

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Energétique

Présenté par :

ABED NASSIF ABED EL WAHID

Thème

**PRODUCTION D'HYDROGENE A PARTIR DE
BIOMASSE COMME TECHNOLOGIE VERTE**

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
HEBICHE N.	MAA	Président
BELKHIRI K.	MCB	Encadreur
BOUCHAREB K.	MAB	Co-Encadreur
BENABBAS S.	MAB	Examineur

Année Universitaire : 2024 / 2025

N° d'ordre : GM/...../2025



Dédicace

*Je dédie cet humble travail à :
Ma mère et mon père avant tout, qu'ALLAH les protège et prolonge
leur vie et
leur procure santé et bien-être, qui m'ont aidé tout au long de cette
longue étude.*

Merci pour tout le soutien que vous m'avez apporté

Aux lecteurs de ce mémoire, pour qui, je l'espère, leur sera utile.

*A mes parents, qu'ALLAH les protège, et prolonge leur vie et
leur procure santé et bien-être, qui m'ont aidé tout au
long de cette longue étude.*

A mes frères et sœurs, merci pour vos encouragements ;

Merci pour tout le soutien que vous m'avez apporté.

Remerciements

Je remercie Allah, qui m'a aidé à accomplir cet humble travail, et j'adresse toute ma reconnaissance et ma sincère gratitude à Monsieur Belkhir K., Maître de Conférences à l'université de M'Sila, qui n'a pas lésiné des conseils, des instructions et une bonne orientation tout au long de la période de préparation de ce travail.

J'adresse également mes sincères remerciements et ma gratitude aux membres jurys pour m'avoir donné part de leur temps et accepté l'étude et la discussion de mon mémoire à bras ouverts.

Je remercie tous ceux qui m'ont soutenu dans la préparation de ce mémoire, que ce soit par la prière ou par l'information, que Dieu les récompense et les bénisse.

ملخص: يتضمن إنتاج الهيدروجين الأخضر من الكتلة الحيوية استعادة المواد العضوية (النفايات الزراعية، أو الحرجية، أو الحضرية) لتوليد الهيدروجين، وهو مصدر طاقة نظيف. تعتمد هذه العملية بشكل أساسي على تقنيات مثل التغويز، والتحلل الحراري، والتخمير. يُسخن التغويز الكتلة الحيوية في جو مُتحكم به لإنتاج غاز مُركب غني بالهيدروجين. يُنقى هذا الغاز بعد ذلك. يُعتبر الهيدروجين المستخرج من الكتلة الحيوية "أخضر" إذا كانت العملية تُصدر كمية قليلة من ثاني أكسيد الكربون أو لا تُصدره على الإطلاق، أو إذا تم تعويض الانبعاثات. يُتيح هذا النهج استعادة النفايات، وتقليل انبعاثات غازات الاحتباس الحراري، وتنويع مصادر الطاقة. ومع ذلك، لا يزال هذا النهج مُكلفًا ومعقدًا من الناحية التكنولوجية. وتُجرى حاليًا أبحاث لتحسين الكفاءة والربحية.

Abstract: Green hydrogen production from biomass involves recovering organic matter (agricultural, forestry, or urban waste) to generate hydrogen, a clean energy source. This process primarily relies on technologies such as gasification, pyrolysis, or fermentation. Gasification heats biomass in a controlled atmosphere to produce a hydrogen-rich synthesis gas. This gas is then purified. Hydrogen from biomass is considered "green" if the process emits little or no CO₂, or if emissions are offset. This approach makes it possible to recover waste, reduce greenhouse gas emissions, and diversify energy sources. However, it remains costly and technologically complex. Research is underway to improve efficiency and profitability.

Résumé : La production d'hydrogène vert à partir de la biomasse consiste à valoriser des matières organiques (déchets agricoles, forestiers ou urbains) pour générer de l'hydrogène, une énergie propre. Ce procédé repose principalement sur des technologies comme la gazéification, la pyrolyse ou la fermentation. La gazéification chauffe la biomasse en atmosphère contrôlée pour produire un gaz de synthèse riche en hydrogène. Ce gaz est ensuite purifié. L'hydrogène issu de la biomasse est qualifié de "vert" si le procédé émet peu ou pas de CO₂, ou si les émissions sont compensées. Cette approche permet de valoriser des déchets, réduire les émissions de gaz à effet de serre, et diversifier les sources d'énergie. Elle reste cependant coûteuse et technologiquement complexe. Des recherches sont en cours pour améliorer le rendement et la rentabilité.

TABLE DES MATIERES

Dédicace	i
Remerciements	ii
Résumé	iii
Table des Matières	iv
Liste des Figures.....	vi
Liste des Tableaux.....	vi
INTRODUCTION GENERALE	1

CHAPITRE 1– IMPORTANCE DE L'ENERGIE

1.1 Introduction	3
1.2 Concept énergétique	4
1.3 Les énergies d'aujourd'hui et de demain.....	5
1.4 Energies Fossiles	6
1.4.1 Principaux types et leurs utilisations	6
1.4.2 Impact sur l'environnement.....	6
1.5 Energies renouvelables.....	7
1.5.1 Sources d'énergie renouvelable	7

CHAPITRE 2– PRODUCTION D'HYDROGENE

2.1 Introduction	12
2.2 Pourquoi l'hydrogène ?	13
2.3 L'Hydrogène, vecteur énergétique de l'avenir	14
2.4 Pile à combustible à Hydrogène	15
2.5 Types de piles à combustible	16
2.5.1 PEMFC – Pile à combustible à membrane échangeuse de protons.....	16
2.5.2 AFC – Pile à combustible alcaline	17
2.5.3 PAFC – Pile à combustible à acide phosphorique.....	17
2.5.4 MCFC – Pile à carbonate fondu	18
2.5.5 SOFC – Pile à oxyde solide.....	18

