisés comme sources d'hydrogène dans diverses applications.

Il convient de noter que l'état de l'hydrogène dépend des conditions de température et de pression. Par conséquent, il est possible de modifier l'état de l'hydrogène en ajustant ces paramètres.

1.8 Le stockage à basse pression

Le stockage basse pression de l'hydrogène consiste à stocker de l'hydrogène gazeux à une pression Le stockage basse pression de l'hydrogène implique la conservation de l'hydrogène gazeux à une pression relativement faible, généralement entre 1 et 10 bars. Cette méthode est largement utilisée dans le secteur du transport en raison de sa sécurité accrue et de son coût plus économique par rapport aux méthodes de stockage haute pression ou liquide.

Le stockage basse pression de l'hydrogène est généralement effectué dans des réservoirs métalliques spécialement conçus à partir de matériaux résistants à la corrosion et à haute résistance, tels que l'acier inoxydable ou les alliages d'aluminium. Ces réservoirs sont équipés de dispositifs de sécurité tels que des soupapes de sécurité pour éviter les défaillances en cas de surpression.

Comparés aux réservoirs de stockage haute pression, les réservoirs de stockage basse pression sont généralement plus légers et moins coûteux car ils peuvent être fabriqués à partir de matériaux moins résistants. Cependant, leur densité énergétique est plus faible, ce qui signifie qu'ils peuvent stocker moins d'hydrogène par unité de volume. Par conséquent, leur utilisation peut être limitée dans des applications nécessitant une grande quantité d'hydrogène, comme les applications industrielles ou les véhicules lourds.

Le stockage basse pression est souvent combiné avec d'autres méthodes de stockage pour augmenter la capacité de stockage globale de l'hydrogène. Par exemple, les véhicules à hydrogène peuvent utiliser une combinaison de réservoirs de stockage basse pression et haute pression pour augmenter leur autonomie et leur capacité de transport. Les réservoirs de stockage basse pression sont également couramment utilisés dans les stations de ravitaillement en hydrogène pour stocker l'hydrogène avant sa compression ou sa liquéfaction pour le stockage haute pression ou liquide.

1.9 Le stockage à haute pression

Le stockage haute pression de l'hydrogène implique de conserver l'hydrogène gazeux à des pressions élevées, généralement supérieures à 10 bars, afin d'optimiser sa densité énergétique et d'assurer un stockage plus efficace.

Cette méthode est couramment utilisée dans des domaines tels que le ravitaillement en hydrogène des véhicules à hydrogène et le stockage à grande échelle.

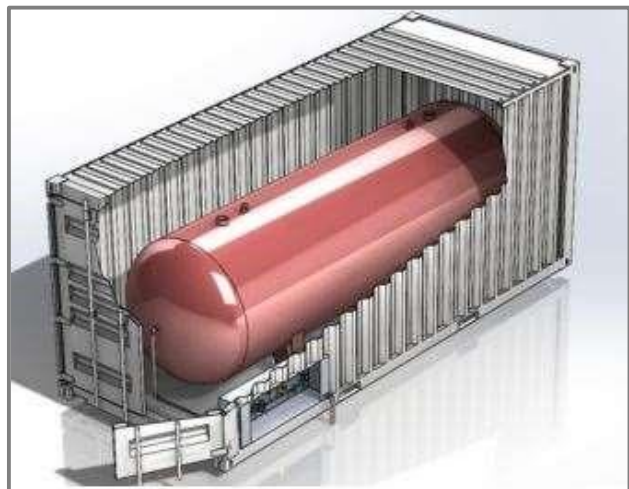


Figure 9 : Module de stockage haute pression
Source : www.hdf-energy.com

Pour le stockage haute pression de l'hydrogène, des réservoirs spéciaux appelés réservoirs de stockage haute pression sont utilisés. Ils sont conçus pour supporter en toute sécurité les pressions élevées. Ces réservoirs sont fabriqués à partir de matériaux solides tels que des composites renforcés de fibres de carbone ou des alliages d'aluminium haute résistance. Ils sont conçus pour résister aux contraintes générées par la pression de l'hydrogène.

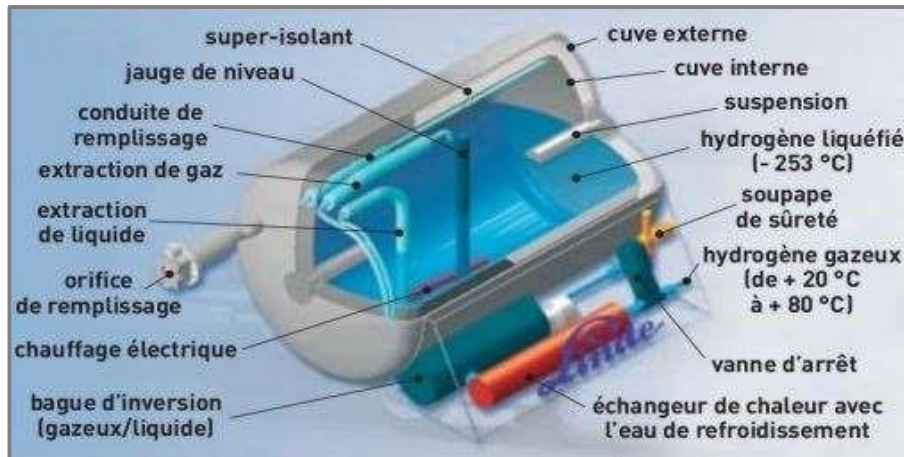


Figure 10 : Réservoir à hydrogène haute pression
Source : www.cnrs.fr

Les réservoirs de stockage haute pression peuvent être classés en deux catégories principales. Les réservoirs en acier renforcé sont utilisés pour stocker l'hydrogène à des pressions allant généralement jusqu'à 70 mégapascals (MPa), soit environ 700 fois la pression atmosphérique normale. Ils sont souvent utilisés dans les applications industrielles et de stockage d'énergie à grande échelle. Les réservoirs composites, fabriqués à partir de matériaux composites renforcés de fibres de carbone, sont plus légers que les réservoirs en acier tout en offrant une résistance élevée à la pression. Ils peuvent stocker l'hydrogène à des pressions allant jusqu'à 70 MPa ou plus, et sont couramment utilisés dans les applications de véhicules à hydrogène, où la réduction du poids est essentielle pour maximiser l'autonomie des véhicules.

Le stockage haute pression offre une densité énergétique plus élevée par rapport au stockage basse pression, permettant de stocker une plus grande quantité d'hydrogène dans un espace donné. Cela facilite le transport et le ravitaillement en hydrogène, en particulier pour les véhicules à hydrogène qui nécessitent une plus grande autonomie. Cependant, le stockage haute pression nécessite des réservoirs solides et coûteux, ainsi que des mesures de sécurité appropriées pour prévenir les fuites et les accidents potentiels.

Des procédés alternatifs, tels que le fractionnement photoélectrochimique de l'eau, sont également en cours de développement. Ce procédé utilise l'électricité produite par des systèmes photovoltaïques pour séparer l'eau en dihydrogène et dioxygène par électrolyse dans une cellule photoélectrochimique. Cette méthode, également connue sous le nom de "photosynthèse artificielle", est considérée comme une méthode propre de production d'hydrogène. Des recherches sont en cours pour améliorer l'efficacité et la durée de vie des cellules multifonctions utilisées dans ce procédé.

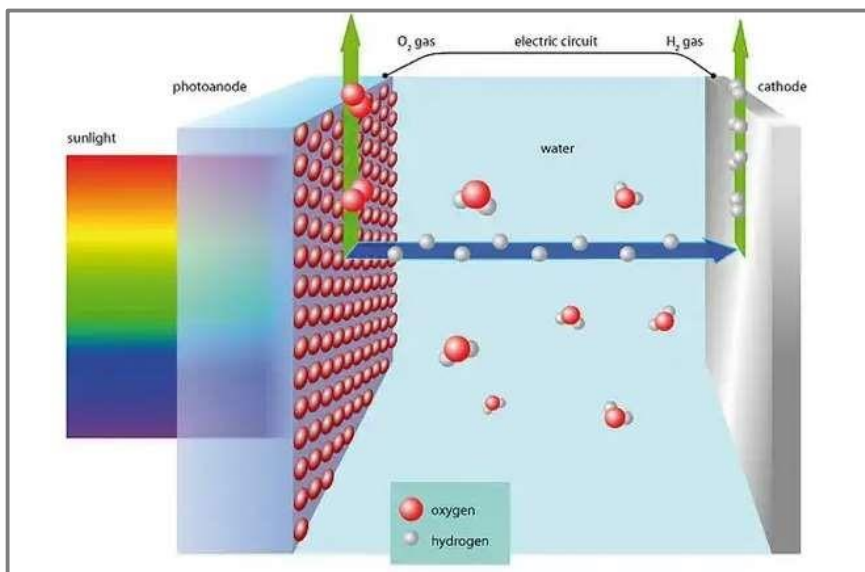


Figure 11 : Procédé photoélectrochimique de l'eau
Source : www.enerzine.com

1.10 Electrolyse à haute température

Lorsque l'énergie est disponible à des températures très élevées, comme dans les centrales nucléaires ou par concentration solaire, l'électrolyse à haute température (HTE) pourrait être la méthode privilégiée pour produire du dihydrogène. Contrairement à l'électrolyse à basse température, la HTE permet de convertir une plus grande quantité de chaleur initiale en énergie chimique (dihydrogène), ce qui augmente l'efficacité de conversion d'environ 50%. L'électrolyse à haute température est plus efficace que le procédé à température ambiante (pouvant atteindre jusqu'à 92%) car une partie de l'énergie nécessaire à la réaction est fournie sous forme de chaleur, moins coûteuse à obtenir que l'électricité, et les réactions d'électrolyse ont un rendement supérieur à haute température.

Le Laboratoire d'innovation pour les technologies des énergies nouvelles et les nanomatériaux (Liten) du CEA, basé à Grenoble, travaille sur le développement de l'électrolyse à haute température. Il estime que son rendement est supérieur à celui des autres technologies concurrentes, car "casser la molécule d'eau sous forme de vapeur nécessite moins d'énergie". En 2021, le laboratoire a créé une coentreprise appelée Genvia avec Schlumberger, Vicat et la région Occitanie dans le but de développer cette technologie.

Bien que l'électrolyse à haute température ait été démontrée en laboratoire, elle n'a pas encore été mise en œuvre à grande échelle. Des prototypes de réacteurs nucléaires de quatrième génération fonctionnent à des températures allant de 850 à 1 000 °C, ce qui est considérablement plus élevé que les réacteurs nucléaires actuels. General Atomics prévoit que le

dihydrogène produit dans un réacteur nucléaire à très haute température coûterait 1,53 \$/kg. En 2003, le vaporeformage produisait du dihydrogène à 1,40 \$/kg. En 2005, avec la flambée des prix du pétrole, le prix du dihydrogène était de 2,70 \$/kg. Par conséquent, une



économie de plusieurs milliards de dollars par an serait possible aux États-Unis grâce à la production d'hydrogène nucléaire. Une telle production centralisée viserait à fournir de l'hydrogène compétitif par rapport au procédé de vaporeformage.

1.11. Le transport de l'hydrogène

Une infrastructure d'hydrogène viable requière également que cette matière puisse être livrée depuis son lieu de production jusqu'au point d'utilisation finale, à l'instar d'une installation industrielle, un générateur d'électricité ou une station-service. L'infrastructure comprend ainsi :

- Les pipelines.
- Les installations de stockage.
- Les usines de liquéfaction.
- Les camions.
- Les compresseurs ainsi que les distributeurs qui sont impliqués dans le processus de livraison du carburant.

Il importe de mentionner que l'hydrogène n'est pas uniquement le plus petit élément sur terre, c'est également le plus léger ; à titre de comparaison, notons que la masse de 5 litres d'essence est d'environ 3.75 kg alors que 5 litres d'hydrogène a une masse de seulement 450 mg. D'ailleurs, pour transporter de grandes quantités d'hydrogène, celui-ci doit être soit :

- Livré sous forme de gaz comprimé.
- Pressurisé.
- Liquéfié.

Aujourd'hui, l'hydrogène est transporté du point de production au point d'utilisation par pipeline et par route dans des camions-citernes à liquide cryogénique ou encore des remorques à tubes gazeux.

En ce qui concerne les pipelines, ces derniers sont généralement déployés dans des régions dans lesquelles la demande est importante, c'est-à-dire celle pouvant atteindre des centaines de tonnes par jour, et devrait rester stable au cours de nombreuses décennies.

Les usines de liquéfaction, les citernes de liquide et les remorques tubulaires sont déployées dans les régions dans lesquelles la demande est à plus petite échelle ou émergente. L'hydrogène peut être aussi transporté par les transporteurs de produits chimiques, comme les barges, et dans les applications à grande échelle, à l'exemple des marchés d'exportation.

Au point d'utilisation de l'hydrogène, les composants d'infrastructure supplémentaires généralement déployés comprennent :

- La compression.
- Les distributeurs.
- Les compteurs et les technologies de détection et de purification des contaminants.
- Le stockage.

A titre d'exemple, les stations déployées afin de distribuer de l'hydrogène dans les véhicules à pile à combustible moyens et lourds devraient comprimer l'hydrogène à une pression de 350 à 700 bars, et distribuer jusqu'à 10 kg/min.

Des technologies à haut débit, afin de répondre aux exigences de performance en question, sont en cours de développement.

2 L'Europe en ordre de bataille, plans de gouvernance étatiques

Nous savons que l'invasion de l'Ukraine par la Russie a fait considérablement grimper les prix du gaz naturel, ce qui laisse par conséquent des millions d'Européens aux prises avec des factures énergétiques exorbitantes. Cette situation fait même pression sur les gouvernements, pour qu'ils aident et soutiennent des sources d'énergie alternatives.

Plusieurs mois après le début des hostilités, il y a une doublure argentée à la crise concernant l'avenir énergétique de l'Europe.

L'augmentation des prix du gaz a fait apparaître soudainement l'hydrogène vert, qui est fabriqué uniquement à partir d'énergie renouvelable. L'hydrogène vert est plus abordable qu'il ne l'était auparavant, ce qui stimule les investissements ainsi que l'intérêt pour un secteur qui pourrait aider le bloc à réduire ses émissions de carbone.

Certains spécialités et parties prenantes de l'industrie affirment que c'est une bonne nouvelle ; d'autres affirment que nous ne devrions pas trop nous réjouir, puisque ce changement veut dire en grande partie que tous les types d'énergie sont coûteux ces jours-ci, et il reste encore beaucoup à faire afin de mettre en place une économie de l'hydrogène verte compétitive.

2.1 Etat des lieux de la France

La France bénéficie de nos jours d'un avantage concurrentiel sur les autres pays européens grâce à la nouvelle clause nucléaire de l'Union européenne. Car l'hexagone pourrait bientôt être exemptée du besoin d'« additionnalité », du fait de son réseau dépendant du nucléaire, pouvant permettre aux acteurs concernés de produire du H₂ renouvelable au quotidien en utilisant l'hydroélectricité existante

En effet, de nouvelles règles dans l'acte délégué de la Commission européenne, mettant en lumière les définitions de l'hydrogène renouvelable et de ses dérivés, vont permettre à ces derniers de produire de l'hydrogène vert moins cher que ceux des autres pays, d'après les explications de l'association professionnelle nationale France Hydrogène.

