



Mémoire de fin d'études

PRESENTÉ EN VUE DE L'OBTENTION
DU DIPLOME DE : Master

Filière : Physique
Option : Physique Énergétique et Énergies renouvelables

THÈME :

*Les sources de la production de l'Hydrogène et les moyens de
stockage.*

Préparé par : Kaabeche Soundes Nour El Houda

Soutenu le : 10/06/2025

Devant le jury :

Président :	Khalfallah Farid	MCA	Université de BBA
Rapporteur :	Daoudi Salim	Pr	Université de BBA
Examineur :	Imekhlaf Anis	MCA	Université de BBA

Année Universitaire 2024-2025

Remerciement

Tout d'abord, nous tenons à remercier Allah, de m'avoir accordé la santé, la force, la volonté et la patience pour mener à bien mes années d'études en master, ainsi que les connaissances qui m'ont permis de réaliser ce travail.

Je remercie également mon encadreur le professeur Daoudi Salim pour ses conseils et ses encouragements.

Je remercie sincèrement l'ensemble de mes enseignants pour leur générosité, leur sérieux et leur aide qui m'ont été d'un grand soutien tout au long de mon parcours en master.

Enfin, j'adresse mes remerciements les plus sincères à ma famille Kaabeche, pour leur soutien moral et leurs encouragements constants, qui ont grandement contribué à ma réussite.

Dédicace

Alhamdulillah, j'ai pu terminer la préparation de ma mémoire, et je remercie Dieu de m'avoir donné cette capacité et facilité mes affaires.

A mon très cher père

Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager, grâce à toi papa j'ai appris le sens du travail et de la responsabilité.

Je voudrais te remercier pour ton amour, ta générosité, ta compréhension....

Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection.

A ma très chère mère

Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles.

A mes très chers frères

Charef et Wassim vous été tous les deux des personnes incroyables qui ont apporté tellement de joie et de bonheur dans ma vie je suis tellement fière d'être votre sœur et je suis reconnaissant pour tout ce que vous avez fait pour moi au fil des années.

A tous ceux que j'aime

Liste des abréviations

PCI : Pouvoir calorifique inférieur

PCS : Pouvoir calorifique supérieur

COP21 : Conférence des Parties – 21^e session

NDCs : Nationally Determined Contributions

GES : Gaz à Effet de Serre

UE : Union européenne

Teb : Température d'Ébullition

SMR : Steam Méthane Reforming

PSA : Pressure Swing Adsorption

GTL : Gas to Liquids

ATR : Autothermal Reforming

PEM : membrane échangeuse de protons

SOEC: Solid Oxide Electrolysis Cell

AEL : *Électrolyseur Alcalin*

AME : Assemble Membrane-Électrode

R&D : Recherche et Développement

Psi : pounds per square inch

Alim: alimentation

YSZ: Ytria-Stabilized Zirconia

DOE : Department of Energy

UV : Ultraviolet

HTGR: High Temperature Gas-cooled Reactor

VHTR: Very High Temperature Reactor

HTE : High Temperature Electrolysis

pH : potentiel Hydrogène

PNS : Purple Non-Sulfur bacteria

SCWG : Supercritical Water Gasification

CCS : captage du CO_2

ENR : énergies renouvelables

BMW : Bayerische Motoren Werke AG

CNT: Carbon Nanotubes

LOHC : Liquid Organic Hydrogen Carriers

MCH = Méthylcyclohexane

DBT = Dibenzyl-toluène

Sommaire :

<i>Remerciement</i>	I
<i>Dédicace</i>	II
Liste des abréviations	III
Sommaire :.....	V
Liste des tableaux.....	VII
Liste des figures.....	VIII
Introduction générale :	1
Chapitre I : L'hydrogène comme vecteur énergétique.....	3
I.1.Introduction :	3
I.2.Historique de l'hydrogène :	3
I.2.1 Découverte et identification de l'hydrogène :	3
I.2.2. Premières applications et expérimentations :	5
I.2.3. L'ère industrielle et les avancées technologiques :.....	9
I.3.Définition :.....	10
I.4. Caractéristiques de l'hydrogène :	12
I.4.1. Caractéristiques physico-chimiques :	12
I.4.2. Caractéristiques énergétiques :.....	13
I.4.3. Sécurité et risques :	14
I.5. L'hydrogène comme vecteur énergétique :.....	15
I.5.1. Définition de vecteur énergétique :	15
I.5.2. Hydrogène - vecteur d'énergie du futur:	15
I.6.Pourquoi le monde se tourne vers l'hydrogène :	17
I.6.1. Les limites des combustibles fossiles et leur impact sur le climat :	17
I.6.2. L'Accord de Paris et son impact sur la transition vers l'hydrogène :	18
I.6.3. Les politiques et les investissements mondiaux dans l'hydrogène :	20
III.7. Conclusion :	24
Chapitre II : Les sources de la production d'hydrogène.....	26
II.1. Introduction :	26
II.2. Les méthodes de production de l'hydrogène :.....	26
II.2.1. Méthodes thermochimiques pour la production d'hydrogène à partir des énergies fossiles:	27
II.2.2. Production de l'hydrogène par électrolyse (méthode électrochimique):	38
II.2.3. Photolyse de l'eau pour la production d'hydrogène :.....	47

II.2.4. Production de l'hydrogène à partir de l'énergie nucléaire :	48
II.2.5. Production d'hydrogène à partir de la biomasse :	49
II.2.6. Production de l'hydrogène à partir des énergies renouvelables :	56
II.3. Les différentes catégories d'hydrogène selon leur mode de production (ou : selon leur couleur):	57
II.4. Conclusion :	59
Chapitre III : Les moyennes de stockage d'hydrogène	60
III.1. Introduction :	60
III.2. Les méthodes de stockages d'hydrogène :	60
III.2.1. Stockage physique :	62
III.2.2. Les matériaux de stockage solide de l'hydrogène:	66
III.2.3. Stockage chimique :	68
III.3. Analyse et comparaison des performances de stockage :	71
III.3.1. Comparaison qualitative (avantages/inconvénients) :	71
III.3.2. Comparaison quantitative (capacité massique, volumique, énergétique) :	72
III.3.3. Analyse graphique et discussion :	74
III.4. Applications de l'hydrogène :	75
III.4.1. Application de l'hydrogène en chimie industrielle :	75
III.4.2. Applications de l'hydrogène dans le secteur du transport:	76
III.4.3. Applications de l'hydrogène dans les Turbines :	78
III.5. Conclusion :	78
Conclusion générale :	79
Références bibliographiques :	81
Résumé (Français):	89

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I.1: Le tableau de Mendeleïev.....	5
Tableau. I.2 : Principales propriétés physico-chimiques de l'hydrogène (et quelques comparaisons avec le gaz naturel)	13
Tableau I.3 : Comparaison des propriétés inflammables de différents gaz combustibles.....	15

Chapitre II

Tableau II. 1 : Les différentes caractéristiques des procédés d'électrolyse de l'eau.....	40
Tableau II.2 : Comparaison des technologies Alcaline et PEM.....	45
Tableau II.3: Comparatif des principaux modes de production de l'hydrogène.....	58

Chapitre III

Tableau III.1 : comparatif des principales méthodes de stockage de l'hydrogène.....	71
Tableau III.2 : comparatif des différentes méthodes de stockage de l'hydrogène selon leur capacité massique, volumique et énergétique.....	73

Liste des figures

Chapitre I	
Figure I.1 :Paracelese (1493 – 1541)	3
Figure I.2: Henry Cavendish (1731-1810)	4
Figure I.3 Lavoisier (1743 – 1794)	4
Figure I.4: Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850)	5
Figure I.5: François Isaac de Rivaz, (1752- 1828).....	6
Figure I.6: La « charrette de Rivaz », 1 re voiture avec un moteur à explosion.....	7
Figure I.7: William Nicholson 1753-1815.....	8
Figure I.8: Christian Friedrich1799-1868.....	8
Figure I.9: William Grove 1811 -1896	8
Figure I.10: L'électrolyseur, procédé inverse, produit de l'hydrogène et de l'oxygène à partir de l'eau et de l'électricité	8
Figure I.11: Francis Thomas Bacon 1904-1992.....	8
Figure I.12: Schéma de la première pile à combustible de William Grove (1839).....	8
Figure I.13 : L'atome de Bohr et son nuage électronique.....	9
Figure I.14 : Fritz Haber 1868-1934 et Carl Bosch 1874 – 1940.....	10
Figure I.15 : le symbole de l'hydrogène et sa masse molaire.....	11
Figure I.16 : Liaisons hydrogène dans l'eau	11
Figure I.17 : Densité de masse d'énergie de quelques carburants.....	14
Figure I.18 : Émissions annuelles de méthane du secteur du pétrole et du gaz par type de production et raison, en millions de tonnes Source : IEA (2020).....	18
Figure I.19 : Graphique montrant la réduction des émissions de GES prévue par l'Accord de Paris par rapport aux tendances actuelles.....	19
Figure I.20 : Stratégies de l'hydrogène existantes et en cours d'élaboration, octobre2021	20
Figure I.21 : Projets et investissements dans l'hydrogène propre, en novembre 2021.....	23
FigureI.22: Le financement annuel moyen potentiel des projets d'hydrogène, 2021-2030	24
Chapitre II	
Figure II.1: Les méthodes de production de l'hydrogène.....	27
Figure II.2 : Répartition de la production mondiale d'hydrogène à partir des énergies fossiles	28

Figure II.3: Schéma d'une installation de production d'hydrogène par vaporeformage	29
Figure II.4: Obtention d'hydrogène par pyrolyse du méthane.....	35
Figure II.5 : mécanismes de la gazéification.....	37
Figure II.6: Schémas des trois types d'électrolyseurs : (a) Alcalin (b) PEM (c) SOEC.....	39
Figure II.7 : Schéma de principe de fonctionnement d'une cellule d'électrolyse alcaline.....	41
Figure II.8 : Schéma de fonctionnement de l'électrolyse PEM.....	43
Figure II.9 : Schéma de fonctionnement de l'électrolyse SOE.....	46
Figure II.10: Schéma de principe de la photo-électrolyse.....	48
Figure II.11: Schéma d'un réacteur nucléaire haute température	49
Figure II.12 : Sources de biomasse et leur conversion en hydrogène et autres produits utiles... 50	
Figure II.13 : Voies biologiques de production d'hydrogène à partir de substrats lignocellulosiques par fermentation sombre et photo-fermentation.....	52
Figure II.14: Méthodes thermo-chimiques de production d'hydrogène.....	53
Figure II.15: Production d'hydrogène via la pyrolyse de la biomasse.....	54
Figure II.16: Production d'hydrogène par gazéification de la biomasse.....	55
Figure II.17 : SCWG pour la conversion de la biomasse en hydrogène.....	55
Figure II.18 : Production de l'hydrogène à partir des énergies renouvelables et stockage, et distribution.....	56

Chapitre III

Figure III.1 : Les méthodes de stockage d'hydrogène.....	61
Figure III.2 : Conception d'un réservoir d'hydrogène comprimé de type 4	63
Figure III.3 : Stockage de l'hydrogène sous forme comprimée (A) et cryo-comprimée (B).....	62
Figure III.4 : Conception de réservoirs pressurisés dotés de capacités de refroidissement	64
Figure III.5 : Réservoir cryogénique pour le stockage de l'hydrogène à -253°C.....	66
Figure III.6 : Représentation schématique d'un faisceau de nano tubes.....	68
Figure III.7 : Chimisorption du cristal métallique et de l'hydrogène	69
Figure III.8 : Comparaison des capacités massiques et volumiques des différentes méthodes de stockage de l'hydrogène	74
Figure III.9 : Schéma de l'hydrodésulfuration	76
Figure III.10 : La portée du carburant hydrogène dans les différents secteurs de la mobilité ...	77

Introduction générale

Introduction générale :

Face à l'épuisement progressif des ressources fossiles, aux défis environnementaux croissants et aux objectifs climatiques ambitieux fixés par les accords internationaux, le développement de vecteurs énergétiques propres, sûrs et durables devient une priorité mondiale.

Dans ce contexte, l'hydrogène s'impose comme une solution stratégique pour accompagner la transition énergétique, en raison de ses caractéristiques physico-chimiques uniques et de sa capacité à jouer un rôle transversal dans de nombreux secteurs industriels, énergétiques et de transport.

L'hydrogène est l'élément le plus abondant dans l'univers, mais il est rarement présent à l'état libre sur Terre. Il doit donc être produit à partir de ressources variées (fossiles, renouvelables, nucléaires, biomasse), selon des procédés dont les impacts environnementaux et les rendements énergétiques sont très variables. De ce fait, le mode de production de l'hydrogène détermine largement son caractère « vert », « bleu », « gris » ou encore « turquoise », selon la typologie chromatique aujourd'hui largement adoptée.

La production propre d'hydrogène constitue ainsi un enjeu technique, économique et écologique majeur pour décarboner les secteurs difficiles à électrifier, tels que l'industrie lourde, les transports longue distance, ou encore le stockage d'énergie renouvelable.

Par ailleurs, le rôle de l'hydrogène dans la transition énergétique ne peut être pleinement rempli qu'à condition de maîtriser son stockage. En effet, l'hydrogène présente des défis spécifiques liés à sa faible densité volumique, à sa réactivité, et à sa capacité à fragiliser certains matériaux. Diverses technologies ont été développées ou sont en cours d'optimisation pour permettre un stockage efficace : stockage physique (gazeux, liquide, cryo-comprimé), stockage dans des matériaux solides (adsorption, hydrures métalliques et chimiques), et stockage chimique indirect.

Dans ce cadre, une attention particulière sera portée à l'analyse comparative des différentes techniques de stockage, à travers l'exploitation de données techniques issues de la littérature scientifique.

Ainsi, ce travail scientifique vise à explorer, dans un premier temps, les caractéristiques fondamentales de l'hydrogène en tant qu'élément chimique et vecteur énergétique, puis à analyser les différentes filières de production de l'hydrogène à travers une approche comparative fondée sur des critères technologiques, économiques et environnementaux. Enfin, un troisième volet est consacré à l'étude des méthodes de stockage, avec une attention particulière portée aux défis sécuritaires, aux performances et aux perspectives d'optimisation, tout en illustrant les applications actuelles et futures de l'hydrogène dans les secteurs clés de l'énergie et de l'industrie.

Ce travail s'inscrit donc dans une démarche pluridisciplinaire, alliant chimie, génie des procédés, énergétique et développement durable. Il ambitionne de fournir une synthèse rigoureuse et actualisée sur le rôle que pourrait jouer l'hydrogène dans l'édification d'un modèle énergétique décarboné, résilient et technologiquement souverain.

Chapitre I

Chapitre I : L'hydrogène comme vecteur énergétique

I.1.Introduction :

L'hydrogène s'impose aujourd'hui comme un élément clé dans la transition énergétique mondiale. Face aux limites des combustibles fossiles et à l'urgence climatique, des nombreux pays misent sur cette ressource pour décarboner leurs industries et réduire leur dépendance aux énergies fossiles. Dans ce contexte, l'Accord de Paris et les stratégies énergétiques nationales jouent un rôle déterminant en encourageant les investissements et en définissant des objectifs ambitieux pour les prochaines décennies.

Ce chapitre examine les dimensions énergétiques et économiques de l'hydrogène. Nous commencerons par présenter une définition complète de l'hydrogène en mettant en avant ses propriétés physico-chimiques et énergétique, ainsi que son rôle en tant que vecteur d'énergie. Enfin, nous analyserons le rôle des politiques climatiques internationales, notamment l'Accord de Paris, dans la promotion de cette source d'énergie, tout en étudiant les stratégies adoptées par les grandes puissances dans la course au leadership sur le marché de l'hydrogène.

I.2.Historique de l'hydrogène :

I.2.1 Découverte et identification de l'hydrogène :

Au 16^e siècle, l'alchimiste Paracelse (Figure I.1) produisit de l'hydrogène pour la première fois en versant du vitriol sur du fer en poudre, découvrant ainsi un gaz inflammable au contact de l'air [1].



Figure I.1 :Paracelse (1493 – 1541) [2]

- En 1766, le scientifique britannique Henry Cavendish (Figure I.2) identifia l'hydrogène comme un élément chimique distinct.



Figure I.2: Henry Cavendish (1731-1810) [1].

Plus tard, le chimiste français Antoine Lavoisier (figure I.3) lui a donné son nom, dérivé du grec : "hydro" (hudôr) signifiant "eau" et "gène" (gennen) signifiant "générer".
Ensuite

- En 1782, Lavoisier a réalisé la première synthèse de l'eau en combinant l'hydrogène avec l'oxygène, permettant ainsi de démontrer expérimentalement la composition chimique de l'eau. Il a démontré la formation de l'eau à partir de ces deux éléments selon la réaction suivante [1] [3]:

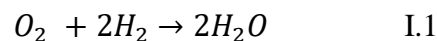


Figure I.3: Lavoisier (1743 – 1794)

- En 1804: le chimiste français Joseph Louis Gay-Lussac (Figure I.4), en collaboration avec le scientifique allemand Alexander von Humboldt, réalisa une série d'expériences démontrant que l'eau est composée de deux volumes d'hydrogène et d'un volume d'oxygène. Les deux scientifiques ont utilisé un appareil en verre pour mesurer

précisément les volumes de gaz avant et après la réaction. Lors de la réaction entre l'hydrogène (H_2) et l'oxygène (O_2) pour former de l'eau (H_2O), ils ont observé que : 2 volumes d'hydrogène réagissaient avec 1 volume d'oxygène pour produire 2 volumes de vapeur d'eau. Ce rapport (2:1) fut nommé loi des volumes combinés. Ces résultats ont contredit les théories antérieures considérant l'eau comme un « élément » indécomposable, une idée remontant à l'alchimie. [2][3]



Figure I.4: Joseph Louis Gay-Lussac (1778-1850)

- **1871** : Dmitri Mendeleïev établit la classification périodique et place l'hydrogène dans la première case en tant qu'élément le plus léger. [3]

Tableau périodique des éléments

1																		2																		3																		4																		5																		6																		7																		8																		9																		10																		11																		12																		13																		14																		15																		16																		17																		18																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																													
H																		He																		Li																		Be																		B																		C																		N																		O																		F																		Ne																		Na																		Mg																		Al																		Si																		P																		S																		Cl																		Ar																		K																		Ca																		Sc																		Ti																		V																		Cr																		Mn																		Fe																		Co																		Ni																		Cu																		Zn																		Ga																		Ge																		As																		Se																		Br																		Kr																		Rb																		Sr																		Y																		Zr																		Nb																		Mo																		Tc																		Ru																		Rh																		Pd																		Ag																		Cd																		In																		Sn																		Sb																		Te																		I																		Xe																		Cs																		Ba																		La																		Ce																		Pr																		Nd																		Pm																		Sm																		Eu																		Gd																		Tb																		Dy																		Ho																		Er																		Tm																		Yb																		Lu																		Fr																		Ra																		Ac																		Th																		Pa																		U																		Np																		Pu																		Am																		Cm																		Bk																		Cf																		Es																		Fm																		Md																		No																		Lr																	

Tableau I.1: Le tableau de Mendeleïev [3].

I.2.2. Premières applications et expérimentations :

- En **1805**, l'ingénieur suisse Isaac de Rivaz (Figure. I.5) conçoit le premier prototype de véhicule équipé d'un moteur à combustion interne fonctionnant à l'hydrogène, baptisé

le « *Char de Rivaz* » (Figure I.6). Ce moteur révolutionnaire reposait sur le principe de l'explosion contrôlée d'un mélange d'hydrogène et d'air dans un cylindre, déclenchée par une étincelle électrique, générant ainsi une force motrice via le mouvement d'un piston. Cette invention a précédé le moteur à essence et a marqué une étape clé dans l'histoire énergétique.

Cependant, malgré son caractère visionnaire, l'invention de Rivaz fut accueillie avec scepticisme par la communauté scientifique de l'époque. L'Académie des sciences française, notamment, jugea que les moteurs à combustion interne ne pourraient jamais rivaliser avec la fiabilité et la puissance des machines à vapeur, alors au cœur de la révolution industrielle. Les historiens attribuent ce rejet à plusieurs défis techniques [2] [3] :

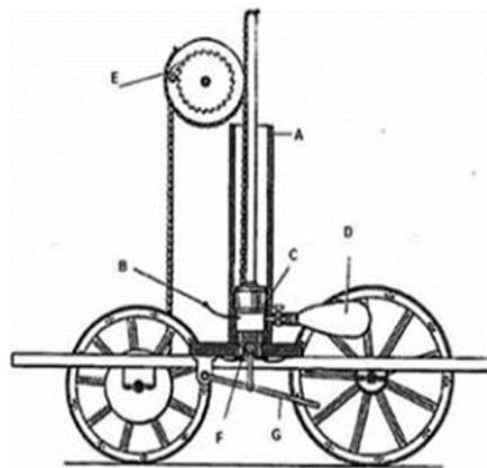
1. **Stockage de l'hydrogène** : Les technologies de l'époque ne permettaient pas une gestion sûre et efficace de ce gaz hautement inflammable.
2. **Fiabilité de l'allumage** : Les systèmes d'étincelle électrique étaient primitifs et sujets à des défaillances fréquentes.
3. **Concurrence avec la vapeur** : La domination des moteurs à vapeur, perçus comme plus stables et matures, a freiné l'adoption des alternatives innovantes. [2] [3]



Figure I.5: François Isaac de Rivaz, (1752- 1828)



[2]



[3]

Figure I.6: | La « charrette de Rivaz », 1 re voiture avec un moteur à explosion.

Principe de la « charrette » de Rivaz (1802) : A = cylindre, B = allumage, C = piston, D = réservoir de gaz des marais, E = gâchette, F = piston avec soupapes pour l'admission et l'échappement, G = manette du piston

- **1800**, William Nicholson (figure I.7) a découvert le processus d'électrolyse, qui constitue la base théorique de la pile à combustible. En **1839**, le chimiste suisse-allemand Christian Friedrich Schönbein (figure I.8) a mis en évidence l'effet "pile à combustible", mais la première pile fabriquée en laboratoire cette même année est l'œuvre de William Robert Grove (figure I.9), un avocat britannique et chimiste amateur, également vice-président de la London Royal Institution. Cette pile à combustible est le procédé inverse de l'électrolyse (figure I.10). Malgré cette découverte précoce, il a fallu attendre plus d'un siècle avant le développement du premier prototype fonctionnel, réalisé par F. T. Bacon (figure I.11) en **1953**. Le schéma de cette première pile est reproduit sur la (figure I.12) ci-dessous [3] [4].

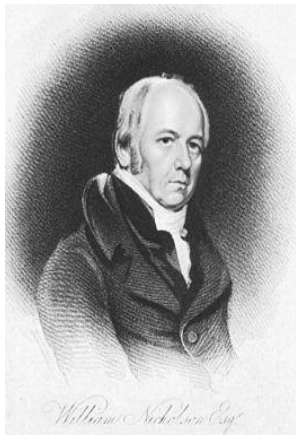


Figure I.7: William Nicholson 1753-1815



Figure I.8: Christian Friedrich 1799-1868



Figure I.9: William Grove 1811 -1896 [2]

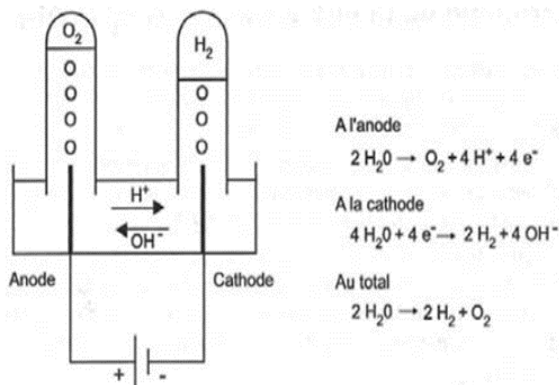


Figure I.10: L'électrolyseur, procédé inverse, produit de l'hydrogène et de l'oxygène à partir de l'eau et de l'électricité [3].



Figure I.11: Francis Thomas Bacon 1904-1992

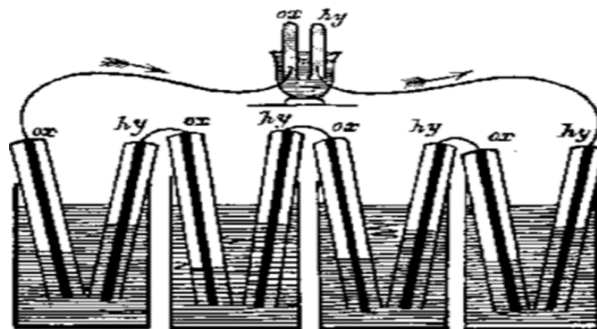


Figure I.12: Schéma de la première pile à combustible de William Grove (1839) [4].

Cependant, cette innovation est tombée dans l'oubli pendant plus d'un siècle, jusqu'au début des années 1960, lorsque la firme américaine General Electric, cherchant un générateur plus performant que les batteries traditionnelles, l'a reprise pour la développer. Deux modules de 1 kWe ont ainsi été installés dans les premières capsules spatiales Gemini, marquant le véritable point de départ de l'industrialisation de cette technologie.

- **1913** : Niels Bohr développe un modèle de l'atome qui permet d'expliquer le spectre de l'hydrogène, contribuant ainsi à la physique quantique (voir figure I.13) [3].

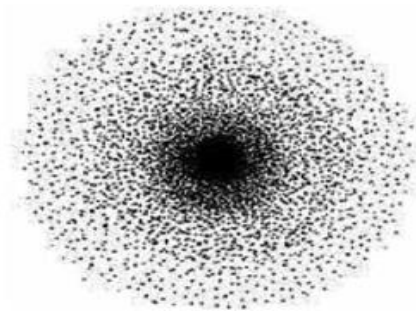
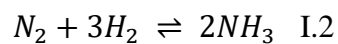


Figure I.13 : L'atome de Bohr et son nuage électronique [3].

1.2.3. L'ère industrielle et les avancées technologiques :

- **1918 et 1931** : Fritz Haber et Carl Bosch reçoivent le prix Nobel pour leur procédé de synthèse de l'ammoniac, utilisé dans la production d'hydrogène industriel. Ce procédé, connu sous le nom de procédé Haber-Bosch, permet la réaction de l'azote atmosphérique avec l'hydrogène sous haute pression (150-300 bar) et haute température (400-500°C) en présence d'un catalyseur à base de fer, selon l'équation [3]:



Cette innovation a révolutionné l'industrie chimique, notamment dans la production d'engrais et d'autres composés à base d'hydrogène.