2.6 La production d'hydrogène	18
2.6.1 Le vaporeformage d'hydrocarbures	19
2.6.2 Le vaporeformage de gaz naturel	20
2.6.3 Oxydation partielle d'hydrocarbures	21
2.6.4 Oxydation partielle de résidu sous vide.....	21
2.6.5 Gazéification de la biomasse	22

CHAPITRE 3– PRODUCTION D'HYDROGENE A PARTIR DE BIOMASSE

3.1 Introduction	23
3.2 Motivations de l'utilisation de la biomasse comme source d'hydrogène.....	23
3.3 La pyrolyse	24
3.3.1 Comparaison des types de pyrolyse de la biomasse	25
3.3.2 Electrolyse à haute température.....	39
3.3.3 Electrolyse de l'eau à membrane échangeuse de protons.....	40
3.4 La gazéification	26
3.5 La fermentation sombre	27
3.5.1 Conditions opératoires de la fermentation sombre	27
3.6 Le reformage à la vapeur.....	28
3.6.1 Étapes mécaniques du processus	28
3.7 Comparaison des méthodes	28
3.8 Applicabilité industrielle : coût et impact environnemental	29
3.9 Stockage de l'hydrogène.....	29
3.10 Biocarburants	30
CONCLUSION GENERALE	32
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	34

Liste des Figures

Fig. 1.1 Conversions des six principales formes d'énergie et quelques exemples de convertisseurs d'énergie.....	04
Fig. 1.2 Sources d'énergie.....	05
Fig. 1.3 Panneaux solaires photovoltaïques.....	08
Fig. 1.4 Capteurs solaires thermiques	08
Fig. 1.5 Énergie éolienne terrestre (onshore).....	09
Fig. 1.6 Énergie éolienne terrestre (offshore).....	09
Fig. 1.7 Illustration scientifique d'une centrale hydroélectrique.	10
Fig. 1.8 Centrale hydroélectrique.....	10
Fig. 2.1 Pile à combustible à Hydrogène	17
Fig. 2.2 Module de pile à combustible PEMFC de 1kW	18
Fig. 2.3 L'unité de vaporeformage construite par Technip pour Sync rude Canada.....	20
Fig. 2.4 Produits issus du processus de gazéification.....	22
Fig. 3.1 Biomasse pyrolyse.....	25
Fig. 3.2 Gazéification de la biomasse pour obtenir de l'hydrogène vert	26
Fig. 3.3. Les différents biocarburants produits à partir de biomasse	31

Liste des Tableaux

Tableau 2.1 Quelques caractéristiques physiques et physico-chimiques de l'hydrogène moléculaire	13
Tableau 2.2 LES Différents types de piles à combustible	17
Tableau 3.1 Types de pyrolyses	26
Tableau 3.2 Comparatif des méthodes de production d'hydrogène à partir de la biomasse	29

Introduction

Générale

L'humanité traverse aujourd'hui une phase critique de son histoire énergétique. La forte croissance démographique, l'industrialisation galopante et la numérisation massive ont engendré une augmentation exponentielle de la demande en énergie. Or, cette énergie repose encore en grande partie sur les ressources fossiles – pétrole, gaz naturel, charbon – dont l'exploitation massive a provoqué des effets dévastateurs sur l'environnement. Le réchauffement climatique, la pollution de l'air, la déforestation, la perte de biodiversité et l'acidification des océans sont autant de symptômes d'un modèle énergétique en crise.

Face à cette situation, le monde s'oriente de plus en plus vers des solutions durables, renouvelables et faibles en carbone. C'est dans ce contexte que l'hydrogène, en particulier l'hydrogène vert, apparaît comme l'un des piliers d'une transition énergétique réussie. Contrairement à l'hydrogène « gris » issu d'hydrocarbures, l'hydrogène vert est produit à partir de sources renouvelables, sans émission nette de gaz à effet de serre. Il peut ainsi jouer un rôle central dans la décarbonation de secteurs clés comme l'industrie, le transport ou la production d'électricité.

De nombreuses sources d'énergie alternatives peuvent être utilisées à la place des combustibles fossiles. La décision quant au type de source d'énergie à utiliser dans chaque cas doit être prise sur la base de considérations économiques, environnementales et de sécurité. En raison des aspects souhaitables en matière d'environnement et de sécurité, il est largement admis que l'énergie renouvelable devrait être utilisée à la place d'autres formes d'énergie alternatives, car elle peut être fournie de manière durable sans nuire à l'environnement.

En Algérie, il existe un grand potentiel pour développer la filière de l'hydrogène vert. Le pays dispose d'importantes ressources solaires et éoliennes, ce qui lui permet de produire de l'hydrogène vert à partir de ces sources renouvelables en grande quantité et à un coût compétitif.

Les plans et stratégies annoncés par l'Algérie indiquent sa volonté de renforcer le secteur des énergies renouvelables et de transformer l'économie en une économie durable. L'hydrogène vert pourrait constituer un élément important de cette stratégie, car il peut être utilisé dans un large éventail d'applications allant de l'industrie lourde aux transports et au stockage d'énergie.

Parmi les différentes voies de production d'hydrogène vert, la valorisation énergétique de la biomasse offre une alternative prometteuse. La biomasse regroupe l'ensemble des matières organiques d'origine végétale, animale ou issue de déchets. Ressource renouvelable, abondante et souvent locale, elle peut être convertie en hydrogène par des procédés thermochimiques ou biologiques. Cette transformation permet non seulement de produire un

vecteur énergétique propre, mais aussi de réduire la charge environnementale liée à l'accumulation des déchets organiques.

L'intérêt croissant pour cette filière s'explique par sa double capacité à répondre à des enjeux énergétiques et écologiques. Elle favorise une approche circulaire où les résidus agricoles, forestiers, industriels ou municipaux deviennent des ressources utiles. De plus, elle contribue à la diversification du mix énergétique, à la réduction de la dépendance aux énergies fossiles, et à la création de valeur dans les territoires.