L'article 4 de l'acte délégué permet aux réseaux nationaux dont les émissions moyennes de gaz à effet de serre sont inférieures à 18 grammes d'équivalent CO₂ par mégajoule d'être exemptés de l'obligation d'« additionnalité », principe d'après lequel l'hydrogène vert doit être produit à partir d'électricité qui provient de nouvelles installations d'énergie renouvelable, afin de ne pas cannibaliser l'alimentation électrique propre existante.

La France pourra probablement atteindre cette limite d'émissions prochainement, à condition qu'elle remette son parc nucléaire à pleine vitesse⁴.

⁴ Lapostolle, D. 2021. Analyser les trajectoires territoriales de transition énergétique. Les territoires hydrogène en France. VerGO-la revue électronique en sciences de l'environnement.

Il convient de souligner que le réseau français a enregistré en moyenne 73g de CO₂ e/kWh en 2022, année dans laquelle une importante partie de son parc atomique était à l'arrêt pour maintenance ou réparation. Les années précédentes avaient vu des taux moyens d'émission de gaz à effet de serre de 55 à 56 g de CO₂ e/kWh.

Dans la mesure où l'Hexagone est éligible à l'exonération de l'additionnalité, les producteurs d'hydrogène du pays pourraient acheter de l'énergie renouvelable à partir de projets hydroélectriques existants, pouvant ainsi permettre aux électrolyseurs de fonctionner continuellement, et plus un électrolyseur fonctionne sans interruption, plus le niveau nivelé est faible.

La France pourrait également bénéficier de l'exemption prochainement, alors que les autres pays pourraient encore construire de nouveaux projets éoliens et solaires, afin de répondre à leurs exigences d'additionnalité, et que ces concurrents pourraient aussi avoir beaucoup de mal à se procurer suffisamment d'énergie renouvelable, afin de permettre la production d'hydrogène au quotidien.

Ce serait encore plus difficile à partir dans les dix ans à venir, lorsque les producteurs d'hydrogène vont devoir fournir une preuve d'approvisionnement en énergie renouvelable sur une base horaire, plutôt que sur la base mensuelle existant jusqu'ici.

2.2. Plan de transition énergétique

Le gouvernement a détaillé récemment le grand plan qui permettra à la France de devenir un acteur mondial de l'hydrogène à l'horizon 2030. Il s'agit non seulement de produire de l'hydrogène « vert » rentable, mais aussi de développer des usages économiquement viables, notamment dans la mobilité.



Le 8 septembre 2020 Bruno Le Maire, ministre de l'Économie, et Barbara Pompili, ancienne ministre de la Transition écologique (6 juillet 2020 – 20 mai 2022), ont présenté en ces termes le plan hydrogène à 7 milliards d'euros qui devrait faire de la France un pionnier Européen et même mondial de l'hydrogène à l'horizon 2030 :

« Cette stratégie nationale s'inscrit dans une logique européenne. Si nous voulons acquérir et conserver un avantage compétitif, si nous voulons rester au meilleur niveau mondial et devancer les industries américaines et asiatiques sur le long terme, nous devons unir nos forces à l'échelle européenne, en faisant collaborer les chercheurs, en facilitant les coopérations industrielles et en regroupant nos financements. »

Les trois priorités du plan de transition énergétique

Priorité n°1 : Décarboner l'industrie en faisant émerger une filière française de l'électrolyse

La production d'hydrogène sans émission de carbone est essentielle pour favoriser le développement des différents secteurs du marché. En augmentant le nombre d'installations de production et leur capacité individuelle, des économies d'échelle peuvent être réalisées, ce qui entraîne une réduction des coûts de production.

La stratégie privilégie l'utilisation de l'électrolyse parmi les différents procédés, car elle est considérée comme la plus prometteuse et la France dispose déjà d'entreprises industrielles à fort potentiel dans ce domaine. Afin de favoriser le marché de la production d'hydrogène décarboné par électrolyse, il est nécessaire de développer des projets de plus grande envergure et d'une capacité accrue. Ainsi, la France s'est fixé l'objectif d'installer 6,5 GW d'électrolyseurs d'ici 2030.

Afin de stimuler la croissance de l'industrie française de production d'hydrogène, la stratégie propose une série d'outils visant à développer des projets de grande envergure en bénéficiant d'une visibilité sur la demande, puis à les mettre à l'échelle industrielle afin d'atteindre la rentabilité.

En 2021, un projet d'envergure européenne, le Projet Important d'Intérêt Européen Commun (PIIEC/IPCEI), a été lancé pour soutenir la recherche et le développement ainsi que l'industrialisation des électrolyseurs afin de produire de l'hydrogène "vert" et de déployer ces solutions dans l'industrie. L'objectif est de promouvoir l'émergence de projets de "gigafactories" d'électrolyseurs en France, suivant un modèle similaire au plan batterie qui prévoit le développement des usines de Nersac et de Douvrin par ACC, une entreprise commune de PSA et Total/Saft (bientôt rejointe par Renault). Ce projet pourrait également englober l'industrialisation d'autres composants technologiques tels que les piles à combustible, les réservoirs, les matériaux, dans le but d'intégrer la chaîne de valeur à l'échelle européenne.

La France réservera une dotation financière exceptionnelle de 1,5 milliards d'euros dans le cadre de cette action. Actuellement, l'industrie représente de loin le plus grand consommateur d'hydrogène. L'objectif est de substituer les méthodes de production utilisant des combustibles fossiles afin de décarboner cette production d'hydrogène. Cette initiative s'inscrit dans le cadre de la programmation pluriannuelle de l'énergie, qui vise à mettre en place des mesures en ce sens. En effet, le potentiel de décarbonation est significatif dans l'industrie sur les segments suivants :

- Dans le raffinage, un marché en croissance pour désulfurer les carburants.
- Dans la chimie avec notamment la production d'ammoniac et de méthanol.
- Dans certains secteurs, tels que l'électronique ou l'agroalimentaire qui utilisent de l'hydrogène, en plus petites quantités.

Afin d'accélérer le processus de décarbonation de l'industrie française, la stratégie met en place un ensemble d'outils visant à renforcer la production par électrolyse, à adapter et développer les procédés industriels, ainsi qu'à soutenir ces solutions tant au niveau des investissements que du fonctionnement des installations. Cette approche est nécessaire tant

que le prix de l'hydrogène n'est pas compétitif par rapport aux alternatives basées sur des sources carbonées.

Lorsqu'une offre compétitive d'électrolyseurs sera disponible, différents mécanismes (réglementation, fiscalité...) se mettront en place :

- Mécanisme pour soutenir les projets de verdissement de l'hydrogène dans le secteur du raffinage.
- Mise en place d'un mécanisme de garanties d'origine permettant de valoriser l'hydrogène décarboné par rapport à l'hydrogène produit à partir de combustibles fossiles.
- Élaboration d'un dispositif de soutien de type « complément de rémunération » qui apportera un soutien à l'investissement et au fonctionnement après appels d'offres

Priorité n°2 : Développer une mobilité lourde à l'hydrogène décarboné

L'objectif est de promouvoir la mobilité lourde à l'hydrogène en développant des solutions adaptées. Les technologies liées à l'hydrogène sont particulièrement adaptées aux véhicules lourds, offrant une capacité de stockage complémentaire aux batteries électriques. L'utilisation de l'hydrogène répond aux besoins de puissance élevée et d'autonomie prolongée, en particulier pour les flottes captives qui parcourent de longues distances de manière régulière.



Véhicules légers



Poids lourds



Bus



Trains régionaux



Camions bennes



Avion

Le déploiement de l'hydrogène sur ce segment répond à l'objectif de décarbonation de ces mobilités dites « lourdes ».

Pourquoi cibler le marché des mobilités lourdes ?

De prime abord, il convient de souligner que la transition énergétique désigne les changements du système de production, de distribution, et de consommation en matière d'énergie réalisée sur le territoire afin de le rendre plus écologique.

Elle a pour finalité de transformer le système énergétique, dans le but de diminuer son impact environnemental.

Pour faire face aux défis de la transition écologique, ainsi que de l'urgence climatique, la France envisage de développer l'hydrogène bas carbone et renouvelable ainsi que ses usages industriels, énergétiques et de mobilité. Le but est d'avoir 20 à 40 % de la consommation totale d'hydrogène et d'hydrogène industriel qui proviennent d'hydrogène bas carbone et renouvelable d'ici 2030.

Selon la programmation énergétique pluriannuelle du gouvernement, le premier objectif est d'atteindre un taux de 10 % d'hydrogène décarboné à usage industriel d'ici la fin de l'année, puis entre 20 et 40 % en décembre 2028.

Afin de soutenir le développement de l'hydrogène bas carbone et renouvelable, le gouvernement français va investir des milliards d'euros d'ici 2030, bon nombre ont été fixées pour cet investissement :

- En premier lieu, décarboner l'industrie, et cela avec un objectif de neutralité carbone à l'horizon 2050.
- En second lieu, développer la mobilité hydrogène.
- En troisième lieu, soutenir et développer la capacité de recherche de la France.

En ce qui concerne le stockage de l'hydrogène, la France a pris conscience de l'importance du stockage de grandes quantités d'électricité sous forme d'hydrogène afin de mieux gérer l'intermittence des énergies renouvelables.

L'avenir de la filière française de l'hydrogène va notamment dépendre de la capacité des parties prenantes à accroître de manière significative la production d'hydrogène bas carbone et renouvelable par électrolyse, et à créer un pôle industriel hydrogène pouvant résister à l'épreuve de la concurrence du marché.

En vue d'être viable, du point de vue économique, la production d'hydrogène renouvelable et bas carbone doit augmenter substantiellement, ce qui pourra engendrer le développement de la demande de gaz renouvelables, et une grande quantité d'électricité bon marché.

Il existe des maturités technologiques différentes selon les types de véhicule mais des équipements communs (piles à combustibles, réservoirs, électronique de puissance) sur lesquels capitaliser des développements. C'est un marché très dynamique qui appelle des solutions technologiques permettant une autonomie supérieure à celle des batteries. Ce secteur (constructeurs et équipementiers automobiles) représente un enjeu économique important, avec un chiffre d'affaires de plus de 100 Md€ et 225 000 emplois.

Il existe dans ce secteur des entreprises françaises prometteuses pour le développement ou l'industrialisation de composants stratégiques.

Pour accélérer le développement de l'offre française de briques technologiques, la stratégie propose un ensemble d'outils qui permettront de :

- Produire des véhicules fiables, répondant aux besoins des entreprises.
- Disposer d'équipements performants et évolutifs.
- Disposer des compétences pour produire et entretenir.

La stratégie vise à développer des projets territoriaux d'envergure en encourageant la mutualisation des usages. Pour accélérer la mise en place de solutions de mobilité professionnelle à l'hydrogène à travers le pays, il est proposé de mutualiser la demande, à la fois dans le secteur industriel et celui de la mobilité, à l'échelle des territoires. L'objectif de ces projets territoriaux est de favoriser des partenariats solides entre les collectivités et les acteurs industriels, afin de synchroniser au mieux l'émergence de l'offre et le développement des usages.

Priorité n°3 : Soutenir la recherche, l'innovation et le développement de compétences afin de favoriser les usages de demain

Les nouveaux usages de l'hydrogène identifiés par la stratégie sont nombreux.

Les exemples suivants en illustrent la diversité :

- L'intégration de l'hydrogène dans les réseaux énergétiques permettra de soutenir le déploiement des énergies renouvelables en renforçant la stabilité de ces réseaux.
- L'utilisation d'hydrogène décarboné peut être incorporée dans divers processus industriels pour réduire les émissions de CO₂. Dans des secteurs tels que la sidérurgie ou l'industrie chimique, l'hydrogène pourrait être employé pour la réduction du minerai de fer ou la fabrication d'engrais, offrant ainsi de nouveaux usages respectueux de l'environnement.
- Les mobilités lourdes de demain : c'est notamment le cas des avions et navires décarbonés. L'utilisation de l'hydrogène par ces filières pourra faire l'objet de démonstrateurs.
- Les infrastructures H₂ de demain : l'hydrogène représente un potentiel certain à moyen terme pour la décarbonation du secteur gazier (H₂ liquide, réutilisation dans le réseau de gaz).

Afin de stimuler la progression des futurs usages de l'hydrogène, la stratégie met en place une série d'outils visant à maintenir l'effort de recherche et développement dans ce domaine, permettant ainsi à la France de demeurer à la pointe à l'échelle internationale. Grâce à sa recherche de premier plan dans ce domaine, la France soutient l'innovation en faveur de l'industrialisation de nouvelles technologies.

2.2.1. Développer les compétences

La stratégie vise à renforcer les compétences nécessaires pour soutenir le développement des utilisations de l'hydrogène sur le territoire. L'objectif est de former les professionnels aux spécificités du gaz hydrogène, à ses utilisations, aux composants et aux interventions associées. Cette formation concerne différents acteurs tels que les techniciens travaillant sur

les véhicules, les responsables de la qualité, de la sécurité et de l'environnement, les pompiers, les ingénieurs et les chercheurs.

Pour répondre à ce besoin, l'État accompagnera la création de campus des métiers et qualifications, en apportant un soutien spécifique à l'ingénierie pédagogique et au développement de nouveaux programmes dans les établissements d'enseignement professionnel, supérieur et auprès des entreprises du secteur. Cela permettra de développer ensemble de nouvelles formations initiales et continues. Ces actions en faveur de la formation et des universités devront également encourager la mobilité des étudiants, tant au niveau national qu'europpéen, afin de répondre aux besoins du secteur d'activité.

2.3. Projet de loi climat

Le Conseil d'État s'est prononcé le 1er juillet 2021 dans le litige ayant opposé le gouvernement français à la commune française de Grande-Synthe concernant l'inaction climatique de l'État français. Le Conseil d'État, après avoir donné un délai de trois mois au Gouvernement dans le but de justifier son refus de mettre en place des mesures supplémentaires portant sur la réduction des émissions de gaz à effet de serre, n'a pas été persuadé par les arguments avancés. Par conséquent, il a commandé le Gouvernement français de prendre des mesures nécessaires en vue d'atteindre l'objectif de réduire les émissions d'ici 2030. Ladite décision intervient dans un contexte intéressant, puisque la même semaine, le Haut Conseil pour le Climat avait publié son rapport annuel, mettant en lumière que les efforts actuels sont insuffisants dans le but de garantir l'atteinte des objectifs, et ce d'ici 2030. Parallèlement, le Sénat français a terminé sa première lecture du projet de loi dite « Climat et Résilience »⁵ et l'Union Européenne a formellement adopté la « loi européenne sur le climat »⁶.

Tous ces évènements centrés plus particulièrement sur la politique climatique sont le reflet des discussions ayant eu lieu, tant au niveau national en France qu'au niveau européen. En ce sens, la nécessité d'agir est largement reconnue et aucune institution ne veut être reconnue comme celle qui bloque l'action climatique. La loi Climat et Résilience, avec l'objectif d'enrayer ou du moins de limiter le dérèglement climatique, de nombreuses mesures portant sur la production d'hydrogène.

2.4 Plan de déploiement de la filière hydrogène

Un plan de déploiement a été élaboré pour soutenir le développement de la filière hydrogène en France, car cette ressource est perçue comme une solution prometteuse pour la transition énergétique et la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

Étape 1 : Mise en place d'un cadre réglementaire et législatif favorable

La première étape consiste à mettre en place un cadre réglementaire et législatif favorable. Cela comprend le développement de normes et de réglementations spécifiques pour garantir la sécurité et la qualité des infrastructures liées à l'hydrogène. Il est également essentiel de

⁵ Loi n°2021-1104 du 22 août 2021 portant loi relative à la lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets.