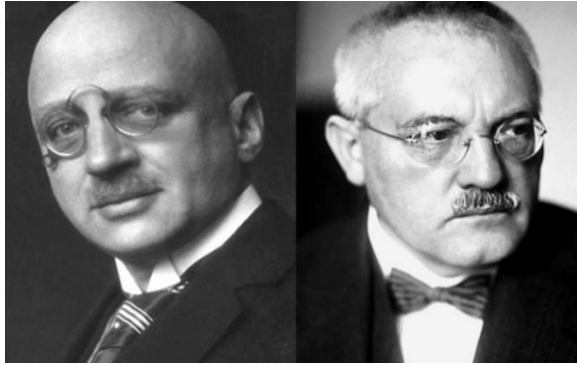
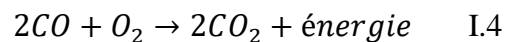
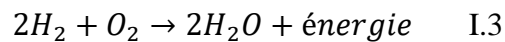


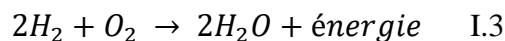
Figure I.14 : Fritz Haber 1868-1934 et Carl Bosch 1874 – 1940.

- **Début du XX^e siècle** : L'hydrogène, sous forme de gaz de synthèse (mélange de H₂ et CO), était utilisé pour l'éclairage public. La combustion de ce mélange libérait une énergie thermique et lumineuse selon la réaction :



Ce principe repose sur la combustion exothermique, où l'énergie libérée est convertie en lumière

- **Depuis les années 1960** : L'hydrogène est utilisé comme carburant cryogénique dans les fusées, notamment par la NASA (Saturn, Falcon, SLS). Il réagit avec l'oxygène liquide dans les moteurs fusés selon la réaction :



Cette réaction produit une impulsion spécifique élevée, essentielle pour propulser les fusées hors de l'atmosphère terrestre [3].

I.3.Définition :

L'hydrogène est l'élément chimique le plus simple : son noyau se compose d'un unique proton et son atome ne compte qu'un électron [5].

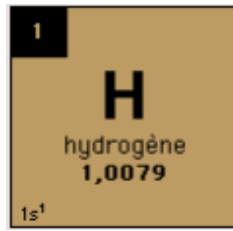


Figure I.15 : le symbole de l'hydrogène et sa masse molaire [6].

Il est également l'élément le plus abondant dans l'univers, représentant environ 75 % de sa masse [7]. Sur Terre, il occupe la neuvième place en abondance et la deuxième dans les océans, mais il n'existe pas à l'état pur. Il est toujours lié à d'autres éléments, principalement dans l'eau (H_2O) et les hydrocarbures (C_nH_m) [7].

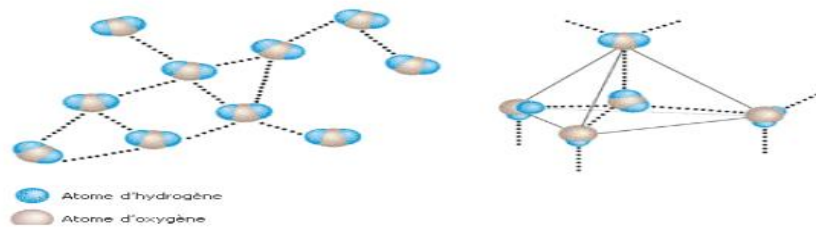
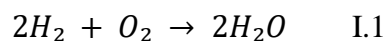


Figure I.16 : Liaisons hydrogène dans l'eau [8].

La molécule de dihydrogène (H_2), communément appelée « hydrogène », est composée de deux atomes d'hydrogène. Sa combustion libère près de trois fois plus d'énergie que celle de l'essence, tout en ne produisant que de l'eau selon la réaction :



Cependant, l'extraction de l'hydrogène à partir de ressources primaires (eau, hydrocarbures ou biomasse) nécessite un apport énergétique, ce qui en fait un « vecteur énergétique » similaire à l'électricité.

L'hydrogène peut être produit par différentes méthodes, notamment le reformage à la vapeur du gaz naturel et l'électrolyse de l'eau, qui utilise un courant électrique pour séparer l'eau en oxygène et en hydrogène [7]. De plus, certains micro-organismes, comme les algues et les bactéries, peuvent produire de l'hydrogène en utilisant l'énergie solaire [7].

En raison de sa densité énergétique élevée et de l'absence d'émissions polluantes lors de sa combustion, l'hydrogène est utilisé depuis les années 1970 dans les programmes spatiaux, notamment par la NASA, où il sert de carburant pour les fusées et d'alimentation pour les piles à combustible [7].

Pour devenir une source d'énergie quasi inépuisable, l'hydrogène doit être produit en quantités suffisantes à un coût compétitif, idéalement à partir d'énergies décarbonées (nucléaire et renouvelables). Les technologies associées à sa production, son stockage et sa conversion sont regroupées sous le terme « technologies de l'hydrogène » [9].

I.4. Caractéristiques de l'hydrogène :

I.4.1. Caractéristiques physico-chimiques :

Les caractéristiques physico-chimiques de l'hydrogène sont reprises dans le Tableau I.2 :

Propriétés	Valeur numériques
PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	10 800 kJ/Nm ³ 119 930 kJ/kg (gaz naturel 50 020 kJ/kg) 3.00kWh/Nm ³ 33.33kWh/kg
PCS (Pouvoir calorifique supérieur : inclut l'énergie de la vapeur d'eau)	12 770 kJ/ Nm ³ 141 860 kJ/kg 3.55 kWh/ Nm ³ 39.41 kWh/kg
Densité gazeuse a 20.3K	1.34 kg/ m ³
Densité gazeuse a 273K	0.08988 kg/ Nm ³ (gaz naturel 0.6512 kg/ Nm ³)
Densité liquide a 20.3K	70.79 kg/ m ³
Chaleur spécifique à pression constante (Cp)	14 266 J/kg K (293k)
Chaleur spécifique à volume constant (C _v)	10 300 J/kg.k
Conductivité thermique du gaz	0.1897 W/(mK)
Chaleur d'évaporation	445.4 kJ/kg

Energie théorique de liquéfaction	14 112 J/g (3.92kWh/kg)
Electronégativité (Pauling)	2.1
Masse atomique	1.0079
Température de solidification	14.01 k
Température d'ébullition (a 1013 mbar abs)	20.268K
Température critique	33/30 K
Température d'auto inflammation dans l'aire	858K (gaz naturel 1 813k)
Température de flamme dans l'air a 300k	2318K (gaz naturel 2 148K)
Limites d'inflammabilité dans l'air (vol %)	4-75 (gaz naturel 5.3-15)
Limites de détonation dans l'air (vol %)	13-65 (daz naturel 6.3-13.5)
Energie minimale d'inflammation (μ J)	20 (Gaz naturel 290)
Energie explosive théorique (kg de TNT/ m^3 de gaz)	2.02 (gaz naturel 7.03)
Supression de détonation (mélange stoechiométrie)	14.7 bar (gaz naturel 16.8 bar)
Coefficient de diffusion dans l'air	0.61 cm^2/s (gaz naturel 0.16)
Vitesse de flamme dans l'air	260 cm/s (7 fois le gaz naturel)
Vitesse de détonation dans l'air	2.0 km/s (gaz naturel 1.8 km/s)
Mélange stoechiométrique dans l'air (vol)	29.53% (gaz naturel 9.48%)

Tableau. I.2 : Principes propriété physico-chimiques de l'hydrogène (et quelques comparaisons avec le gaz naturel) [10].

I.4.2. Caractéristiques énergétiques :

L'hydrogène se distingue par ses propriétés énergétiques exceptionnelles, faisant de lui un vecteur énergétique clé pour l'avenir. Il est l'élément chimique le plus simple et le plus abondant de l'univers, représentant environ 75 % de la masse totale et 95 % du nombre d'atomes. Son isotope le plus courant est constitué d'un unique proton et d'un électron, ce qui lui confère une structure atomique légère et une masse volumique très faible. Cependant, bien qu'abondant dans l'univers, l'hydrogène est rare dans l'atmosphère terrestre et se trouve principalement sous forme combinée, notamment dans l'eau et les matières organiques.

Sur le plan énergétique, l'hydrogène possède une densité énergétique massique élevée, atteignant 143 MJ/kg, soit environ 2,2 fois celle du gaz naturel et cinq fois plus que le charbon. Il présente également un contenu énergétique de 39,4 kWh/kg, le plaçant bien au-dessus des combustibles fossiles en termes d'énergie par unité de masse. En comparaison, le charbon oscille entre 7,8 et 8,7 kWh/kg, ce qui met en évidence la supériorité de l'hydrogène comme

source d'énergie. La figure suivante illustre la densité massique d'énergie de différents carburants, mettant en évidence la supériorité de l'hydrogène par rapport aux autres sources d'énergie [11].

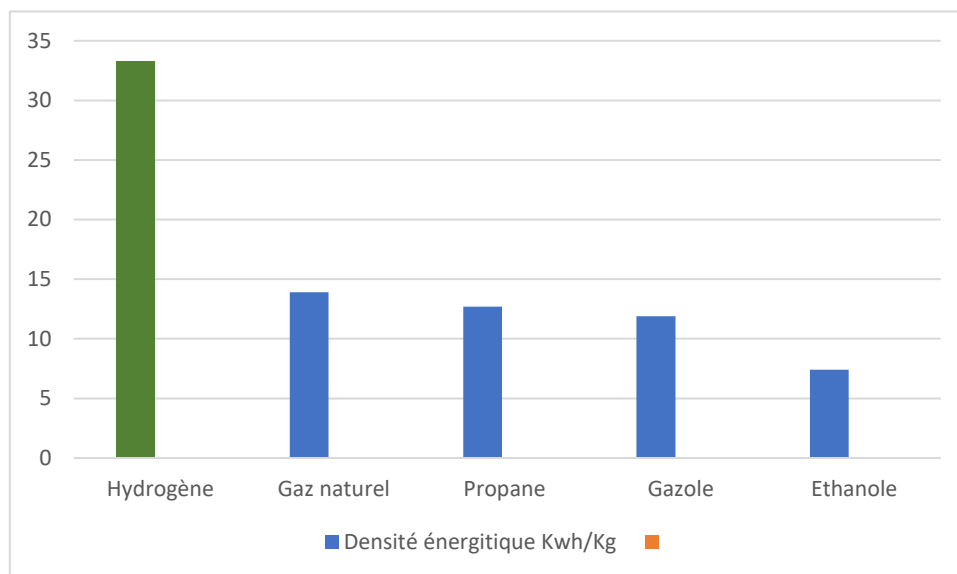


Figure I.17 : Densité de masse d'énergie de quelques carburants.

I.4.3. Sécurité et risques :

L'hydrogène est un gaz non polluant et non toxique, mais fortement explosif. Sa combustion dans l'air ne produit que de l'eau. Étant le gaz le plus léger, il se diffuse très rapidement dans l'air, ce qui peut réduire les risques en cas de fuite. Cependant, en espace confiné, il peut former des mélanges hautement inflammables, ce qui nécessite des précautions particulières pour son stockage et son utilisation.

L'hydrogène possède une large plage d'inflammabilité dans l'air, allant de 4 % à 75 % (contre 5 % à 15 % pour le méthane), ce qui augmente les risques pour un gaz riche en hydrogène. Sa combustion thermique à haute température, en présence d'air, génère des oxydes d'azote. La flamme de l'hydrogène est à peine visible à l'œil nu, ce qui peut représenter un danger pour les secours en cas d'incendie [12].

Le tableau suivant compare les propriétés inflammables de l'hydrogène avec celles d'autres gaz combustibles couramment utilisés, mettant en évidence son potentiel de danger en cas de mauvaise manipulation.

Gaz	Energie minimale d'inflammation mJ/mole	Chaleur de combustion kJ/g	Température de flamme °C	Température d'auto inflammation °C
H_2	0,017	120	2 045	585-858
CH_4	0,29	50	1 875	540
Propane	0,26	50	1 920	760
Essence	0,24	44,5	2 200	228-501

Tableau I.3 : Comparaison des propriétés inflammables de différents gaz combustibles [12].

I.5. L'hydrogène comme vecteur énergétique :

I.5.1. Définition de vecteur énergétique :

On parle de vecteur énergétique au sens large, en tant que source d'énergie. Plus précisément les vecteurs énergétiques sont des formes transformées d'énergie, qui permettent de véhiculer et stocker cette énergie. Par exemples : électricité, hydrogène (H_2), air comprimé, vecteurs énergétiques produits à partir du pétrole (essence, kérosène, diesel, ...) [13].

I.5.2. Hydrogène - vecteur d'énergie du futur:

On considère que le dihydrogène est un vecteur énergétique car il n'existe pratiquement pas (ou très peu) à l'état pur dans la nature ; on ne le trouve presque que sous forme combinée (H_2O , C_nH_m , ...). Il est donc nécessaire de dépenser de l'énergie pour le produire. Il peut être produit à partir de nombreuses sources aussi bien fossiles, nucléaires que renouvelables. Il permet ainsi d'avoir un stockage tampon d'énergie. L'hydrogène permet le lien entre le monde énergétique actuel (plutôt basé sur les énergies fossiles) et le monde énergétique futur (plutôt basé sur les énergies renouvelables et l'énergie nucléaire). "C'est un aspect non négligeable au vu des protocoles à caractère écologique tel que celui de Kyoto (ratifié en 2005). Ce dernier recommande de réduire les émissions de gaz carbonique à effet de serre de 180 pays".

L'attrait fondamental de l'hydrogène tient à ses avantages écologiques potentiels par rapport aux combustibles fossiles. Sur le lieu d'utilisation, sa combustion ne dégage ni émission toxique ni gaz à effet de serre. L'utilisation de l'hydrogène, comme combustible, permet de

produire de l'électricité et de la chaleur (ou du travail) sans émission de CO_2 . L'hydrogène pourrait donc constituer le fondement d'un système énergétique réellement durable [14].

Les plus importantes caractéristiques qui font de l'hydrogène un important vecteur énergétique pour le futur sont :

C'est un élément chimique simple, léger (plus que l'air), stable, peu réactif à température ambiante ;

- Il est facile à transporter.
- Il peut être produit en quantité presque illimitée.
- Sa combustion ne génère que la vapeur d'eau accompagnée de dégagement de chaleur.
- Il est plus énergétique que les autres sources d'énergie fossile.

Par contre, ses inconvénients peuvent être résumés ainsi :

- ✓ Ses taux d'inflammabilité et de détonation dans l'air sont plus élevés que celles du gaz naturel, d'un facteur 5 environ.
- ✓ Sa légèreté implique une densité énergétique volumique moins favorable au stockage sous forme gazeuse, que celle du gaz naturel.
- ✓ L'énergie minimale nécessaire pour l'enflammer est dix fois inférieure à celles des hydrocarbures classiques (20 μJ pour l'hydrogène contre 260 μJ pour le propane ou 290 μJ pour le méthane).
- ✓ Il a une mauvaise image auprès du grand public puisqu'il est considéré comme un gaz dangereux (syndrome de l'Hindenburg et bombe à hydrogène).

L'intérêt suscité par l'hydrogène vient de son exceptionnel pouvoir énergétique gravimétrique avec une densité énergétique de 33 kWh par kilogramme. Il libère 3 fois plus d'énergie que le gazole et 2,5 fois plus d'énergie que le gaz naturel. Par conséquent, sur une base pondérale, la quantité de carburant nécessaire pour délivrer une quantité d'énergie donnée est considérablement réduite lorsque l'hydrogène est utilisé.

Par contre, l'hydrogène a une plus faible densité d'énergie volumique que les carburants classiques. Afin de mettre ces chiffres en perspective, un réservoir d'essence de 50 litres est équivalent en énergie à un réservoir de 460 litres d'hydrogène comprimé à 350 bars, ou à un réservoir de 340 litres comprimé à 700 bars.

L'utilisation de l'hydrogène permet de réduire la consommation d'énergie fossile qui est épuisable, et d'augmenter l'efficacité d'un moteur thermique (plus grande densité massique d'énergie) et permet d'obtenir des rendements énergétiques supérieurs à 80 % grâce à la combinaison avec une pile à combustible.

Néanmoins, le changement de paradigme énergétique d'une société basée sur le pétrole vers une société basée sur les énergies renouvelables et l'hydrogène ne peut se faire sans transition. L'enjeu actuel vise donc à utiliser les modes de production actuels de l'hydrogène pour en développer ces usages et ces réseaux de distribution [14].

I.6. Pourquoi le monde se tourne vers l'hydrogène :

I.6.1. Les limites des combustibles fossiles et leur impact sur le climat :

Les combustibles fossiles, tels que le pétrole, le gaz naturel et le charbon, sont des ressources naturelles formées sur des millions d'années à partir des restes d'organismes vivants enfouis sous les couches terrestres. Ces ressources sont limitées et non renouvelables, ce qui signifie qu'elles finiront par s'épuiser avec le temps. Selon un rapport publié par "Sigma Earth", on estime que le pétrole s'épuisera dans environ 47 ans, le gaz naturel dans 52 ans et le charbon dans 133 ans [15].

En plus de leur disponibilité limitée, l'utilisation des combustibles fossiles entraîne des effets environnementaux négatifs, notamment les émissions de gaz à effet de serre qui contribuent au réchauffement climatique ainsi qu'à la pollution de l'air et de l'eau. Le secteur des combustibles fossiles est la deuxième plus grande source d'émissions de méthane (35 %) après l'agriculture. Étant donné que le méthane a un pouvoir de réchauffement 86 fois supérieur à celui du dioxyde de carbone sur une période de 20 ans, la réduction de ses émissions pourrait ralentir le rythme du réchauffement à court terme [16].

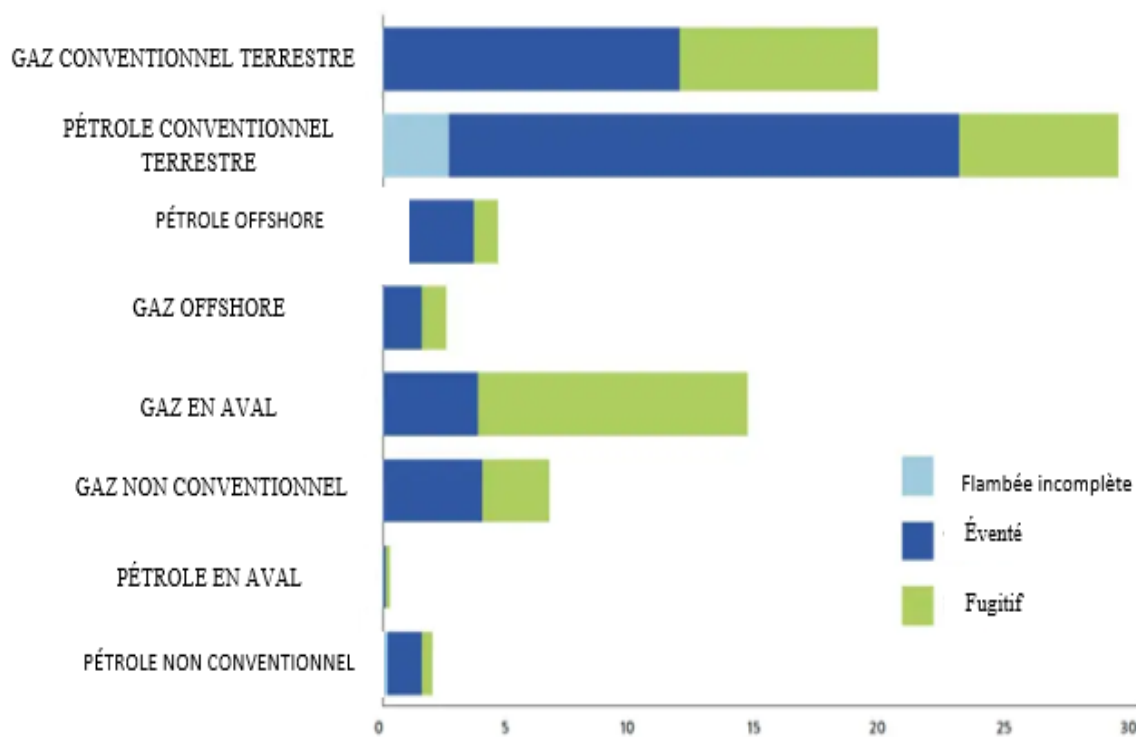


Figure I.18 : Émissions annuelles de méthane du secteur du pétrole et du gaz par type de production et raison, en millions de tonnes Source : IEA (2020) [15].

L'extraction et la combustion des combustibles fossiles, ainsi que l'accumulation des gaz à effet de serre dans l'atmosphère, en particulier le dioxyde de carbone, sont les principales causes du réchauffement climatique, rendant les phénomènes météorologiques extrêmes tels que les tempêtes, les sécheresses et les inondations plus fréquents et plus intenses [17].

I.6.2. L'Accord de Paris et son impact sur la transition vers l'hydrogène :

Adopté en 2015 lors de la COP21, l'Accord de Paris représente un cadre international fondamental visant à contenir le réchauffement climatique en dessous de 2°C et, idéalement, à ne pas dépasser 1,5°C par rapport aux niveaux préindustriels. Cet accord, ratifié par près de 195 pays, repose sur des contributions déterminées au niveau national (NDCs), qui engagent chaque pays à réduire ses émissions de gaz à effet de serre (GES) en fonction de ses capacités et de ses ressources [18].

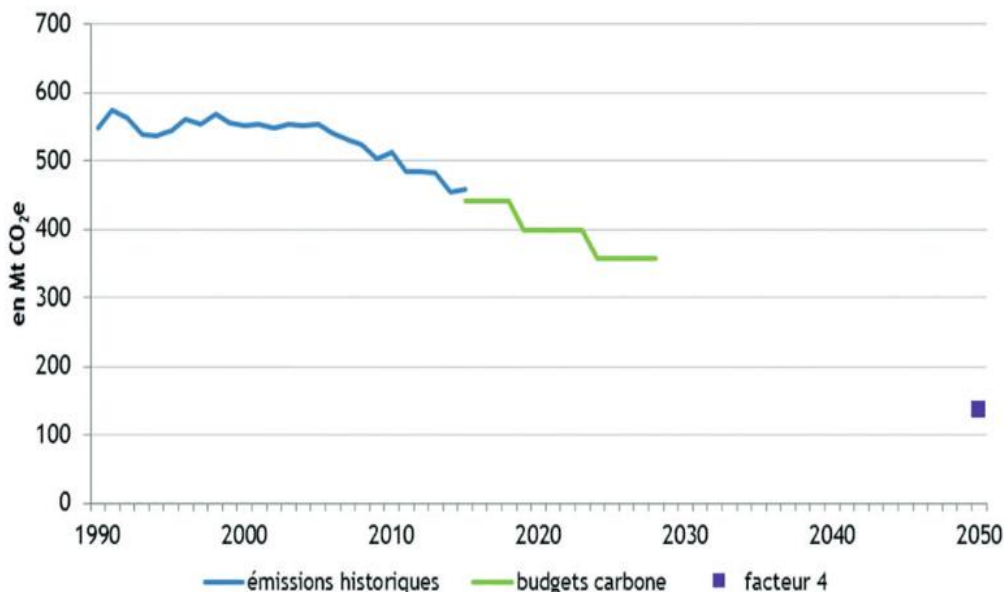


Figure I.19 : Graphique montrant la réduction des émissions de GES prévue par l'Accord de Paris par rapport aux tendances actuelles [18].

- **Objectifs clés de l'accord [18] :**

L'Accord de Paris met l'accent sur plusieurs axes stratégiques :

- ✓ **Neutralité carbone d'ici 2050** : La nécessité d'une transition énergétique vers des sources à faible émission de carbone, y compris l'hydrogène vert.
- ✓ **Réduction des énergies fossiles** : Encourager le développement des énergies renouvelables pour limiter la dépendance au pétrole, au charbon et au gaz naturel.
- ✓ **Développement technologique et innovation** : Soutenir la recherche et les investissements dans des technologies propres, notamment les électrolyseurs et les piles à combustible.

- **Rôle de l'hydrogène dans la mise en œuvre de l'Accord de Paris:**

L'hydrogène est perçu comme un vecteur énergétique clé pour atteindre les objectifs climatiques fixés par l'accord. En particulier :

- ✓ L'hydrogène vert permet de stocker et d'utiliser l'énergie issue des sources renouvelables, garantissant une décarbonisation du secteur énergétique.
- ✓ Il offre une solution propre pour les secteurs difficiles à électrifier, comme l'industrie lourde et les transports longue distance (aviation, maritime).
- ✓ Les engagements de l'Union Européenne (stratégie hydrogène du Green Deal) et d'autres grandes économies montrent une adoption croissante de cette technologie [18].

I.6.3. Les politiques et les investissements mondiaux dans l'hydrogène :

A. La recomposition géopolitique du marché de l'hydrogène :

L'hydrogène peut entraîner des transformations majeures dans l'équilibre des puissances mondiales en modifiant la position des pays et des régions dans le système économique et énergétique international. Il représente une opportunité pour les pays producteurs de combustibles fossiles de se protéger contre les risques liés à la transition vers la neutralité carbone, en réutilisant leurs infrastructures énergétiques pour l'hydrogène. De plus, l'hydrogène peut transformer les industries à forte consommation d'énergie en secteurs basés sur les énergies renouvelables, pouvant devenir des pôles de production industrielle verte [19].

B. Course à la domination des politiques et marchés de l'hydrogène:

La compétition dans le secteur de l'hydrogène propre est de plus en plus intense, les pays cherchant à s'imposer à travers des politiques stratégiques, des investissements et des projets de grande envergure. En 2017, seul le Japon possédait une stratégie nationale pour l'hydrogène, tandis qu'en 2021, plus de 30 pays avaient mis en place ou étaient en train d'élaborer des stratégies nationales pour l'hydrogène, reflétant un intérêt croissant pour cette filière énergétique [19].



Figure I.20 : Stratégies de l'hydrogène existantes et en cours d'élaboration, octobre 2021

[19].

Avec cette concurrence croissante dans le secteur de l'hydrogène, de nombreux pays ont développé des stratégies nationales visant à sécuriser une position de leader sur ce marché en pleine expansion. Les sections suivantes examineront les visions et stratégies des principales nations pionnières dans ce domaine.

C. Les stratégies des grandes puissances pour le développement de l'hydrogène :

Leurs ambitions industrielles et de leurs objectifs climatiques. Cependant, certaines nations se démarquent par des stratégies ambitieuses qui leur permettent d'influencer le développement du marché mondial de l'hydrogène et d'établir des normes et des cadres réglementaires [19].

- **La Chine : Un leader en production et en consommation d'hydrogène**

La Chine est actuellement le plus grand producteur et consommateur d'hydrogène au monde, avec une consommation annuelle dépassant 24 millions de tonnes. Son industrie repose principalement sur l'hydrogène gris issu du charbon, qui représente entre 62 % et 70 % de la production totale. Toutefois, la Chine investit massivement dans l'hydrogène vert pour réduire son empreinte carbone. En 2019, plus de 30 projets d'hydrogène vert étaient en cours de développement, soutenus par des subventions gouvernementales et des partenariats industriels.

Le plan de développement de l'hydrogène publié en 2016 visait à accroître l'utilisation de l'hydrogène dans les transports et l'industrie. Plus récemment, dans son 14^e plan quinquennal (2021-2025), la Chine a mis l'accent sur la production d'hydrogène propre et l'expansion de son réseau de stations de ravitaillement.