Cependant, malgré son potentiel, la production d'hydrogène à partir de la biomasse soulève encore plusieurs défis : complexité des procédés, rendements variables, besoins en prétraitement, coûts technologiques, et contraintes environnementales. Ces défis nécessitent une exploration scientifique approfondie pour identifier les procédés les plus efficaces, durables et adaptés aux ressources disponibles.

C'est dans cette perspective que s'inscrit notre travail, en cherchant à comprendre comment la biomasse peut être exploitée pour produire de l'hydrogène propre, à travers l'étude des procédés, l'analyse de leurs performances, et l'évaluation de leur impact environnemental. Cette réflexion s'insère dans une ambition plus large : contribuer à l'émergence d'un modèle énergétique décarboné, sobre, résilient et respectueux des équilibres naturels.

Chapitre 1 :

Importance de l'Energie

1.1 Introduction

L'énergie est le moteur silencieux de toute civilisation. Elle conditionne le développement économique, oriente les choix géopolitiques et façonne notre quotidien. Depuis la révolution industrielle, notre dépendance à l'énergie n'a cessé de croître, rendant sa disponibilité et sa gestion centrales pour la stabilité mondiale. Dans ce contexte, comprendre les enjeux liés à l'énergie n'est pas seulement une nécessité scientifique, mais une urgence sociétale [1].

L'essor des sociétés modernes repose sur un accès fiable à des sources d'énergie abondantes et abordables. De l'électricité qui alimente les foyers aux carburants qui propulsent les transports, chaque aspect de la vie contemporaine est tributaire d'un système énergétique complexe, souvent invisible mais omniprésent. Le lien entre consommation énergétique et indicateurs de développement humain est aujourd'hui clairement établi [2].

Cependant, cette dépendance s'accompagne de défis majeurs. Les sources fossiles, qui représentent encore la majorité de notre approvisionnement, sont limitées, polluantes et géopolitiquement sensibles. Le changement climatique, les conflits autour des ressources et les inégalités d'accès à l'énergie constituent autant de menaces qui imposent une réflexion profonde sur nos choix énergétiques [3].

Face à ces enjeux, la transition énergétique s'impose comme une priorité. Il ne s'agit plus seulement de produire plus d'énergie, mais de la produire mieux : proprement, durablement et équitablement. Le développement des énergies renouvelables, la maîtrise de la demande et l'innovation technologique sont autant de leviers pour construire un avenir énergétique plus résilient [4].

L'énergie est un axe stratégique de l'économie algérienne, car le pays dépend fortement des exportations de pétrole et de gaz naturel, qui représentent plus de 90 % de ses recettes en devises. Cette forte dépendance a fait du secteur énergétique l'épine dorsale des finances publiques et des programmes de développement de l'État. L'Algérie possède l'une des plus grandes réserves prouvées de gaz naturel d'Afrique et est un exportateur majeur vers l'Europe, ce qui lui confère une influence géopolitique dans la région. Cependant, ce secteur est confronté à des défis majeurs, notamment la fluctuation des prix sur le marché mondial, la baisse de la production et le besoin urgent de diversifier les sources d'énergie et l'économie. Dans ce contexte, l'importance d'investir dans les énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire

et l'hydrogène vert, apparaît comme une option stratégique qui garantit la sécurité énergétique et renforce l'indépendance économique à long terme [5].

1.2 Concept énergétique

L'énergie est une grandeur physique fondamentale qui désigne la capacité d'un système à produire un travail ou à provoquer un changement, que ce soit dans la matière, le mouvement ou la température. Elle se manifeste sous différentes formes — mécanique, thermique, chimique, électrique, nucléaire ou encore rayonnante — et peut être convertie d'une forme à une autre, mais ne peut ni être créée ni détruite selon le principe de la conservation. Dans le contexte technologique et économique, l'énergie devient un vecteur essentiel du développement, conditionnant l'activité industrielle, les transports, le confort domestique, et les services. La compréhension, la gestion et l'optimisation de l'énergie sont donc au cœur des enjeux scientifiques et stratégiques contemporains [6].

L'énergie existe sous plusieurs formes, chacune jouant un rôle clé dans le fonctionnement du monde qui nous entoure. Cette diversité permet de répondre à des besoins variés, qu'ils soient mécaniques, thermiques, électriques ou chimiques. Comme le montre la Figure (1.1) suivante :

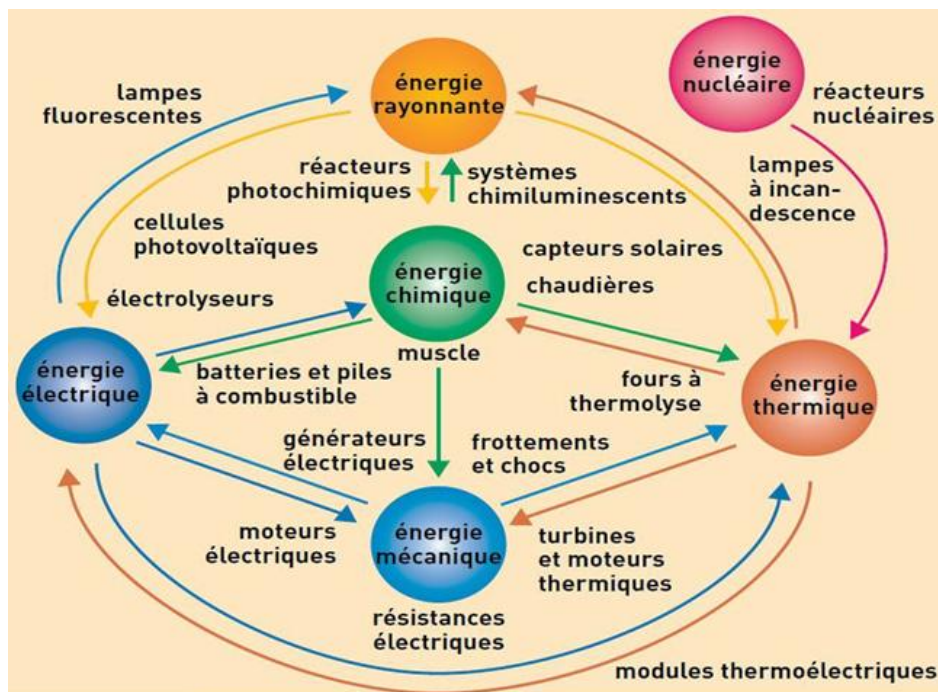


Fig. 1.1 Conversions des six principales formes d'énergie et quelques exemples de convertisseurs d'énergie [7].