⁶ Règlement du Parlement Européen et du Conseil modifiant le règlement (UE) 2018/842 relatif aux réductions annuelles contraignantes des émissions de gaz à effet de serre par les États membres de 2021 à 2030 contribuant à l'action pour le climat afin de respecter les engagements pris dans le cadre de l'accord de Paris.

favoriser la coopération entre les différents acteurs de la filière, tels que les entreprises, les institutions de recherche et les pouvoirs publics. Enfin, des incitations fiscales seront proposées afin de stimuler les investissements dans la filière hydrogène.

Étape 2 : Soutien à la recherche et au développement

La deuxième étape comprend un soutien accru à la recherche et au développement. Cela implique d'augmenter les financements dédiés à la recherche et au développement des technologies liées à l'hydrogène, en mettant l'accent sur la production, le stockage et la distribution. Il est également prévu de créer des partenariats entre les acteurs publics et privés afin de développer des projets pilotes et des démonstrateurs. Parallèlement, des mesures seront prises pour soutenir la formation et favoriser le développement de compétences spécifiques à la filière hydrogène.

Étape 3 : Développement des infrastructures de production et de distribution

La troisième étape projette un développement des infrastructures de production et de distribution. Cela implique l'établissement d'un plan national pour déployer ces infrastructures, en privilégiant les technologies les moins émettrices de CO₂. Il est essentiel de favoriser le développement de la production d'hydrogène vert à partir d'énergies renouvelables telles que l'éolien et le solaire. De plus, des réseaux de distribution adaptés aux besoins des différents secteurs d'application de l'hydrogène, tels que le transport et l'industrie, seront mis en place.

Étape 4 : Intégration de l'hydrogène dans les secteurs clés de l'économie

La quatrième étape concerne l'intégration de l'hydrogène dans les secteurs clés de l'économie. Cela implique la promotion de l'utilisation de l'hydrogène comme carburant dans les transports, en mettant l'accent sur les transports publics, les véhicules utilitaires et les poids lourds. Il est également prévu de soutenir l'intégration de l'hydrogène dans les processus industriels, notamment dans les secteurs à forte intensité énergétique tels que la sidérurgie et la chimie. Par ailleurs, des explorations seront menées pour identifier les opportunités d'utilisation de l'hydrogène dans le secteur du bâtiment, notamment pour le chauffage et la production d'électricité décentralisée.

Étape 5 : Communication et sensibilisation

La cinquième étape porte sur la communication et la sensibilisation. Il est prévu de mettre en place des campagnes de communication afin d'informer le grand public sur les avantages et les enjeux de la filière hydrogène. Des événements, des conférences et des formations seront également organisés pour faciliter les échanges entre les différents acteurs de la filière et partager les meilleures pratiques. De plus, il sera encouragé que les entreprises et les collectivités ayant adopté des solutions à base d'hydrogène partagent leurs retours d'expérience et témoignent de leurs succès.

Pour assurer la réussite de ce plan de déploiement, il est essentiel d'établir une collaboration étroite entre les acteurs de la filière hydrogène et les pouvoirs publics. Cette collaboration favorisera un environnement propice à l'innovation et à la croissance de cette filière prometteuse.

2.5 Cartographie des ressources françaises

L'utilisation de l'hydrogène peut permettre d'améliorer la qualité de l'air, et parallèlement de lutter contre le changement climatique. Le nombre d'infrastructures dédiées à l'hydrogène en France ne cesse d'augmenter.

Cette dernière a pour finalité d'atteindre la neutralité carbone d'ici l'année 2050. En ce sens, l'association France Hydrogène a récemment présenté sa plateforme « Vig'Hy » dont le but est de recenser les activités de la filière hydrogène à travers l'Hexagone. Cette initiative permet de faire connaître les métiers, les parties prenantes, les projets ainsi que les produits, et de les localiser par le biais d'une carte interactive.



Figure 12 : Plateforme Vig'HY

Source : www.vighy.france-hydrogene.org

La carte dessus montre le développement de l'hydrogène en France. En effet, la cartographie des ressources hydrogène en France permet d'avoir des :

- Chiffres clés.
- Un annuaire des entreprises.
- Des fiches pratiques en ce qui concerne la réglementation notamment sur le transport, ainsi que le stockage.

- Une rubrique pouvant permettre aux entreprises de publier des offres d'emplois ainsi que de stages.
- Une carte interactive de la France métropolitaine.

Cette cartographie facilitera les relations entre les parties prenantes pour accélérer le déploiement de l'hydrogène vert.

En outre, la France a annoncé que son plan hydrogène vert dispose d'un budget de 7 milliards d'euros, dans l'objectif de promouvoir les énergies bas Carbone, et afin de se passer des énergies primaires (gaz, charbon, pétrole) qui émettent des gaz à effet de serre, comme le charbon.

La France a de ce fait souhaité développer la filière hydrogène qui prévoit de passer de deux milles à dix mille emplois d'ici dix ans. Elle prévoit, entre autres, de parvenir à 700 000 tonnes d'hydrogène bas carbone pour l'horizon 2030.

2.6 Les acteurs français de l'hydrogène

2.6.1 Pouvoirs publics et institutions

- Gouvernement français : Le gouvernement soutient le développement de l'hydrogène décarboné par le biais de sa stratégie nationale et de mesures telles que des subventions, des incitations fiscales et des réglementations favorables.
- ADEME (Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie) : L'ADEME est un acteur clé dans le financement des projets liés à l'hydrogène et dans la promotion des technologies et des solutions innovantes.

2.6.2 Les centres de recherche et développement

Le développement de la filière hydrogène en France est soutenu par plusieurs centres de recherche et de développement, tels que :

- CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) : Le CEA mène des recherches dans le domaine de l'hydrogène, notamment sur la production, le stockage et les applications industrielles.
- CNRS (Centre national de la recherche scientifique) : Le CNRS est impliqué dans plusieurs projets de recherche liés à l'hydrogène, en collaboration avec des universités et des entreprises françaises et internationales.
- IFP Énergies nouvelles (IFPEN) : IFPEN développe des technologies innovantes pour la production et l'utilisation de l'hydrogène, notamment dans les secteurs des transports et de l'industrie.
- HyMEET (Hydrogen Material and Equipment Engineering and testing Center) : est le premier centre de tests, et d'ingénierie sur les matériaux liés à l'hydrogène de France.

2.6.3 Ressources naturelles et énergétiques

La production d'hydrogène décarboné repose sur l'utilisation d'énergies renouvelables, telles que l'énergie éolienne, solaire et hydraulique. La France possède un potentiel considérable dans ces domaines, ce qui favorise le développement de l'hydrogène.

- ☐ Énergie éolienne : La France dispose d'une capacité éolienne installée d'environ 17,6 GW en 2021, avec un potentiel de croissance important, notamment dans les zones côtières et les parcs éoliens en mer.
- ☐ Énergie solaire : La capacité solaire installée en France était d'environ 10,7 GW en 2021, avec un fort potentiel de développement, en particulier dans le sud du pays.
- ☐ Énergie hydraulique : La France est le deuxième producteur d'énergie hydraulique de l'Union européenne, avec une capacité installée d'environ 25,5 GW en 2021.

2.6.4 Entreprises et consortiums industriels

- ☐ Air Liquide : Leader mondial des gaz industriels, Air Liquide est un acteur majeur de la production et la distribution d'hydrogène en France et à l'étranger.
- ☐ Groupe EDF (Électricité de France) : est impliqué dans plusieurs projets liés à l'hydrogène, notamment dans la production d'énergie et le stockage.
- ☐ Engie : participe à plusieurs projets d'hydrogène, notamment dans les domaines de la production, du stockage et des infrastructures.
- ☐ Total Energies : investit dans le développement de l'hydrogène décarboné et participe à plusieurs projets en France et à l'étranger.
- ☐ Groupe Renault : développe des véhicules à pile à combustible à hydrogène et collabore avec d'autres acteurs de la filière pour développer des infrastructures de recharge.
- ☐ Groupe FORVIA : est un équipementier automobile d'envergure mondiale qui promeut la mobilité saine depuis plusieurs années avec la réduction d'émission de CO². L'entreprise développe des réservoirs à hydrogène pour les poids lourd et prochainement pour les véhicules utilitaires.
- ☐ Alstom : est un leader dans le développement de trains à hydrogène et a lancé le premier train à hydrogène commercial, le Coradia iLint.

2.6.5 Quelques projets en cours de déploiement

2.6.5.1 Dans le transport

- ☐ La création de stations-service à hydrogène pour les voitures, les bus et les camions comme propose la société McPhy.
- ☐ Le développement de trains à hydrogène, comme le projet Hydrail piloté par la SNCF.

- ☐ L'exploration de l'utilisation de l'hydrogène pour les navires et les avions.

2.6.5.2 Dans l'industrie

- ☐ Le projet H2V Industry, qui prévoit la construction d'une usine de production d'hydrogène décarboné pour les industries chimiques et de raffinage.
- ☐ Le projet SIDERWIN, qui vise à développer un procédé de production d'acier à base d'hydrogène décarboné.
- ☐ Le projet Jupiter 1000, qui vise à développer un système de stockage d'énergie à grande échelle basé sur l'hydrogène.
- ☐ Le projet GRHYD, qui étudie l'injection d'hydrogène dans les réseaux de distribution de gaz naturel.

2.6.5.3 Les strats-ups et PME innovantes

De nombreuses start-ups et PME françaises travaillent sur des technologies et des applications innovantes liées à l'hydrogène :

- ☐ McPhy : McPhy est un spécialiste des équipements de production et de stockage d'hydrogène, notamment les électrolyseurs et les stations de recharge.
- ☐ Symbio : Symbio développe des piles à combustible pour les véhicules électriques à hydrogène et collabore avec des constructeurs automobiles tels que Stellantis, Faurecia et Michelin.
- ☐ Lhyfe : Lhyfe produit de l'hydrogène vert à partir d'énergie éolienne et solaire et travaille sur des projets de déploiement en France et à l'étranger.

2.6.5.4 Les réseaux et associations professionnelles

Plusieurs réseaux et associations professionnelles soutiennent le développement de la filière hydrogène en France, parmi lesquels :

- ☐ France Hydrogène (anciennement AFHYPAC) : France Hydrogène est l'association nationale représentant les acteurs de la filière hydrogène en France. Elle promeut le développement de l'hydrogène décarboné et soutient les entreprises et les projets innovants.
- ☐ Hydrogen Europe : Hydrogen Europe est l'association européenne représentant les entreprises et les organisations travaillant dans le secteur de l'hydrogène. Elle soutient le développement de l'hydrogène en France à travers des initiatives européennes et internationales.

2.6.5.5 Le secteur du transport pour une mobilité saine

Le transport de l'hydrogène depuis sa production est une pièce maîtresse du puzzle dans la création d'une économie de l'hydrogène fonctionnelle et abordable en France⁷.

Le fait de déplacer l'élément le plus léger et le plus dense en énergie du monde efficacement n'est pas facile, et le coût et l'efficacité du transport du gaz des électrolyseurs à l'acheteur, que ce soit à travers les frontières internationales ou depuis les parcs éoliens, déterminera la place de l'hydrogène dans les futurs marchés de l'énergie.

L'hydrogène bas carbone contribue généralement à accélérer la transition énergétique, et à renforcer le tissu industriel de la France. En donnant différentes solutions de transport d'hydrogène, les missions des transporteurs sont importantes dans le déploiement de ladite filière. Il existe de nombreux acteurs qui visent à assurer le transport de l'hydrogène, comme :

- Air liquide, cette entreprise s'occupe non seulement de la production, mais également du stockage de l'hydrogène.
- Teréga.
- NPROXX.

De nombreux défis sont en lien au transport de l'hydrogène. Néanmoins, tous ceux-ci peuvent être résolus en augmentant considérablement la production nationale, et en réduisant la distance entre le producteur et le consommateur.

⁷ Hauet, J-P., Lacire, S. 2022. Hydrogène et transport de marchandise par camions. ANNALES DES MINES-RÉALITÉS INDUSTRIELLES.

3 La stratégie énergétique allemande

3.1. Un partenaire conscient de ses intérêts économiques

À la suite de la guerre, l'Allemagne a été soumise à une politique d'occupation restrictive. L'économie du pays était alors au plus bas, et il régnait la pénurie des denrées alimentaires.

Toutefois, depuis l'année 1950, le pays s'est engagé dans la mise en œuvre d'un plan de relance économique ambitieux, autrefois connu sous la dénomination de « Wirtschaftswunder » qui signifie « miracle économique ». Néanmoins, l'application de ce plan allait dépendre de plusieurs facteurs, dont :

- Une réforme monétaire intervenue en 1948 et qui aura eu pour effet d'introduire le Deutsche Mark. L'objectif était de changer la monnaie, qui, en raison de l'hyperinflation, n'avait plus de valeur.
- Dans le but de moderniser le secteur industriel, l'Allemagne a misé sur l'amélioration de ses infrastructures, ainsi que sur la production de biens susceptibles d'améliorer les rendements comme les produits chimiques et les machines/outils.
- Par ailleurs, l'Allemagne a également entrepris l'ouverture de ses marchés en référence au commerce international. Le pays s'est alors lancé dans la promotion des investissements étrangers, et a noué différentes relations commerciales à travers le monde.
- Par ailleurs, le pays a également pris en considération l'importance de la formation professionnelle. En cela, il a créé un système de formation professionnelle destiné à permettre le développement des ouvriers qualifiés.

À travers ces plans d'action, l'objectif de l'Allemagne était de dépasser la simple reconstruction du pays d'après-guerre, car il avait une vision économique plus ambitieuse, notamment celle qui vise l'intégration européenne, voire la coopération économique au niveau mondial.

D'ailleurs, le pari semble avoir été tenu si l'on se réfère à l'année 1957, date à laquelle, l'Allemagne a tenu un rôle essentiel dans le cadre de la création de la Communauté Economique Européenne (CEE) qui aura permis la formation de l'Union européenne.

L'Allemagne a également été un protagoniste important dans la mise en œuvre du système monétaire international. Il aurait alors, d'une certaine manière, contribué à la libéralisation des échanges commerciaux au niveau international.

Au final, les objectifs poursuivis par l'Allemagne après la Seconde Guerre mondiale ont été couronnés de succès, car :

- le pays a réussi à se relever avec une rapide reconstruction.
- Il a également innové et a ainsi pu moderniser son industrie.
- Il est parvenu à nouer des partenariats économiques au niveau mondiale, ce qui lui assure l'ouverture de ses marchés.

Désormais, l'Allemagne est considérée comme l'une des plus grandes puissances économiques mondiales. Les mesures qui ont été prises dès la fin de la Seconde Guerre mondiale, ont, finalement, permis le redressement rapide (en seulement quelques décennies) du pays.

Il a effectivement été rapporté qu' : « Entre 1950 et 1960, le PIB de la RFA a augmenté de plus de 10 % par an en moyenne. Cette croissance a permis de réduire le chômage, de stimuler les investissements et de moderniser l'industrie. »

Il faut dire que mise à part l'adoption d'une politique économique basée sur l'exportation, et notamment l'emploi d'une main-d'œuvre qualifiée. La RDA, à son époque, a déjà appliqué une économie socialiste centralisée et planifiée, qui était destinée à favoriser l'industrialisation rapide du pays. Cette orientation politique a ensuite été maintenue jusqu'en 1990, date de réunification de la RDA avec l'Allemagne de l'Ouest.

3.2 Une organisation bien fondée

L'Allemagne est, de nos jours, l'un des pays les plus imminents en matière de développement de la technologie de l'hydrogène.