- **L'Union européenne : Un engagement stratégique à travers le Green Deal**

L'Union européenne (UE) considère l'hydrogène comme un levier essentiel pour atteindre la neutralité carbone d'ici 2050. En 2020, la Commission européenne a adopté une stratégie pour l'hydrogène, qui prévoit la production de 10 millions de tonnes d'hydrogène vert d'ici 2030.

Les États membres ont lancé plusieurs initiatives pour stimuler le marché, notamment l'Allemagne, qui a alloué 9 milliards d'euros à son plan hydrogène national. La France, de son

côté, a annoncé un investissement de 7 milliards d'euros pour développer des électrolyseurs et promouvoir l'hydrogène dans les transports et l'industrie.

- **Le Japon : Un pionnier dans l'adoption de l'hydrogène**

Le Japon est l'un des premiers pays à avoir mis en place une stratégie nationale dédiée à l'hydrogène. Dès 2017, le gouvernement japonais a publié la première feuille de route nationale, visant à créer une économie de l'hydrogène d'ici 2050.

Le Japon mise principalement sur l'hydrogène comme alternative au nucléaire et aux énergies fossiles importées. Il a investi dans des infrastructures telles que des stations de ravitaillement en hydrogène et des centrales à pile à combustible. Le projet "Fukushima Hydrogen Energy Research Field", inauguré en 2020, illustre l'engagement du Japon dans la production d'hydrogène vert à partir d'énergies renouvelables.

- **Les États-Unis : Une montée en puissance avec la loi sur l'infrastructure**

Les États-Unis ont récemment intensifié leurs efforts dans le domaine de l'hydrogène. En 2021, l'administration Biden a adopté la loi sur l'infrastructure, qui prévoit un investissement de 8 milliards de dollars dans la création de hubs régionaux de production d'hydrogène propre.

Des entreprises comme Tesla et Nikola développent des solutions basées sur l'hydrogène pour le secteur des transports, tandis que des États comme la Californie et le Texas encouragent les initiatives liées aux énergies propres.

- **L'Inde : Un ambitieux projet pour devenir un hub de l'hydrogène vert**

L'Inde a lancé la "National Hydrogen Mission" en août 2021, visant à faire du pays un centre mondial de production et d'exportation d'hydrogène vert. Le gouvernement indien prévoit d'intégrer l'hydrogène dans plusieurs secteurs stratégiques, notamment les raffineries et la production d'engrais.

L'Inde est également le plus grand importateur mondial d'ammoniac, une matière clé pour la production d'hydrogène. En 2019, elle a importé 1,27 milliard de dollars d'ammoniac. Afin de

réduire cette dépendance, l'Inde explore des opportunités pour produire localement de l'hydrogène vert et devenir un acteur majeur de l'exportation d'hydrogène propre.

- **La Corée du Sud : Un leader dans l'innovation hydrogène**

La Corée du Sud considère l'hydrogène comme un moteur de croissance économique et d'innovation industrielle. Dès 2019, elle a adopté une feuille de route ambitieuse pour développer son marché de l'hydrogène.

Le pays vise à alimenter 30 % de ses villes en hydrogène d'ici 2040, et prévoit que cette source d'énergie devienne le principal vecteur énergétique national d'ici 2050. La Corée du Sud est également un leader dans le domaine des véhicules à pile à hydrogène, avec des entreprises comme Hyundai qui investissent massivement dans la mobilité hydrogène.

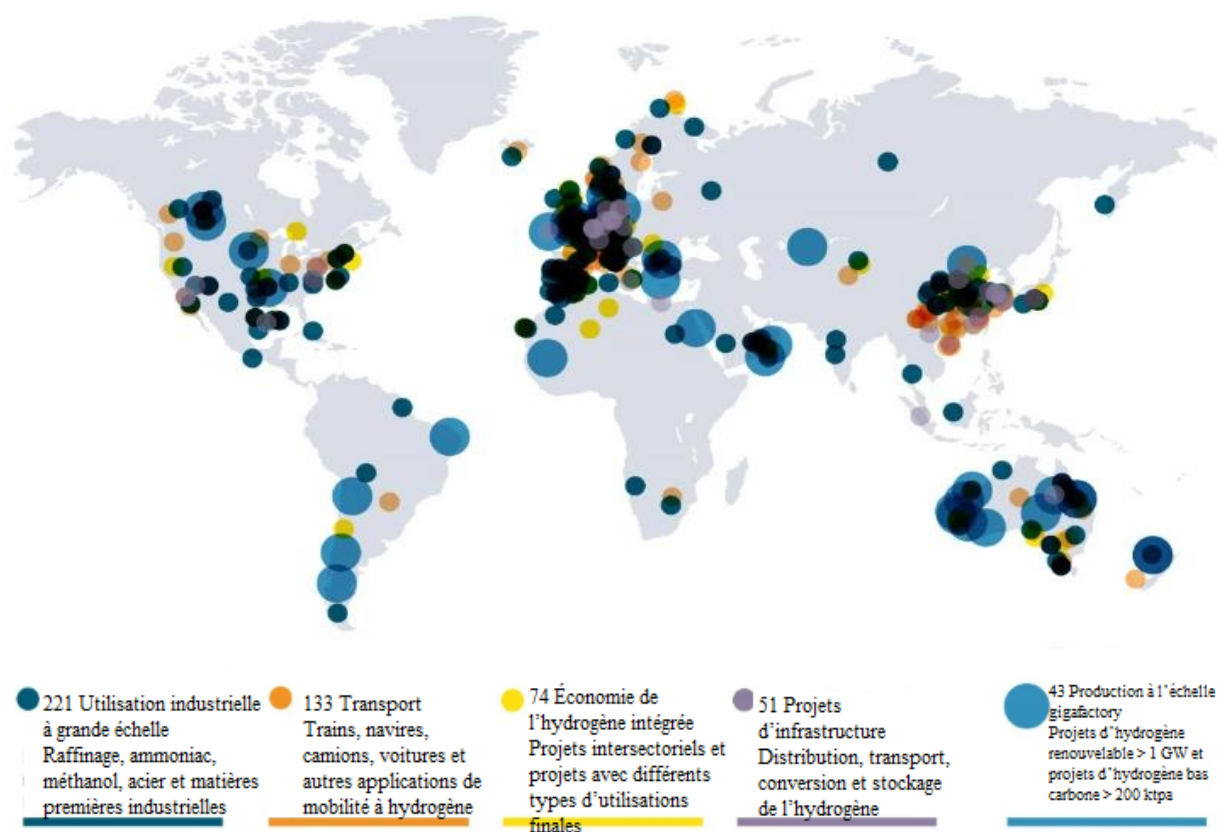


Figure I.21 : Projets et investissements dans l'hydrogène propre, en novembre 2021 [19].

D. L'infrastructure et les projets futurs :

En août 2021, les gouvernements avaient alloué environ 65 milliards de dollars au secteur de l'hydrogène propre, avec la France, l'Allemagne et le Japon en tête des investissements. Toutefois, ces montants restent bien inférieurs aux 634 milliards de dollars de subventions destinées aux combustibles fossiles en 2017 [19].

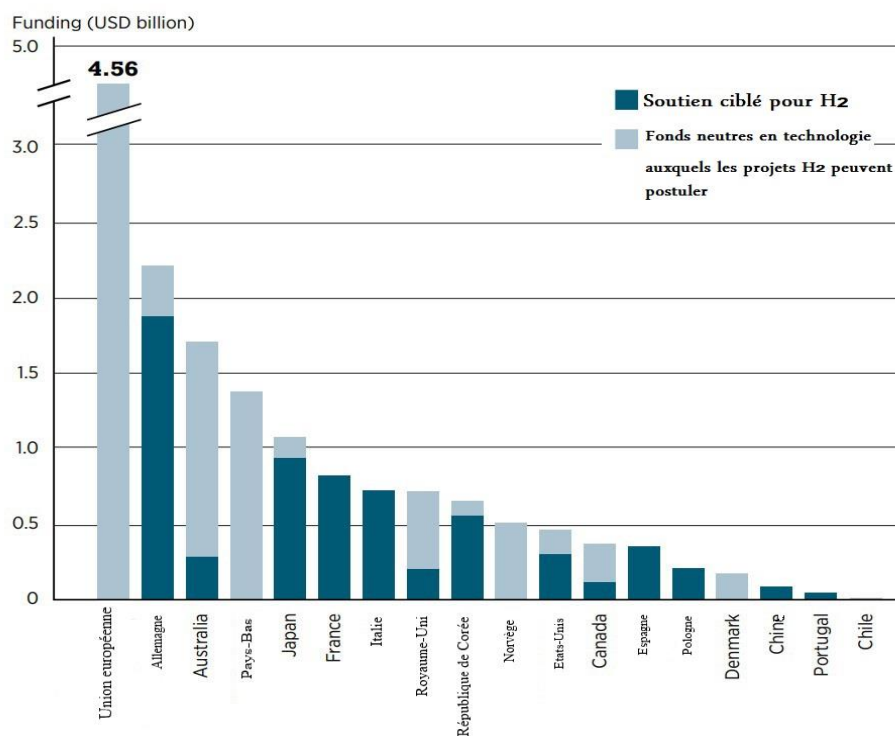


Figure I.22 : Le financement annuel moyen potentiel des projets d'hydrogène, 2021-2030 [19].

III.7. Conclusion :

L'hydrogène s'impose progressivement comme un pilier essentiel de la transition énergétique mondiale. Face aux limites des combustibles fossiles et à l'urgence climatique, il offre une alternative stratégique pour décarboner l'industrie et les transports. Conscientes de son potentiel, de nombreuses puissances économiques investissent massivement dans le développement des infrastructures et des technologies liées à l'hydrogène, cherchant ainsi à renforcer leur souveraineté énergétique et leur compétitivité mondiale. Cependant, des défis majeurs subsistent, notamment en matière de coûts de production, de stockage et de distribution, nécessitant une accélération des efforts de recherche et d'innovation pour rendre l'hydrogène propre plus accessible et compétitif.

Dans cette perspective, il est essentiel d'examiner les différentes méthodes de production de l'hydrogène et leurs implications environnementales et économiques. Le chapitre suivant explorera en détail la production de l'hydrogène, mettant en lumière les opportunités et défis associés à chaque technologie. Comprendre ces aspects est crucial pour évaluer le rôle que l'hydrogène jouera dans l'avenir énergétique mondial.

Chapitre II

Chapitre II : Les sources de la production d'hydrogène.

II.1. Introduction :

La transition énergétique mondiale vers des sources plus propres et durables a replacé l'hydrogène au cœur des stratégies énergétiques des décennies à venir. Ce vecteur énergétique polyvalent, bien que n'étant pas une source d'énergie primaire, présente un potentiel considérable pour décarboner des secteurs difficiles à électrifier, notamment l'industrie lourde et le transport.

Cependant, l'impact environnemental de l'hydrogène dépend essentiellement de la méthode employée pour sa production. Ainsi, plusieurs procédés thermochimiques, électrochimiques et biologiques ont été développés ou sont en cours d'optimisation, chacun présentant des avantages, des contraintes techniques et des niveaux d'émissions de CO₂ différents.

Pour faciliter l'analyse de ces procédés selon leur contribution à la neutralité carbone, une classification par couleurs a été introduite, identifiant l'hydrogène gris, bleu, vert, turquoise, entre autres, selon l'origine des matières premières et la gestion des émissions associées.

Ce chapitre s'attache donc à présenter de manière détaillée les différentes filières de la production de l'hydrogène, en mettant en évidence leurs principes de fonctionnement, leurs rendements, ainsi que leur impact environnemental, tout en proposant une lecture critique à travers la classification chromatique couramment utilisée.

II.2. Les méthodes de production de l'hydrogène :

La production d'hydrogène représente aujourd'hui environ 630 milliards de mm^3 , principalement utilisée pour la synthèse de l'ammoniac, du méthanol ou encore du HNO_3 . Toutefois, cette production reste insuffisante face aux nouveaux besoins énergétiques croissants. À titre d'exemple, la demande mondiale en énergie primaire était de 443 EJ en 2003, dominée par le pétrole, le charbon et le gaz naturel. Cela signifie que la production actuelle d'hydrogène ne couvrirait qu'environ 1,5 % de cette demande [20].

Dans ce contexte, l'hydrogène peut être produit à partir de nombreuses sources. Le choix de la méthode de production dépend de la disponibilité des ressources, de la quantité exigée et de la pureté souhaitée. Les chercheurs et les industriels développent un éventail de procédés visant

à produire de l'hydrogène de manière économiquement rentable et écologiquement viable. Selon le mode de production utilisé, il est possible d'obtenir de l'hydrogène sans émettre de gaz à effet de serre, ouvrant ainsi la voie à une chaîne d'approvisionnement énergétique propre. La figure II.1 illustre les principales méthodes de production de l'hydrogène à partir des sources d'énergie renouvelables, nucléaires (secondaires) ou fossiles (primaires) [14].

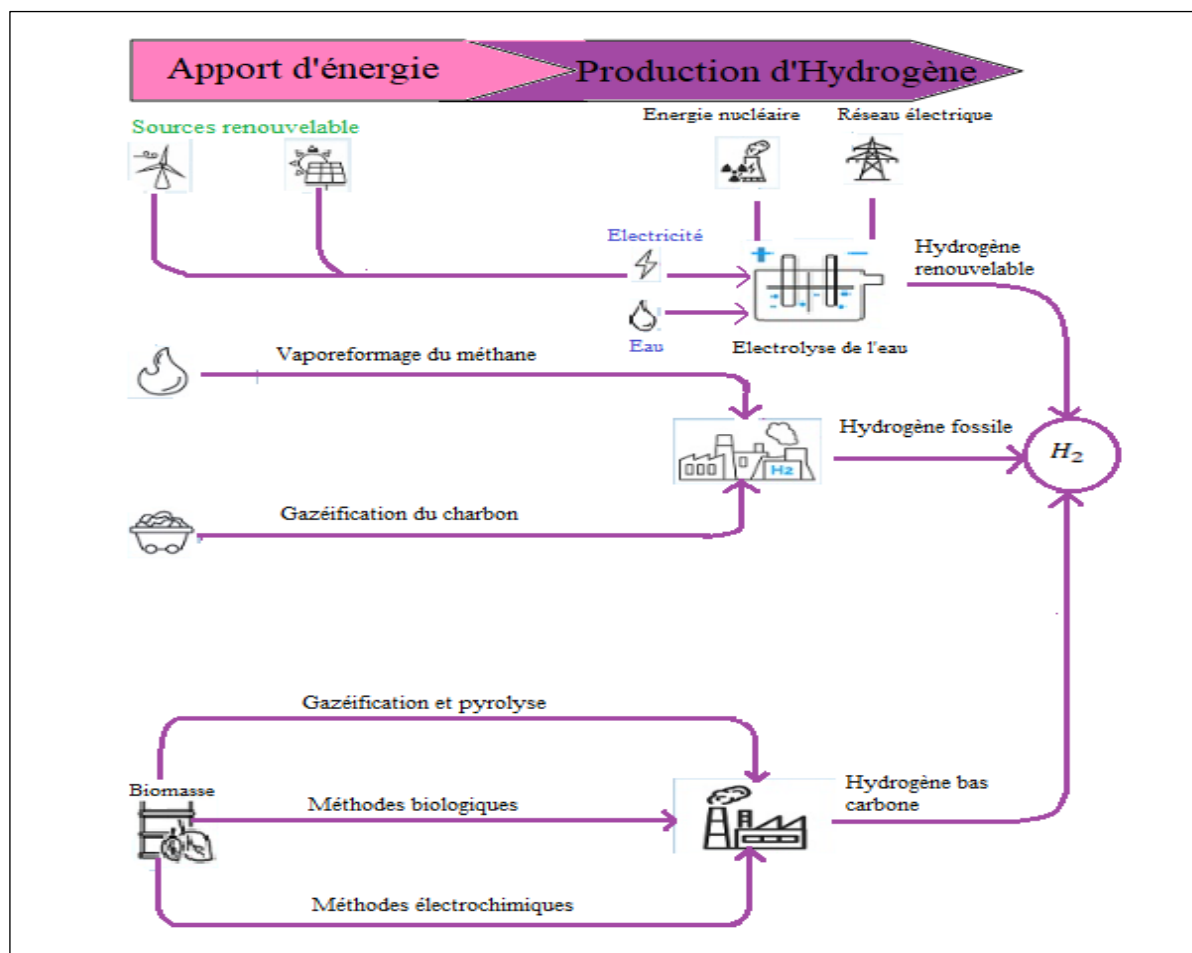


Figure II.1: Les méthodes de production de l'hydrogène.

II.2.1. Méthodes thermochimiques pour la production d'hydrogène à partir des énergies fossiles:

Les méthodes thermochimiques sont actuellement les plus utilisées pour la production d'hydrogène, représentant environ 96 % de la production mondiale. Selon l'Agence Internationale de l'Énergie, sur les 70 millions de tonnes d'hydrogène produites annuellement [21], 49 % proviennent du gaz naturel, 29 % d'hydrocarbure et 18 % du charbon [22].

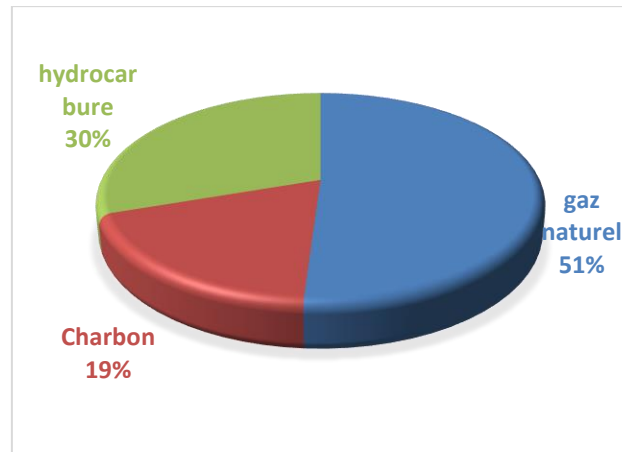


Figure II.2 : Répartition de la production mondiale d'hydrogène à partir des énergies fossiles

Pour transformer ces ressources fossiles en hydrogène, plusieurs procédés thermochimiques sont mis en œuvre, chacun adapté à une charge donnée (gaz naturel, pétrole ou charbon). Les principales méthodes sont :

A. La production d'hydrogène par vaporeformage :

- **Principe de base**

Le reformage à la vapeur vise à maximiser la libération d'hydrogène contenu dans l'eau et le combustible. Ce procédé transforme les hydrocarbures légers en gaz de synthèse (H_2 , CO , CO_2 , CH_4 , H_2O) par réaction avec la vapeur d'eau sur un catalyseur au nickel, à haute température et pression modérée [23].

Il se déroule en quatre étapes principales :

1. **Purification de la charge** (élimination des impuretés, notamment du soufre).
2. **Vaporeformage** (réaction des hydrocarbures avec la vapeur d'eau).
3. **Conversion du CO** (réaction du monoxyde de carbone avec l'eau pour produire davantage d'hydrogène).
4. **Purification des gaz** pour isoler l'hydrogène.

Le gaz naturel est la matière première privilégiée, mais le méthane, le naphta et d'autres hydrocarbures légers ($T_{eb} < 200^\circ C$) peuvent également être utilisés.

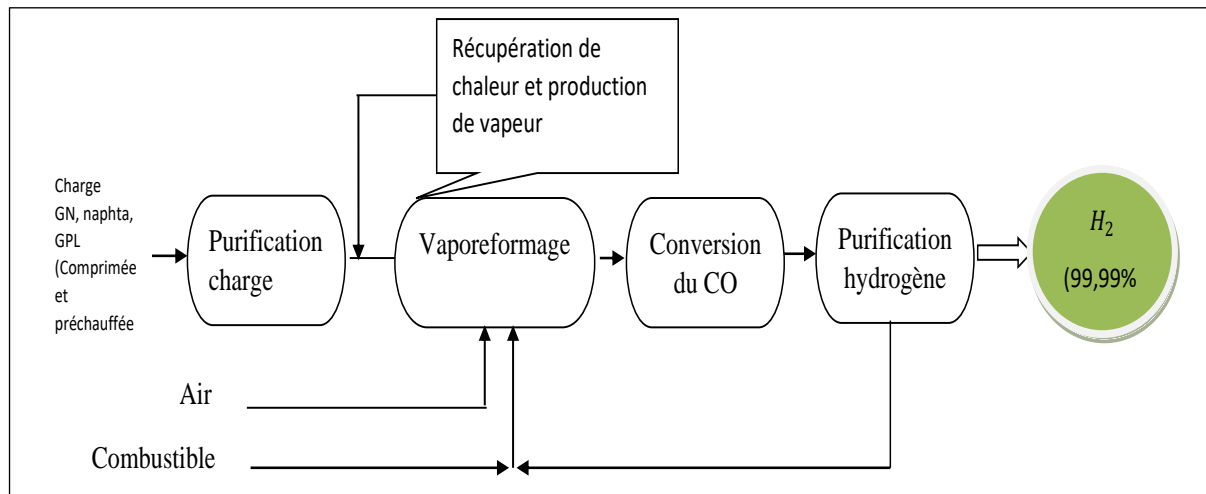
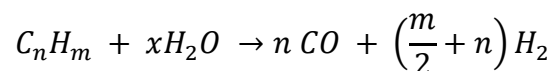


Figure II.3: Schéma d'une installation de production d'hydrogène par vaporeformage.

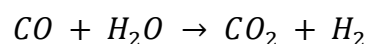
- **Vaporeformage d'hydrocarbure:**

Lorsqu'un combustible fossile liquide ou gazeux est converti en hydrogène, le processus de réformation se produit. Ce processus implique de nombreuses réactions complexes. La réformation par vapeur est une conversion fortement endothermique des hydrocarbures qui réagissent avec la vapeur d'eau [24].

La réaction de réformation par vapeur pour un hydrocarbure arbitraire s'écrit comme suit :

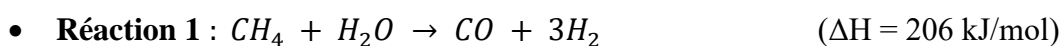


La réaction de décalage de gaz de l'eau, liée à l'équation de la réformation par vapeur, est :



- **Reformage du gaz nature à la vapeur (Steam Méthane Reforming - SMR) :**

Le gaz naturel est principalement composé de méthane (CH_4), constitué de quatre atomes d'hydrogène pour un atome de carbone. Cependant, avant d'être dirigé vers l'unité de vaporeformage, il doit généralement être désulfuré. Les deux principales réactions chimiques mises en œuvre sont la production de gaz de synthèse et la conversion du monoxyde de carbone [23] :



- **Réaction 2** : $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ ($\Delta H = -41$ kJ/mol)
- **Bilan des deux réactions** : $CH_4 + 2H_2O \rightarrow CO_2 + 4H_2$ ($\Delta H = 165$ kJ/mol)

La réaction de vaporeformage est une étape clé pour la production d'hydrogène à partir d'hydrocarbures. Elle est endothermique et nécessite des conditions sévères : une température comprise entre 840 et 950 °C, et une pression de 20 à 30 bars [23][25]. Le rapport stœchiométrique H_2/CO est d'environ 3, bien que ce rapport puisse varier entre 2,5 et 6 selon la nature de la charge d'alimentation. Le catalyseur au nickel, souvent employé, offre une bonne efficacité mais reste sensible aux impuretés telles que le soufre.

Le gaz de synthèse obtenu est riche en H_2 et en CO, mais contient également du CO_2 . Comme le monoxyde de carbone est toxique et interfère avec certaines applications (notamment les piles à combustible), il est ensuite transformé en dioxyde de carbone par la réaction de conversion du gaz à l'eau (water gas shift), une réaction légèrement exothermique, généralement réalisée en une ou deux étapes.

- La conversion à haute température (HTS) effectuée à environ 400°C.
- La conversion à basse température (LTS) effectuée à environ 200°C.

À l'issue de ces réactions, on obtient un gaz contenant principalement de l'hydrogène (H_2), du dioxyde de carbone (CO_2) (16 à 20% en volume), de la vapeur d'eau (H_2O), ainsi qu'une faible quantité de CO et de CH_4 . Globalement, le bilan des deux réactions précédentes est endothermique [23].

Des réactions secondaires de décomposition des hydrocarbures peuvent également survenir, conduisant généralement à la formation de suies. Cependant, ces réactions peuvent être maîtrisées en ajustant le taux de vapeur injecté dans le réacteur, ce qui permet d'éliminer ces résidus carbonés.

- **Purification :**

Après la conversion, le gaz doit être purifié. Deux procédés industriels sont généralement utilisés :

1. Méthanisation :

- **Décarbonatation** : élimination du CO_2 à l'aide de solvants tels que les éthanolamines ou les carbonates, permettant d'atteindre une teneur résiduelle en CO_2 de 0,005 à 0,1% en volume [26].
- **Réaction de méthanisation** :
 - $CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O \left(\Delta H = -206 \frac{kJ}{mol} \right)$
 - $CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O \left(\Delta H = -165 \frac{kJ}{mol} \right)$

Cette méthode permet d'atteindre une pureté en hydrogène supérieure à 97% en volume, mais elle réduit le rendement de production, car une partie de l'hydrogène est consommée pour la méthanisation.

2. Adsorption sélective par tamis moléculaires via le procédé PSA (Pressure Swing Adsorption) :

La méthode PSA (Pressure Swing Adsorption) permet de purifier directement l'hydrogène du gaz de synthèse sans étape de décarbonatation, en retenant sélectivement les impuretés sur des tamis moléculaires. Elle offre une pureté élevée (jusqu'à 99,9%), même avec des charges lourdes, tout en maintenant des conditions modérées. Toutefois, la quantité d'hydrogène récupérée est légèrement inférieure à celle obtenue par d'autres procédés.

- **Les avantages** :
 - Taux de conversion élevé : Le procédé permet une conversion efficace du méthane, ce qui maximise la production d'hydrogène.
 - Réduction de la formation de coke : Grâce à la présence de vapeur d'eau, la formation de dépôts de carbone (coke) sur le catalyseur est limitée, ce qui prolonge la durée de vie de ce dernier.
 - Technologie mature et industrialisée : Le vaporeformage est une technique largement éprouvée, déjà commercialisée à grande échelle dans le monde entier.

- **Les inconvénients :**

Le procédé de reformage à la vapeur du méthane est avantageux puisqu'il ne nécessite pas d'oxygène, permet d'avoir un rapport H_2/CO élevé et est aujourd'hui bien maîtrisé. Les principaux inconvénients de ce procédé sont [27] :

- la nécessité d'éliminer le soufre contenu dans le gaz alimentant le réacteur pour éviter l'empoisonnement des catalyseurs.
- l'importante émission de gaz polluants comme les Nox.
- la possibilité de formation de carbone sur le catalyseur qui entraîne une baisse de la productivité et la dégradation des performances du réacteur.

B. La production d'hydrogène par oxydation partielle :

- **Principe de base :**

L'oxydation partielle permet la production d'hydrogène à partir de matières premières variées telles que le gaz naturel, les résidus pétroliers lourds, le charbon ou encore la biomasse. Ce procédé devient économiquement intéressant lorsque le coût réduit de la matière première compense les investissements plus élevés comparés au vaporeformage.