1.3 Les énergies d'aujourd'hui et de demain

Dans un monde en perpétuelle mutation, l'énergie demeure le moteur invisible de tout ce qui nous entoure. Du soleil généreux qui éclaire nos journées, aux vents qui caressent les collines, en passant par les vagues de la mer et les battements du cœur de la Terre, les sources d'énergie sont multiples et variées, entre tradition et nouveau. Comme le montre la Figure suivante :

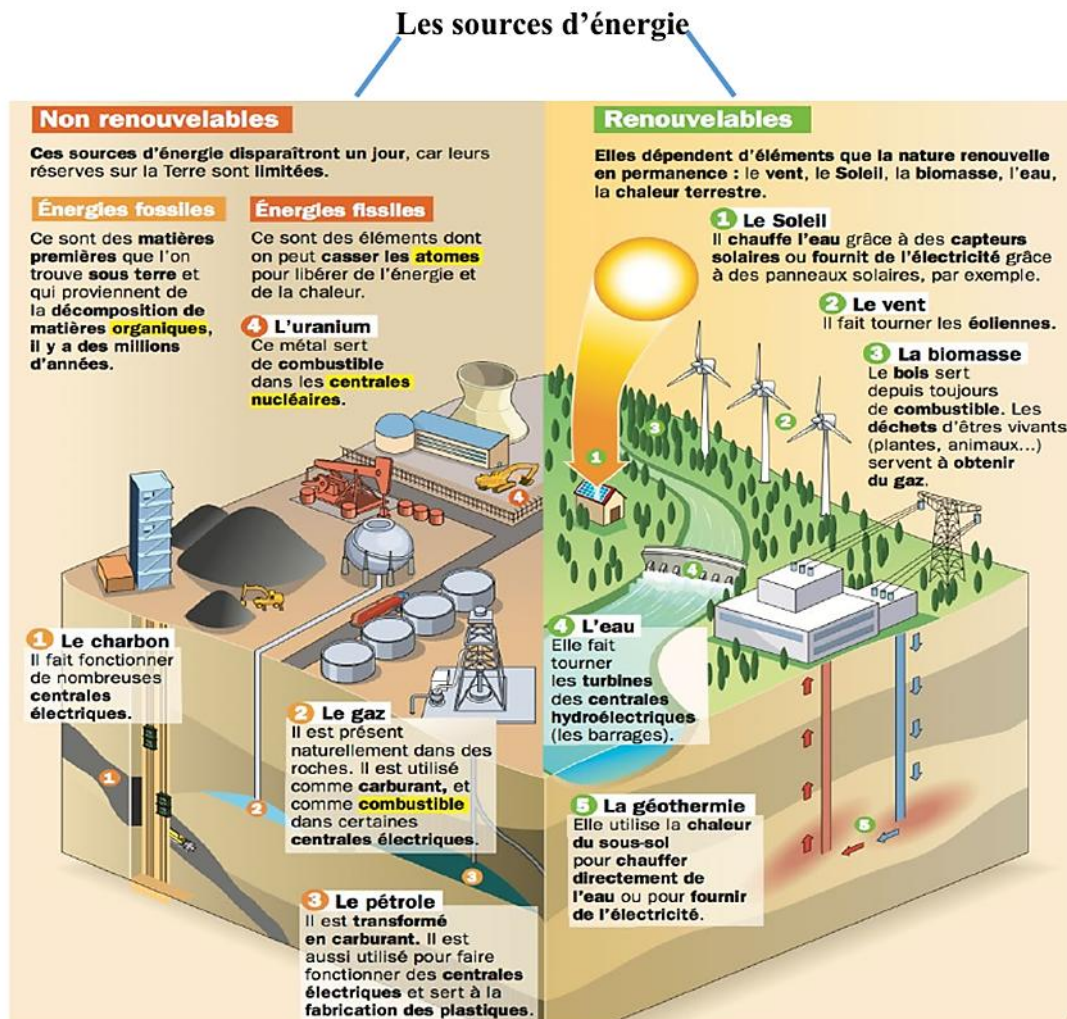


Fig. 1.2 Sources d'énergie [8].

1.4 Énergies Fossiles

Les énergies fossiles sont des sources d'énergie issues de la décomposition lente de matières organiques (plantes, animaux) enfouies dans le sous-sol depuis des millions d'années. Elles comprennent principalement le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Ces ressources sont dites non renouvelables, car leur formation prend un temps géologique extrêmement long, et leur consommation dépasse largement leur capacité de renouvellement. La combustion des

énergies fossiles est aujourd'hui la principale source d'émissions de gaz à effet de serre, contribuant ainsi au réchauffement climatique mondial [9].

1.4.1 Principaux types et leurs utilisations

- **Charbon** : Formé à partir de plantes anciennes dans des environnements marécageux (comme la période carbonifère il y a 300 millions d'années).
Principales utilisations : production d'électricité (37 % dans le monde) et production d'acier.
- **Huile** : Il provient d'organismes marins enfouis dans des bassins sédimentaires. Il est utilisé dans les transports (90 % de la demande mondiale de pétrole), les plastiques et les produits chimiques.
- **Gaz naturel** : Formé à partir d'organismes microscopiques dans les sédiments marins. Il est utilisé pour le chauffage, la production d'électricité et les processus industriels (tels que la production d'engrais).
- **L'uranium** : L'uranium est un élément chimique lourd et radioactif (symbole U, numéro atomique 92). Il constitue le principal combustible de l'énergie nucléaire. Il est utilisé pour produire de l'électricité via la fission nucléaire et pour fabriquer des armes nucléaires, mais il représente également un défi environnemental et sécuritaire complexe.