Il a, récemment, soit en 2020, adopté une stratégie nationale de l'hydrogène, dans le but de favoriser le développement de l'hydrogène et notamment son usage en tant que source d'énergie saine et durable.

Il a été rapporté que : « Les objectifs de développement sont ambitieux et prévoient 5 GW d'ici 2030 et 10 GW pour 2035 (voire 2040) avec un investissement de près de 10 Milliards d'euros. (4,2 Md€ en plus de ce qui a été investi depuis 2006) »⁸

En fait, concrètement, la stratégie de développement de l'hydrogène a différents objectifs qu'il importe de détailler ci-après :

- Le développement du marché intérieur de l'hydrogène. Il s'agit de rendre l'hydrogène plus accessible en termes de coût. Il s'agit de permettre son usage aux secteurs des transports et de l'industrie.
 - La création des économies d'échelle grâce au développement et à l'exportation des technologies liées à l'hydrogène vert à travers une solide base industrielle.
 - La planification plus rapprochée des infrastructures de transport et de distribution.

⁸ h ps://www.tresor.economie.gouv.fr/Ar cles/c3a6d87f-5d74-4f2d-b9fc-fe8f4c250511/files/eb0db01f-4f0941b4-a16f-0c0048cc480a

- L'anticipation des besoins de recherche et le renforcement des compétences
- La sensibilisation afin de susciter l'intérêt des futurs consommateurs de technologies hydrogène
- La collaboration avec des partenariats potentiels dans le cadre de l'exportation d'hydrogène vert, ou encore dans le cadre de l'importation des technologies liées à l'hydrogène, comme le cas des technologies « Power to X »⁹.

3.3 Une stratégie de domination économique

Le commerce international de l'hydrogène et de ses produits est en phase de devenir un facteur industriel et géopolitique important, qui crée un besoin d'objectifs et décisions stratégiques, mais offre également de nouvelles opportunités pour les parties.

À travers sa stratégie, l'Allemagne entend renforcer l'industrie allemande et également sécuriser les opportunités que peut receler le marché mondial.

En fait, sa démarche vise à permettre aux entreprises allemandes d'occuper une place de choix dans le cadre de la concurrence pour le développement de l'exportation des technologies qui ont trait à l'hydrogène.

La vaste communauté des parties prenantes allemandes dans le domaine de la technologie de l'hydrogène sur le plan international constitue un facteur clé du succès de la montée en puissance de technologies de l'hydrogène en Allemagne. Elle contribue à améliorer les opportunités des entreprises allemandes sur ce marché tourné vers l'avenir.

La fabrication de composants pour la génération et l'utilisation d'hydrogène contribuera à la création de valeur régionale, et renforcera les entreprises actives dans ces domaines. Pour que cela se produise, une attention est portée à la mise en œuvre de la stratégie hydrogène et notamment dans les mesures de financement pour s'assurer que toutes les régions d'Allemagne bénéficient du nouveau potentiel de croissance de l'économie de l'hydrogène.

Il faut dire que les technologies apportent également une contribution importante face à l'impact économique de la pandémie de coronavirus, et jette une nouvelle base pour une orientation durable de l'industrie allemande.

Dans l'objectif d'assurer l'approvisionnement futur en hydrogène et ses produits dérivés, l'Allemagne a réfléchi sur la façon de le concevoir pour qu'il soit durable.

Il faut savoir, en effet, qu'à moyen et long termes, l'Allemagne importera d'importantes quantités d'hydroélectricité. Le pays partage avec d'autres futurs importateurs un intérêt dans la mise en place d'un réseau mondial de marché de l'hydrogène compte tenu de leur potentiel.

⁹ Power to X (<https://www.alfalaval.fr/industries/energies-et-des-utiles/sustainable-solutions/solutions-durables/energies-propres/power-to-x/>)

C'est en ce sens que l'Allemagne s'est intéressée aux pays qui produisent et exportent des combustibles fossiles. Ces pays sont intéressants, car ils représentent pour l'Allemagne des opportunités intéressantes pour convertir leurs chaînes d'approvisionnement à l'utilisation des énergies renouvelables et l'hydrogène, et ainsi devenir fournisseurs potentiels d'hydrogène.

3.4. Stratégie de développement Hydrogène

L'Allemagne est actuellement l'un des leaders mondiaux en matière de développement de la technologie de l'hydrogène. Elle a adopté une stratégie nationale de l'hydrogène en 2020, qui vise à promouvoir le développement et l'utilisation de l'hydrogène comme source d'énergie propre et durable. Les objectifs de développement sont ambitieux et prévoit 5 GW d'ici 2030 et 10 GW pour 2035 (voire 2040) avec un investissement de près de 10 Milliards d'euros. (4,2 Md€ en plus de ce qui a été investi depuis 2006)

Plusieurs entreprises allemandes sont très impliquées dans le développement de la technologie de l'hydrogène, notamment Siemens, Linde, et ThyssenKrupp. L'Allemagne dispose d'un réseau de stations de recharge d'hydrogène en expansion rapide et soutient la recherche et le développement de technologies d'hydrogène, telles que les piles à combustible.

Cette stratégie de développement de l'hydrogène vise à :

- Développer le marché intérieur de l'hydrogène en le rendant plus abordable, afin d'atteindre une masse critique, en particulier dans les secteurs de l'industrie (acier, chimie) et des transports (surtout lourds : l'aviation, le maritime, le train, les bus et poids lourds, mais aussi les véhicules utilitaires/particuliers dans le cadre de flottes commerciales)
- Générer des économies d'échelle en développant les technologies liées à l'hydrogène vert, en s'appuyant sur la base industrielle solide, afin de pouvoir les exporter
- Planifier les infrastructures de transport et de distribution le plus en amont possible
- Anticiper les besoins de formation et renforcer les dotations de la recherche
- Influencer les normes et les futurs acheteurs de technologies hydrogène étrangers
- Nouer des partenariats avec les possibles futurs pays exportateurs d'hydrogène vert et importateurs de technologies liées à la production et la chaîne logistique d'hydrogène (incluant les technologies « Power to X »).

La stratégie a été plutôt bien reçue par l'industrie, en particulier dans les secteurs de l'acier et de l'automobile, ainsi que par la presse.

L'Allemagne s'est engagée à atteindre la neutralité carbone d'ici 2045 et l'hydrogène est considéré comme un élément clé de cette transition. Cette transition ne se fera pas sans le développement des énergies renouvelables et décarbonées. Le 15 avril 2023, les 3 dernières centrales nucléaires allemandes en activité ont été mis à l'arrêt, aboutissement de 20 ans de

désengagement politique volontaire, accéléré depuis la catastrophe de Fukushima en 2011, pour favoriser les énergies renouvelables. (En 2021, les énergies renouvelables représentaient 35% de la production d'électricité allemande)

3.5. Programme de recherche allemand dans le domaine énergétique

Le système énergétique de demain sera fondamentalement différent de celui d'aujourd'hui, il sera caractérisé par :

- Une sécurité d'approvisionnement élevée.
- Des mesures de protection du climat efficaces.
- Un approvisionnement énergétique économiquement viable.

La durabilité à long terme de la transition énergétique est essentielle pour maintenir l'Allemagne en tant qu'espace économique et industriel compétitif. Le gouvernement fédéral soutient la recherche et le développement dans le domaine des technologies énergétiques futures. Dans cet esprit, le gouvernement allemand encourage les entreprises et les institutions de recherche à étudier et développer de nouvelles technologies pour l'approvisionnement énergétique de demain, à travers le 7ème programme de recherche énergétique (2023).

Ce soutien continu à la recherche et à l'innovation par le biais du programme de recherche énergétique est un élément stratégique de la politique énergétique du gouvernement fédéral. Le 7ème programme de recherche énergétique définit les orientations et les priorités actuelles de la politique allemande en matière de promotion des technologies énergétiques innovantes. Les mesures de soutien sont particulièrement axées sur les technologies répondant aux exigences de la transition énergétique, avec une attention particulière portée à l'efficacité énergétique et aux énergies renouvelables.

Cela inclut des technologies de production d'électricité éolienne et photovoltaïque, l'augmentation de la part des énergies renouvelables dans le secteur de la chaleur, l'optimisation énergétique des bâtiments et des quartiers, ainsi que l'efficacité énergétique dans l'industrie. Des questions systémiques telles que l'intégration de nouvelles technologies énergétiques, les réseaux intelligents et le stockage d'énergie, ainsi que l'interconnexion des secteurs, sont également mises en avant.

Depuis le lancement du premier programme de recherche énergétique en 1977, le gouvernement fédéral a subventionné plus de 17 300 projets de recherche énergétique non nucléaire, pour un montant d'environ 12 milliards d'euros au cours des 40 dernières années. Le rapport fédéral annuel sur la recherche énergétique fournit un aperçu détaillé de la politique de soutien du gouvernement fédéral en matière de recherche énergétique. Il présente de manière transparente les progrès réalisés et les développements actuels en matière de soutien à la recherche. Le rapport fédéral sur la recherche énergétique met également à jour les données chiffrées concernant le programme-cadre européen de recherche et la recherche énergétique des Länder fédéraux.

3.6. Promotion de recherche – Piles à combustible et technologies de l'hydrogène

Dans la perspective d'un système d'approvisionnement énergétique qui tienne compte de l'objectif d'optimiser la consommation d'énergie primaire tel qu'il est fixé dans le concept

énergétique, il convient de combiner la production d'électricité et l'utilisation de la chaleur produite en même temps, dans la plupart des cas, en misant sur des procédés de cogénération. L'utilisation de piles à combustibles dans ce contexte s'impose notamment en raison de son rendement électrique très élevé par rapport à d'autres technologies voire son indice de cogénération très élevé.

Depuis de nombreuses années, la pile à combustible est développée en Allemagne tant pour la production d'électricité décentralisée que pour l'emploi dans les groupes de propulsion dans les véhicules. La pile à combustible est caractérisée par un rendement plus élevé par rapport à d'autres processus thermiques. Son rendement reste élevé également en conditions de charge partielle et dans des unités de petite taille, ce qui représente un avantage particulier.

Compte tenu du fort potentiel d'exportation des technologies liées à la production d'hydrogène, le gouvernement fédéral entend renforcer le site de production allemand et développer le plus possible son leadership technologique. La recherche et le soutien à l'innovation doivent permettre de réduire nettement les coûts encore élevés de l'hydrogène renouvelable.

Le ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie (BMWi) apporte son soutien à la recherche et au développement de la technologie de l'hydrogène et des piles à combustible dans le cadre du « programme d'innovation national » (NIP) dédié à ces technologies, lancé en 2006 par le BMWi. Cela témoigne de l'engagement du ministère à promouvoir et à encourager les avancées dans ce domaine.

Le programme NIP2, qui fait suite au programme précédent, se déroulera de 2016 à 2025. Il repose sur la maturité de la technologie et la disponibilité des équipements de première génération sur le marché. En vue de la commercialisation imminente à grande échelle, il est essentiel de coordonner les efforts nationaux entre les scientifiques, l'industrie et les autorités publiques au sein d'un seul programme commun.

L'objectif principal consiste à favoriser le développement des innovations liées à l'hydrogène et aux piles à combustible qui ne sont pas encore commercialisées, ainsi qu'à établir les infrastructures requises. De plus, il s'agit de promouvoir la mise sur le marché des technologies matures en mettant en place des instruments et des mesures appropriés.

Le ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie (BMWi) soutient activement ces objectifs à travers son programme de recherche sur l'énergie. Ce programme vise à promouvoir la recherche et le développement en tant que fondement des futures applications dans divers domaines tels que les transports, la production d'hydrogène, l'approvisionnement énergétique des bâtiments résidentiels, les applications industrielles, les marchés spécifiques pour les piles à combustible, ainsi que les aspects transversaux liés à ces domaines.

Le couplage des secteurs et les technologies de l'hydrogène sont également des domaines clés abordés dans le cadre des "laboratoires vivants de la transition énergétique". Ce programme, qui fait partie des initiatives de financement du gouvernement fédéral en matière de recherche énergétique, vise à soutenir l'introduction sur le marché de technologies énergétiques innovantes et à relever les défis liés à la transformation de l'approvisionnement énergétique.

Les "laboratoires vivants de la transition énergétique" sont une initiative qui rassemble les politiques industrielles, climatiques, énergétiques et d'innovation, afin de relever les défis liés à la transition énergétique dans des domaines cruciaux tels que la décarbonisation du secteur

de la chaleur, des transports et des processus industriels, en réponse aux enjeux climatiques pressants.

4. Les partenaires stratégiques de l'Allemagne

4.1. La Nouvelle-Zélande

En 2022, trois coopérations entre l'Allemagne et la Nouvelle-Zélande ont débuté leurs recherches sur l'hydrogène vert, se concentrant sur la production, le stockage et la distribution de ce gaz en tant que source d'énergie. Le projet "HighHy" se concentre sur l'électrolyse AEM (à membrane échangeuse d'anions), qui ne nécessite pas de métaux précieux coûteux et rares, mais qui est moins efficace que d'autres procédés. L'objectif de cette coopération entre la Société Fraunhofer, l'université de Bayreuth et les universités de Canterbury, d'Auckland et de Wellington, est de développer des catalyseurs en nickel et en manganèse hautement performants.

Un projet mené par le centre Helmholtz Hereon et l'University of Otago étudie comment les alliages fer-titane peuvent être utilisés pour stocker l'hydrogène. Dans le cadre du projet "HINT", le Centre aérospatial allemand (DLR) collabore avec les universités de Canterbury et d'Auckland pour étudier la production à faible coût et l'intégration de grandes quantités d'hydrogène vert dans les systèmes en Allemagne et en Nouvelle-Zélande.

Ces trois consortiums bénéficient du soutien du ministère fédéral de l'Éducation et de la Recherche (BMBF) jusqu'en 2025, avec un financement de 1,2 million d'euros. L'objectif de ces coopérations est de développer des avancées technologiques dans le domaine de l'hydrogène vert, en mettant l'accent sur des procédés de production efficaces, des méthodes de stockage améliorées et l'intégration de grandes quantités d'hydrogène vert dans les systèmes énergétiques des deux pays.

4.2. L'Australie

L'Australie et l'Allemagne sont partenaires dans la production d'hydrogène vert, avec la possibilité de transporter le gaz depuis l'Australie jusqu'en Allemagne par bateau. Des experts de l'industrie ont étudié la faisabilité d'établir une chaîne logistique pour ce transport, avec des résultats positifs jusqu'à présent. L'étude est financée par le BMF (ministère fédéral des Finances) à hauteur de 1,7 million d'euros et est coordonnée par acatech (Académie des sciences techniques), en collaboration avec la Fédération de l'Industrie allemande (BDI) et l'Université de New South Wales du côté australien. En février 2022, le projet "HyGATE" (GermanAustralian Hydrogen Innovation and Technology Incubator) a été lancé par le BMBF (ministère fédéral de l'Éducation et de la Recherche) en coopération avec l'Australian Renewable Energy Agency (ARENA). L'objectif de ce projet est d'importer de l'hydrogène en exportant les technologies allemandes pour contribuer à la protection du climat.

4.3. Le Canada

Depuis octobre 2022, l'Allemagne et le Canada collaborent dans des projets de recherche sur l'hydrogène vert. Depuis 2020, dix projets ont été financés pour renforcer les réseaux de recherche germano-canadiens sur l'hydrogène, grâce à des mesures de soutien bilatérales avec le Natural Sciences and Engineering Research Council (NSERC). Cette coopération se distingue par l'intégration des petites et moyennes entreprises (PME) des deux pays. L'objectif principal

de cette collaboration est de créer une chaîne logistique transatlantique pour l'hydrogène vert. Les premières livraisons d'hydrogène du Canada vers l'Allemagne devraient commencer à partir de 2025. Les deux pays ont un partenariat de 50 ans dans le secteur des technologies de demain, ce qui témoigne de leur engagement commun dans le développement de technologies avancées.