L'oxydation partielle se réalise à haute température (900–1500 °C) et haute pression (20–60 bars), en présence d'oxygène (comme oxydant) et de vapeur d'eau (comme modérateur thermique). Contrairement au vaporeformage, cette réaction est exothermique et ne nécessite généralement pas de catalyseur [23].

- **Oxydation partielle des résidus pétroliers lourds :**

Ce procédé implique principalement deux réactions :

- La production de gaz de synthèse (réaction globale simplifiée).
- La conversion du monoxyde de carbone.

Comme pour le vaporeformage, la majorité des réactions sont en équilibre, à l'exception de la réaction d'oxydation proprement dite, qui est quasi totale en raison des températures élevées dans le réacteur.

- **Réactions principales :**

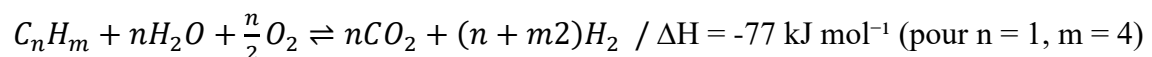
- **Réaction 1 : Oxydation partielle**



- **Réaction 2 : Conversion du monoxyde de carbone**



- **Bilan des deux réactions :**



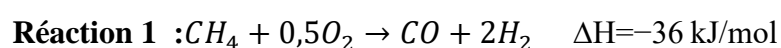
La réaction 1 est une combustion avec déficit d'oxygène, donc incomplète. Elle produit principalement CO et H_2 , ainsi que des quantités variables de H_2O , suie (C), et CH_4 [25].

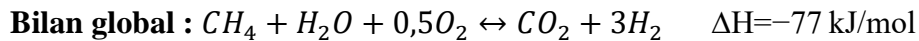
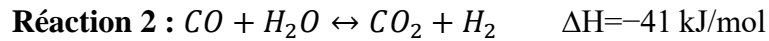
Des réactions secondaires comme la conversion du CO (water-gas shift) ou la méthanation peuvent également avoir lieu, afin d'augmenter la production d'hydrogène et de réduire les impuretés du gaz de synthèse, selon les besoins du procédé.

- **Oxydation partielle du gaz naturel :**

L'oxydation partielle du gaz naturel n'est généralement pas utilisée pour la production d'hydrogène, au profit du procédé de vaporeformage. Cependant, elle peut être envisagée dans certaines applications chimiques ou dans les procédés GTL (Gas to Liquids), où un rapport H_2/CO légèrement inférieur à 2 est souhaité [23].

La charge d'alimentation est composée principalement de méthane (CH_4). En posant $n = 1$ et $m = 4$, les réactions deviennent :





La première réaction est exothermique et selon les conditions opératoires, conduit à un rapport H_2/CO compris entre 1,6 et 1,9.

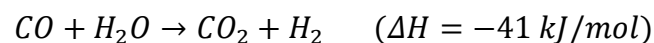
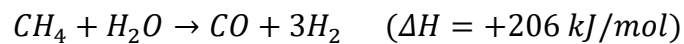
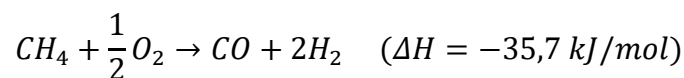
La deuxième réaction est également exothermique.

Le rendement global en hydrogène, par rapport au méthane utilisé, est généralement de l'ordre de 27 % en poids, ce qui est inférieur au rendement obtenu par la voie du vaporeformage (environ 30 % en poids).

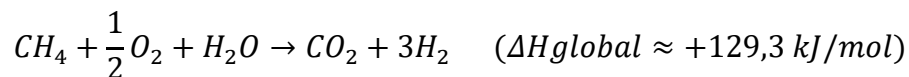
C. La production du l'hydrogène par autothermique :

Le reformage autothermique (ATR) combine oxydation partielle exothermique et vaporeformage endothermique dans un même réacteur à lit fixe [28].

- **Réactions clés :**



- **Équation globale :**



Le fonctionnement s'effectue généralement à une température comprise entre 900 et 1100 °C et sous une pression de 20 à 60 bar, en présence d'un catalyseur au nickel. Les étapes de purification du gaz obtenu sont semblables à celles du vaporeformage, incluant un passage par le Water Gas Shift suivi d'une décarbonatation et d'une méthanation ou d'un traitement par PSA [28].

- **Avantages :**
 - Équilibre thermique auto-alimenté (la chaleur de l'oxydation compense celle du vaporeformage).
 - Procédé adapté aux installations industrielles de grande échelle.
 - Potentiel pour une production d'hydrogène bas carbone.
- **Inconvénients :**
 - Besoin d'oxygène pur (coût élevé).
 - Présence de suies et de contaminants (ex. : H_2S).
 - Rendement en hydrogène inférieur au vaporeformage.
 - Technologies de séparation (membranes) encore au stade expérimental.
 - Complexité du procédé à haute pression/température.

D. La pyrolyse du méthane :

La pyrolyse du méthane est un procédé thermo-chimique permettant de produire de l'hydrogène dit « *turquoise* » sans émission directe de CO_2 , contrairement au vaporeformage (SMR). Elle repose sur la décomposition du méthane (CH_4) en hydrogène (H_2) et en carbone solide (C), selon la réaction : $CH_4 \rightarrow C + 2H_2$ $\Delta H = +37,7$ kJ/mol

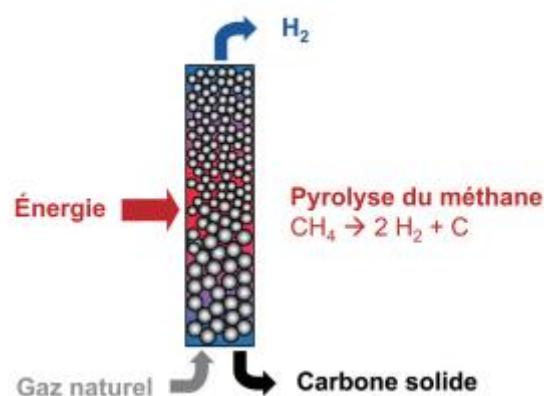


Figure II.4: Obtention d'hydrogène par pyrolyse du méthane [29].

Ce procédé nécessite des températures élevées (1200 °C sans catalyseur), mais peut être optimisé à 750 °C grâce à des catalyseurs adaptés. L'énergie thermique peut être fournie par un four électrique, le solaire concentré ou le plasma thermique [30].

Sur le plan environnemental et économique, la pyrolyse consomme nettement moins d'énergie que l'électrolyse de l'eau, et permet de valoriser le carbone solide en produits à haute valeur ajoutée (nanotubes, nanofilaments), ce qui en fait une technologie prometteuse pour une transition énergétique bas-carbone [30].

- **Coûts :**
- Coût du kg d' H_2 par SMR : 2 €.
- Coût du kg d' H_2 par pyrolyse : entre 2,6 et 3,2 €.

Ce coût pourrait être réduit si le carbone co-produit est valorisé, et si des taxes sur les émissions de CO_2 augmentent.

- **Avantages de la pyrolyse du méthane :**
- Absence directe d'émission de CO_2
- Moins énergivore que l'électrolyse ou le SMR
- Valorisation possible du carbone produit (matériaux à haute valeur ajoutée)
- Procédé adapté à une production plus propre
- **Inconvénients de la pyrolyse du méthane :**
- Technologie encore peu mature industriellement
- Coûts de production élevés par rapport au SMR
- Besoin d'une source de chaleur écologique pour être totalement durable

La pyrolyse du méthane constitue une technologie d'avenir pour la production d'hydrogène turquoise. Elle présente un compromis intéressant entre l'efficacité énergétique, l'impact environnemental et le potentiel de déploiement à moyen terme. Elle pourrait jouer un rôle de transition entre les méthodes fossiles classiques et les technologies plus propres telles que l'électrolyse de l'eau alimentée par des énergies renouvelables.

E. Production d'hydrogène par gazéification :

- **Principe de base :**

La gazéification est une conversion thermochimique d'un matériau carboné (biomasse, charbon, etc.) par oxydation partielle à haute température (800–1200 °C), en présence d'un gaz caloporteur. Ce processus permet la transformation de la matière carbonée en gaz de synthèse, principalement composé de H_2 , CO , CH_4 , CO_2 , H_2O et d'hydrocarbures légers [31].

Elle comprend généralement trois étapes successives :

- **Le séchage :** pour éliminer l'humidité.
- **La pyrolyse :** qui produit des goudrons, huiles et résidus solides.
- **La gazéification proprement dite :** où le carbone résiduel, les goudrons et les gaz issus de la pyrolyse sont convertis en gaz par oxydation partielle.

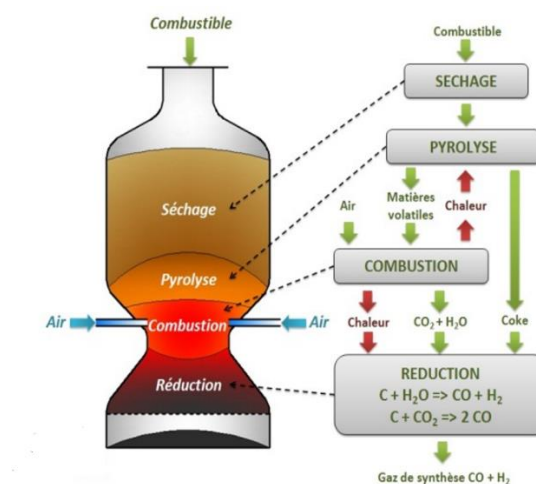


Figure II.5 : mécanismes de la gazéification [32].

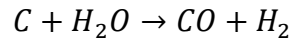
- **Types de gazéification :**

Il existe deux grandes catégories selon la température :

- **Gazéification à basse température (800–1000 °C) :** le gaz produit contient 50 % de H_2 et CO , et le reste en méthane et hydrocarbures lourds.
- **Gazéification à haute température (>1200 °C) :** permet une conversion totale en gaz de synthèse.

- **Gazéification à la vapeur :**

Dans un réacteur adapté, la gazéification à la vapeur est réalisée à la vapeur est réalisée à 800–900 °C. La réaction principale est l'interaction endothermique entre le carbone solide et la vapeur d'eau :

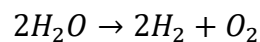


Cette réaction produit un gaz de synthèse riche en hydrogène et monoxyde de carbone. La chaleur nécessaire est apportée par un fluide caloporteur chauffé [31].

II.2.2. Production de l'hydrogène par électrolyse (méthode électrochimique):

L'électrolyse de l'eau est une méthode électrochimique permettant de séparer l'eau en hydrogène et en oxygène à l'aide d'un courant électrique continu [33]. Ce procédé repose sur l'application d'une différence de potentiel entre deux électrodes (anode et cathode) immergées dans un bain électrolytique, créant ainsi un champ électrique orienté qui provoque la migration des ions : les cations vers la cathode et les anions vers l'anode [34].

La réaction globale s'exprime par :



Le potentiel théorique de dissociation de l'eau est de 1,481 V à 298 K. Cependant, dans les systèmes industriels, la tension appliquée varie généralement entre 1,7 et 2,1 V, ce qui permet d'atteindre des rendements de 70 à 85 % [34]. Bien que ce procédé soit techniquement simple, sa forte demande énergétique limite actuellement son déploiement à grande échelle. Toutefois, s'il est couplé à des sources d'énergie renouvelable, il représente une solution prometteuse pour une production durable d'hydrogène, sans émissions polluantes, notamment pour les véhicules à pile à combustible [33].

Trois principales technologies d'électrolyse de l'eau sont aujourd'hui utilisées, chacune présentant des caractéristiques distinctes en termes de rendement, de coût, et de maturité industrielle : l'électrolyse alcaline, l'électrolyse avec membrane échangeuse de protons (PEM), et l'électrolyse à haute température (SOEC) [22]. Ces technologies sont représentées dans la Figure II.6.

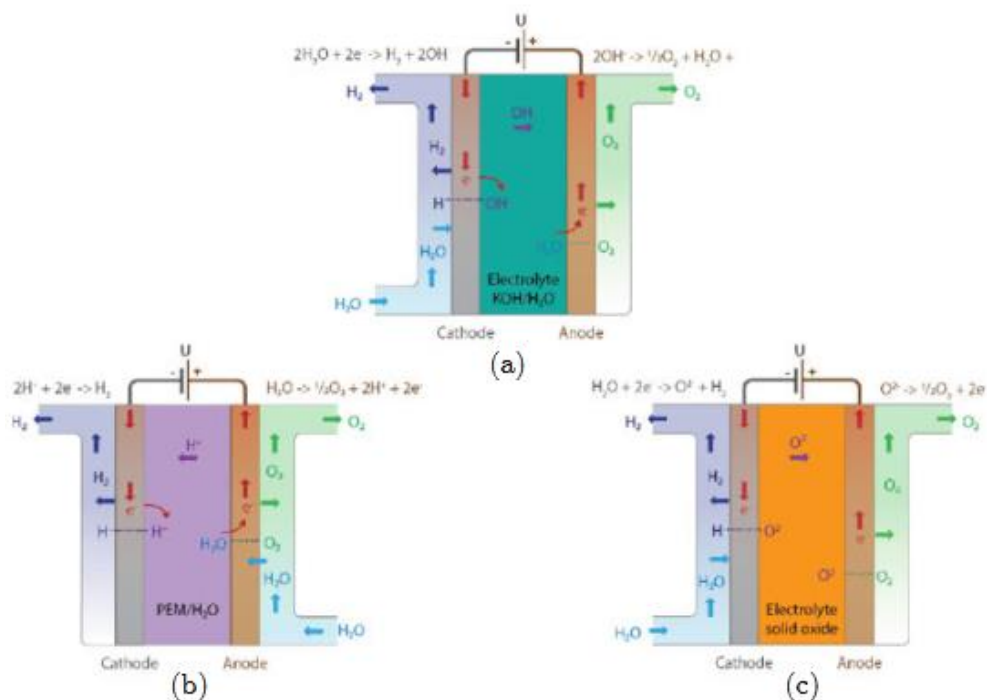


Figure II.6: Schémas des trois types d'électrolyseurs : (a) Alcalin (b) PEM (c) SOEC [35].

Ces trois technologies diffèrent sensiblement en matière de conditions de fonctionnement, de flexibilité opérationnelle, de rendement énergétique, de durabilité, et de coût. Le tableau suivant présente une comparaison synthétique de leurs principales caractéristiques techniques et économiques [36].

Paramètres	AEL	PEME	SOEL
Paramètres de fonctionnement			
Température de la cellule (°C)	60–90	50–80	700–900
Pression typique (bar)	10–30	10–30	1–15
Densité de courant (A/cm ²)	0,25–0,45	1,0–2,0	0,3–1,0
Flexibilité			
Flexibilité de charge (% de la charge nominale)	20–100	0–100	-100/+100
Temps de démarrage à froid	1–2 h	5-10min	heurs
Temps de démarrage à chaud	1–5 min	< 10 s	15 min
Efficacité			
Rendement nominal du stack (%)	63–71%	60–68%	100% ^a
Consommation énergétique spécifique (kWh/Nm ³)	4,2–4,8	4,4–5,0	3
Rendement nominal du système (PCI) (%)	51–60%	46–60%	76–81% ^b

Consommation énergétique spécifique (kWh/Nm ³)	5,0–5,9	5,0–6,5	3,7–3,9
Capacité disponible			
Puissance max. nominale par stack (MW)	6	2	< 0,01
Production d'hydrogène par stack (Nm ³ /h)	1440	400	< 10
Surface de la cellule (m ²)	< 3,6	<0,13	<0,06
Durabilité			
Durée de vie (kh)	55–120	60–100	(8–20) ^c
Dégradation du rendement (%/an)	0,25–1,5	0,5–2,5	2–50
Paramètres économiques			
Coût d'investissement (€/kW)	800–1500	1400–2100	> 2000 ^c
Coûts de maintenance (% du coût d'investissement/an)	2–3	3–5	n.a.

Tableau II. 1 : Les différentes caractéristiques des procédés d'électrolyse de l'eau [36].

Comme l'illustre la tableau II. 1, chaque procédé présente des avantages spécifiques selon les applications visées. La technologie PEM est actuellement considérée comme la plus prometteuse en raison de sa compacité, de sa flexibilité et de son potentiel de déploiement à grande échelle, bien que la technologie alcaline reste largement utilisée et maîtrisée.

Dans les sections suivantes, une analyse détaillée sera consacrée à chaque technologie d'électrolyse.

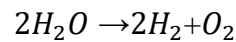
✓ Les différentes techniques de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau :

A- Electrolyse Alcaline :

L'électrolyse alcaline est la première technologie d'électrolyse développée à l'échelle industrielle, après la découverte du principe de base en 1800. Son industrialisation a réellement commencé au début du XXe siècle, notamment avec la mise au point d'électrolyseurs bipolaires. Cette technologie, de conception relativement simple, est aujourd'hui bien maîtrisée et largement répandue dans le monde, notamment en Amérique du Nord, en Allemagne et au Japon [36].

Le principe consiste à plonger deux électrodes (cathode et anode) dans une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium (KOH), de concentration typique comprise entre 25 % et 40 % selon

la température d'exploitation (80 à 160 °C) [36,37]. Les électrodes sont séparées par un diaphragme conducteur aux ions hydroxyles (OH^-), qui empêche la recombinaison des gaz produits (H_2 et O_2), limitant ainsi le risque de formation de mélanges explosifs. La réaction globale s'écrit :



Les demi-réactions sont :

- Cathode: $2\text{H}_2\text{O} + 2e^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^-$
- Anode: $2\text{OH}^- \rightarrow \frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2e^-$

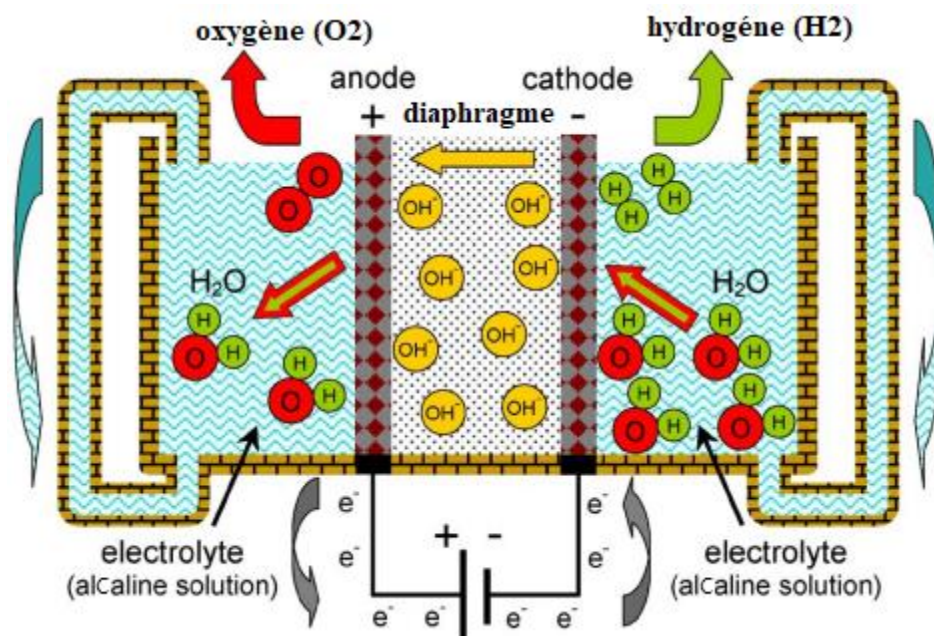


Figure II.7 : Schéma de principe de fonctionnement d'une cellule d'électrolyse alcaline [37].

Le rendement énergétique typique de cette technologie varie entre 47 % et 82 %, en fonction des conditions de fonctionnement et du design [37]. Toutefois, la présence d'un électrolyte liquide et d'un diaphragme génère des pertes ohmiques non négligeables, limitant les densités de courant à environ 0,2 à 0,4 A/cm² [36]. L'électrolyse alcaline est donc peu adaptée aux sources d'énergie intermittentes (solaire, éolien), en raison de l'inertie thermique et chimique du système.

- **Performance et conditions opératoires :**
- Pression de fonctionnement : jusqu'à 30 bar dans certains modèles commerciaux.
- Coût du H_2 : entre 3 et 5 €/kg (varie avec le coût de l'électricité) [36].
- Durée de vie : jusqu'à 15 ans, ce qui constitue un avantage économique majeur.
- Pureté du gaz produit : jusqu'à 99,9 % pour H_2 et 99,7 % pour O_2 , sans purification externe [37].

B- Électrolyse PEM (à membrane échangeuse de protons)

L'électrolyse PEM (Proton Exchange Membrane) est de même nature que pour la pile à Combustible de même technologie [38]. Repose sur l'utilisation d'un électrolyte solide constitué d'une membrane polymère perfluorosulfonée, généralement en Nafion®. Les électrodes sont recouvertes de catalyseurs à base de métaux nobles, souvent poreux. [36]

- ✓ Une cellule élémentaire d'électrolyseur PEM comprend un assemblage membrane-électrode (AME), formé de :
 - Une membrane conductrice de protons (électrolyte solide).
 - Deux couches catalytiques (anode et cathode).
 - Des plaques bipolaires assurant la distribution des fluides et le contact électrique.
- ✓ La membrane assure trois fonctions essentielles :
 - Conducteur ionique (protons H^+).
 - Isolant électronique.
 - Séparateur des gaz (O_2 / H_2).

Le processus commence à l'anode, où l'eau est oxydée pour libérer des protons et des électrons. Les protons traversent la membrane, tandis que les électrons rejoignent la cathode par un circuit externe. À la cathode, ils se recombinent pour former l'hydrogène gazeux.

Pour maintenir la conductivité protonique, la membrane doit rester hydratée, ce qui limite la température de fonctionnement à environ 80 °C.

Les demi-réactions sont :

- Cathode: $H_2O \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + 2H^+ + 2e^-$
 - Anode: $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$
- Réaction globale : $H_2O \rightarrow \frac{1}{2}O_2 + H_2$

Cette réaction endothermique nécessite un apport d'électricité, idéalement fournie par des sources renouvelables (solaire, éolien...), permettant ainsi la production d'un hydrogène décarboné.

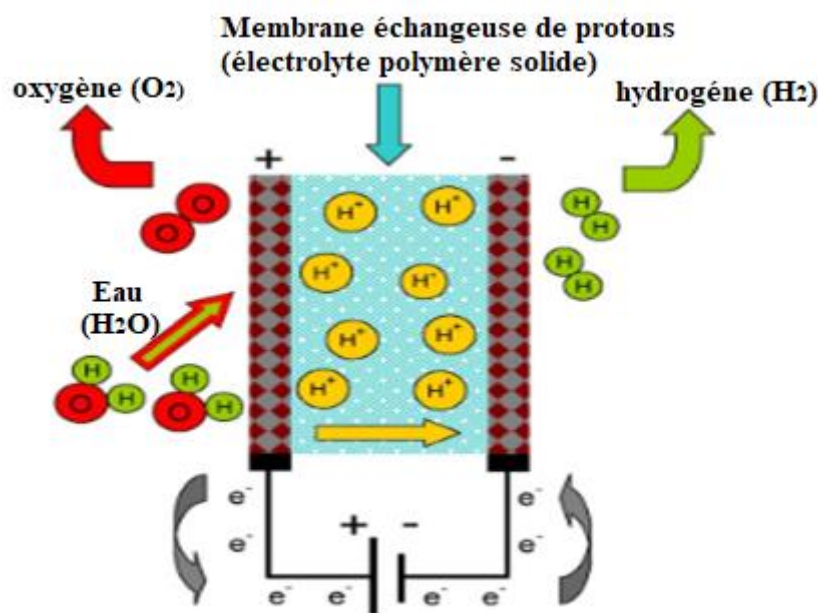


Figure II.8 : Schéma de fonctionnement de l'électrolyse PEM [37].

- **Avantages de l'électrolyse PEM :**
- Compacité et simplicité de conception grâce à la réduction de la distance interpolaire entre les électrodes.
- Grande pureté des gaz produits (>99.999%) grâce à la faible perméabilité de la membrane Nafion®.
- Production directe d'hydrogène sous pression élevée (jusqu'à 150 bars commercialement, et même 350–500 bars pour les prototypes), évitant ainsi une étape de compression coûteuse.

- Réactivité rapide à la variation de la puissance d'entrée, ce qui permet un démarrage en quelques secondes et une adaptation aux énergies renouvelables intermittentes.
- Efficacité énergétique pouvant atteindre 60 %.
- Longue durée de vie démontrée : jusqu'à 60 000 heures en fonctionnement stationnaire, soit 10 à 12 ans en continu.
- Technologie prometteuse pour les applications couplées aux énergies renouvelables grâce à sa souplesse d'exploitation.

• **Inconvénients de l'électrolyse PEM :**

- Coût élevé des composants : membranes (550 €/m² pour Nafion® 115), catalyseurs à base de métaux nobles (platine, iridium, ruthénium), plaques bipolaires.
- Environnement acide de la membrane (équivalent à 0,5 mol/L H_2SO_4) imposant des contraintes sévères sur le choix des matériaux (corrosion, durabilité).
- Cross-perméation de l'hydrogène à travers la membrane, accentuée par la pression cathodique, la finesse de la membrane et les fortes densités de courant.
- Limite de pression maximale liée à la perméation d' H_2 , ce qui restreint l'augmentation de pression pour certains usages.
- Le marché reste encore étroit, nécessitant un fort soutien politique et économique pour un déploiement à grande échelle.

✓ **Comparaison entre Electrolyseurs Alcalins et PEM :**

Critère	PEM	Alcaline
Structure	Densité de courant élevée (1 à 2 A/cm ²). - Structure compacte. - Autorise des pressions de fonctionnement élevées. - Production de masse facilitée due à la conception simple (réduction significative des coûts plus probable). - Conception plus simple, plus sûre.	- Densité de courant faible (<0,4 A/cm ²). - Structure peu compacte – difficile à réduire. - Utilisation de matériels et matériaux moins coûteux (mais production de masse plus compliquée à mettre en œuvre).

Système/prix -	Système/prix - Pression de l'oxygène faible → réduction des coûts d'installation - Echelle de production de 50 cm ³ à 50 Nm ³ /h de H ₂ - Systèmes ultra compacts disponibles - Utilisation de catalyseurs à base de métaux nobles (platine) → coût élevé	- Capacité limitée de variation de la production - Des installations de purge d'azote et antidéflagrantes peuvent être exigées
Fiabilité	Fiabilité - Haute fiabilité dans le temps prouvée (utilisation spatiale/ sous- marins) - Fiabilité démontrée par des R&D nombreuses depuis 1980	- Utilisation commerciale à grande échelle éprouvée, robuste - Contamination potentielle des tuyauteries par le KOH
Pression H ₂ /O ₂ aspect sécurité	- Pression différentielle jusqu'à 3000 psi (200bar) démontrée - Purge de l'H ₂ sûre par l'ouverture de vannes à l'extinction ou en cas de panne d'alim. - Mélange très limité entre l'H ₂ et l'O ₂	- faible pression différentielle tolérée Extinction sûre difficile ; des systèmes de contrôle spécifiques et d'énergie de secours sont exigés pour éviter un possible et catastrophique mélange d'H ₂ et d'O ₂

Tableau II.2 : Comparaison des technologies Alcaline et PEM [38].