1.4.2 Impact sur l'environnement

- *Emissions de gaz à effet de serre* : La combustion des combustibles fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel) est la principale source d'émissions de dioxyde de carbone (CO₂), un gaz à effet de serre majeur. Ces émissions accentuent le réchauffement climatique en piégeant la chaleur dans l'atmosphère terrestre. En 2022, environ 75 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre provenaient de l'énergie fossile [10].
- *Pollution de l'air* : Les centrales thermiques, les véhicules et les industries utilisant des combustibles fossiles libèrent des particules fines (PM2.5), des oxydes d'azote (NO_x) et du dioxyde de soufre (SO₂). Ces polluants provoquent des maladies respiratoires, des cancers et des millions de décès prématurés chaque année [11].
- *Dégradation des écosystèmes* : L'extraction de combustibles fossiles (forages pétroliers, mines de charbon, fracturation hydraulique) détruit les habitats naturels,

perturbe la biodiversité et pollue les sols et les nappes phréatiques. Des écosystèmes entiers sont menacés par les marées noires et les fuites de méthane [12].

- *Acidification des océans* : Le CO₂ émis par les combustibles fossiles ne reste pas uniquement dans l'atmosphère : il est aussi absorbé par les océans, augmentant leur acidité. Cela fragilise les récifs coralliens et perturbe la chaîne alimentaire marine [13].
- *Contribution aux changements climatiques extrêmes* : L'utilisation continue et accumulée des combustibles fossiles exacerbe les phénomènes climatiques extrêmes, tels que les vagues de chaleur intenses, les inondations, les incendies de forêt et les sécheresses prolongées. Ces catastrophes climatiques menacent directement la sécurité alimentaire, réduisent la disponibilité de l'eau et augmentent les risques pour la santé humaine.

1.5 Les énergies renouvelables

Les énergies renouvelables désignent des sources d'énergie provenant de processus naturels constamment régénérés à l'échelle humaine — comme le soleil, le vent, l'eau, la biomasse ou la chaleur terrestre — qui, contrairement aux combustibles fossiles, émettent peu ou pas de gaz à effet de serre lors de leur exploitation, sont considérées comme durables car pratiquement inépuisables, et jouent un rôle essentiel dans la transition énergétique, la lutte contre le changement climatique, ainsi que dans le renforcement de la sécurité énergétique en réduisant la dépendance aux ressources fossiles importées [14].

1.5.1 Sources d'énergie renouvelable

Les énergies renouvelables proviennent de phénomènes naturels constamment régénérés, ce qui les rend inépuisables malgré leur exploitation humaine. Offrant une alternative propre et durable aux énergies fossiles comme le charbon et le pétrole, elles jouent un rôle central dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre et la lutte contre le changement climatique. Parmi ces sources d'énergie, on distingue notamment :

- *Énergie solaire* : Il s'agit de l'énergie produite à partir de la lumière du soleil, et elle peut être convertie en électricité ou en chaleur à l'aide de technologies telles que les panneaux photovoltaïques, comme le montre la Figure (1.3), ou les capteurs solaires thermiques, comme le montre la Figure (1.4). Cette énergie est une ressource propre et renouvelable, et ne produit aucune émission nocive lors de son utilisation, ce qui en fait une option efficace pour lutter contre le changement climatique [15].



Fig. 1.3 Panneaux solaires photovoltaïques [8].