5. L'Afrique, un partenaire stratégique déjà convoité

5.1. L'hydrogène, un potentiel de développement économique

On reconnaît désormais à l'Afrique un grand potentiel dans le secteur de l'hydrogène vert. C'est d'ailleurs ce qui motive les investisseurs qui se font de plus en plus nombreux à vouloir nuer des partenariat s en Afrique.

Ceci est d'autant plus pertinent lorsqu'il a été révélé qu' : « Exploiter l'énergie de l'Afrique pour produire 50 tonnes d'hydrogène vert par an d'ici 2035 peut contribuer à sécuriser l'approvisionnement mondial en énergie, à créer des emplois, à décarboner l'industrie lourde, à renforcer la compétitivité mondiale et à transformer l'accès à l'eau potable et à l'énergie durable. »

De ce fait, l'Afrique est devenue la sureté pour l'accessibilité de l'énergie verte aussi bien dans le continent qu'au niveau international. Une étude intitulée « Africa's extraordinary Green Hydrogen Potential » révèle l'étendue des possibilités d'investissement en terme technique, environnemental et économique dans l'objectif de développer le commerce.

L'Allemagne a, par exemple, annoncé son soutien aux ambitions du Kenya en matière d'hydrogène, avec une promesse récente d'environ 112 millions d'euros pour aider le Kenya à mettre en œuvre le passage à un secteur énergétique 100 % dépendant des énergies renouvelables d'ici 2030.

Le « Partenariat pour le climat et le développement » se concentrera sur la création d'emploi, mais également et sur l'expansion des énergies renouvelables, du réseau électrique et de la production d'hydrogène.

Dans une même mesure, un partenariat sur l'hydrogène entre l'Allemagne et la Namibie a été signé. Ce qui fait de l'Allemagne le premier pays à former officiellement un partenariat hydrogène avec la Namibie. En ce sens, le pays a fourni jusqu'à 40 millions d'euros de financement dans le cadre de la relance économique, en guise de contribution pour financer une étude de faisabilité pour la mise en œuvre de projets pilotes conjoints et renforcer le renforcement des capacités.

À travers ces types d'accord, l'Allemagne veille à ce que ses marchés locaux opèrent une transition énergétique dans les pays partenaires. De leurs côtés, ces pays pourront également bénéficier à long terme des relations commerciales existantes.

En définitive, le commerce international de l'hydrogène et des produits synthétiques dérivés créera non seulement de nouvelles relations commerciales pour l'Allemagne, mais facilitera également une plus grande diversification des sources d'énergie et des voies de transport, et améliorera ainsi la sécurité d'approvisionnement auprès du pays.

5.2. Des menaces concurrentielles émergentes

Au cours des dernières années, les principaux acteurs européens de l'hydrogène et les institutions financières ont activement poursuivi des partenariats hydrogène avec certains pays africains¹⁰, avec l'Égypte, le Kenya et la Namibie en tête de liste de partenaires européens stratégiques, car ils constituent des concurrents imminents.

5.2.1. L'Égypte

En novembre 2022, en marge de la COP 27¹¹, la Commission européenne et l'Égypte ont signé une déclaration conjointe sur l'hydrogène renouvelable. C'est un accord qui, concrètement, vise la mise en place d'un partenariat stratégique sur l'hydrogène renouvelable. L'objectif étant de permettre aux deux parties d'accélérer la décarbonation de leurs systèmes énergétiques grâce au développement, à l'usage, et au commerce de l'hydrogène renouvelable.

L'Europe et l'Égypte se sont engagées à prendre les mesures nécessaires pour accélérer le déploiement de la production d'énergie renouvelable en tant qu'élément de la transition vers des systèmes énergétiques décarbonés.

Il importe de noter que la Banque Européenne pour la Reconstruction et le Développement (BERD) a soutenu le gouvernement égyptien dans la mise en œuvre de la stratégie hydrogène bas carbone lancée lors de la COP27. Elle s'est engagée à accorder un prêt de 80 millions de dollars à Egypt Green pour développer la première installation d'hydrogène vert égyptien.

5.2.2. Le Kenya

Au Kenya, la Banque Européenne d'Investissement (BEI) est devenue l'un des principaux promoteurs de l'hydrogène vert. Suite à son important soutien financier à l'énergie en Afrique à ce jour, comprenant plus de 5,3 milliards d'euros pour des investissements énergétiques à travers l'Afrique, dont 418 millions d'euros pour des investissements géothermiques, éoliens et solaires en tant qu'investissement dans le réseau au Kenya et en reconnaissance de l'exceptionnel les sources d'énergie renouvelables et la nécessité de développer le stockage composants, la BEI cherche à promouvoir le soutien à l'hydrogène vert investissement au Kenya par la signature d'une déclaration commune sur Hydrogène propre et renouvelable.

La déclaration conjointe fait suite à plusieurs décennies de coopération de la BEI avec le Kenya, et la communauté de l'hydrogène espère que la déclaration commune pourra contribuer à la mise en œuvre de projets de développement de l'hydrogène vert dans le cadre du Kenya Energy Sector Roadmap 2040.

Il vise à améliorer la compréhension de la meilleure façon d'identifier, de structurer, de débloquer et mettre en œuvre des investissements dans l'hydrogène vert.

La BEI entend mobiliser 5.3 milliards d'euros de subventions. 418 millions seront investis dans le réseau des énergies renouvelables au Kenya.

5.2.3. La Namibie

La Namibie fait également l'objet de plusieurs initiatives européennes. Ainsi, lors de la COP27, un protocole d'accord de collaboration stratégique entre l'UE et la Namibie sur le partenariat durable et les énergies renouvelables a été convenu.¹²

¹⁰ [L'Afrique, futur hub mondial de l'hydrogène vert ?](#) Le Point.

¹¹ La COP 27, Conférence des Nations Unies sur les changements climatiques (2022).

¹² [COP27 : L'union européenne a noué un partenariat stratégique](#) avec la Namibie sur les matières premières durables et l'hydrogène renouvelable.

L'un des objectifs de cette collaboration est d'assurer un approvisionnement sûr et durable en hydrogène renouvelable en Europe.

En janvier 2023, des représentants de la Commission européenne se sont rendus en Afrique australe pour renforcer les liens entre l'Europe et la Namibie. Il s'agissait de renforcer la coopération dans le cadre du Gateway, et également de discuter de la manière de faire avancer le protocole d'accord de la COP27.

L'Europe a confirmé qu'elle était prête à aider la Namibie à étendre sa capacité de production d'hydrogène vert.

Les discussions qui ont suivi ont exploré les opportunités et défis découlant du nouveau partenariat entre l'Europe et la Namibie, ainsi que les étapes clés d'une feuille de route vers la sécurisation de l'hydrogène vert

5.2.4. L'Afrique du Sud

Le gouvernement allemand a approuvé une subvention de 15,9 millions de dollars en faveur du groupe chimique Linde pour soutenir le projet HySHiFT, un projet d'hydrogène renouvelable à Mpumalanga en Afrique du Sud. Le projet est mené en collaboration avec Sasol, Enertrag et Hydrogen Energy. L'objectif du projet est de construire un électrolyseur de 200 MW pour produire de l'hydrogène vert, qui sera utilisé dans les installations existantes de Sasol pour produire un carburant aviation durable appelé E-Kerosene.

La subvention allemande soutiendra la première phase du projet, qui prévoit un électrolyseur de 40 MW. Cette annonce intervient également lors du lancement de l'appel d'offres inaugural de H2Global, visant à importer des dérivés d'hydrogène vert en Allemagne et dans l'Union européenne.

Le projet HySHiFT représente un partenariat entre l'Allemagne et l'Afrique du Sud pour développer une infrastructure d'hydrogène renouvelable et produire des carburants durables, contribuant ainsi à la transition énergétique et à la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

5.2.5. La Tunisie

La Tunisie a pris un engagement majeur dans le domaine de l'hydrogène vert en partenariat avec l'Agence allemande de coopération internationale, la GIZ, à partir du 28 juin 2022. Ce projet est réalisé en collaboration avec le ministère de l'Industrie, des Mines et de l'Énergie de la Tunisie et a pour objectif d'améliorer les conditions pour développer une chaîne de valeur basée sur l'hydrogène vert et ses dérivés. Il vise également à établir un hub technologique tuniso-allemand pour l'hydrogène vert.

En s'engageant dans cette voie, la Tunisie rejoint d'autres pays nord-africains tels que l'Égypte, l'Algérie et le Maroc, qui se sont déjà impliqués dans la production d'hydrogène vert. Par exemple, en mai 2022, la Mauritanie a signé un accord-cadre avec CWP pour son projet AMAN d'hydrogène vert d'une valeur de 40 milliards de dollars.

Dans le contexte de la crise énergétique qui affecte l'Union européenne et de la transition énergétique en cours, les pays membres ont de plus en plus recours aux ressources énergétiques disponibles en Afrique. La recherche de sources d'énergie plus propres et durables, telles que l'hydrogène vert, est devenue une priorité pour de nombreux pays afin de réduire leur dépendance aux combustibles fossiles et de lutter contre le changement climatique.

5.3. Les industries allemandes en première ligne

Il existe de nombreuses entreprises allemandes qui œuvrent pour le développement de la technologie de l'hydrogène. C'est par exemple le cas de Linde, Siemens, et ThyssenKrupp. Ces entreprises sont connues pour leurs éminences dans leur domaine d'activité.

Cela s'explique certainement par le fait que l'Allemagne détient un réseau de stations de recharge d'hydrogène qui est d'ailleurs en plein développement. De plus, le pays soutient activement la recherche dans le secteur des technologies d'hydrogène, comme le cas des piles à combustible.¹³

6. Autres projets dans le monde

6.1. Le Japon

La ville de Kawasaki, située dans la préfecture de Kanagawa, a lancé le projet "Kawasaki City Hydrogen Strategy" en 2015. Ce projet vise à créer une économie de l'hydrogène durable en utilisant l'hydrogène comme source d'énergie pour les véhicules, les bâtiments et l'industrie. La ville a construit un réseau de stations de recharge d'hydrogène et a également commencé à utiliser de l'hydrogène pour alimenter des bus, des taxis et des camions de livraison.²⁰

Le projet Hydrogen Energy Supply Chain (HESC) : il s'agit d'un projet visant à produire de l'hydrogène liquéfié à partir de charbon en Australie, à le transporter par navire au Japon, puis à le stocker et à le distribuer localement pour une utilisation dans des piles à combustible.²¹

Le projet de la région de Fukushima Hydrogen Energy Research Field (FH2R) est une installation de production d'hydrogène à grande échelle située dans la ville de Namie, dans la préfecture de Fukushima. Cette installation utilise de l'énergie solaire et éolienne pour produire de l'hydrogène en quantités importantes, qui peut ensuite être utilisé comme source d'énergie propre pour les véhicules, les bâtiments et l'industrie. La FH2R est considérée comme la plus grande installation de production d'hydrogène renouvelable au monde, avec une capacité de production de 1 200 mètres cubes d'hydrogène par heure. Ce projet est considéré comme un symbole de la reprise de la région de Fukushima après la catastrophe nucléaire de 2011.²²

²⁰ Source : <https://www.city.kawasaki.jp/en/page/0000038678.html>

²¹ Source : <https://www.hystra.or.jp/en/project/>

²² Source : https://www.nedo.go.jp/english/news/AA5en_100422.html

¹³ In a live H2 Mobility- Réseau de distribution d'hydrogène étendu à environ 400 stations d'ici 2023- condition préalable au succès commercial des véhicules électriques à pile à combustible(https://www.bfmtv.com/amp/economie/patrimoine/placements-epargne/linde-ag-plusieurs-grandesentreprises-ndustrielles-conviennent-d-un-plan-d-action-pour-la-construction-d-un-reseau-de-revitaillement-enhydrogene-en-allemande-informations-avec-materiel-supplementaire_AN-201309300284.html)

6.2. La Corée du Sud

Le projet Hydrogen Economy Roadmap de la Corée du Sud a été initié en 2019 dans le but de développer une économie de l'hydrogène en utilisant cette ressource comme source d'énergie pour les véhicules, les bâtiments et l'industrie. Le gouvernement sudcoréen a alloué un budget d'environ 2,3 milliards de dollars pour ce projet, d'ici 2022, dans le but de produire 6,2 millions de tonnes d'hydrogène renouvelable par an d'ici 2040. Le plan inclut également la construction de 450 stations-service d'hydrogène et la promotion de l'utilisation de l'hydrogène dans les transports publics, les camions de livraison et les navires.²³

La ville de Ulsan, située dans le sud-est de la Corée du Sud, est renommée en tant que centre industriel majeur du pays, abritant la plus grande concentration de raffineries de pétrole. Néanmoins, la ville a entrepris un projet ambitieux pour devenir la "ville de l'hydrogène" en utilisant cette ressource comme principale source d'énergie pour réduire les émissions de gaz à effet de serre. Ulsan a développé une vaste infrastructure de production d'hydrogène avec une capacité de 10 000 tonnes par an, destinée à alimenter des véhicules, des bâtiments et des industries locales. Dans le cadre de cette initiative, Ulsan prévoit également de mettre en place plus de 100 stations de recharge d'hydrogène d'ici 2025, afin de favoriser l'utilisation de cette énergie propre dans les transports publics et les véhicules privés. Le gouvernement sud-coréen soutient activement ce projet et a investi environ 160 millions de dollars pour contribuer à la construction de l'infrastructure hydrogène dans la ville.²⁴

²³ Source : <https://www.ifri.org/en/publications/editoriaux-de-lifri/edito-energie/south-koreas-hydrogen-strategy-and-industrial>

²⁴ Source : <https://www.intralinkgroup.com/getmedia/daeb142b-c1c2-420c-b3bc-93e2e36f4c94/Korean-Market-Intelligence-Report-Hydrogen-Economy-April-2021pdf>

Source : <https://www.iea.org/policies/6566-korea-hydrogen-economy-roadmap-2040>

6.3. La Chine

Dans la province du Shandong, située dans l'est de la Chine, le projet d'hydrogène vert vise à promouvoir une économie basée sur l'hydrogène renouvelable. Ce projet englobe la mise en place d'une infrastructure de production et de distribution d'hydrogène, ainsi que l'utilisation de cette ressource comme source d'énergie pour les transports, les bâtiments et l'industrie. Pour concrétiser cette initiative, le gouvernement du Shandong s'apprête à investir plus de 7 milliards de dollars dans le développement de l'industrie de l'hydrogène renouvelable au sein de la province. Ce projet est considéré comme un modèle illustrant l'usage de l'hydrogène pour réduire la dépendance de la Chine envers les combustibles fossiles, tout en contribuant à la réalisation des objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre du pays.¹⁴



Figure 13 : Projet de production d'hydrogène, province du Shandong
Source : www.lesechos.fr