C- Électrolyse à oxyde solide (SOE – Solid Oxide Electrolysais)

L'électrolyseur à oxyde solide (SOE) représente une technologie avancée qui permet la décomposition de la vapeur d'eau en hydrogène et oxygène à haute température, généralement entre 600 °C et 900 °C. Cette température élevée réduit significativement la demande énergétique électrique, augmentant ainsi l'efficacité globale du procédé. En effet, une part importante de l'énergie nécessaire peut être fournie sous forme de chaleur, ce qui rend cette méthode particulièrement attractive lorsqu'une source de chaleur haute température est disponible (ex : réacteurs nucléaires à gaz ou géothermie) [37].

Les demi-réactions sont :

- cathode: $H_2O(g) + 2e^- \rightarrow H_2(g) + O^{2-}$
- L'anode : $O^{2-} \rightarrow \frac{1}{2} O_2(g) + 2e^-$

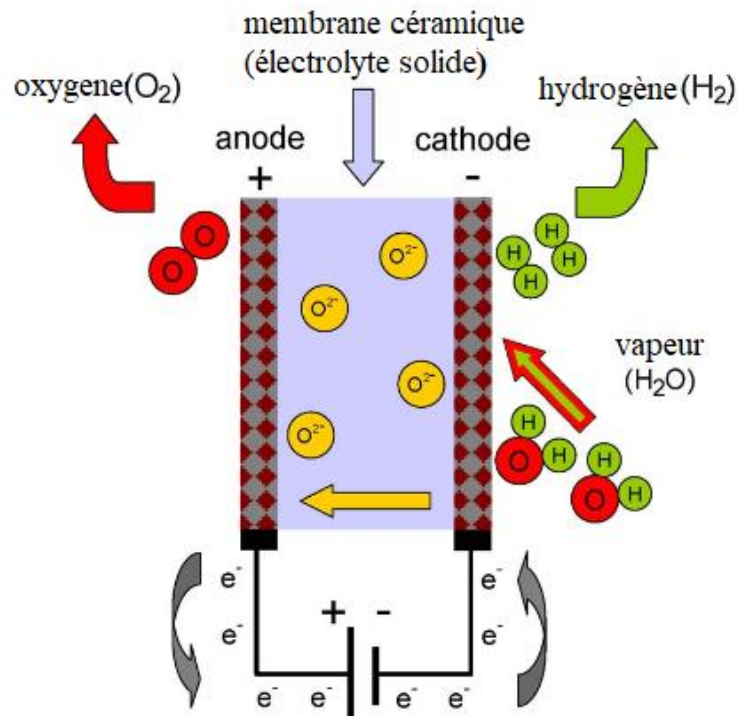


Figure II.9 : Schéma de fonctionnement de l'électrolyse SOE [37].

Les électrodes sont généralement poreuses pour faciliter les échanges gazeux, et sont constituées de céramiques-métal (cermets) : nickel/YSZ pour la cathode et matériaux à base de manganites, ferrites ou cobaltites pour l'anode. L'utilisation de céramiques conductrices de protons comme les zirconnates de strontium permet aussi d'envisager un fonctionnement à température intermédiaire (700 °C), avec un hydrogène plus pur produit directement à la cathode [37].

- **Avantages de la technologie SOE:**
- Rendement élevé : une partie de l'énergie est fournie sous forme de chaleur, ce qui diminue l'énergie électrique requise.
- Potentiel de production directe d'hydrogène sous pression.

- Intégration possible avec des sources de chaleur renouvelables (géothermie, solaire thermique) ou nucléaires.
- Réactions rapides grâce à la température élevée.
- Technologie prometteuse pour le stockage de l'énergie en hydrogène.
- **Inconvénients et défis actuels :**
 - Instabilité à long terme : dégradation accélérée des cellules en mode électrolyse (vieillessement de l'électrolyte, désactivation des électrodes).
 - Problèmes d'étanchéité et de compatibilité thermique des matériaux.
 - Coût d'investissement élevé (1000 \$/kW actuellement, bien au-dessus de l'objectif du DOE de 170 \$/kW).
 - Complexité liée à la séparation vapeur-hydrogène à la sortie cathodique.
 - Perte de rendement liée aux surtensions ohmiques et aux limitations de diffusion.
- **État de développement et perspectives :**

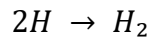
La technologie SOE est encore en phase de recherche et développement. Plusieurs centres dans le monde travaillent activement sur le sujet.

II.2.3. Photolyse de l'eau pour la production d'hydrogène :

La photolyse de l'eau est un procédé photochimique par lequel les molécules d'eau sont décomposées en hydrogène et oxygène sous l'effet d'un rayonnement lumineux, principalement les rayons ultraviolets (UV) de haute énergie. Cette dissociation directe nécessite une énergie d'environ 285,57 kJ/mol, absorbée à des longueurs d'onde autour de 190 nm. Toutefois, dans des conditions naturelles, l'eau pure n'absorbe pas efficacement cette lumière, rendant la photolyse directe très difficile [39].

Pour surmonter cette limite, des photo catalyseurs tels que l'oxyde d'étain (SnO), l'oxyde de zinc (ZnO) ou d'autres oxydes semi-conducteurs sont utilisés afin de faciliter la séparation des charges et d'abaisser l'énergie requise. Ces matériaux permettent d'activer la réaction à l'aide de la lumière solaire ou d'un rayonnement UV artificiel, selon les équations suivantes [39] :





Malgré son intérêt théorique pour une production propre d'hydrogène, la photolyse de l'eau reste encore au stade expérimental en raison de son faible rendement et de la difficulté à concevoir des systèmes stables et efficaces à grande échelle.

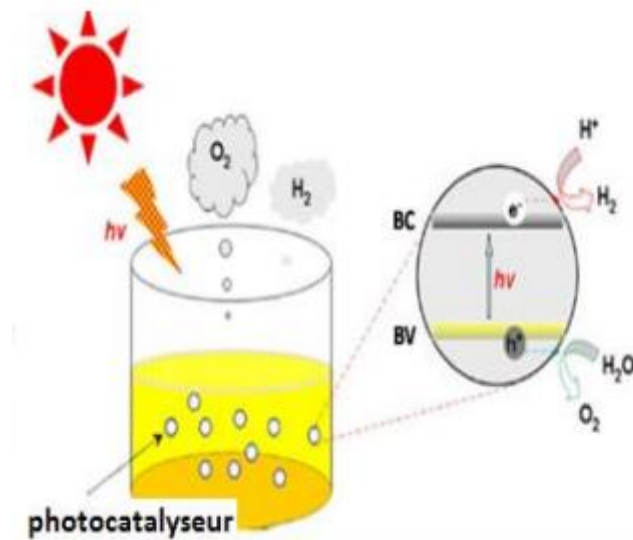


Figure II.10: Schéma de principe de la photo-électrolyse [14].

II.2.4. Production de l'hydrogène à partir de l'énergie nucléaire :

L'énergie nucléaire représente une voie prometteuse pour la production d'hydrogène bas carbone, en particulier grâce aux réacteurs nucléaires à haute température (HTGR – High Temperature Gas-cooled Reactor) et très haute température (VHTR – Very High Temperature Reactor), appartenant à la quatrième génération des réacteurs. Contrairement aux centrales nucléaires classiques, dont la température de sortie (300°C) est insuffisante pour des procédés de dissociation de l'eau, les HTGR et VHTR peuvent atteindre des températures de 700 à 800°C, ce qui ouvre la voie à des technologies avancées de production d'hydrogène [40].

Ces réacteurs peuvent alimenter deux procédés principaux :

- L'électrolyse de l'eau à haute température (HTE – High Temperature Electrolysis), via des électrolyseurs à oxyde solide (SOEC), permettant une amélioration significative de l'efficacité énergétique.

- Les cycles thermochimiques, qui permettent de dissocier directement l'eau sans conversion intermédiaire en électricité, par des réactions chimiques alimentées par la chaleur du réacteur.

L'électrolyse à haute température présente deux avantages majeurs par rapport à l'électrolyse conventionnelle :

- La part d'énergie électrique nécessaire est réduite, car une plus grande part de l'apport énergétique est fournie sous forme de chaleur.
- Les pertes ohmiques dans la cellule électrolytique sont également plus faibles à haute température, ce qui améliore les performances globales du système.

Par ailleurs, cette approche permet de produire de l'hydrogène sans émission directe de CO_2 , ce qui en fait une filière stratégique dans la perspective de la décarbonation du secteur énergétique.

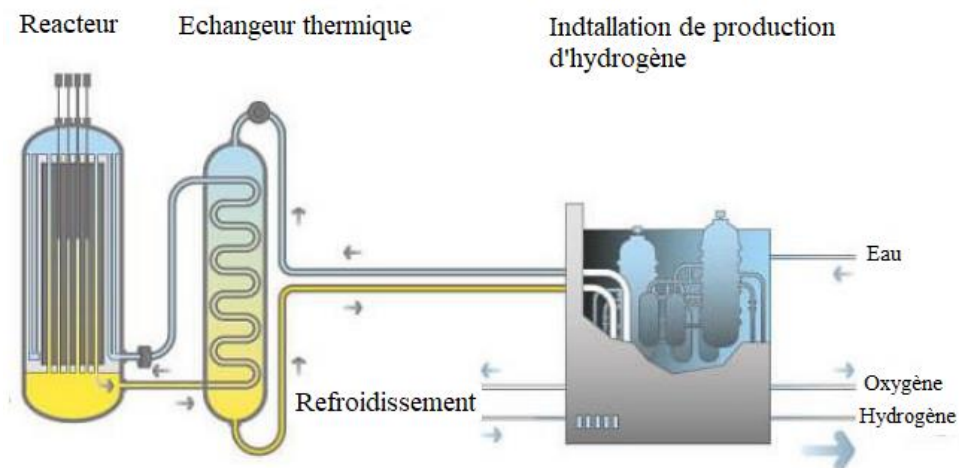


Figure II.11: Schéma d'un réacteur nucléaire haute température [41].

II.2.5. Production d'hydrogène à partir de la biomasse :

La biomasse représente une ressource renouvelable précieuse pour la production d'hydrogène, notamment dans le cadre de la transition vers des vecteurs énergétiques plus durables. Le terme biohydrogène désigne l'hydrogène obtenu à partir de matières organiques, principalement par des procédés biologiques ou thermochimiques. Ces procédés permettent de

valoriser des déchets solides ou liquides, réduisant ainsi l'impact environnemental tout en offrant une alternative aux sources fossiles traditionnelles [42].

La production de biohydrogène s'inscrit dans une logique d'économie circulaire, où les sous-produits organiques deviennent des matières premières pour l'énergie. Elle constitue ainsi une voie prometteuse pour un hydrogène vert et respectueux de l'environnement, bien que plusieurs défis technologiques et économiques subsistent.

La figure suivante illustre les différentes sources de biomasse ainsi que leur conversion en énergie et en produits utiles tels que l'hydrogène, à travers des procédés comme l'hydrolyse, la combustion, la fermentation et la gazéification.

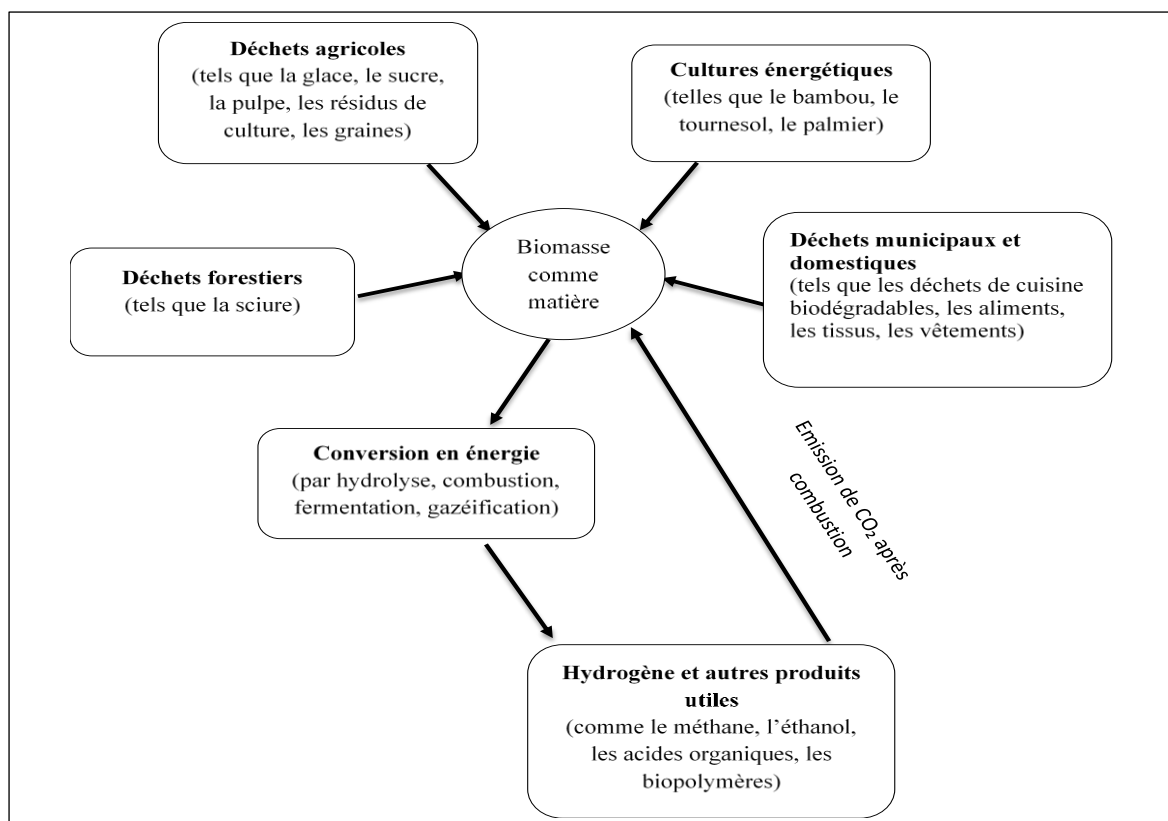


Figure II.12 : Sources de biomasse et leur conversion en hydrogène et autres produits utiles [39].

II.2.5.1. Les méthodes biologiques de production d'hydrogène à partir de la biomasse :

La production de biohydrogène à partir de la biomasse repose sur plusieurs voies biologiques, classées en deux grandes catégories : les méthodes dépendantes de la lumière

(comme la bio photolyse directe et indirecte), et les méthodes indépendantes de la lumière (telles que la fermentation sombre et la photo fermentation). Des approches hybrides et les cellules d'électrolyse microbienne complètent ce panel technologique [43].

Ces procédés utilisent une diversité d'organismes (algues vertes, cyanobactéries, bactéries anaérobies, archées, etc.) capables de convertir des substrats organiques ou l'eau, avec ou sans lumière, en hydrogène. L'un des grands avantages de ces méthodes réside dans leur efficacité énergétique et la possibilité d'exploiter des déchets comme substrat, ce qui favorise une production durable et la valorisation des déchets.

Chaque technique présente des conditions de fonctionnement spécifiques ainsi que des avantages et des limitations en matière de rendement, durabilité et faisabilité.

A- La fermentation sombre :

La fermentation sombre est une méthode biologique de production d'hydrogène sans lumière, utilisant des micro-organismes anaérobies tels que les Clostridia et Enterobacteria [42]. Les Clostridia sont les plus efficaces pour convertir les substrats glucidiques, bien que le rendement soit influencé par des facteurs comme le pH et la toxicité du milieu.

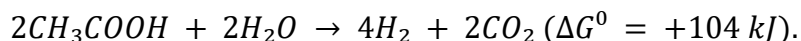
Les principales réactions produisent soit de l'acétate (avec un rendement maximal de 4 mol H_2 /mol glucose), soit du butyrate (2 mol H_2 /mol glucose), soit de l'éthanol (sans H_2). En pratique, ces réactions coexistent, donnant un rendement typique de 1,5 à 3 mol H_2 /mol glucose.

Les sous-produits comme les acides gras volatils peuvent être valorisés dans une seconde étape via la fermentation photo-dépendante, dans le cadre de procédés combinés sombre-lumière.

B- Photo-fermentation :

La photo-fermentation est une méthode biologique de production d'hydrogène utilisant des bactéries photosynthétiques anaérobies, notamment les bactéries pourpres non sulfureuses (PNS), qui réduisent les ions H^+ en H_2 grâce à l'énergie lumineuse et à l'oxydation de composés organiques [39].

Le genre *Rhodobacter* est le plus utilisé. Ces bactéries consomment divers substrats organiques tels que l'acétate, les acides aminés et les sucres. La réaction typique avec l'acétate est :



Cette réaction, non spontanée, nécessite un apport d'énergie lumineuse pour produire jusqu'à 4 moles d'hydrogène par mole d'acétate [39].

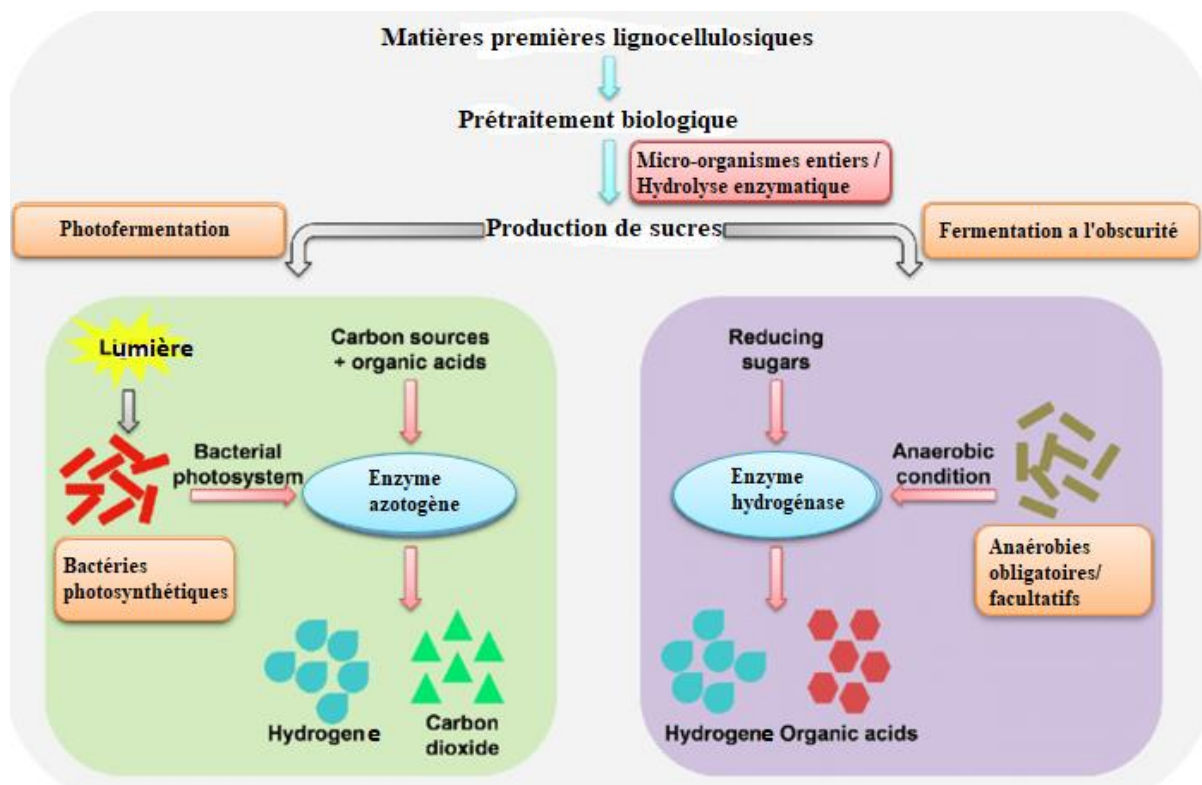


Figure II.13 : Voies biologiques de production d'hydrogène à partir de substrats lignocellulosiques par fermentation sombre et photo-fermentation [44].

II.2.5.2. Les méthodes thermochimiques de production d'hydrogène à partir de la biomasse:

La conversion thermochimique de la biomasse permet d'obtenir une variété de combustibles liquides, solides et gazeux, et revêt également une grande importance du point de vue industriel et écologique. La production d'hydrogène par voie thermochimique à partir de différents types de biomasse est considérée comme une méthode viable et économiquement attractive. Ce procédé permet la production d'hydrogène à partir de diverses biomasses humides sans nécessiter l'ajout de produits chimiques [45].

Cependant, des avancées supplémentaires sont encore nécessaires pour optimiser la plupart des procédés de conversion thermochimique, car plusieurs obstacles subsistent, notamment le coût variable des équipements, l'approvisionnement en matières premières, des défis pratiques ainsi que l'acceptabilité publique.

Les principales méthodes thermochimiques comprennent la pyrolyse, la gazéification et les procédés en liquide supercritique (voir Figure II.15).

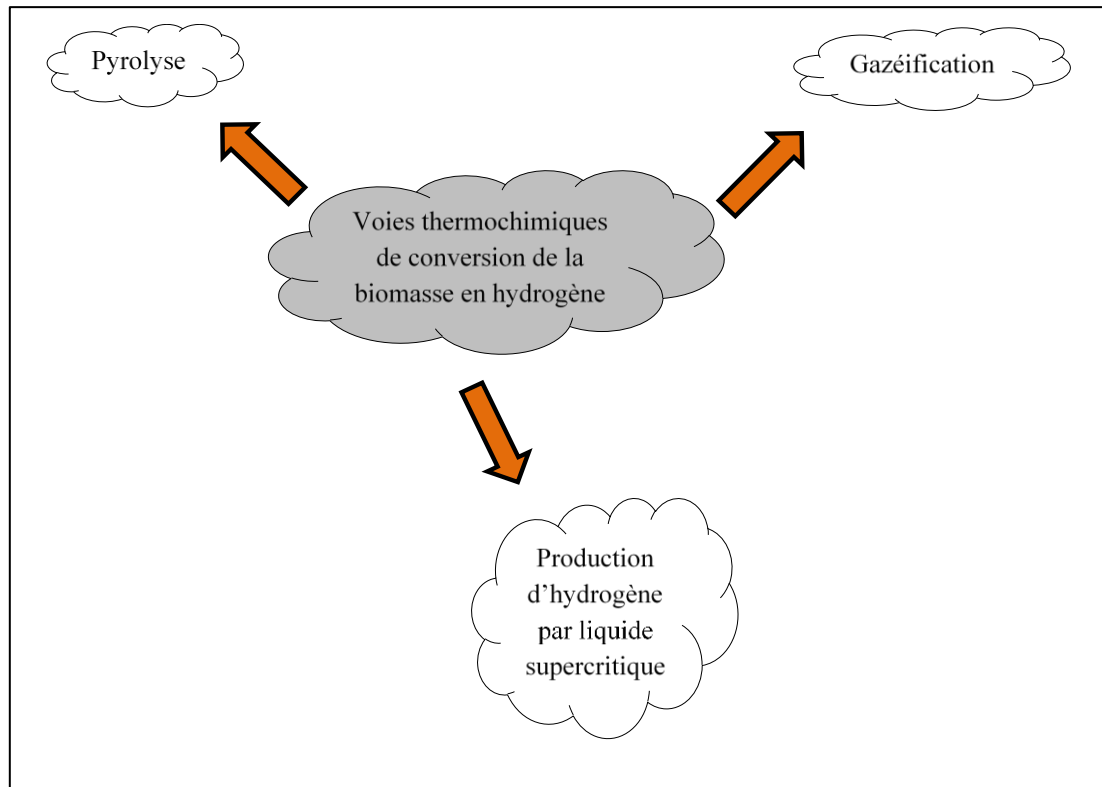


Figure II.14: Méthodes thermochimiques de production d'hydrogène.

A- La pyrolyse:

La pyrolyse est un procédé de conversion thermique de la biomasse réalisé dans un environnement inerte (en absence d'oxygène). Au cours de ce processus, les longues chaînes carbonées se décomposent en molécules plus petites, produisant ainsi trois types de produits [45] :

- Des gaz (tels que H_2 , CO , CO_2 et CH_4) ;
- de l'huile bio (bio-huile) ;
- du charbon bio (biochar).

Différents modes de pyrolyse existent selon la vitesse de chauffage et la température, notamment la pyrolyse lente et rapide, influençant la quantité et la qualité des produits obtenus.

Le gaz généré par la pyrolyse constitue une source pour la production d'hydrogène, et l'optimisation des conditions opératoires (comme la température et l'utilisation de catalyseurs) permet d'améliorer l'efficacité de ce processus. La pyrolyse apparaît ainsi comme une technique prometteuse pour la production durable d'hydrogène à partir de ressources renouvelables, bien que des défis techniques subsistent, notamment le contrôle des sous-produits et l'amélioration du rendement en hydrogène [45].

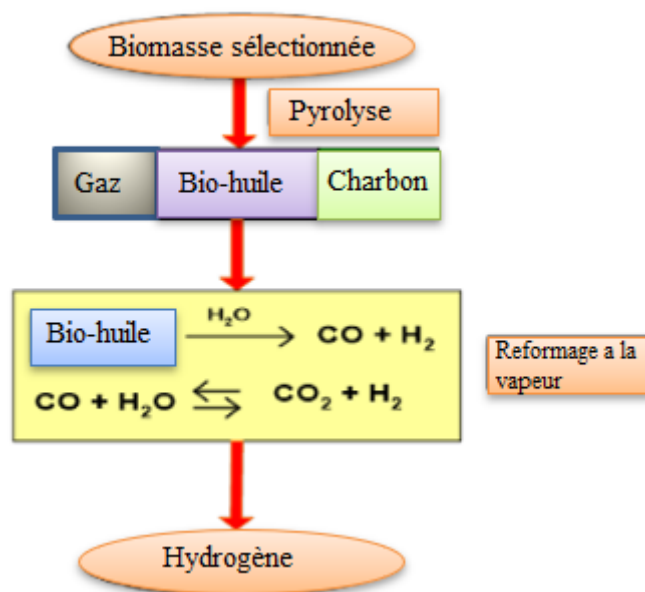
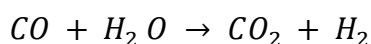


Figure II.15: Production d'hydrogène via la pyrolyse de la biomasse [45].

B- Gazéification :

La gazéification de la biomasse est un procédé thermochimique reposant sur une combustion partielle de la matière organique pour produire un gaz de synthèse riche en H₂ et CO. La réaction clé est celle du water-gas shift :



L'ajout de catalyseurs (ex. : Ni, Ca, K₂CO₃) et l'optimisation des paramètres opératoires (température, vapeur, rapport CaO/biomasse) permettent d'améliorer significativement le rendement en hydrogène, atteignant jusqu'à 73 % en volume selon les études expérimentales récentes [45].