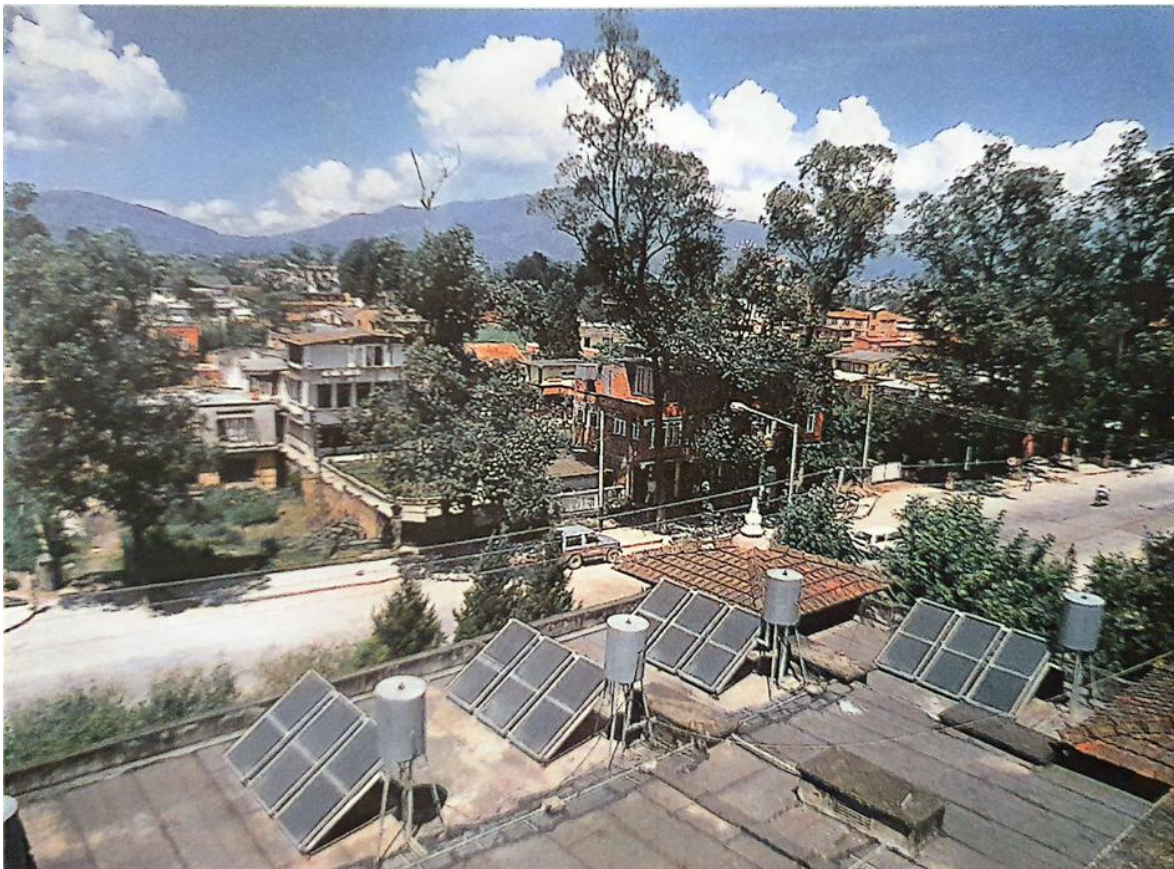


Fig. 1.4 Capteurs solaires thermiques [7].

- *Energie éolienne* : L'énergie éolienne est une forme d'énergie renouvelable qui résulte de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en énergie électrique à l'aide d'éoliennes. Le vent étant un mouvement d'air provoqué principalement par les différences de température à la surface de la Terre, il constitue une ressource inépuisable à l'échelle humaine. Les éoliennes, quant à elles, utilisent des pales montées sur un rotor pour capter cette énergie et entraîner un générateur électrique.

Cette technologie, propre et silencieuse, joue un rôle de plus en plus central dans la transition énergétique, notamment dans les stratégies de décarbonation du secteur électrique [16].

Il existe deux types de cette énergie, énergie éolienne terrestre (onshore) Comme le montre la Figure (1.5), et énergie éolienne en mer (offshore) ; ceci est montré dans la Figure (1.6).



Fig. 1.5 Énergie éolienne terrestre (onshore) [17].



Fig.1.6 Energie éolienne en mer (offshore) [18].

- *Énergie hydraulique* : L'énergie hydraulique est l'énergie produite par l'exploitation du mouvement de l'eau, qu'il s'agisse de chutes d'eau, de courants fluviaux ou du

déversement des barrages, afin de générer de l'électricité. Elle constitue l'une des plus anciennes formes d'énergie renouvelable utilisées par l'homme et elle est aujourd'hui largement exploitée à travers les centrales hydroélectriques [19].

La production d'énergie hydraulique s'effectue en exploitant le mouvement de l'eau provenant d'un point élevé. L'eau est d'abord stockée derrière un barrage, accumulant ainsi une énergie potentielle. Lorsqu'on ouvre les vannes, l'eau est dirigée à travers des conduites vers des turbines qu'elle fait tourner sous la force de son débit. Le mouvement des turbines transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, puis en énergie électrique grâce à un générateur fonctionnant selon le principe de l'induction électromagnétique. L'électricité produite est ensuite acheminée vers les réseaux de distribution, tandis que l'eau est restituée à son cours naturel. Comme le montre la Figure (1.7), ce qui rend ce procédé à la fois efficace et respectueux de l'environnement, malgré certains impacts locaux.

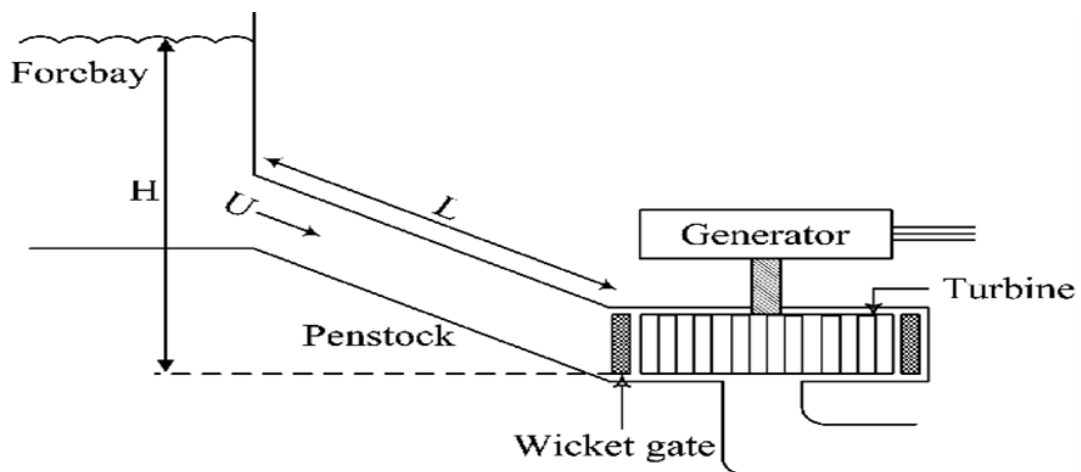


Fig.1.7 Illustration scientifique d'une centrale hydroélectrique [20].



Fig.1.8 Centrale hydroélectrique

- *Énergie de la Biomasse* : L'énergie de la biomasse désigne l'ensemble des formes d'énergie obtenues à partir de la matière organique d'origine végétale ou animale. Cette matière peut être utilisée directement, notamment par combustion pour produire de la chaleur, ou transformée par divers procédés physico-chimiques et biologiques en vecteurs énergétiques comme le biogaz, le bioéthanol ou le biodiesel. La biomasse regroupe ainsi une diversité de ressources, incluant le bois, les résidus agricoles, les déchets organiques, les cultures énergétiques et même certaines algues. En tant que source renouvelable, son exploitation est conditionnée par des pratiques durables de gestion des sols, des forêts et des déchets. Elle joue un rôle clé dans la transition énergétique, notamment pour la production de chaleur, d'électricité et de carburants, tout en permettant la valorisation des déchets et la réduction des émissions de gaz à effet de serre, lorsque son cycle carbone est bien maîtrisé [21].