La ville de Foshan, située dans la province du Guangdong, au sud de la Chine, a entrepris un projet ambitieux visant à promouvoir une économie de l'hydrogène en utilisant cette ressource comme source d'énergie pour les transports, les bâtiments et l'industrie. Lancée en 2019, cette initiative prévoit un investissement d'environ 63 milliards de dollars pour développer l'industrie de l'hydrogène dans la ville. Les principales composantes de ce projet comprennent la création d'une chaîne de production d'hydrogène à grande échelle, l'établissement d'un réseau de stations de recharge d'hydrogène et l'utilisation de l'hydrogène pour alimenter les bus, les taxis et les véhicules utilitaires de la ville. Par ailleurs, la ville de Foshan envisage également d'exploiter l'hydrogène pour le chauffage et la climatisation des bâtiments, ainsi que pour alimenter les équipements industriels. Cette initiative est considérée comme un projet d'envergure pour le développement de l'industrie de l'hydrogène en Chine, contribuant ainsi à la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans la ville de Foshan.¹⁵

¹⁴ Source : <https://www.lesechos.fr/industrie-services/energie-environnement/energies-renouvelables-la-chinelance-un-mega-projet-dhydrogene-vert-1339661>

¹⁵ Source : <https://meethydrogen.com/resource/foshan-the-hydrogen-technology-city>



Figure 14 : Train à hydrogène, ville de Foshan
Source : www.meethydrogen.com

6.4. Les Etats Unis d'Amérique

Le Département de l'énergie des États-Unis a mis en place le projet H2@Scale, une initiative visant à établir une économie d'hydrogène à grande échelle en utilisant cette ressource comme vecteur énergétique dans les domaines de l'électricité, de l'industrie, des transports et du stockage d'énergie. Ce projet comprend la production d'hydrogène à partir de sources renouvelables telles que l'énergie solaire et éolienne, ainsi que la capture et le stockage du dioxyde de carbone émis lors de la production d'hydrogène à partir de combustibles fossiles. L'objectif du projet H2@Scale est de réduire les coûts de production de l'hydrogène et de favoriser son adoption dans divers secteurs. Plusieurs entreprises, universités et laboratoires nationaux collaborent activement à cette initiative.¹⁶

¹⁶ Source : <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/h2scale>

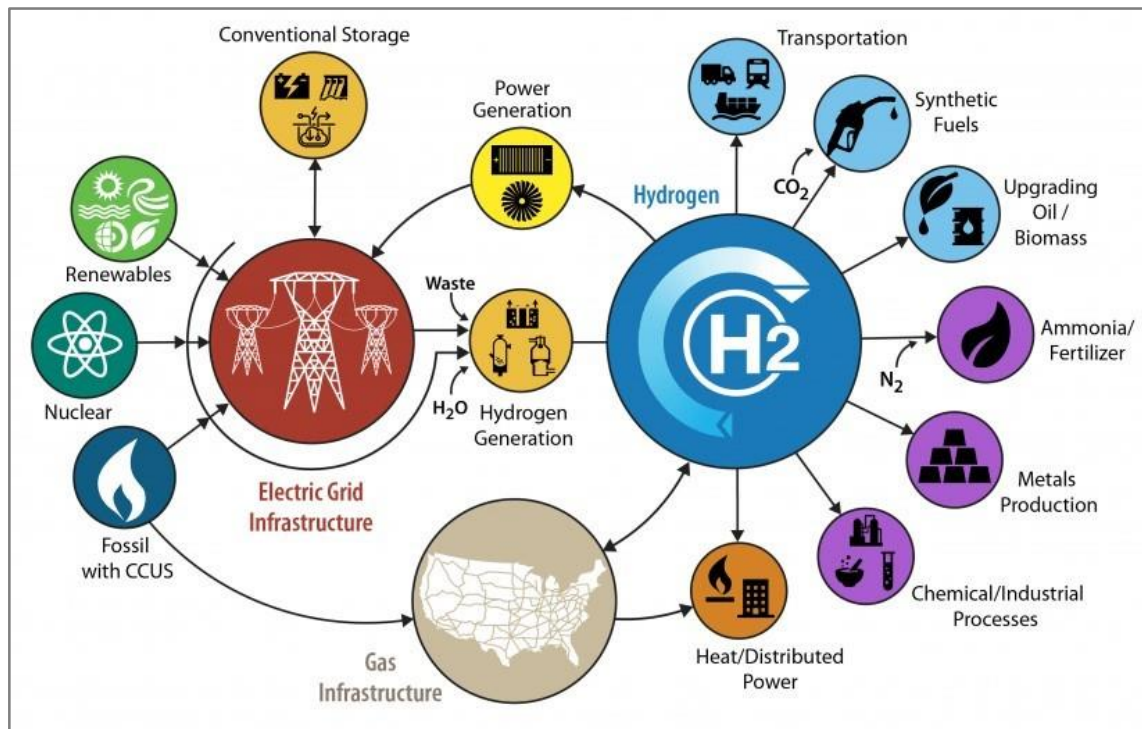


Figure 15 : Process du projet H2@Scale
Source : www.energy.gov



Toyota a entrepris le projet de développement d'un camion lourd à hydrogène, connu sous le nom de "Project Portal", dans le but de faciliter le transport de marchandises. Ce camion novateur utilise une pile à combustible à hydrogène pour générer de l'électricité qui alimente son moteur électrique. Les premiers prototypes ont été testés par Toyota dès 2017 dans les ports de Californie, où les émissions des camions diesel posent un problème majeur. Fort du succès initial, le projet s'est ensuite étendu à d'autres régions, et Toyota poursuit ses efforts pour améliorer la conception du camion afin de le rendre adapté à une utilisation plus généralisée. Avec une autonomie d'environ 300 miles et une capacité de charge de jusqu'à 80 000 livres, ce camion à hydrogène incarne une solution permettant de décarboner le transport de marchandises tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre. Toyota a l'intention de commencer la production en série de ces camions à hydrogène d'ici 2022.¹⁷

6.5. Le Canada

La ville de Vancouver, située en Colombie-Britannique, a mis en place un projet d'hydrogène vert dans le but de favoriser le développement d'une économie basée sur l'hydrogène renouvelable. Ce projet implique l'utilisation de l'hydrogène comme source

¹⁷ Source : <https://www.toyota.fr/decouvrez-toyota/actualites/project-portal>

d'énergie pour les transports, les bâtiments et l'industrie. La ville a investi dans la construction d'une station de recharge d'hydrogène et collabore avec des partenaires pour créer une flotte de véhicules à hydrogène destinés aux services municipaux. De plus, elle encourage l'utilisation de l'hydrogène dans les bâtiments en travaillant en étroite collaboration avec les propriétaires pour l'installation de systèmes de chauffage et de climatisation à base d'hydrogène. L'objectif principal de ce projet est de réduire les émissions de gaz à effet de serre de la ville de 80% d'ici 2050.¹⁸

Air Liquide Canada a lancé le projet d'hydrogène vert, une initiative visant à produire de manière extensive de l'hydrogène renouvelable à partir de l'énergie éolienne. Ce projet est centré autour d'une installation de production d'hydrogène située à Bécancour, au Québec, qui utilise l'énergie éolienne pour produire de l'hydrogène via l'électrolyse de l'eau. Avec une capacité de production de 20 mégawatts, cette installation se positionne comme l'une des plus grandes installations de production d'hydrogène renouvelable en Amérique du Nord. L'hydrogène produit est utilisé pour alimenter des véhicules à hydrogène ainsi que des équipements industriels, tout en étant également employé pour des applications de stockage d'énergie. Ce projet est considéré comme un exemple de l'utilisation de l'hydrogène renouvelable pour atténuer les émissions de gaz à effet de serre dans les secteurs industriels et de transport.¹⁹

6.6. L'Australie

Le gouvernement de l'Australie-Méridionale s'est engagé dans un projet d'hydrogène vert visant à stimuler le développement d'une économie basée sur l'hydrogène, en l'utilisant comme source d'énergie pour les transports, les bâtiments et l'industrie. Dans cette optique, le gouvernement australien a réalisé des investissements dans la construction d'une infrastructure de production et de stockage d'hydrogène, ainsi que dans la mise en place d'une flotte de véhicules à hydrogène destinés aux services publics. Par ailleurs, l'Australie-Méridionale utilise également de l'hydrogène pour alimenter des équipements industriels, notamment dans les secteurs minier et pétrochimique. L'objectif de ce projet est de réduire les émissions de gaz à effet de serre dans l'État tout en établissant une économie durable autour de l'hydrogène.²⁰

6.7. La Russie

L'initiative de la ville de Skolkovo pour l'hydrogène vert vise à développer une économie durable basée sur l'hydrogène dans cette localité proche de Moscou. Ce projet implique la mise en place d'une infrastructure de production d'hydrogène à grande échelle qui utilisera l'énergie solaire pour produire de l'hydrogène par électrolyse de l'eau.

L'hydrogène ainsi obtenu sera utilisé pour alimenter des véhicules à hydrogène, des équipements industriels et des bâtiments de la ville. En outre, Skolkovo prévoit de créer une flotte de véhicules à hydrogène destinés aux services publics. Cette initiative est considérée

¹⁸ Source : <https://news.gov.bc.ca/releases/2021EMLI0045-001306>

¹⁹ Source : <https://www.usinenouvelle.com/article/pourquoi-air-liquide-choisit-le-canada-pour-se-lancer-dans-l-hydrogene-decarbone.N811360>

²⁰ Source : https://www.energymining.sa.gov.au/__data/assets/pdf_file/0007/848446/Hydrogen-andRenewable-Energy-Act-Issues-paper.pdf

comme un élément clé pour aider la Russie à atteindre ses objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre, tout en favorisant le développement d'une nouvelle source d'énergie propre.

6.8. Le Danemark

Le Danemark et l'Allemagne ont convenu ce vendredi 24 mars 2023 de s'allier pour construire à l'horizon 2028 un gazoduc transportant de l'hydrogène « vert ». Au début de l'année, l'Allemagne avait déjà conclu un projet similaire avec la Norvège pour décarboner son économie.²¹

6.9. L'Allemagne aussi associée au projet H2Med

Ce nouvel accord fait écho au projet de pipeline européen d'hydrogène H2Med. Il vise à développer l'emploi de l'hydrogène sur le continent et va être étendu des pays du sud-ouest européen à l'Allemagne. Cet accord, annoncé fin janvier « renforce la dimension paneuropéenne de H2Med » et permet à l'Espagne de devenir une plaque tournante de l'énergie verte de la péninsule ibérique vers l'Europe centrale et du Nord.

Le gazoduc situé sous la mer Méditerranée transportera de l'hydrogène vert, fabriqué à partir de l'eau par électrolyse, selon un procédé utilisant des énergies renouvelables. Le gouvernement espagnol estime que H2Med pourra acheminer chaque année quelque deux millions de tonnes d'hydrogène vers la France, soit 10% des besoins estimés en hydrogène de l'Union européenne. Le projet devrait coûter 2,5 milliards d'euros.

6.10. La « Banque européenne de l'hydrogène »

La « Banque européenne de l'hydrogène », une nouvelle structure destinée à soutenir le développement de l'hydrogène vert, sera « opérationnelle » d'ici fin 2023 et lancera « dès l'automne » de premières enchères pour financer sur fonds de l'UE des projets de production. La création de cette institution publique avait été promise en septembre par la présidente de l'exécutif européen, Ursula von der Leyen, pour accompagner la transition énergétique avec quelque 3 milliards d'euros de financements.

« La Banque visera à combler le déficit d'investissement actuel dans le développement de l'hydrogène renouvelable et à garantir que l'UE conserve son avance dans cette technologie essentielle », a expliqué le vice-président de la Commission, Frans Timmermans. L'idée est « d'envoyer un signal clair que l'Europe est une région de production d'hydrogène ».

Faut-il importer massivement de l'hydrogène vert ou le produire localement ?

De nombreux pays, l'Allemagne en tête, entendent importer de très grands volumes d'hydrogène pour décarboner leur économie, depuis des régions du monde disposant d'énergies renouvelables très compétitives. Cette vision d'un commerce longue distance de la molécule verte ne fait pas l'unanimité, notamment pour des enjeux de souveraineté. La France, par exemple, défend une production locale. Au-delà de ces clivages géopolitiques, le

²¹ Source : <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/energie-environnement/le-danemark-vafournir-de-l-hydrogene-vert-a-l-allemande-via-un-gazoduc-956534.html>

transport d'hydrogène renouvelable rencontre un certain nombre d'écueils technique, économique ou encore climatique.²²



²² Source : <https://www.latribune.fr/entreprises-finance/industrie/energie-environnement/faut-il-importermassivement-de-l-hydrogene-vert-ou-le-produire-localement-le-debat-fait-rage-936772.html>

7. Quelle vision pour la France

7.1. Isolement de la France

Dès le début du sommet du Conseil européen des dirigeants européens, le président français avait mis la chancellerie allemande sur la défensive. En effet, la France avait déclaré que l'Allemagne était « isolée » dans son opposition à un plafonnement temporaire des prix du gaz, que l'Etat français privilégie comme moyen afin de contenir la crise énergétique endémique de l'Union Européenne.

Le président français a aussi utilisé le sommet de Bruxelles en vue d'anéantir efficacement les espoirs de l'Allemagne dans la construction du gazoduc Midcat qui, selon l'espoir de l'Allemagne, pourrait amener plus de gaz d'Afrique du Nord au cœur de l'Europe par le biais de la France et de l'Espagne.

La France a également annoncé de manière préventive la construction d'un autre projet énergétique qui prendrait beaucoup plus de temps que ne le souhaitait l'Allemagne. Au milieu des tensions grandissantes entre ces deux pays sur des questions politiques importantes à l'exemple de l'énergie ou encore la défense, ils ont annulé une réunion conjointe clé. Bon nombre d'experts estiment que la France et l'Allemagne ne devraient pas avoir ce genre de comportement, alors que la guerre fait rage en Europe et que les factures d'énergie deviennent incontrôlables. Cela pourrait même conduire à l'isolement de la France.

Des difficultés entre les deux plus grandes puissances de l'Union Européenne posent toujours un problème pour l'avenir énergétique de la France et généralement pour le fonctionnement plus large de l'UE.

la France est actuellement isolée, en raison de l'alliance de l'Allemagne, de l'Espagne et du Portugal pour la mise en place du gazoduc Midcat reliant la péninsule ibérique à l'Europe du Nord, acheminant du gaz algérien comme alternative au gaz russe. L'isolement de la France est principalement dû à son projet BarMar consistant en la construction d'un pipeline sous-marin. Or, les groupes environnementaux préviennent que ce serait une mauvaise idée de construire un pipeline sous-marin dans des zones marines protégées.

Sur les questions politiques clés portant sur la défense, la France reste toujours en retrait, aux yeux des Etats-Unis, même si ces derniers appellent les Européens à se mobiliser face à la menace russe.

Dans le même temps, l'Allemagne ne cesse d'augmenter sérieusement ses dépenses en matière de défense. Le budget militaire annuel régulier de l'Allemagne de 50 milliards d'euros, qui sera complété par un fonds spécial de 100 milliards d'euros pour l'armement qui sera versé au cours des cinq prochaines années, dépasse le budget de défense de 44 milliards d'euros de la France pour l'année prochaine.

L'Allemagne s'est finalement engagé à respecter l'objectif de l'OTAN de consacrer au moins 2 % de la production économique de son pays à la défense, ce qui signifie qu'à plus long terme, avec l'économie allemande qui devrait encore croître, le budget de la défense pourra atteindre plus de 75 milliards d'euros par an. En outre, l'Allemagne surclasse, et ce de manière considérable, la France dans ses contributions promises à la guerre en Ukraine.

7.2. Le pont africain s'écroule

La relation entretenue par la France n'est plus le même et tend même à s'écrouler. Parallèlement, de nouveaux partenariats se dessinent progressivement avec d'autres pays européens.