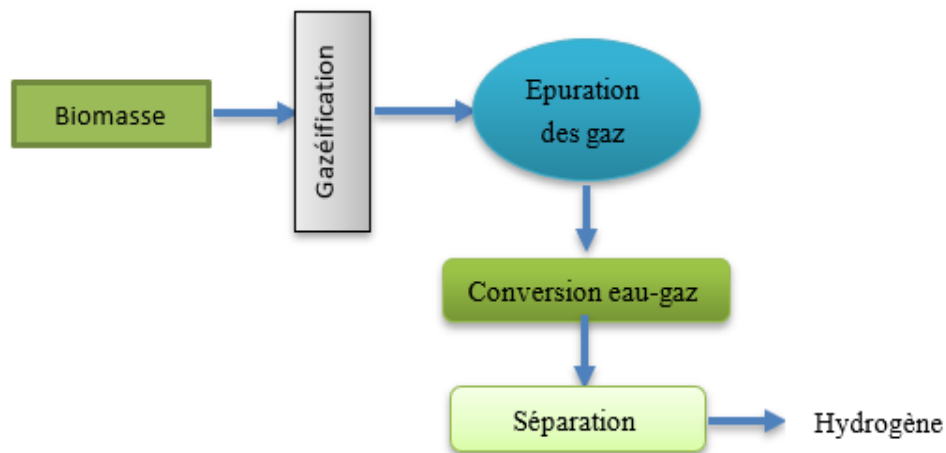


Figure II.16: Production d'hydrogène par gazéification de la biomasse [45].

C- Production d'hydrogène par gazéification de la biomasse via l'eau supercritique:

La gazéification de la biomasse par eau supercritique (SCWG) constitue une méthode innovante et efficace pour produire de l'hydrogène à partir de biomasse humide, sans nécessité de séchage préalable. Grâce aux propriétés uniques de l'eau supercritique — agissant comme un solvant non polaire sous conditions critiques — la réaction se déroule dans un environnement homogène, favorisant la dégradation complète de la biomasse en un gaz riche en H_2 . Cette technologie, plus économe en énergie que les procédés classiques, montre un fort potentiel pour la valorisation durable des déchets organiques en énergie propre.

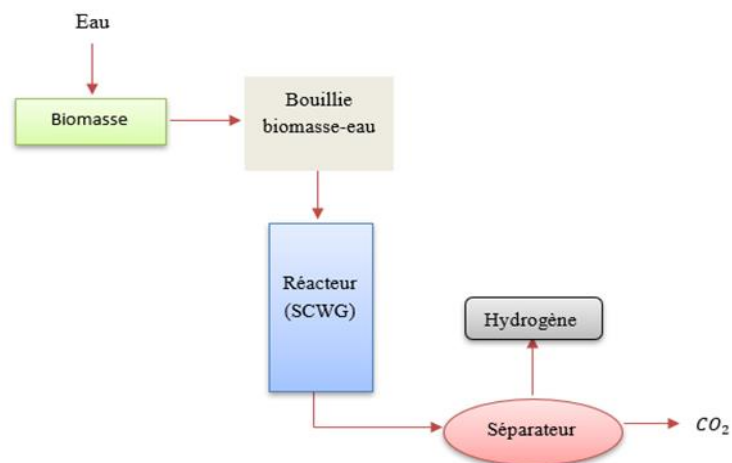


Figure II.17 : SCWG pour la conversion de la biomasse en hydrogène [45].

II.2.6. Production de l'hydrogène à partir des énergies renouvelables :

L'électrolyse de l'eau, lorsqu'elle est alimentée par une électricité issue des énergies renouvelables, constitue une solution prometteuse pour produire de l'hydrogène propre et durable. Malgré un rendement global modéré dû aux conversions successives (production d'électricité puis électrolyse), cette voie présente un avantage environnemental majeur puisqu'elle repose sur des sources inépuisables et non émettrices de gaz à effet de serre [47, 48].

Parmi les sources renouvelables utilisées, on retrouve l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marémotrice ainsi que la valorisation énergétique de la biomasse (déjà abordée). L'électricité verte ainsi produite alimente des électrolyseurs qui génèrent de l'hydrogène sans émissions de carbone. Le schéma général du système — production, stockage, distribution — est présenté à la Figure II.19 [49].

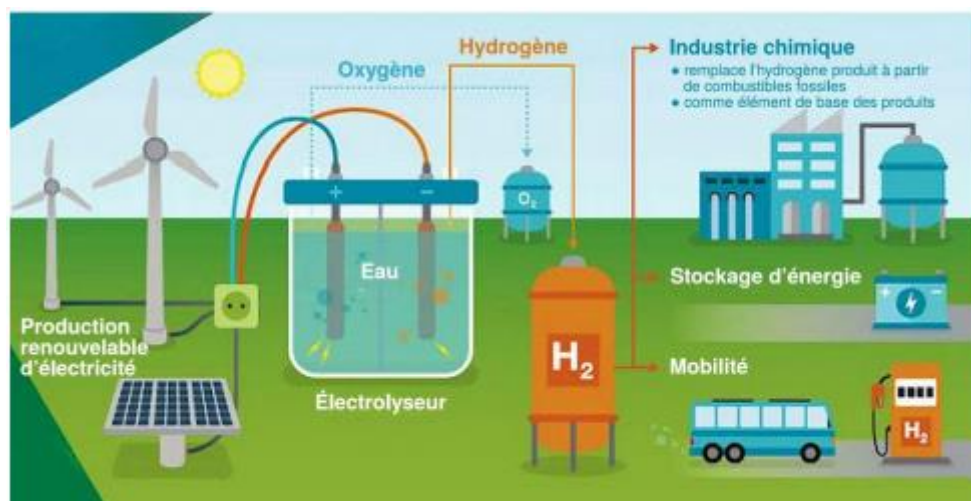


Figure II.18 : Production de l'hydrogène à partir des énergies renouvelables et stockage, et distribution [49].

Ainsi, l'intégration des énergies renouvelables dans la filière hydrogène représente une voie stratégique pour concilier sécurité énergétique et réduction des émissions. Dans ce qui suit, l'accent sera mis sur les deux sources les plus exploitées à l'échelle mondiale : l'énergie solaire et l'énergie éolienne.

A- L'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est exploitée depuis environ trente ans pour la production d'électricité à partir de la force du vent, au moyen de deux types principaux de turbines : terrestres (onshore) et marines (offshore). Cette forme d'énergie a connu une croissance mondiale significative [48].

B- L'énergie solaire:

L'énergie solaire est l'une des principales sources d'énergie renouvelable, exploitée à travers deux technologies essentielles : le photovoltaïque, qui convertit directement la lumière du soleil en électricité à l'aide de cellules en silicium, et le solaire thermique, qui utilise la chaleur solaire pour chauffer l'eau ou produire de l'électricité à l'aide de turbines.

II.3. Les différentes catégories d'hydrogène selon leur mode de production (ou : selon leur couleur):

Le terme « couleur de l'hydrogène » désigne la source énergétique et le procédé utilisé pour sa production. Cette classification permet de distinguer les différents types d'hydrogène en fonction de leur impact environnemental.

Couleur	Matière première utilisée	Technologie	Coût estimé (base Europe)	Rendement	Emissions de tonnes de CO ₂ par tonne d'hydrogène produite, en ACV (calcul LCOE)
NOIR	Charbon	Gazéification	1000€/t	50 à 70 %	20 (mines à ciel ouvert) 24 (mines souterraines)
Gris	Méthane, dérivés pétroliers	Vaporeformage sans CCS	1600€/t	72 à 82 %	9 à 13

	Dérivés pétroliers	Oxydation partielle sans CCS		53 à 67 %	13 à 18
Bleu	Méthane, dérivés pétroliers	Vaporeformage avec CCS	+500 à 2000€	72 à 82 %	Inférieur à 5
	Dérivés pétroliers	Oxydation partielle avec CCS		53 à 67 %	
	Charbon	Gazéification avec CCS	+1000 à 3000€	50 à 70 %	Inférieur à 20
Turquoise	Méthane	Pyrolyse sans générer de CO ₂	1660€/t 350 à 850 €/t à terme	50 %	Dépend de l'origine de l'électricité utilisée (4 selon mix américain et nul ou négatif si ENR)
Vert	Eau + électricité	Électrolyse → l'énergie provenant de ENR	4000 à 6000€/t (moins cher : l'alcalin, plus cher : le SOEC, entre les deux : le PEM) 2000 à 3000€/t à terme	70 % (jusque 85 % pour le SOEC)	Faible
Rose		Électrolyse → l'énergie provenant de nucléaire			21 selon mix américain et 3 selon mix français
Vert	Biomasse	Thermolyse	2000 à 6000€/t selon la taille des unités	70 %	Faible, nul ou négatif (-15 dans le cas où le biochar produit retourne à la terre)

Tableau II.3: Comparatif des principaux modes de production de l'hydrogène [50].

NB : CCS = captage du CO_2 ; ENR = énergies renouvelables

Ce tableau synthétise les principales caractéristiques environnementales et économiques des différentes "couleurs" de l'hydrogène, issues des procédés de production analysés précédemment. Une comparaison approfondie de ces filières en fonction des usages et des contraintes de stockage sera menée dans le chapitre suivant.

II.4. Conclusion :

À travers ce chapitre, nous avons exploré de manière approfondie les différentes méthodes de production de l'hydrogène, qu'elles soient issues de ressources fossiles, renouvelables, biologiques ou encore nucléaires. Chaque filière a été analysée selon ses principes de fonctionnement, ses rendements énergétiques, ses avantages techniques et ses limites environnementales. Nous avons également abordé la classification de l'hydrogène selon les couleurs, qui permet de mieux apprécier l'empreinte carbone de chaque méthode de production.

Cependant, pour que l'hydrogène puisse jouer pleinement son rôle dans le futur mix énergétique, sa production ne suffit pas : il est également essentiel de maîtriser son stockage, étape clé entre la production et l'utilisation finale. Ainsi, le chapitre suivant sera consacré aux moyens de stockage de l'hydrogène, en mettant en lumière les défis technologiques, économiques et sécuritaires associés à cette étape cruciale de la chaîne de valeur.

Chapitre III

Chapitre III : Les moyennes de stockage d'hydrogène

III.1. Introduction :

Dans le cadre du développement d'une économie de l'hydrogène, le stockage constitue l'un des verrous technologiques et scientifiques majeurs à surmonter.

En effet, le dihydrogène est un gaz extrêmement léger, peu dense à pression atmosphérique, ce qui rend son stockage et son transport particulièrement contraignants. Pour assurer son rôle de vecteur énergétique, il est impératif de pouvoir le stocker de manière efficace, sûre et économiquement viable. Les propriétés physico-chimiques de l'hydrogène – notamment sa tendance à fuir à travers de nombreux matériaux et sa réactivité dans certaines conditions – imposent des exigences élevées en termes de conception des systèmes de stockage. Ces systèmes doivent à la fois minimiser les pertes, garantir la sécurité, et répondre aux besoins spécifiques des applications visées, qu'elles soient industrielles, stationnaires ou mobiles.

Ce chapitre propose une analyse structurée des principales méthodes de stockage de l'hydrogène, classées en trois grandes catégories : le stockage physique (sous forme gazeuse, liquide ou cryo-comprimée), le stockage dans les matériaux solides (par adsorption ou chimisorption), et enfin le stockage chimique (notamment via les hydrures métalliques ou chimiques).

Une analyse comparative approfondie sera menée à partir des capacités massiques, volumiques et énergétiques issues de la littérature, afin de mieux évaluer la pertinence de chaque méthode en fonction des applications.

Enfin, les principales applications industrielles et énergétiques du dihydrogène stocké seront brièvement abordées pour souligner l'enjeu fondamental de la maîtrise de ces technologies dans la transition énergétique.

III.2. Les méthodes de stockages d'hydrogène :

Le stockage d'hydrogène est certainement un verrou technique et scientifique pour le développement de la technologie de l'hydrogène. L'hydrogène est un gaz extrêmement léger qui occupe un volume important dans les conditions de pression standard, c'est à dire à la pression atmosphérique. Pour le stocker et le transporter efficacement, il faut fortement réduire ce volume. Le dihydrogène ne peut jouer son rôle de vecteur d'énergie que si l'on peut le stocker efficacement, pour un coût limité et dans des conditions de sécurité acceptables. Le

risque de fuite de dihydrogène doit être pris en considération, compte tenu du caractère inflammable et explosif de ce gaz dans certaines conditions. Or, en raison de la petite taille de sa molécule, il est capable de traverser de nombreux matériaux, y compris certains métaux. De plus, il en fragilise certains en les rendant cassants [51]. Les méthodes de stockage de l'hydrogène peuvent être classées en trois grandes catégories, comme illustré dans la figure suivante.

Premièrement, l'hydrogène moléculaire peut être stocké sous forme gazeuse ou liquide, sans liaison physique ou chimique significative avec d'autres matériaux. Deuxièmement, l'hydrogène moléculaire peut être adsorbé à la surface ou dans la structure de certains matériaux, et maintenu en place par des interactions physiques faibles, telles que les forces de Van der Waals. Troisièmement, l'hydrogène atomique peut être absorbé et lié de manière covalente à des matériaux spécifiques [52].

Le développement des infrastructures de ravitaillement en hydrogène dans les réseaux de transport, ainsi que les investissements dans ces stations, pourraient favoriser une adoption plus large et une rentabilité accrue du vecteur hydrogène.

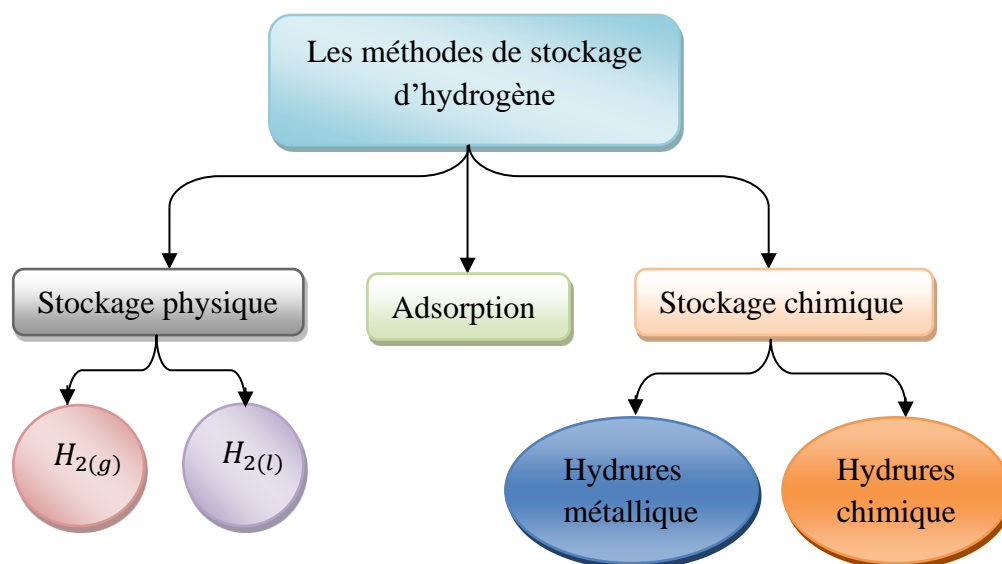


Figure III.1 : Les méthodes de stockage d'hydrogène.

III.2.1. Stockage physique :

A. Stockage par compression à haute pression :

Le stockage de l'hydrogène sous pression est l'une des méthodes les plus utilisées, notamment dans les véhicules fonctionnant avec des piles à combustible. En raison de la faible densité énergétique volumique de l'hydrogène, son stockage à pression atmosphérique est peu pratique, car il nécessiterait un volume environ 3000 fois supérieur à celui de l'essence pour fournir la même quantité d'énergie. C'est pourquoi il est généralement comprimé à des pressions variantes entre 200 et 700 bar afin de réduire le volume requis [53].

Cependant, l'énergie stockée par unité de volume reste nettement inférieure à celle des carburants fossiles comme l'essence ou le méthanol. De plus, l'alimentation de la pile à combustible nécessite un détendeur pour abaisser la pression à environ 2 ou 3 bar, valeur de fonctionnement optimale pour la pile [53].

Dans le domaine industriel, le stockage de l'hydrogène sous pression dans des réservoirs en acier est une technologie éprouvée depuis de nombreuses années. Le réservoir est généralement constitué d'une bouteille cylindrique en acier, permettant un stockage à une pression de 200 à 250 bar. Toutefois, cette technologie est limitée par la masse importante des réservoirs. La densité de stockage volumique reste autour de 14 g/dm^3 à 200 bar. Compte tenu de la fragilisation de l'acier induite par l'hydrogène, les parois doivent être suffisamment épaisses et résistantes, ce qui augmente la masse totale et limite le développement futur de cette technique [54].

De nos jours, les technologies ont considérablement évolué. Il existe désormais plusieurs types de réservoirs capables de supporter des pressions très élevées allant jusqu'à 700 bar, tout en maintenant la température ambiante. Ces réservoirs sont largement utilisés dans les stations de ravitaillement et les véhicules à pile à combustible, car ils permettent de stocker une quantité significative d'hydrogène dans un volume réduit [55].

Les réservoirs sont classés en quatre grandes catégories selon le matériau utilisé [55]:

- **Type 1** : tout en acier, pression maximale de 350 bar.
- **Type 2** : doublure métallique avec enveloppe composite, jusqu'à 700 bar.
- **Type 3** : doublure en polymère avec enveloppe composite, jusqu'à 700 bar.

- **Type 4** : doublure en polymère avec enveloppe composite optimisée (figure III.2), pression maximale de 875 bar ; il s'agit du type le plus léger, mais également le plus coûteux.

Ces réservoirs de nouvelle génération représentent une solution fiable et efficace pour le stockage d'hydrogène à haute pression dans les applications modernes.

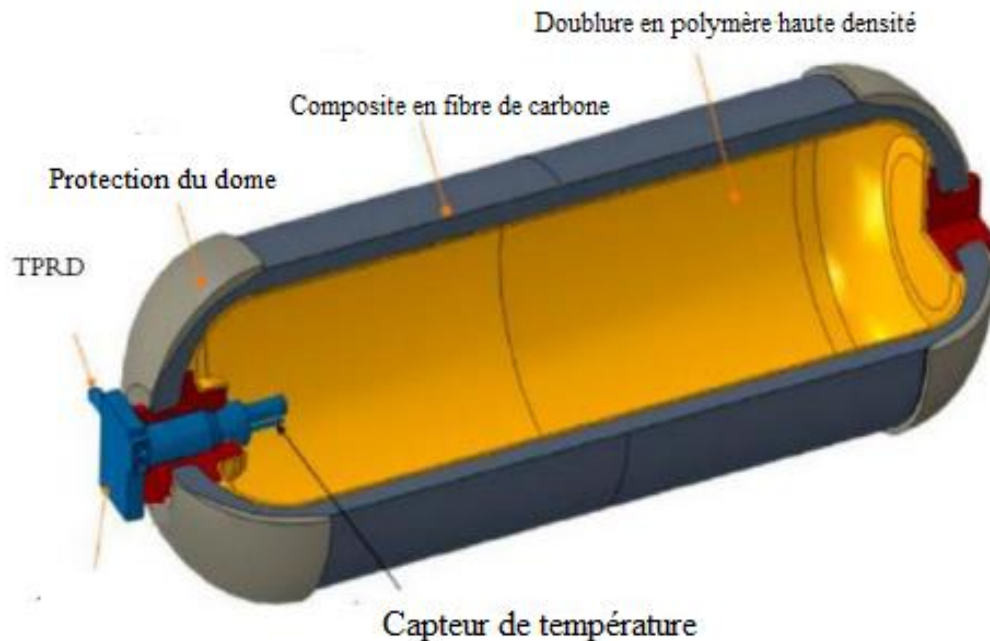


Figure III.2 : Conception d'un réservoir d'hydrogène comprimé de type 4 [55].

- **Inconvénients du stockage de l'hydrogène sous pression :**

- Consommation énergétique élevée : la compression de l'hydrogène consomme environ 7 % de l'énergie stockée à 200 bar, et jusqu'à 5 kWh/kg à 700 bar.
- Masse du réservoir : pour stocker 5 kg d'hydrogène à 700 bar, un réservoir de 80 kg est nécessaire.
- Volume important : le réservoir prend environ quatre fois le volume d'un réservoir de carburant classique pour une même autonomie.
- Coût élevé : un réservoir de 1 kg à 500 bar peut coûter jusqu'à 2100 dollars, soit cent fois plus qu'un réservoir classique.

- Empreinte carbone de la compression : si l'électricité utilisée pour comprimer l'hydrogène provient de sources fossiles, la compression peut générer plus de 3 kg de CO_2 par kg d'hydrogène, soit l'équivalent des émissions de 4 litres d'essence brûlés.

B. Stockage cryo-comprimé :

Le stockage cryo-comprimé de l'hydrogène est une méthode hybride combinant les avantages du stockage sous haute pression et du stockage sous forme liquide. Le principe consiste à comprimer le gaz hydrogène à des pressions élevées (jusqu'à 350 bar) tout en refroidissant à des températures très basses (environ -253 °C), afin d'augmenter sa densité volumique et de réduire la taille des réservoirs nécessaires [55] [52]. La Figure III.3 illustre le gaz hydrogène sous forme de gaz comprimé et de liquide cryogénique.

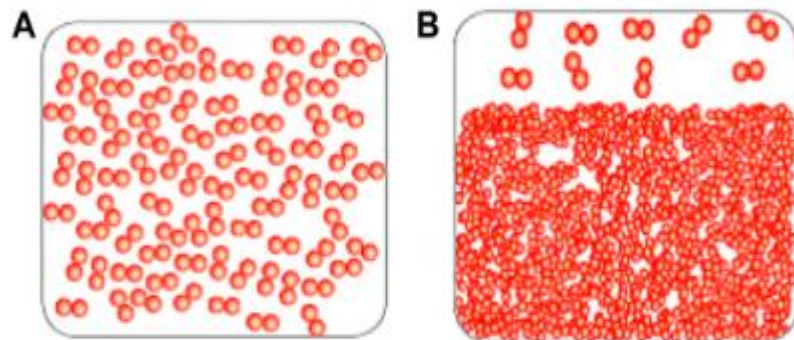


Figure III.3 : Stockage de l'hydrogène sous forme comprimée (A) et cryo-comprimée (B) [52].

Cette technologie a été proposée pour la première fois par BMW, puis développée par d'autres entreprises, en utilisant des réservoirs dotés d'une capacité de refroidissement et d'une résistance thermique élevée.

Ces réservoirs constitués de matériaux multicouches assurant isolation thermique et résistance à la pression [55].

Malgré ses avantages en matière de densité volumique, cette méthode reste énergivore, car la compression et la liquéfaction nécessitent une grande quantité d'énergie. De plus, l'hydrogène liquide est hautement volatil et peut former des mélanges explosifs avec l'air en cas d'évaporation.

L'amélioration de l'efficacité énergétique et la limitation des pertes par évaporation exigent des matériaux avancés, comme des polymères spéciaux, capables de réduire les fuites et de résister aux contraintes thermiques et mécaniques [52].

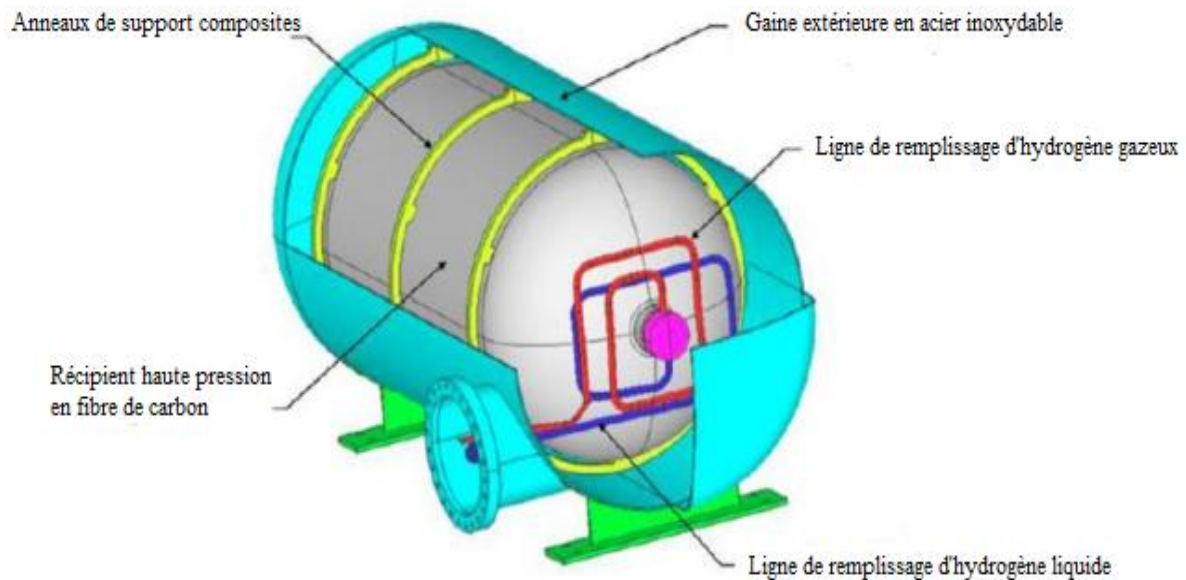


Figure III.4 : Conception de réservoirs pressurisés dotés de capacités de refroidissement [55].

C. Stockage liquide :

L'hydrogène se liquéfie à une température inférieure à 20 K sous pression atmosphérique. Dans ces conditions, le liquide est environ 800 fois plus dense que le gaz à température ambiante. Selon le type de réservoir cryogénique utilisé, une capacité massique de l'ordre de 6,5 % peut être obtenue pour le système complet. Les procédés de liquéfaction de l'hydrogène reposent sur des techniques complexes combinant l'apport de froid et des phases de détente adiabatique. Le gaz est d'abord refroidi progressivement à l'aide d'un système de réfrigération mécanique, puis à l'aide d'un échangeur thermique utilisant de l'azote liquide. Des cycles successifs de compression et détente permettent ensuite d'abaisser davantage la température jusqu'à l'obtention de l'état liquide [54].