Types de biomasse utilisés pour la production d'énergie :

- ✓ Les plantes (le bois de chauffage, les cultures agricoles...);
 - ✓ Les déchets agricoles et industriels (la paille, les résidus de bois, etc.);
 - ✓ Les déchets organiques (les déchets alimentaires, le fumier des animaux...);
 - ✓ Les algues;
 - ✓ Les huiles végétales et les graisses animales.
- *Hydrogène* : L'hydrogène est l'élément chimique le plus léger et le plus abondant dans l'univers. Il ne se trouve pas naturellement à l'état pur sur Terre, mais il peut être extrait de diverses sources comme l'eau ou les hydrocarbures. Incolore, inodore et non toxique, il constitue un vecteur énergétique prometteur : lorsqu'il est utilisé dans une pile à combustible, il ne produit que de l'électricité, de la chaleur et de la vapeur d'eau comme émissions. L'hydrogène est ainsi perçu comme un pilier potentiel de la transition énergétique, en particulier s'il est produit à partir de sources d'énergie renouvelables [22].

Chapitre 2 :

Production

d'Hydrogène

2.1 Introduction

En raison de l'augmentation du niveau de vie, de la croissance démographique et du développement industriel dans les pays en développement, la demande et la consommation mondiales d'énergie augmentent. Selon l'Agence internationale de l'énergie, la consommation mondiale d'énergie devrait augmenter de 50 % d'ici 2030. Les combustibles fossiles représentent plus de 95 % de cette demande, mais ils contribuent également de manière significative à la pollution de l'environnement et au réchauffement climatique en raison de la grande quantité d'émissions de gaz à effet de serre. Par conséquent, la création de nouvelles solutions d'énergie verte est essentielle pour promouvoir la durabilité. L'Accord de Paris, ratifié par 196 pays lors de la COP21, interdit une augmentation de la température mondiale en dessous de 1.5 degré Celsius. Afin de parvenir à la durabilité environnementale et de réduire les émissions de carbone, de nombreux pays ont également adopté des réglementations énergétiques respectueuses de l'environnement. Afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre de 709.1 millions de tonnes en 2017 à 536 millions de tonnes d'ici 2030, la Corée du Sud a publié son deuxième plan directeur pour la stratégie de lutte contre le changement climatique en 2019. Partout dans le monde, des instituts et des organisations de recherche développent des technologies avancées qui utilisent des ressources renouvelables pour produire de l'énergie et des carburants verts. L'hydrogène, l'élément le plus abondant dans l'univers, est une source viable d'énergie propre et renouvelable [23].

Pour que l'hydrogène puisse réellement s'inscrire dans une dynamique de développement durable, il est essentiel de développer des moyens de production à faible émission de carbone, tels que l'électrolyse de l'eau à partir d'électricité renouvelable, la gazéification de la biomasse ou encore des procédés photo- ou thermo-chimiques avancés [6].

Ce vecteur énergétique, souvent qualifié de "carburant du futur", présente des caractéristiques particulièrement attrayantes. L'hydrogène est l'élément chimique le plus abondant de l'univers, il ne génère aucune émission de dioxyde de carbone lors de sa combustion, et peut être utilisé dans de nombreuses applications allant des transports à l'industrie en passant par le stockage d'énergie renouvelable [22].

Cependant, la production d'hydrogène reste un défi technologique et environnemental. À l'heure actuelle, environ 95 % de l'hydrogène est produit à partir d'énergies fossiles, notamment par vaporeformage du méthane, un procédé à forte intensité carbone [24].

Comprendre les fondements théoriques et pratiques de la production d'hydrogène ne constitue pas seulement une exigence scientifique, mais représente aussi une contribution à l'édification d'un avenir plus durable, où l'énergie serait propre, accessible et sûre.

2.2 Pourquoi l'hydrogène ?

Pourquoi recourir à l'hydrogène ? Certaines réponses à cette question relèvent autant d'un optimisme excessif que d'un pessimisme exagéré. Comme souvent dans de tels débats, la vérité se situe entre deux extrêmes. Elle résulte de la demande énergétique, l'épuisement des ressources fossiles et réchauffement de la planète imputable à un effet de serre excessif [25].

L'hydrogène peut stocker l'énergie excédentaire produite par les panneaux solaires ou les éoliennes. Cette énergie peut être restituée ultérieurement via des piles à combustible, un avantage essentiel pour stabiliser les réseaux électriques [26].

L'hydrogène possède également des propriétés physiques qui le rendent meilleur que les combustibles fossiles, comme le montre le Tableau (2.1) suivant :

Propriétés	Valeur numérique
masse atomique	1,0079
constante du gaz	4124,5 J/kg·K
PCI (Pouvoir Calorifique Inférieur)	33,33 kWh/kg / 3 kWh/Nm ³ (essence : ≈ 12 kWh/kg, 8,8 kWh/l) (gaz naturel : 10,6 - 13,1 kWh/kg, 8,8 - 10,4 kWh/Nm ³) L'énergie contenue dans 1 Nm ³ d'hydrogène est équivalente à 0,34 litre d'essence, 1 kg d'hydrogène est équivalent à 2,75 kg d'essence 10800 kJ/Nm ³
PCS (inclut l'énergie de la vapeur d'eau)	39,41 kWh/kg / 3,55 kWh/Nm ³ 12770 kJ/Nm ³
densité gazeuse à 273 K	0,0899 kg/Nm ³ (gaz naturel : 0,6512 kg/Nm ³)
chaleur spécifique (Cp à 273 K)	14199 J/kg/K
température d'ébullition (à 1013 mbars)	20,268 K

Tableau 2.1 Quelques caractéristiques physiques et physico-chimiques de l'hydrogène moléculaire [25].