Récemment, un nouveau projet de gaz naturel liquéfié en Afrique a attiré l'attention des dirigeants polonais et allemands. Le projet initial près des côtes du Sénégal et de la Mauritanie devrait contenir environ 425 milliards de mètres cubes de gaz, cinq fois plus que ce que l'Allemagne dépendante du gaz.

Cela n'aidera pas à résoudre la crise énergétique en Europe, une crise ayant été déclenchée par la guerre entre la Russie et l'Ukraine. Pourtant, cela ne pourrait pas être plus opportun, dans la mesure où l'Europe cherche désespérément à réduire sa dépendance au gaz naturel russe, en vue :

- D'alimenter les usines.
- Produire de l'électricité.
- Chauffer les maisons.

Les récents événements illustrent le rôle vital que l'hydrogène vert peut jouer pour soutenir la sécurité énergétique des nations et des régions. Alors que les réserves de gaz naturel de l'Afrique sont vastes et que les pays d'Afrique du Nord comme l'Algérie ont déjà des gazoducs reliés à l'Europe, le manque d'infrastructures et les problèmes de sécurité ont longtemps empêché les producteurs d'autres parties du continent d'augmenter leurs exportations.

Ces derniers temps, l'Europe s'est efforcée de trouver des sources alternatives, alors que la Russie a considérablement réduit les flux de gaz naturel vers les pays de l'Union Européenne, déclenchant une flambée des prix de l'énergie et des attentes croissantes d'une récession. Les pays de l'UE se préparent donc à la possibilité d'une coupure complète de la Russie.

Pour trouver des solutions, les dirigeants européens ont afflué vers des pays comme la Norvège, le Qatar, l'Azerbaïdjan et plus spécifiquement ceux d'Afrique du Nord, où l'Algérie a un pipeline vers l'Italie et un autre vers l'Espagne.

L'Italie a signé un accord gazier correspondant à une valeur de 4 milliards de dollars avec l'Algérie, peu de temps après que l'Égypte ait conclu un accord avec l'Union Européenne et Israël, afin de stimuler les ventes de gaz naturel liquéfié. L'Angola a également signé un accord gazier avec l'Italie.

Les dirigeants égyptiens espèrent rapporter plus de 400 millions de dollars supplémentaires par mois en devises étrangères en réorientant 15 % de sa consommation intérieure de gaz vers l'exportation, ont rapporté les médias officiels.

Plus de 60 % de la consommation de gaz naturel de l'Égypte est encore utilisée par les centrales électriques pour faire fonctionner le pays. La majeure partie de son gaz naturel liquéfié est destinée aux marchés asiatiques.

Un nouvel accord tripartite verra Israël envoyer plus de gaz vers l'Europe via l'Égypte, qui dispose d'installations pour le liquéfier pour l'exportation par voie maritime. L'Union

Européenne a déclaré qu'elle aiderait les deux pays à augmenter la production et l'exploration de gaz.

Au Nigéria, des plans ambitieux n'ont pas encore donné de résultats malgré des années de planification. Le pays a exporté moins de 1% de ses vastes réserves de gaz naturel l'année dernière.

Somme toute, nous pouvons constater que l'Afrique a conclu de nouveaux partenariats avec de nombreux pays, autres que la France, ce qui amoindrit considérablement la relation entre ce dernier et les pays africains.

7.3. La dépendance économique

Tout au long de son premier mandat, le président Emmanuel Macron a eu pour objectif de revitaliser les relations diplomatiques de la France avec les pays d'Afrique. Certains aspects de ce pivot ont été conçus en vue d'aborder plus directement l'héritage du colonialisme français dans les pays francophones.

Celui-ci a aussi senti que la stature croissante de puissances non occidentales comme la Chine a donné à leurs homologues africains une plus grande latitude, dans le but d'entretenir des relations dans un contexte de concurrence diplomatique accrue avec bon nombre de pays, tant en Europe qu'ailleurs.

Dans la poursuite de la stratégie en question, il a cherché à promouvoir une vision de la diplomatie française avec l'Afrique par une aide étrangère accrue, mais également des liens plus solides entre les peuples, fondés sur un esprit de partenariat entre égaux. Les efforts de Macron ont créé une ouverture pour des relations renouvelées.

L'inertie bureaucratique et les cloisonnements dans les cercles de la politique étrangère française ont parfois signifié que la mise en œuvre des politiques en question a pris du retard. Néanmoins, l'accent mis par Macron sur la diplomatie économique est globalement similaire à l'approche de l'ancien président François Hollande et de l'ancien Premier ministre Laurent Fabius, bien qu'à certains égards, Macron ait mis l'accent sur l'aide au développement et d'autres outils financiers encore plus que ses prédécesseurs. Au cours de diverses tournées diplomatiques, le président a souligné l'expansion de la coopération économique bilatérale avec l'Afrique

Au cours des cinq dernières années, le budget d'aide au développement international de la France a considérablement augmenté, passant de 0,38 % du revenu national brut de la France en 2016 à 0,53 % en 2020, un chiffre qui devrait atteindre 0,7 % en 2025.

Tout ceci témoigne alors de la dépendance économique l'Afrique envers l'Hexagone, pouvant même être renforcé par une stratégie de souveraineté énergétique.

8. Stratégie de souveraineté énergétique

8.1. Des partenariats africains consolidés

La France, en raison des récents événements qui se sont produits sur la scène mondiale et sur la scène européenne, notamment la détérioration de sa relation avec l'Allemagne, a jugé bon de consolider ses partenariats avec l'Afrique. Le fait de renforcer les partenariats contribue considérablement à sécuriser l'approvisionnement de la France en d'hydrogène vert, mais aussi à :

- Créer des emplois.
- Consolider la compétitivité de la France.
- Décarboner l'industrie lourde.
- Transformer l'accès à l'énergie durable.

Le continent africain dispose de la meilleure énergie solaire au monde et le fait de transformer l'énergie en question en hydrogène vert peut être bénéfique pour la France, car cela permettrait de :

- Renforcer la sécurité énergétique du pays.
- Réduire, et ce de manière considérable, les émissions ainsi que la pollution.
- -Décarboner les transports ainsi que l'industrie.

La France n'a cessé récemment de consolider ses partenaires dans l'Afrique afin de mieux exploiter le potentiel de ce continent en matière d'énergies renouvelables ainsi que de produire de l'hydrogène vert à grande échelle et à faible coût. Ce qui lui permettrait notamment de rivaliser avec l'Allemagne, qui tend également ces dernières années à mettre en place une collaboration avec les pays africains pour produire ce type d'hydrogène.

Sans nul doute, l'Afrique a un réel potentiel dans le domaine de l'hydrogène vert, montrant alors des opportunités concrètes afin de transformer l'accès à l'énergie verte au niveau national et international. L'Afrique fait partie des continents le mieux doté de meilleures ressources au monde en énergie renouvelable.

La France veut alors libérer le potentiel en hydrogène vert de ce continent à travers une étroite collaboration.

Les études en ce qui concerne le surprenant potentiel de ce continent dans le domaine de l'hydrogène vert met en avant les opportunités que la France doit saisir, afin de faire face aux pays rivaux, comme l'Allemagne. Il importe même de souligner que la Banque européenne d'investissement se félicite d'avoir l'opportunité de travailler avec des partenaires africains, afin de faire de cette ressource énergétique une réalité.

Le directeur général de l'Alliance solaire internationale déclare que : « La technologie solaire photovoltaïque nous fournit l'électricité la moins chère. Elle coûtera moins de 2 EUR par kilogramme dans plusieurs pays africains d'ici à 2030, soit un prix nettement inférieur à l'hypothèse actuelle de 5 EUR, qui contraste fortement avec les 60 à 70 USD payés pour un baril de pétrole. Grâce à cette électricité peu onéreuse et à la baisse des coûts des électrolyseurs, la prochaine étape consiste à fournir un carburant propre, moins cher que tous les combustibles fossiles actuels. Cela nous permettra de décarboner le secteur de l'électricité

et la plupart des secteurs où il est difficile de réduire les émissions, comme les engrais, la fabrication d'acier et les raffineries ».

Le président d'HyDeal explique que : « Face aux crises énergétique et climatique mondiales, l'hydrogène vert compétitif à grande échelle permettra d'assurer un approvisionnement en énergie sûr, abordable et décarboné. Des pôles intégrés d'hydrogène réunissant des acteurs en amont, en milieu de chaîne et en aval sur la base de contrats d'achat de la production à long terme sont en train d'établir de puissants modèles économiques. Des pays africains pionniers comme la Mauritanie ouvrent la voie, ce qui prouve que l'Afrique peut aider la planète avec l'hydrogène vert, en s'assurant un avenir de développement industriel, une croissance rapide et propre pour tous et toutes ».

A noter que l'hydrogène vert est viable sur le plan économique, et cette ressource énergétique peut être même produite à moins de 2 euros par kilogramme en France. En d'autres termes, l'hydrogène vert est moins cher que l'énergie traditionnelle, communément appelée fossile, dont le coût s'élève à 60 dollars le baril.

De plus, en consolidant son partenariat avec l'Afrique, la France pourra aisément répondre à la demande énergétique locale ; mais aussi à travers ce partenariat, elle peut envisager une exportation de l'hydrogène vert vers la plupart des marchés internationaux.

Toutefois, plusieurs facteurs doivent être réunis dans le but de permettre la production d'hydrogène vert en Afrique, comme :

- - Des programmes nationaux de réglementation, de planification, mais aussi d'incitation doivent mobiliser tous les investissements du secteur privé.
 - Les projets pilotes doivent prouver le succès en matière de production, du stockage, de distribution, mais aussi de l'usage de cette ressource énergétique, non seulement au stade de la démonstration, mais également à l'échelle commerciale.
 - Des partenariats qui sont fondés sur le marché sont indispensables afin de favoriser la demande, ainsi que la consommation d'hydrogène vert à grande échelle.
 - Renforcer la coopération dans le but de concevoir, de financer, de créer, mais aussi d'exploiter les infrastructures portant sur la production, le stockage ainsi que la distribution d'hydrogène vert.

Au vu de ce qui a été dit plus haut, force est de constater que nouer des partenariats avec les pays africains sera plus bénéfique pour la France, dans sa quête de ressource énergétique bas carbone et renouvelable.

8.2. Un littoral français correctement exploité

Le potentiel de développement de l'hydrogène vert est immense. Dans le secteur du transport, l'automobile, la navigation, l'aviation ainsi que les projets qui utilisent l'hydrogène comme source d'énergie ne cesse de se multiplier à travers le monde.

Néanmoins, l'approvisionnement de l'hydrogène vert qui est ultra léger et qui n'émet pas de CO₂ est relativement cher et emploie généralement du gaz produit avec des énergies fossiles. Aussi, il existe des entreprises en France qui se sont mises à la recherche d'une solution, dans le but de proposer d'importantes quantités d'hydrogène vert, produit à partir d'énergies renouvelables.

Pour ce faire, les entreprises françaises exploitent correctement le littoral. Branché à un parc éolien, bon nombreuses de sites emploient l'électricité provenant du vent pour isoler l'hydrogène à partir d'eau pompée en mer. L'eau de mer doit, de prime abord, être désalinisée et purifiée dans de grandes cuves ; par la suite, c'est un électrolyseur qui vient séparer les éléments.

Certaines de ces entreprises gardent secret les détails de la technologie qui ont réussi l'exploit de s'adapter à l'intermittence des éoliennes ; il importe de souligner que les photographies des équipements sont aussi interdites, et cela afin de se protéger de la concurrence.

Il existe de nombreuses entreprises à travers le monde qui produisent de l'hydrogène. Cependant, seules les entreprises françaises arrivent à sortir de l'hydrogène vert de cette manière, et à exploiter le littoral à bon escient.

Cela n'est pas chose facile. Les industries françaises capable d'une telle prouesse ont investi des millions d'euros pour arriver à un tel résultat, dont la grande majorité était réalisée pour résoudre les difficultés de recherche et de développement.

8.3. La sûreté globale des industries de l'hydrogène

Le développement de l'hydrogène en France ne peut être envisagé que sous l'angle d'un développement bas-carbone, fiable, accessible, et mais aussi sûr pour le pays, notamment pour l'environnement. Cela requiert des processus de sécurité qui sont dédiés à l'hydrogène sur l'ensemble des étapes du cycle de vie, comme :

- La production.
- Le stockage.
- Le transport.
- Les usages finaux.

Les recherches ont mis en avant que les principaux risques pouvant être associés à l'hydrogène sont le risque incendie, le risque d'explosion, ou encore la détérioration de la performance de l'ensemble des installations de production, en raison d'une mauvaise anticipation des interfaces, à l'instar de :

- La formation de mélanges hydrogène-oxygène ou encore hydrogène-air.
- Fuites d'hydrogène au niveau de l'atmosphère.

- Exposition des hydrures à l'eau ou à l'air.

La gestion des risques en question s'applique dans le courant de la chaîne de valeur :

- Durant la phase de conception : mise en place de matériaux adaptés, ainsi que d'un système de contrôle du procédé ;
- Au cours de la phase d'installation : les entreprises doivent procéder à un contrôle de l'étanchéité de l'ensemble des raccords de leur installation ;
- Pendant la phase d'exploitation : les entreprises concernées doivent faire leur maximum pour assurer la sécurité des utilisateurs finaux, des opérateurs ainsi que des équipes de maintenance.

Bien appréhendés depuis de nombreuses années, prendre en considération et maîtriser la sûreté de l'hydrogène sont actuellement éprouvés. Le principal enjeu se trouve aujourd'hui dans l'intégration fiable et sûre de l'hydrogène dans de nouveaux écosystèmes et équipements. Ces derniers sont déjà normés, car ils sont assujettis à des risques ainsi qu'à d'importantes contraintes.

Les acteurs concernés doivent alors gérer et introduire l'ensemble des exigences qui sont propres à l'hydrogène, en garantissant la démonstration, sans engendrer d'impact négatif sur les normes de sûreté et de sécurité qui sont déjà en place, et ce dans les divers secteurs.

9. Prospective horizon 2030, France-Allemagne

9.1. Prospective, définition et méthode

La prospective peut être définie comme une démarche méthodologique visant à explorer l'avenir en évaluant les tendances, les incertitudes et les enjeux qui peuvent façonner notre futur. Elle vise à anticiper les évolutions possibles et à élaborer des scénarios pour mieux comprendre les impacts potentiels de ces évolutions sur les décisions présentes.

La méthode de prospective repose sur plusieurs étapes clés :

- Identification de l'objet d'étude : Définir clairement le sujet ou le domaine d'étude pour lequel la prospective est réalisée, que ce soit dans le domaine technologique, économique, social ou environnemental.
- Collecte de données : Rassembler des informations pertinentes et variées sur les tendances actuelles, les innovations, les comportements sociétaux, les facteurs économiques, les politiques publiques, etc. Cette étape implique souvent une veille active et une analyse approfondie des données disponibles.
- Analyse des signaux faibles : Identifier les signaux faibles, c'est-à-dire les éléments discrets ou émergents qui pourraient indiquer des changements ou des ruptures potentielles dans le futur. Ces signaux peuvent être de nature technologique, sociale, économique ou culturelle.