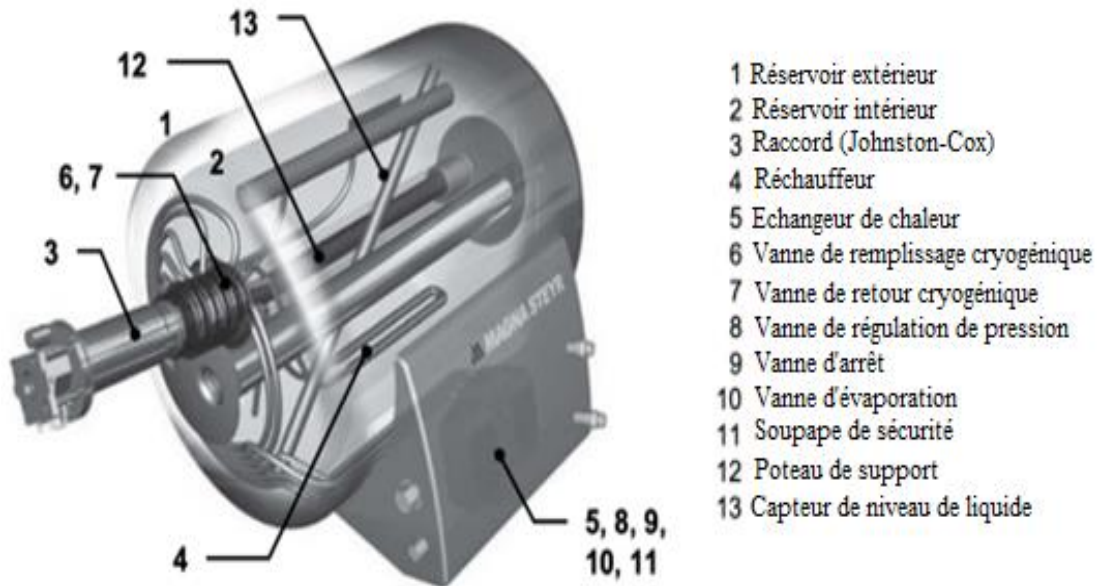


Figure III.5 : Réservoir cryogénique pour le stockage de l'hydrogène à -253°C [56].

- Inconvénients du stockage liquide de l'hydrogène :

- Nécessite des réservoirs cryogéniques avec une isolation thermique très élevée, ce qui augmente le volume et le poids du système.
- Pertes thermiques inévitables à 20 K malgré l'isolation renforcée.
- Architecture ouverte des réservoirs indispensable pour la sécurité, entraînant des pertes par évaporation (boil-off) pouvant atteindre 1 % par jour.
- Risques de sécurité accrus dans les environnements confinés à cause du phénomène de boil-off.
- Coût énergétique élevé de la liquéfaction, pouvant atteindre jusqu'à 50 % du pouvoir calorifique inférieur (PCI) de l'hydrogène.

III.2.2. Les matériaux de stockage solide de l'hydrogène:

Afin de surmonter les contraintes liées au stockage de l'hydrogène sous forme liquide ou comprimée, l'une des solutions envisagées consiste à le stocker dans un solide, soit par piégeage physique, soit par combinaison chimique.

III.2.2.1. Adsorption :

L'adsorption consiste en l'«immobilisation» d'un composé sur la surface d'un autre. Cette adsorption augmente avec la pression du gaz et est d'autant plus importante que la température est plus basse, étant purement physique, l'adsorption est réversible. L'hydrogène peut se fixer sur la plupart des surfaces solides mais quasiment seule l'adsorption sur des surfaces de carbone est envisagée pour le stockage, qui n'en est encore qu'aux premières phases de recherche. Il nécessite des matériaux avec de grandes surfaces spécifiques, du ressort des nanotechnologies [51].

✓ Les différents types d'adsorbant:

A- Les charbons actifs :

Le charbon actif est un matériau carboné poreux possédant une très grande surface spécifique (pouvant dépasser plusieurs milliers de m^2/g), préparé à partir de matières premières telles que le bois ou le charbon, via des activations chimiques et/ou thermiques. Les études ont montré qu'une taille de pore optimale (0,6 nm) permet une adsorption efficace de l'hydrogène. À température cryogénique (77 K), une capacité de stockage pouvant atteindre 6 % en poids est possible, tandis qu'à température ambiante, elle reste inférieure à 1% [56].

Les performances peuvent être améliorées par l'ajout de métaux (Ni, Pd, Pt) permettant d'atteindre jusqu'à 2,6 % en poids sous haute pression, bien que cela augmente significativement les coûts. Le broyage, en augmentant la surface spécifique, améliore également la capacité d'adsorption [56].

Malgré ces optimisations, les capacités de stockage obtenues restent insuffisantes pour des applications industrielles.

B- Nanotubes de carbone :

Les nanotubes de carbone (CNT) figurent parmi les matériaux les plus prometteurs pour le stockage de l'hydrogène par adsorption, en raison de leur structure nanométrique compacte et de leur forte porosité. Comparés aux matériaux carbonés traditionnels comme le charbon actif, les CNT présentent une capacité d'adsorption théorique plus élevée, notamment lorsque leur diamètre interne permet l'accès des molécules d'hydrogène et que l'espacement entre les parois atteint environ 6 Å. Dans des conditions de basse température (<150 K) et de pression modérée

(<50 bar), l'adsorption dans des faisceaux parallèles de CNT pourrait surpasser le stockage par compression. Toutefois, cet avantage disparaît à température ambiante et sous des pressions inférieures à 200 bar. Par ailleurs, une densité volumique élevée de l'adsorbant est essentielle pour maximiser la quantité de gaz stockée, un objectif réalisable grâce à la capacité des CNT à être densifiés, contrairement au charbon actif conventionnel [57].

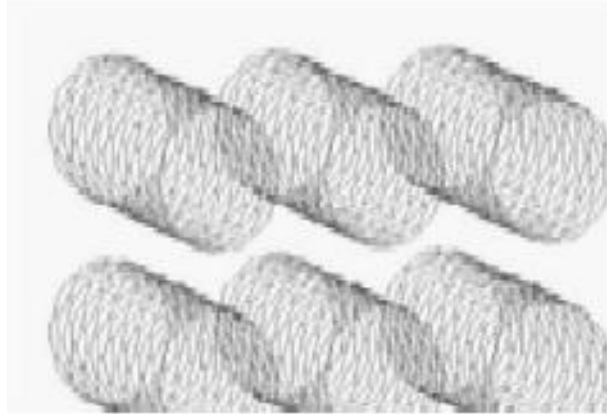


Figure III.6 : Représentation schématique d'un faisceau de nano tubes [58].

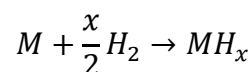
III.2.3. Stockage chimique :

A- Hydrures métalliques :

Le stockage chimique de l'hydrogène représente une alternative prometteuse pour surmonter les contraintes liées au stockage sous forme liquide ou comprimée. Cette méthode repose sur la fixation de l'hydrogène dans des matériaux solides, notamment les hydrures métalliques, via un mécanisme de chimisorption. Lorsqu'une molécule de dihydrogène entre en contact avec une surface métallique, elle se dissocie en deux atomes H qui diffusent dans un réseau hôte métallique pour y former des liaisons chimiques. Ces hydrures métalliques permettent ainsi une absorption réversible de l'hydrogène. Ils présentent des densités de stockage volumétriques nettement supérieures à celles du gaz ou de l'hydrogène liquide — jusqu'à 6,5 atomes H/cm^3 pour le MgH_2 , contre 0,99 pour le H_2 gazeux et 4,2 pour le H_2 liquide [59].

Ce processus peut se produire selon deux réactions principales [59] :

- **Par adsorption dissociative directe :**



- **Par réduction électrochimique de l'eau :**

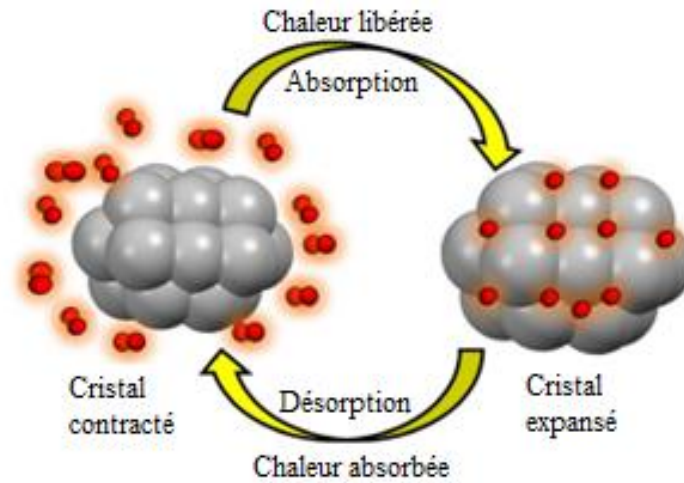
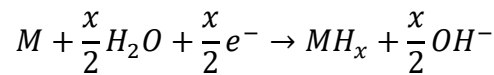


Figure III.7 : Chimisorption du cristal métallique et de l'hydrogène [60].

Parmi les matériaux étudiés [59] :

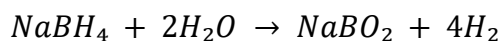
- MgH_2 : Capacité théorique élevée (7,7 % en masse), mais cinétique lente et température de décomposition élevée (300 °C à 1 bar). Des améliorations sont possibles via le broyage mécanique, la formation d'alliages (Mg-Ni, Mg-Co) ou l'ajout de catalyseurs (Pd, Pt, Ru).
- $LaNi_5$: Bonne cinétique à température modérée, mais capacité limitée (1,4 % en masse), pouvant diminuer après traitement mécanique.
- $FeTi$: Matériau économique et stable (1,9 % en masse avec catalyseur Pd), mais sensible à l'oxydation du titane, ce qui rend son activation difficile.

Ces matériaux sont donc prometteurs pour le stockage réversible de l'hydrogène, à condition de maîtriser les conditions opératoires (température, pression) et d'optimiser leur stabilité cyclique.

B- Hydrures chimiques :

Les capacités de stockage de l'hydrogène des hydrures chimiques se situent entre 6 et 8 % en poids, offrant ainsi des densités énergétiques supérieures à celles des hydrures

métalliques à des températures de fonctionnement modérées. Parmi les hydrures les plus importants figurent l'ammonia borane et les borohydrures. Le borohydrure de sodium ($NaBH_4$), par exemple, atteint une capacité théorique de 10,8 % en poids via une réaction d'hydrolyse, comme indiqué ci-dessous [24] :



En résumé, les hydrures chimiques présentent l'avantage de bonnes capacités volumétriques à des températures convenables. En revanche, aucune régénération embarquée n'est possible et un système de gestion thermique est nécessaire. Il est donc indispensable de développer des processus de régénération économes en énergie et à faible coût.

- **Stockage de l'hydrogène dans les borohydrures de sodium sous forme de "power balls" :**

L'hydrogène peut être stocké à l'aide du borohydrure de sodium ($NaBH_4$), produit par chauffage de l'hydroxyde de sodium (NaOH). Lorsqu'il réagit avec l'eau, du dihydrogène est libéré. Le $NaBH_4$ peut être façonné en boulettes ou granulés. Le produit résiduel de la réaction entre le $NaBH_4$ et l'eau est appelé borax ($NaBO_2$), qui peut être échangé et rechargé en hydrogène. Le borax est disponible en grande quantité dans les lacs salés asséchés. Le $NaBH_4$ n'est ni explosif ni inflammable, et peut être stocké à pression atmosphérique. La capacité de stockage est estimée à 4,3 % en poids d'hydrogène, avec une densité de 47 kg/m³. Pour plus d'informations, voir les références [24].

- **Stockage de l'hydrogène dans les liquides organiques LOHC :**

Le stockage de l'hydrogène dans des composés organiques liquides (LOHC, Liquid Organic Hydrogen Carriers) constitue une alternative chimique. Ces vecteurs, liquides à température et pression ambiantes, permettent de fixer l'hydrogène par hydrogénation catalytique (réaction exothermique) à environ 150 °C sous 10 à 50 bar, puis de le libérer par déshydrogénation (réaction endothermique) à 200–300 °C à pression atmosphérique. Des molécules comme le méthyl cyclohexane (MCH), le dibenzyl-toluène (DBT), ou encore les alkylcarbazoles offrent une densité de stockage massique allant jusqu'à 6,2 %, avec l'avantage d'un transport sécurisé et stable. Bien que la technologie LOHC soit encore en phase de démonstration pour de

nombreuses applications, elle permet d'exploiter les infrastructures existantes des carburants liquides, ce qui renforce son potentiel à grande échelle [61].

III.3. Analyse et comparaison des performances de stockage :

III.3.1. Comparaison qualitative (avantages/inconvénients) :

Méthode de stockage	Avantages principaux	Inconvénients majeurs
Gazeux à haute pression	<ul style="list-style-type: none"> - Technologie mature- Temps de charge rapide - Compatible avec mobilité 	<ul style="list-style-type: none"> - Faible densité énergétique - Poids et volume élevés - Coûts élevés - Risques de fuite et fragilisation de l'acier
Cryo-comprimé	<ul style="list-style-type: none"> - Bonne densité volumique - Plus compact que le stockage gazeux seul 	<ul style="list-style-type: none"> - Consommation énergétique élevée - Risques de volatilisation - Coûts très élevés
Liquide	<ul style="list-style-type: none"> - Haute densité volumique - Compatible avec stockage de masse 	<ul style="list-style-type: none"> - Nécessite -253 °C- Perte par évaporation (1%/jour) - Système lourd et coûteux
Adsorption sur matériaux poreux	<ul style="list-style-type: none"> - Fonctionne à température ambiante (théoriquement) - Flexible géométriquement 	<ul style="list-style-type: none"> - Capacités encore faibles - Dépendance à la température basse - Coûts des matériaux avancés
Hydrures métalliques	<ul style="list-style-type: none"> - Haute densité volumique - Bonne sécurité - Stockage réversible possible 	<ul style="list-style-type: none"> - Poids élevé - Température de fonctionnement élevée - Coûts des alliages et catalyseurs
Hydrures chimiques	<ul style="list-style-type: none"> - Capacité théorique très élevée (jusqu'à 10,8%) - Pas de pression nécessaire- Bonne stabilité 	<ul style="list-style-type: none"> - Non réversibles embarqués - Requiert traitement pour régénération - Système de gestion thermique complexe

Tableau III.1 : comparatif des principales méthodes de stockage de l'hydrogène.

- **Analyse comparative :**

Il ressort de cette comparaison que chaque technologie répond à des besoins spécifiques en termes de mobilité, de stockage stationnaire ou d'applications industrielles. Pour la mobilité (comme les véhicules à pile à combustible), le stockage gazeux à haute pression (350 à 700 bar) reste le plus mature et le plus répandu actuellement, bien qu'il présente des limites de densité. En revanche, les hydrures métalliques et chimiques offrent de meilleures densités et meilleure sécurité, mais restent freinés par leur masse, leur cinétique lente ou leur difficulté de régénération. Le stockage liquide et cryo-comprimé sont prometteurs pour les réseaux d'approvisionnement à grande échelle, mais exigent des infrastructures coûteuses et une gestion thermique pointue. Ainsi, il n'existe pas encore une solution universelle, mais plutôt une complémentarité entre technologies selon les usages. Les recherches en nanomatériaux et la baisse des coûts permettront à terme d'optimiser l'efficacité et la durabilité du stockage de l'hydrogène.

III.3.2. Comparaison quantitative (capacité massique, volumique, énergétique) :

Principe de stockage de l'hydrogène			Capacité Massique (%)	Capacité Volumique (kg/m^3)	Densité énergétique (kWh/kg)	Références		
Stockage liquide	Physique	Cryogénique (21K)	7	70,8	39	[57] [62] [63]		
			Chimique (vecteurs organiques liquides)	N-ethycarbazole	5.8	-	-	[64]
				Toluene	6.2	47.4	-	[65] [66]
	Dibenzyltoluene	6.9		57	-	[67] [66]		
	Benzene	7.2		55.9	-	[68]		
	Biphenyl	7.3	-	-	[69]			
	Carbazole	6.7	-	-	[70]			

Stockage solide	Hydrures métalliques interstitiels	Les hydrures	$LaNi_5$	1,5	100	0,52	[71] [63]	
		phases de Laves	(Zr, Ti) (Mn, V, Cr, Ni)	2,2	100	-	[72]	
		TiFe		1,9	100	0,6	[73] [63]	
		Mg_2Ni		3,6	90	-	[54]	
		Mg		7,6	120	3	[74] [75] [63]	
		Hydrures métalliques complexes	$LiBH_4$	18,5	121	-	[76]	
			$NaAlH_4$	7,5	94		[77]	
			Mg_2FeH_6	5,5	150		[78]	
			$BaReH_9$	2,7	134		[78]	
		Adsorbant L'hydrogène.	Charbons actifs (77K)		2,1	55	-	[79]
	Nanotubes de C 77K			2	-		[80]	
	Zéolithe NaY 77K			1,8	27,9		[81]	
	Zéolithe KX 77K			1,96	30,2		[81]	
	Stockage gazeux	Vessie + fibres de C	Haute pression (700 bar)		5,5	50	6.4	[57] [82]
			Basse pression (300 à 350 bar)		4	20	4	[57] [82]
Microbilles				5,5	20	-	[57]	

Tableau III.2 : comparatif des différentes méthodes de stockage de l'hydrogène selon leur capacité massique, volumique et énergétique.

III.3.3. Analyse graphique et discussion :

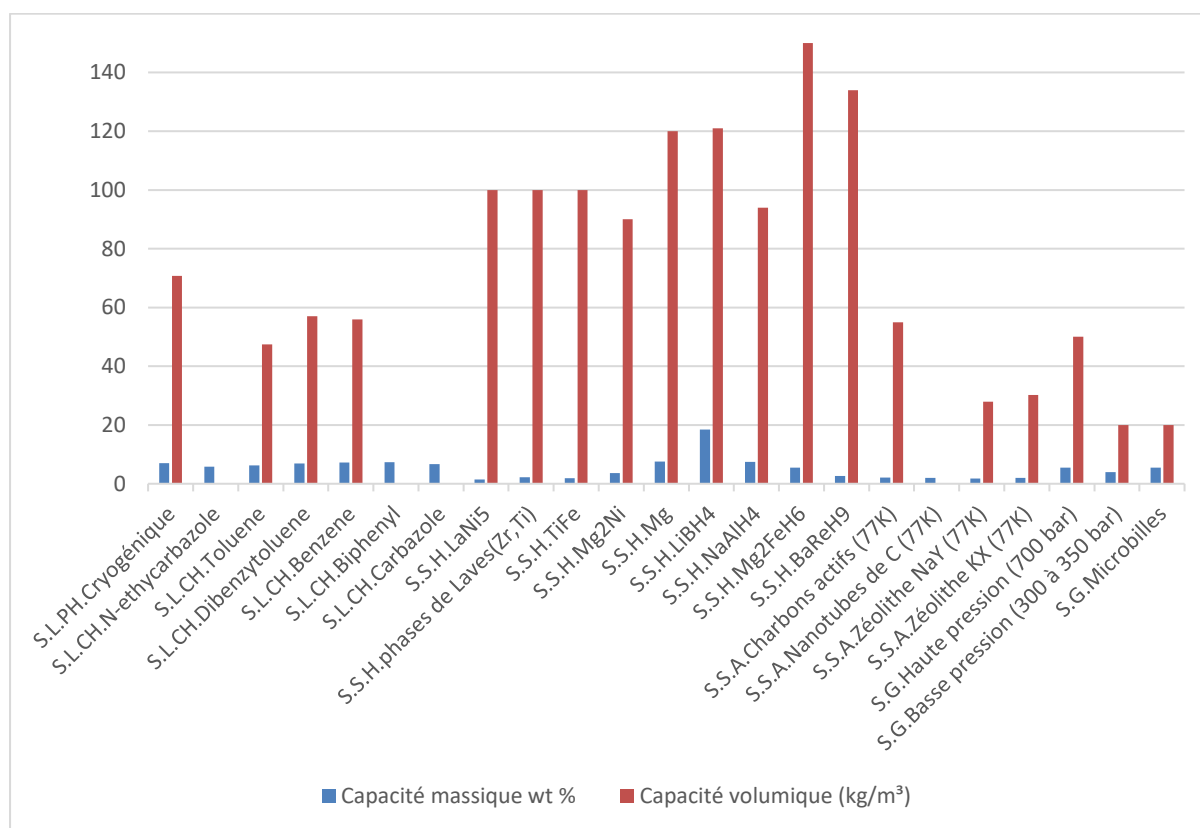


Figure III.8 : Comparaison des capacités massiques et volumiques des différentes méthodes de stockage de l'hydrogène

Le tableau comparatif des différentes technologies de stockage de l'hydrogène constitue un outil essentiel pour appréhender les différences fondamentales de performance entre les modes physiques (gazeux, liquide, solide) et chimiques. L'analyse de la capacité massique (exprimée en % massique) révèle que les composés chimiques tels que le $LiBH_4$ et le $NaAlH_4$ offrent les meilleures performances théoriques (18,5 % et 7,5 %, respectivement), surpassant largement les technologies de compression à haute pression, qui ne dépassent généralement pas 5,5 %. Cela reflète une capacité élevée d'intégration de l'hydrogène dans la structure chimique des matériaux.

En ce qui concerne la capacité volumique (kg/m^3), certaines phases solides comme le Mg_2FeH_6 ou le TiFe ($100-150 kg/m^3$) présentent de meilleures performances par rapport au stockage gazeux, qui souffre d'une faible densité volumique ($<50 kg/m^3$ même à 700 bar). Le stockage liquide (cryogénique) offre quant à lui une densité appréciable ($70,8 kg/m^3$), mais

au prix d'une consommation énergétique élevée et de conditions thermiques extrêmes (-253 °C).

Concernant les capacités énergétiques (capacité énergétique), bien que les données soient limitées, l'hydrogène possède une valeur calorifique théorique notable d'environ 33,33 kWh/kg. Toutefois, cette valeur est réduite en pratique en raison des pertes énergétiques induites par les processus de compression ou de liquéfaction.

Du point de vue bibliographique, cette étude repose sur 22 références couvrant plus de cinquante années de recherche scientifique, illustrant l'évolution considérable des connaissances, allant des recherches fondamentales jusqu'aux développements récents dans les nanomatériaux et les hydrures complexes. Cette distribution temporelle met en évidence l'intérêt croissant pour l'hydrogène dans le contexte de la transition énergétique mondiale et la nécessité croissante de solutions de stockage sûres et performantes.

III.4. Applications de l'hydrogène :

L'hydrogène stocké, qu'il soit sous forme gazeuse, liquide ou solide, est destiné à de nombreuses applications industrielles et énergétiques :

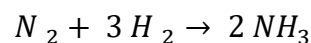
III.4.1. Application de l'hydrogène en chimie industrielle :

L'hydrogène est un élément chimique de grande importance industrielle, intervenant dans plusieurs réactions fondamentales dans le secteur de l'industrie chimique. Parmi ses principales utilisations, on distingue :

A- La production de l'ammoniac (NH_3) :

L'hydrogène est utilisé dans l'industrie chimique pour la production de l'ammoniac (NH_3) à partir d'une réaction entre l'azote (N_2) de l'air et l'hydrogène (H_2). Cette réaction s'effectue à une température d'environ 500 °C et sous une pression comprise entre 200 et 300 bars, en présence d'un catalyseur à base de fer, selon l'équation [83] :

L'équation chimique de cette réaction est :



L'ammoniac ainsi obtenu est principalement utilisé dans la fabrication d'engrais, qui servent à nourrir les plantes et les cultures agricoles. En plus de l'industrie des engrais, l'ammoniac trouve également des applications dans les secteurs pharmaceutique, textile, de la chimie fine et de la plasturgie [83].

B- La désulfuration des dérivés du pétrole :

La désulfuration du pétrole, ou hydrodésulfuration, est un procédé clé dans le raffinage visant à éliminer le soufre présent dans les fractions telles que l'essence, le kérosène et le gazole. La présence de soufre dans les carburants est problématique car sa combustion produit du dioxyde de soufre (SO_2), responsable des pluies acides, et il agit également comme poison pour les catalyseurs [83].

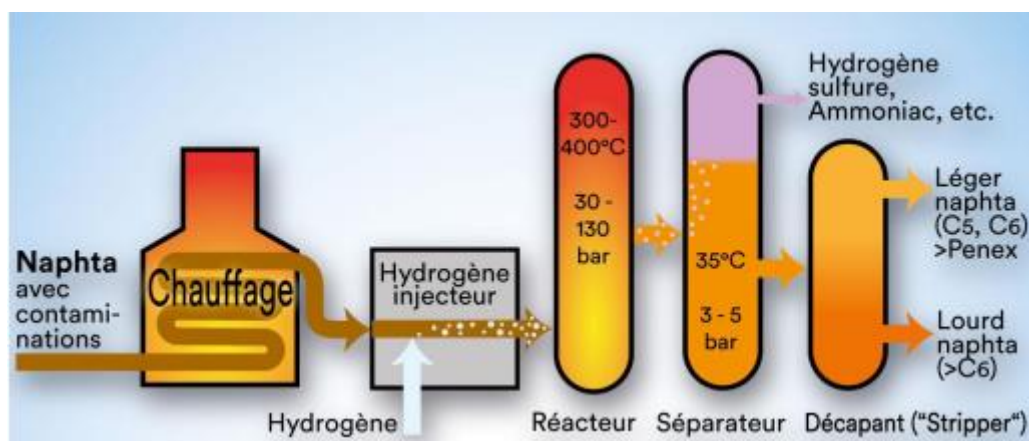


Figure III.9 : Schéma de l'hydrodésulfuration [86].

C- L'hydrogénation des graisses :

Cette technique est utilisée dans l'industrie alimentaire pour transformer les huiles végétales liquides, insaturées, en graisses saturées ou partiellement saturées, plus stables au stockage et à la cuisson, comme dans la fabrication de la margarine. Elle consiste à faire passer de l'hydrogène à travers les huiles en présence d'un catalyseur métallique, ce qui permet la saturation des doubles liaisons dans les acides gras et améliore les propriétés du produit final [83].

III.4.2. Applications de l'hydrogène dans le secteur du transport :

L'hydrogène constitue une alternative prometteuse dans le domaine du transport, notamment à travers deux configurations principales : les piles à combustible et les moteurs à combustion interne. Dans la première, l'hydrogène est converti en électricité via une pile à combustible, qui alimente le moteur électrique. Cette solution offre un rendement élevé, une autonomie satisfaisante et une absence totale d'émissions polluantes. Elle est particulièrement adaptée aux véhicules de grande taille et à usage intensif [52].

La deuxième option consiste à adapter les moteurs à combustion interne traditionnels pour fonctionner à l'hydrogène. Bien que cette technologie permette de réduire les émissions de CO et de CO_2 , elle génère néanmoins des oxydes d'azote (NO_x) et présente un rendement inférieur à celui des piles à combustible. En revanche, elle peut être rapidement mise en œuvre grâce à la maîtrise des technologies existantes [52].

Concernant l'infrastructure, plusieurs méthodes permettent de ravitailler les véhicules en hydrogène : production locale par électrolyse, stockage sous forme gazeuse ou liquide, ou encore distribution par pipeline. Toutefois, l'absence de normes internationales uniformes représente un frein à leur déploiement.

En matière de sécurité, l'hydrogène présente moins de risques que l'essence en termes d'inflammabilité. Il est léger, se dissipe rapidement dans l'air, et les incendies liés à son utilisation durent généralement moins longtemps. De plus, il n'est ni toxique ni corrosif, ce qui limite son impact environnemental en cas de fuite.

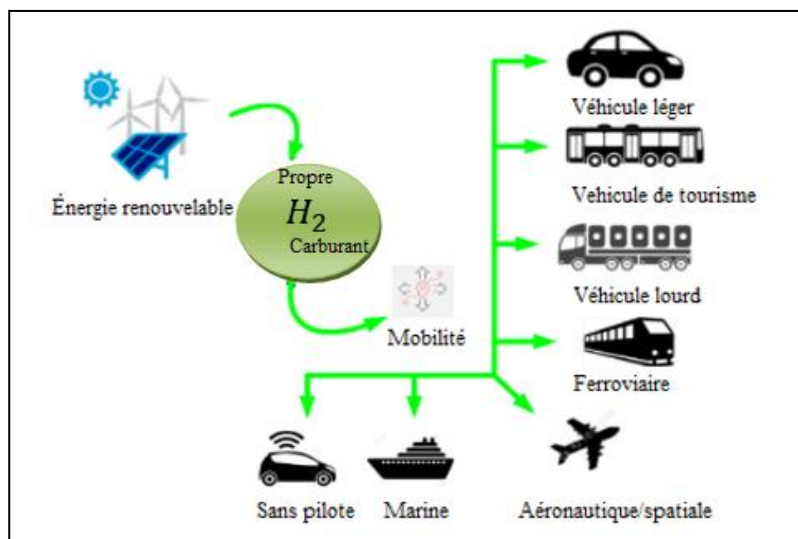


Figure III.10 : La portée du carburant hydrogène dans les différents secteurs de la mobilité [52].

III.4.3. Applications de l'hydrogène dans les Turbines :

L'hydrogène peut être utilisé de manière similaire aux carburants traditionnels dans les moteurs à turbine. Toutefois, son utilisation permet d'atteindre des températures de fonctionnement plus élevées, ce qui se traduit par une amélioration du rendement global. De plus, cette technologie permet une réduction significative des émissions de gaz à effet de serre, avec comme principal polluant une faible quantité d'oxydes d'azote (NO_x) [84]. Actuellement, la technologie des turbines à hydrogène est considérée comme une solution de transition moins coûteuse que les piles à combustible.

III.5. Conclusion :

Le stockage de l'hydrogène représente un maillon essentiel dans la chaîne de valorisation de ce vecteur énergétique, notamment dans un contexte de transition vers des systèmes énergétiques décarbonés. Qu'il soit sous forme gazeuse, liquide, cryo-comprimée, adsorbé dans des matériaux poreux ou fixé chimiquement dans des hydrures, chaque méthode présente des avantages spécifiques et des contraintes technologiques, économiques et sécuritaires. Malgré les progrès considérables réalisés ces dernières années, aucun mode de stockage ne répond à lui seul à l'ensemble des exigences pour toutes les applications. Le choix de la technologie dépendra donc du contexte d'usage, du niveau de maturité des solutions et des objectifs de performance visés.

L'analyse des données techniques comparatives, notamment en termes de capacité massique et volumique, met en évidence la supériorité des hydrures complexes comme le $LiBH_4$ (18,5 wt%) en termes de densité gravimétrique, tandis que certaines solutions solides telles que le Mg_2FeH_6 (150 kg/m³) ou le cryo-stockage (70,8 kg/m³) se démarquent par leur densité volumique. Ces résultats soulignent la nécessité d'adopter une approche hybride et adaptative, où les technologies sont choisies en fonction des exigences spécifiques d'application (mobilité, stationnaire, réseau, etc.). Le développement de nouveaux matériaux, notamment à l'échelle nanométrique, et l'intégration intelligente aux infrastructures énergétiques existantes demeurent des leviers clés pour l'avenir du stockage de l'hydrogène.

Conclusion

générale

Conclusion générale :

À l'issue de ce travail, il apparaît clairement que l'hydrogène représente un pilier potentiel de la transition énergétique mondiale, à condition que l'ensemble de sa chaîne de valeur – de la production au stockage, en passant par le transport et l'utilisation – soit maîtrisée de manière sûre, efficace et durable.

Dans un premier temps, l'étude a permis de mettre en lumière les caractéristiques fondamentales de l'hydrogène : sa légèreté, sa réactivité, son abondance dans l'univers, mais également les défis qu'il pose en matière de manipulation, de sécurité et d'infrastructure. Ces particularités justifient la place centrale qu'il occupe dans les stratégies de décarbonation actuelles, notamment comme vecteur énergétique propre, capable de remplacer les carburants fossiles dans des usages difficiles à électrifier.

L'analyse approfondie des différentes méthodes de production de l'hydrogène a montré la diversité des filières existantes : des procédés thermochimiques à base d'énergies fossiles aux technologies électrochimiques alimentées par des sources renouvelables, en passant par les voies biologiques et nucléaires. Chaque méthode présente des performances spécifiques en termes de rendement, de coût, et surtout d'impact environnemental. D'où l'importance croissante de la classification chromatique (gris, bleu, vert, turquoise...) permettant de juger la pertinence environnementale de chaque type d'hydrogène dans un contexte donné.

Par ailleurs, la question du stockage de l'hydrogène s'est révélée être un enjeu technologique majeur. Les données comparatives obtenues à partir de 22 références, issues de plusieurs décennies de recherche, ont mis en évidence l'hétérogénéité des performances des technologies. D'un côté, les hydrures complexes comme le $LiBH_4$ offrent une capacité massique exceptionnelle (jusqu'à 18,5 wt%), tandis que des solutions solides comme Mg_2FeH_6 ou le stockage cryogénique atteignent des densités volumiques remarquables (150 kg/m^3 et $70,8 \text{ kg/m}^3$ respectivement). En revanche, les technologies gazeuses à haute pression (jusqu'à 700 bar) restent les plus répandues dans le secteur de la mobilité grâce à leur maturité, malgré une densité volumique limitée. Cette analyse démontre qu'aucune solution unique n'est optimale dans tous les cas, et qu'une approche modulée selon les usages est impérative.

Enfin, les applications industrielles et énergétiques de l'hydrogène ont été mises en perspective, montrant que ce vecteur n'est plus une simple promesse théorique, mais un acteur émergent dans des secteurs aussi variés que la chimie, la mobilité, ou encore la production d'électricité.

En somme, cette étude met en évidence que le développement de l'hydrogène ne dépend pas uniquement de la faisabilité technique des procédés, mais aussi d'un cadre global cohérent combinant innovations technologiques, politiques publiques incitatives, infrastructures adaptées et acceptabilité sociale. À travers une approche intégrée et multidisciplinaire, l'hydrogène pourrait ainsi contribuer significativement à l'atteinte des objectifs de neutralité carbone, tout en assurant la sécurité énergétique des générations futures. Il est prévu que le rôle de l'hydrogène s'intensifie dans les années à venir avec l'essor des technologies associées et la pression croissante des politiques climatiques. L'émergence de nouvelles chaînes de production bas-carbone, la miniaturisation des systèmes de stockage et l'intégration intelligente de l'hydrogène dans les réseaux énergétiques existants feront de ce vecteur un pilier incontournable de la transition énergétique. À moyen et long terme, l'hydrogène pourrait transformer profondément les infrastructures industrielles, les modes de transport et les équilibres géopolitiques, en redéfinissant les flux énergétiques mondiaux. Toutefois, le développement d'une économie mondiale de l'hydrogène nécessite une coopération internationale étroite, un cadre réglementaire stable et des investissements massifs en recherche et innovation.

Références bibliographiques

Références bibliographiques :

- [1] "Hydrogène H2", [En ligne]. Disponible sur : <http://www.h2-hydrogene.com/index.php>. [Consulté le : mars 2025].
- [2] Association Française de l'Hydrogène (AFH2), *Mémento de l'hydrogène : fiche 1.1*, sept. 2018.
- [3] B. Wiesenfeld, *L'hydrogène vert : Le défi de demain, pour une énergie inépuisable et décarbonée*. Les Ulis, France : EDP Sciences, 2023.
- [4] P. Malbrunot, *Mémento de l'hydrogène : fiche 5.2.1, fiche 2.1*, Association Française de l'Hydrogène, févr. 2018.
- [5] H. Laurie, "Hydrogène : une méthode inédite et propre décuple sa production à partir de l'eau", mars 2022.
- [6] K. Bouziane, *Étude d'une installation photovoltaïque de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau*, Mémoire de Magister, Génie des Procédés, Univ. Kasdi Merbah, Ouargla, 2011.
- [7] M. Momirlan et T. N. Veziroglu, "The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet", *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 30, no. 8, pp. 795–802, 2005.
- [8] H. Marino, *Phase inversion temperature emulsification: from batch to continuous process*, Ph.D. dissertation, Univ. of Bath, Bath, U.K., 2010.
- [9] Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives (CEA), "L'essentiel sur l'hydrogène", 10 mai 2022.
- [10] AFH2, *Les Données de Base sur l'Hydrogène. Mémento de l'hydrogène, fiche n° 2.1*, févr. 2018.
- [11] K. Mazloomi et C. Gomes, "Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges", *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 16, no. 6, pp. 3024–3033, 2012.

- [12] B. W. INERIS et P. M. AFHYPAC, *Mémento de l'Hydrogène – Fiche 7.1 : Inflammabilité et Explosivité de l'Hydrogène*, Révision - mai 2020.
- [13] Bruxelles Environnement, "Vecteur énergétique", *Guide Bâtiment Durable*. [En ligne]. Disponible sur : <https://guidebatimentdurable.brussels/glossaire/vecteur-energetique>. [Consulté le : 23 févr. 2025].
- [14] H. A. S. A., *Nouveaux composés ternaires à base de magnésium : structure, propriétés de sorption d'hydrogène et propriétés physiques*, Thèse de doctorat, Univ. de Poitiers, 2016.
- [15] Sigma Earth, "Peut-on remplacer les combustibles fossiles par les énergies renouvelables ?", [En ligne]. Disponible sur : <https://sigmaearth.com/ar/>.
- [16] Climate and Clean Air Coalition, "Programme de réglementation des combustibles fossiles," *CCAC*, [En ligne]. Disponible sur : <https://www.ccacoalition.org/content/fossil-fuel-regulation>. [Consulté le: 2 mars 2025].
- [17] Amnesty International, *Un accord mondial à la COP28 pour l'élimination progressive des combustibles fossiles est vital pour prévenir une catastrophe climatique et des droits humains*, Amnesty International, 2023.
- [18] J. Boutang et M. Tuddenham, "L'ambitieux objectif français de la neutralité carbone nette en 2050", *Annales des Mines – Responsabilité & Environnement*, no. 89, pp. 34–38, 2018.
- [19] Agence Internationale pour les Énergies Renouvelables (IRENA), *Geopolitics of the Energy Transformation: The Hydrogen Factor*, IRENA, 2022.
- [20] M. Banou, "Étude du procédé de production d'hydrogène par vaporeformage et par vaporeformage autotherme du bio-méthanol," Mémoire de magistère, Univ. Ferhat Abbas Sétif 1, Sétif, Algérie, 2014.
- [21] Assemblée nationale & Sénat, *Les modes de production de l'hydrogène*, Note scientifique n° 25, Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, Paris, France, 2021.

- [22] C. Rozain, "Développement de nouveaux matériaux d'électrodes pour la production d'hydrogène par électrolyse de l'eau," Thèse de doctorat, Univ. Paris-Sud XI, Paris, France, 2013.
- [23] IFP & AFHYPAC, *Mémento de l'Hydrogène – Fiche 3.1.1: Production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles*, The Future of Hydrogen, rapport préparé par l'IEA pour le G20, Japon, juin 2019.
- [24] B. Sundén, *Hydrogen, Batteries and Fuel Cells*, ch. 3: Production of hydrogen, pp. 37–55, Academic Press, 2019.
- [25] CEA, *Comment produire l'hydrogène ?*, Clefs CEA, no. 50/51, Hiver 2004–2005.
- [26] M. Oualid, "Production de l'hydrogène à partir des énergies renouvelables," Mémoire de magistère, Univ. de Tlemcen, Tlemcen, Algérie, 2009.
- [27] M. Mbodji, "Conception et dimensionnement de réacteurs-échangeurs microstructurés pour la production de gaz de synthèse par vaporeformage du méthane," Thèse de doctorat, Univ. de Lorraine, Nancy, France, 2013.
- [28] TIGREAT D., *Les techniques de production de l'hydrogène et les risques associés*, Rapport d'étude, no. DRA-08-95313-07833B, MEEDDAT, Verneuil-en-Halatte, France, juin 2008.
- [29] P. Pineau, "BASF, l'ambition d'une croissance neutre en CO₂," *L'Actualité Chimique*, no. 437, pp. 36–40, févr. 2019.
- [30] A. Azara, "Pyrolyse du méthane pour la production de l'hydrogène « turquoise »,," *Bulletin des Énergies Renouvelables*, no. 58, CDER.
- [31] A. Ounnar, F. Kaidi, L. Benhabyles, and R. Rihani, "Production de l'hydrogène en utilisant la technique des lits fluidisés," in *2IWH 2007*, Ghardaïa, Algérie, CDER, oct. 2007.
- [32] Gazéification.info. *Gazéification – Principes*. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.gazéification.info/principes> [Consulté le : 20 Avril 2025].

- [33] N. A. Kelly, "Hydrogen production by water electrolysis," in *Advances in Hydrogen Production, Storage and Distribution*, Elsevier Ltd., pp. 159–186, 2014.
- [34] B. Boumzaza, "Analyse des cycles thermochimiques de production d'hydrogène par l'énergie solaire," Mémoire de magistère, Univ. Ammar Thelidji – Laghouat, Laghouat, Algérie, 2013.
- [35] L. Bebon, "Stockage solide réversible de l'hydrogène : Étude et modélisation du comportement de la particule isolée de composés intermétalliques lors de l'absorption," Thèse de doctorat, Univ. Bourgogne Franche-Comté, France, 2021.
- [36] B. Verdin, "Étude d'électrodes grande surface d'électrolyseurs PEM: inhomogénéités de fonctionnement et intégration de catalyseurs innovants," Thèse de doctorat, Univ. Paris-Saclay, France, 2018.
- [37] A. Ursúa, L. M. Gandía, and P. Sanchis, "Hydrogen production from water electrolysis: Current status and future trends," *Proc. IEEE*, vol. 100, no. 2, pp. 410–426, Feb. 2012.
- [38] S. Rabih, "Contribution à la modélisation de systèmes réversibles de types électrolyseur et pile à hydrogène en vue de leur couplage aux générateurs photovoltaïques," Thèse de doctorat, Inst. Nat. Polytechnique de Toulouse, France, 2008.
- [39] E. B. Agyekum, C. Nutakor, A. M. Agwa, and S. Kamel, "A critical review of renewable hydrogen production methods: Factors affecting their scale-up and its role in future energy generation," *Membranes*, vol. 12, no. 2, p. 173, 2022.
- [40] Connaissance des Énergies, *Production de l'hydrogène – Fiche pédagogique*. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/production-de-lhydrogene> [Consulté le : 25 Avril 2025].
- [41] Kernenergie.ch, "Fission nucléaire," *Kernenergie*, [En ligne]. Disponible sur : https://www.kernenergie.ch/fr/fission-nucleaire_content---1--1107.html. [Consulté le : 25 Avril 2025].
- [42] V. Piemonte, L. Di Paola, M. De Falco, A. Iulianelli, and A. Basile, "Hydrogen production using inorganic membrane reactors," in *Advances in Hydrogen Production, Storage and Distribution*, Elsevier, pp. 283–313, 2014.

- [43] W. Nabgan et al., "Catalytic biohydrogen production from organic waste materials: A literature review and bibliometric analysis," *Int. J. Hydrogen Energy*, 2021.
- [44] R. Saha, D. Bhattacharya, and M. Mukhopadhyay, "Enhanced production of biohydrogen from lignocellulosic feedstocks using microorganisms: A comprehensive review," *Energy Convers. Manage.* X, vol. 13, p. 100153, 2021.
- [45] N. C. Joshi, P. Gururani, and N. C. Talniya, "An updated review on biomass-based hydrogen production," *Biointerface Res. Appl. Chem.*, vol. 14, no. 4, p. 98, 2024.
- [46] A. Demirbaş, "Hydrogen production from biomass via supercritical water extraction," *Energy Sources*, vol. 27, no. 15, pp. 1409–1417, 2005.
- [47] Connaissance des Énergies, *Production de l'hydrogène*, [en ligne], consulté le 28 avr. 2025. Disponible sur : <https://www.connaissancedesenergies.org/production-hydrogene>
- [48] F. Collard, *Les énergies renouvelables, Courrier hebdomadaire du CRISP*, no. 2252–2253, 2015.
- [49] N. Bouaziz and A. Allam, "Dimensionnement d'un système photovoltaïque orienté pour alimenter l'électrolyseur pour produire de l'hydrogène vert," Mémoire de master, Univ. Kasdi Merbah-Ouargla, Ouargla, Algérie, 2023.
- [50] Office parlementaire d'évaluation des choix scientifiques et technologiques, *Les modes de production de l'hydrogène*, Note scientifique n° 25, Assemblée nationale & Sénat, Paris, France, avr. 2021.
- [51] L. Mohammedi, "Étude ab-initio des propriétés structurales et électroniques des hydrures métalliques TiFe-H : Restitution totale et partielle de l'hydrogène," Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2015.
- [52] S. Chakraborty, S. K. Dash, R. M. Elavarasan, A. Kaur, D. Elangovan, S. T. Meraj, P. Kasinathan, and Z. Said, "Hydrogen energy as future of sustainable mobility," *Frontiers in Energy Research*, vol. 10, Article 893475, 2022.
- [53] B. Blunier and A. Miraoui, *20 questions sur la pile à combustible: L'hydrogène : vecteur énergétique de demain ?* Paris: Éditions Technip, 2009.

- [54] P. Hollmuller, B. Lachal, F. Romerio, W. Weber, and J.-M. Zraggen (Eds.), *L'hydrogène, futur vecteur énergétique ?* Carouge: CUEPE, 2005.
- [55] H. Khenfer, "Calcul des propriétés de stockage de l'hydrogène dans les hydrures à base de Li et Na dopés par des atomes (C, Si, Ge)," Thèse de doctorat, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2024.
- [56] A. Pennetier, "Stockage d'hydrogène dans des matériaux hybrides innovants," Thèse de doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour, Ecole doctorale des Sciences Exactes et de leurs Applications, 2023.
- [57] M. Viseur, "Étude de faisabilité de l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur alternatif d'énergie," Mémoire de master, Université Libre de Bruxelles, Institut de Gestion de l'Environnement et de l'Aménagement du Territoire, 2008.
- [58] H. Derbal, M. Belhamel, and A. M'Raoui, "L'hydrogène, vecteur énergétique solaire," *Revue des Énergies Renouvelables – ICRES-07 Tlemcen*, pp. 235–240, Centre de Développement des Énergies Renouvelables, Alger, Algérie, 2007.
- [59] P. R. Prabhukhot, M. M. Wagh, and A. C. Gangal, "A review on solid state hydrogen storage material," *Advances in Energy and Power*, vol. 4, no. 2, pp. 11–22, 2016.
- [60] V. Meille and I. Pitault, "Une forme de stockage sûre de l'hydrogène : les Liquid Organic Hydrogen Carriers ou LOHC," *HAL Archives Ouvertes*, hal-03826521v1, Oct. 2022.
- [61] S. K. Dewangan, M. Mohan, V. Kumar, A. Sharma, and B. Ahn, "A comprehensive review of the prospects for future hydrogen storage in materials: Application and outstanding issues," *International Journal of Energy Research*, pp. 1–28, 2022.
- [62] A. Züttel, "Hydrogen storage methods," *Naturwissenschaften*, vol. 91, pp. 157–172, 2004.
- [63] D. Planté, *Élaboration d'un alliage métallique de structure cubique centrée pour le stockage portatif de l'hydrogène*, Thèse de doctorat, spécialité Physique des Matériaux, Univ. de Grenoble, Institut Néel - CNRS, France, 11 juil. 2013.
- [64] C. Wan, Y. An, W. W. Kong, and G. Xu, "Study of cyclic uptake-release of hydrogen with N-ethylcarbazole," *Taiyangneng Xuebao/Acta Energiae Solaris Sinica*, vol. 35, no. 8, pp. 1546–1549, Aug. 2014.

- [65] G. Cabrera, M. Mora, J. P. Gil-Burgos, R. Visbal, F. Machuca-Martínez, and E. Mosquera-Vargas, "Liquid Organic Hydrogen Carrier Concepts and Catalysts for Hydrogenation and Dehydrogenation Reactions," *Molecules*, vol. 29, no. 20, p. 4938, 2024.
- [66] C. Chu, K. Wu, B. Luo, Q. Cao, and H. Zhang, "Hydrogen storage by liquid organic hydrogen carriers: Catalyst, renewable carrier, and technology – A review," *Carbon Resources Conversion*, vol. 4, no. 3, pp. 255–273, 2023.
- [67] M. E. Konnova, S. V. Vostrikov, A. A. Pimerzin, and S. P. Verevkin, "Thermodynamic analysis of hydrogen storage: Biphenyl as affordable liquid organic hydrogen carrier (LOHC)," *J. Chem. Thermodynamics*, vol. 159, p. 106455, 2021
- [68] S. Ramadhani, Q. N. Dao, Y. Imanuel, M. Ridwan, H. Sohn, H. Jeong, K. Kim, C. W. Yoon, K. H. Song, and Y. Kim, "Advances in Catalytic Hydrogenation of Liquid Organic Hydrogen Carriers (LOHCs) Using High-Purity and Low-Purity Hydrogen," *ChemCatChem*, vol. 16, no. 8, e202401278, 2024.
- [69] I. G. Baigildin *et al.*, "Biphenyl hydrogenation with syngas for hydrogen purification and transportation: Performance of dispersed catalytic systems based on transition metal sulfides," *Petroleum Chemistry*, vol. 61, no. 10, pp. 1131–1137, 2021.
- [70] B. S. Shin, C. W. Yoon, S. K. Kwak, and J. W. Kang, "Thermodynamic assessment of carbazole-based organic polycyclic compounds for hydrogen storage applications via a computational approach," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 43, no. xx, pp. 1–10, 2018.
- [71] S. Sleiman, S. Shahgaldi, and J. Huot, "Investigation of the First Hydrogenation of LaNi₅," *Reactions*, vol. 5, no. 3, pp. 419–428, 2024.
- [72] F. T. Zohra, C. J. Webb, K. E. Lamb, and E. M. Gray, "Degradation of metal hydrides in hydrogen-based thermodynamic machines: A review," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 49, 2024.
- [73] A. K. Patel, A. Duguay, B. Tougas, B. Neumann, C. Schade, P. Sharma, and J. Huot, "Study of the microstructural and first hydrogenation properties of TiFe alloy with Zr, Mn and V as additives," *Processes*, vol. 9, no. 7, p. 1217, Jul. 2021.

- [74] I. Konstanchuk, K. Gerasimov, and J.-L. Bobet, "Mechanochemically prepared magnesium-based materials for hydrogen storage," *HAL Open Science*, hal-00530059v1, Mar. 2024.
- [75] F. Schüth, B. Bogdanović, and M. Felderhoff, "Light metal hydrides and complex hydrides for hydrogen storage," *Chem. Commun.*, no. 20, pp. 2249–2258, 2004.
- [76] F. Peru, S. Payandeh, T. R. Jensen, G. Charalambopoulou, and T. Steriotis, "Destabilization of the LiBH₄–NaBH₄ Eutectic Mixture through Pore Confinement for Hydrogen Storage," *Inorganics*, vol. 11, no. 3, p. 128, 2023.
- [77] B. Bogdanović, M. Felderhoff, and G. Streukens, "Hydrogen storage in complex metal hydrides," *J. Serb. Chem. Soc.*, vol. 74, no. 2, pp. 183–196, 2009.
- [78] K. Yvon, "Hydrides: Recent developments," *Chimia*, vol. 52, no. 10, pp. 613–619, 1998.
- [79] D. Langohr, *A study on hydrogen storage through adsorption in nanostructured carbons*, Ph.D. dissertation, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, France.
- [80] D. P. Broom and M. Hirscher, "Irreproducibility in hydrogen storage material research," *Energy Environ. Sci.*, vol. 9, no. 11, pp. 3368–3380, 2016.
- [81] H. W. Langmi *et al.*, "Hydrogen storage in ion-exchanged zeolites," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 30, no. 9, pp. 983–993, 2005.
- [82] M. Gardiner, *Energy requirements for hydrogen gas compression and liquefaction as related to vehicle storage needs*, DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record, Record no. 9013, Jul. 7, 2009. Approved by S. Satyapal, Oct. 26, 2009.
- [83] P. Malbrunot, "Mémento de l'hydrogène : Application de l'hydrogène en chimie industrielle," Fiche, mars 2023.
- [84] T. Djerad, "Étude de l'utilisation de l'énergie hydrogène comme énergie alternative," Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah - Ouargla, 2018.

Résumé (Français):

L'hydrogène est aujourd'hui au cœur des stratégies de transition énergétique, grâce à son potentiel comme vecteur énergétique propre. Cette étude examine d'abord ses propriétés physico-chimiques, puis les différentes filières de production, allant des procédés fossiles aux méthodes renouvelables, biologiques et nucléaires. Une attention particulière est accordée aux impacts environnementaux et au classement chromatique de l'hydrogène. L'étude inclut également une comparaison qualitative et quantitative entre ces différentes méthodes. Ensuite, les technologies de stockage (physique, solide et chimique) sont analysées selon leurs performances, contraintes et applications. Enfin, les principales utilisations industrielles et énergétiques sont présentées, notamment dans la chimie, les transports et la production d'électricité. L'hydrogène apparaît ainsi comme un levier stratégique vers une économie bas-carbone.

Abstract (English) :

Hydrogen plays a key role in global energy transition strategies due to its potential as a clean energy carrier. This work first presents its physicochemical properties, then explores the various production methods: fossil-based, renewable, biological, and nuclear. Special focus is given to environmental impact and the color classification of hydrogen. The study also investigates the main storage technologies—physical, solid-state, and chemical—analyzing their performance, challenges, and potential uses. A qualitative and quantitative comparison between these methods is also presented. Lastly, major applications in industry, transport, and power generation are discussed. Hydrogen thus emerges as a crucial tool in the shift toward a low-carbon energy system.

المخلص (العربية):

يمثل الهيدروجين عنصرًا محوريًا في خطط الانتقال الطاقوي العالمي، نظرًا لقدرته على العمل كناقل طاقة نظيف. تتناول هذه المذكرة خصائصه الفيزيائية والكيميائية، ثم تستعرض مختلف طرق إنتاجه من مصادر أحفورية، متجددة، بيولوجية و نووية، مع التركيز على الأثر البيئي وتصنيف "ألوان الهيدروجين". كما تشمل هذه الدراسة مقارنة كمية ونوعية وتحليل لتقنيات تخزينه (الفيزيائي، الصلب، والكيميائي) من حيث الكفاءة، التحديات، وسيناريوهات الاستخدام. وفي الأخير، عرضت أهم تطبيقاته في المجالات الصناعية والنقل وتوليد الكهرباء. يثبت الهيدروجين بذلك أنه أداة واعدة نحو اقتصاد منخفض الكربون.