- Construction de scénarios : En se basant sur les données et les signaux faibles, élaborer différents scénarios possibles d'évolution future. Les scénarios peuvent représenter des futurs contrastés, reflétant différentes visions ou hypothèses concernant les facteurs clés et les incertitudes identifiés.
- Analyse des impacts et des stratégies : Évaluer les implications des scénarios sur les plans stratégiques, politiques, économiques ou sociaux. Identifier les opportunités et les risques associés à chaque scénario et élaborer des stratégies d'adaptation ou d'action en conséquence.
- Communication des résultats : Présenter les résultats de la prospective de manière claire et accessible aux décideurs, aux acteurs concernés et au grand public. Mettre en évidence les principales conclusions, les incertitudes et les recommandations pour soutenir la prise de décision éclairée.

Il faut préciser que la prospective n'est pas une prédiction précise de l'avenir, mais plutôt une exploration systématique des possibilités futures. Elle vise à élargir la réflexion, à anticiper les défis et à fournir des informations utiles pour guider les décisions stratégiques et l'action à long terme.

9.2. La prospective énergétique

La prospective énergétique est une branche spécifique de la prospective qui se concentre sur l'exploration des évolutions futures du secteur de l'énergie. Elle vise à analyser les tendances, les enjeux et les scénarios possibles concernant la production, la distribution, la consommation et la transformation de l'énergie.

La prospective énergétique s'intéresse à la fois aux aspects techniques, économiques, environnementaux et sociaux de l'énergie. Elle prend en compte les nouvelles technologies, les politiques énergétiques, les changements de comportement, les contraintes environnementales et les facteurs économiques pour comprendre les futures dynamiques du système énergétique.

Les scénarios qui vous seront présentés ici n'ont pas pour but de prédire l'avenir, mais plutôt de mettre en évidence des possibilités d'orientations stratégiques.

9.3. Scénario 1 : Domination de la coalition des pays de l'Europe du Nord

Les conséquences du fiasco concernant le projet REPower EU qui prônait une énergie abordable, sûre et durable pour l'Europe. La Russie a su faire face à la stratégie de l'Union Européenne qui consistait à assécher financièrement l'état Russe en aidant économiquement l'Etat Ukrainien.

Les différents rapprochements politiques de la Russie avec le Venezuela, le Mali, et la Corée du Sud ont créé un enlisement de l'état de guerre en Ukraine. Cette situation économique a eu pour effet de créer des tensions politiques et sociales dans plusieurs pays Européens comme l'Allemagne, la France et l'Italie.

Par ce fait, nous avons déjà pu identifier la montée des parties radicales allemands au Bundestag avec 78 députés en 2020, mais la pression la plus importante fut celle du parti politique des verts allemands qui deviennent en 2024 la première force politique au parlement européen.

Cette position de l'Allemagne et la prolongation de sa récession économique l'a conduite vers la sortie de l'Union Européenne aux élections européennes de 2027. Ce séisme géopolitique a

eu pour effet de poser la question aux autres pays de l'Union Européenne des conséquences économiques et stratégiques de souveraineté.

C'est sans tarder qu'une coalition économique se crée entre l'Allemagne, les Pays-Bas, la Belgique et la Norvège appelée l'Union des Pays Européen du Nord (UPEN), portant comme projet d'envergure, l'EHB (European Hydrogen backbone) initié en 2023 ayant pour objectif de consolider la distribution d'hydrogène vert venu d'Afrique sur toute l'Europe par les installations de pipeline historiquement utilisées pour le transport de Gaz Naturel. Leur volonté clairement affichée de mettre de côté la France dans ce projet d'importation et de distribution, a pour conséquence de rendre la France dépendante du prix de l'hydrogène qui revient aux français à un coût de l'hydrogène de plus de quatre euros le Kg contre 1 euro pour les alliés de l'Allemagne. Le coût de l'énergie en France n'a eu que l'effet de renforcer le climat social déplorable déjà initié en 2018 avec les mouvements de gilets jaunes.

L'Allemagne a su anticiper la situation géopolitique de ses opposants économiques qui étaient censés être en apparence des partenaires industriels. Sa stratégie d'intégration de l'UE et le déploiement des partenariats avec les pays Africains dès 2022 étaient des signaux faibles pourtant à la vue de tous. La France, bien qu'ayant des projets en cours d'étude et une filière industrielle créative peine à trouver les financements nécessaires pour les concrétiser. La montée au pouvoir des partis politiques extrêmes en 2027 n'ont fait que renforcer le clivage du peuple français qui dirige le pays vers une politique patriotique, d'isolement géopolitique et économique, et perd ainsi la crédibilité des pays de l'Union Africaine sur le marché international d'importation d'hydrogène.



Figure16 : Projet Waterstof backbone

Source : www.economie.gouv.fr

Analyse des risques SWOT : Allemagne

Forces	Faiblesses
- Qualité des process industriels - Investissement massif dans les EnR - Réseau de pipeline existant	- Récession économique - Climat social dégradé - Pression des parties politiques écologistes

- Participation au projet du port de Rotterdam	- Importation de son hydrogène
Opportunités	Menaces
- dominer l'importation de l'hydrogène vert en Europe - Améliorer le pouvoir d'achat des Allemands - avoir une autosuffisance énergétique	- mouvements sociaux à répétition - Poursuite de sa récession économique - Emergence d'une concurrence énergétique transatlantique sur le continent Africain.

9.4. Scénario 2 : La France en tête des pays européens de la méditerranée

En ayant clairement identifié les intérêts stratégiques de l'Allemagne, tout d'abord en fragilisant les groupements industriels par entrée aux capitaux des industries françaises faisant ainsi ralentir leur développement, puis en allant massivement démarcher les pays nord-africains avec leur projet Power to X proposant la production d'électricité utilisé dans la production d'hydrogène vert ou d'ammoniac pour la fertilisation de leurs sols ou encore la production d'eau pure.

Les investissements massifs dès 2020 dans les EnR (Energies Renouvelables), cette stratégie détectée à juste valeur par la France a été confirmée avec, en 2027 lors de la proposition de loi obligeant tous les pays membres de l'Union Européenne à sortir du Nucléaire et fermer leurs centrales encore ouvertes.

Cette décision a eu pour effet la sortie immédiate de la France, suivis par l'Italie et l'Espagne créant ainsi la coalition des pays européens de la méditerranée composée de la France, de l'Espagne, de l'Italie, du Portugal, et de la Grèce. Le consortium économique du sud faisant opposition à la coalition des pays européens du nord avec en tête l'Allemagne et les Pays-Bas. Une telle alliance d'opposition stratégique permet un transport plus court depuis les gigafactories Espagnoles de production d'hydrogène issue directement de fours solaires par thermolyse ce qui rend la production d'hydrogène beaucoup plus rentable avec un prix compétitif à 1 euros le Kg d'hydrogène et se passant d'Electrolyseur.

L'Allemagne a été écartée du projet de pipeline H2med reliant Barcelone à Marseille pour la distribution d'hydrogène et pour faire opposition au projet EHB (European Hydrogen Backbone).

La contre-offensive de la France, soutenue par l'Etat français qui avait déjà débloqué en 2020 plus d'un milliard d'euros dans le projet de développement de minicentrales nucléaire lors du « plan France Relance », et après le succès du projet Nuward piloté par EDF en partenariat avec Framatome, le CEA, TechniAtome, et Naval Group, la première commercialisation fut un succès dès 2024. C'est en 2025 qu'EDF lance le déploiement à grande échelle des minicentrales

de production d'hydrogène vert appelées les SMR (small modular reactor) dans toutes les grandes villes françaises.

Le déploiement de toutes ces installations, a poussé l'Etat français à créer une Force Nationale de Protection de la Souveraineté Energétique (FNPE) constituée d'un pôle cyber, sécurité, sûreté, et maritime des sites stratégiques de production, ainsi que les réseaux de transport de l'hydrogène offrant une sécurité globale et maîtrisée de nos savoir-faire énergétiques et intérêts économiques.

Cette nouvelle force sera administré conjointement avec l'Autorité de Sûreté Nucléaire et le ministère de la défense. Ces équipes opérationnelles pourront aussi bien être déployées en France comme dans les pays partenaires où se trouveront nos alliés énergétiques principalement en Afrique bordant le Golfe de Guinée.

À la suite de la création du pipeline reliant l'Espagne au Maroc, la France est ses alliés économiques rendent moins compétitif la stratégie de l'Allemagne utilisant des routes maritimes beaucoup plus longues. Ces événements ont eu pour effet l'abandon des pays africains de la plupart des projets allemands. La construction du port de Rotterdam et sa digitalisation qui devait permettre de devenir le hub européen de l'hydrogène n'a fait que creuser la dette de l'Allemagne qui tente vainement de faire face aux mouvements sociaux de plus en plus virulent dans le pays.

Analyse des risques SWOT : France

Forces	Faiblesses
- Son littoral étendu - Développement des mini centrales SMR - création d'une force de protection des installations hydrogène - réseau routier et pipeline avec l'Espagne	- Climat social dégradé - Manque de partenaires africains - Manque d'investissement dans la recherche sur l'hydrogène - Manque de cursus universitaires liés à l'hydrogène
Opportunités	Menaces
- dominer l'importation de l'hydrogène vert en Europe - Améliorer le pouvoir d'achat des Français - avoir une autosuffisance énergétique - Exporter l'excédent de production aux pays de l'est européens	- mouvements sociaux à répétition - Poursuite de sa récession économique - Contrôle des partenaires africains par la Russie et les US - monopole des industries de production d'hydrogène vert en Afrique par les Allemands

Conclusion générale

La guerre opposant l'Ukraine et la Russie ainsi que les profonds bouleversements que celle-ci engendre exaspèrent la rivalité entre la France et l'Allemagne en ce qui concerne les questions énergétiques.

Sur la question de l'hydrogène, ces deux pays se mettent rarement d'accord. Si la France se bat afin que l'hydrogène qui est produit à partir d'électricité nucléaire est perçu comme vert ; le concept en question n'est pas apprécié par l'Allemagne.

Dernièrement, les pays de l'EU s'écharpent sur le rôle que pourra avoir l'hydrogène vert ; un vecteur énergétique qui est généralement considéré comme essentiel en vue de décarboner l'industrie ainsi que la mobilité. Mais les visions se heurtent : si la France met en avant que la contribution nucléaire de ce gaz soit reconnue, l'Allemagne veut le mettre du côté des hydrocarbures, malgré son faible impact sur l'environnement.

Actuellement, la hache de guerre semble être enterrée, cependant les signaux faibles issue de l'analyse prospective réalisée en annexe, nous montre bien que la stratégie énergétique et économique allemande à plusieurs facettes. Le questionnement que l'on peut avoir est comment l'Allemagne va faire face à ses défis sociaux et économiques avec la volonté de sortir du nucléaire, et de sa forte dépendance au gaz naturel. Les alliances déjà initiés par l'Allemagne concernant l'importation massive d'hydrogène vert depuis l'Afrique et l'association avec les pays nordiques doivent nous faire réfléchir au choix de nos futurs orientations stratégiques afin d'anticiper notre avenir énergétique et garantir sa souveraineté.

Glossaire

Termes	Définitions
Pile à combustible alcaline (AFC)	L'AFC est un type de pile à combustible à hydrogène et/ou oxygène dans lequel l'électrolyte est de l'hydroxyde de potassium (KOH) concentré, et les ions hydroxyde (OH-) sont transportés de la cathode à l'anode.
E-carburant	Les e-carburants sont une classe de carburants de remplacement qui sont fabriqués en utilisant de l'électricité issue de sources décarbonées
Pile à combustible	Le principe de la pile à combustible est de produire de l'électricité par oxydation d'hydrogène et réduction simultanée d'oxygène avec pour seuls sous-produits de l'eau et de la chaleur. L'oxygène est généralement puisé dans l'air alors que l'hydrogène peut être fourni par plusieurs types de sources. Les deux plus fréquentes sont le gaz hydrogène ou le méthanol.
PEM	Les piles à combustible à membrane d'échange de protons, connues aussi sous le nom de piles à combustible à membrane électrolyte polymère (ou PEMFC selon l'acronyme des expressions anglaises proton exchange membrane fuel cells ou polymer electrolyte membrane fuel cells) sont un type de piles à combustible
Power-to-X (ou PtX ou P2X)	Transformation d'électricité en un autre vecteur énergétique, tel qu'un gaz ou un liquide.
Power-to-Gas (ou PtG ou P2G)	Transformation d'électricité en gaz, tel que l'hydrogène et/ou le méthane.
Hydrogène	Dans le présent document, le terme général « hydrogène » est utilisé en référence à l'élément hydrogène (H), ainsi qu'à la molécule de dihydrogène (H ₂), qui représente la forme d'hydrogène majoritaire sur Terre et celle rencontrée dans les applications PtX.

Hydrogène gris (dit fossile)	Hydrogène produit à base de matières premières fossiles, telles que le gaz naturel, les hydrocarbures liquides ou le charbon, avec émission de dioxyde de carbone.
Hydrogène bleu (dit bas carbone)	Hydrogène produit d'une manière similaire à l'hydrogène gris, mais avec capture et séquestration d'une partie du dioxyde de carbone produit, avec émission réduite de dioxyde de carbone.
Hydrogène vert (dit décarboné)	Hydrogène produit par électrolyse de l'eau, à partir d'électricité provenant de source(s) renouvelable(s), sans émission de dioxyde de carbone.
Hydrogène rose (dit nucléaire)	Hydrogène produit par électrolyse de l'eau, à partir d'électricité provenant de source(s) nucléaire(s), sans émission de dioxyde de carbone.
Electrolyse de l'eau	Dissociation électrochimique de l'eau en hydrogène et en oxygène, à l'aide d'un courant continu circulant entre deux électrodes (l'anode et la cathode) et d'ions circulant dans un électrolyte.
Electrolyte	Substance (liquide ou solide) conductrice en raison de la présence d'ions mobiles.
Electrolyse alcaline (ou AEL)	L'électrolyse utilisant un électrolyte liquide au sein duquel circulent des ions OH ⁻ .
Electrolyse à membrane échangeuse de protons (ou PEM)	L'électrolyse utilisant un électrolyte solide au sein duquel circulent des ions H ⁺ .

Electrolyse à oxyde solide (ou SOEC)	L'électrolyse utilisant un électrolyte solide au sein circulent des ions O^{2-} .	duquel
--	--	--------

Bibliographie

- Damette, O., Cremel, M., Demaie, H., Lemoine, F. 2020. Les enjeux économiques de la filière hydrogène : une solution pour la transition énergétique ? Monde en développement 48.
- Goldthau, A., Sovacool, B.K. 2012. The uniqueness of the energy security, justice, and governance problem. Energy Policy.
- Hauet, J-P., Lacire, S. 2022. Hydrogène et transport de marchandise par camions. Annales des Mines – Réalités industrielles.
- Jenkis, K. 2019. Energy justice, energy democracy, and sustainability : Normative approaches to the consumer ownership of renewables. In J. Lowitzsch (Ed.), Energy transition : Financing consumer co-ownership in renewables.
- Lapostolle, D. 2021. Analyser les trajectoires territoriales de transition énergétique. Les territoires « hydrogène » en France. VertigO-la revue électronique en sciences de l'environnement.
- Lepercq, T. 2021. Hydrogène : vers une renaissance industrielle de la France ?
- MacGrégor, C. 2021. Les chemins vers une transition énergétique résiliente et compétitive. Hors les murs.

Textes

- Loi n°2021-1104 du 22 août 2021 portant lutte contre le dérèglement climatique et renforcement de la résilience face à ses effets.
- Règlement du Parlement Européen et du Conseil modifiant le règlement (UE) 2018/842 relatif aux réductions annuelles contraignantes des émissions de gaz à effet de serre par les Etats membres de 2021 à 2030 contribuant à l'action pour le climat afin de respecter les engagements pris dans le cadre de l'accord de Paris.