2.3 L'Hydrogène, vecteur énergétique de l'avenir

Un vecteur énergétique est une substance ou un système capable de transporter ou de stocker de l'énergie pour une utilisation ultérieure. Contrairement à une source primaire (comme le pétrole ou le soleil), un vecteur doit être produit à partir d'une autre forme d'énergie. L'hydrogène en est un parfait exemple : il ne se trouve pas à l'état libre sur Terre et doit être extrait par des procédés consommateurs d'énergie, comme l'électrolyse de l'eau ou le reformage du gaz naturel [22].

L'hydrogène (H_2) n'est pas une source primaire d'énergie comme le soleil ou le charbon c'est un vecteur. Cela signifie qu'on doit d'abord le produire à partir d'autres sources d'énergie. Mais une fois produit, il peut stocker, transporter et restituer l'énergie [22].

L'hydrogène et l'énergie partagent une longue histoire commune : il a alimenté les premiers moteurs à combustion interne il y a plus de 200 ans et est devenu un élément essentiel de l'industrie moderne du raffinage. Léger, stockable, riche en énergie, il ne produit aucune émission directe de polluants ni de gaz à effet de serre. Mais pour que l'hydrogène contribue significativement aux transitions énergétiques propres, il doit être adopté dans des secteurs où il est quasiment absent, comme les transports, le bâtiment et la production d'électricité [27].

L'hydrogène pourrait s'imposer comme un nouveau vecteur énergétique après l'électricité et la chaleur. Le CEA, conscient de ces perspectives, accroît ses recherches dans ce domaine ainsi que dans celui des piles à combustible, qui peuvent avoir de multiples utilisations dans les transports et dans le domaine du stationnaire, comme source d'électricité et de chaleur, ou dans celui du portable pour l'alimentation d'appareils "nomades" (téléphones, ordinateurs, outils de jardin, camping...) [25].

L'hydrogène peut jouer un rôle crucial dans le stockage de l'énergie intermittente produite par les sources renouvelables (solaire, éolien). Lors des pics de production, l'électricité excédentaire peut être utilisée pour produire de l'hydrogène par électrolyse (Processus de conversion d'énergie en gaz). Cet hydrogène peut ensuite être stocké et reconverti en électricité via une pile à combustible lorsque la demande augmente [28].

La fiabilité du transport d'énergie électrique désigne la capacité du réseau à acheminer l'électricité depuis les centres de production jusqu'aux centres de consommation, de manière continue, sécurisée et stable, malgré les aléas techniques, environnementaux ou humains [29].

2.4 Pile à combustible à Hydrogène

Elle joue un rôle central dans la transition énergétique, notamment dans le secteur de la mobilité propre (voitures, bus, trains), en remplaçant les moteurs à combustion interne par une technologie sans émissions directes de gaz à effet de serre [30].

La pile à combustible à hydrogène, également connue sous le nom de pile à membrane échangeuse de protons (PEMFC, Moulage de piles à combustible à membrane échangeuse de protons), est un système électrochimique qui transforme directement l'énergie chimique contenue dans l'hydrogène en électricité, Comme le montre la Figure (2.1). Son fonctionnement ne repose pas sur la combustion, mais sur une réaction chimique propre, dont les seuls sous-produits sont de l'eau, de la chaleur et, dans certains cas, un faible niveau sonore.

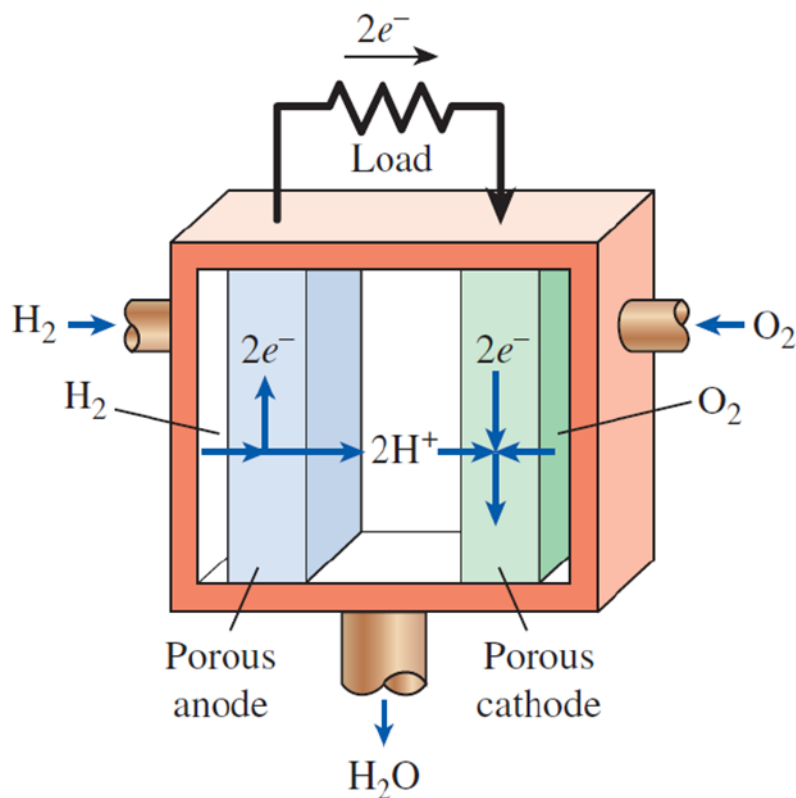


Fig.2.1 Pile à combustible à Hydrogène [8].

L'hydrogène, gaz léger et abondant dans l'univers, possède des caractéristiques remarquables : il peut être produit à partir de diverses sources (électrolyse de l'eau, reformage du gaz naturel, biomasse), stocké, transporté, et surtout utilisé sans émettre de CO₂ lorsqu'il est converti en énergie. Parmi les technologies permettant d'exploiter ce potentiel, la pile à combustible occupe une place de choix.

Les piles à combustible trouvent aujourd'hui des applications variées, allant des systèmes portables à l'alimentation stationnaire, en passant par le secteur des transports. Par ailleurs, l'intégration des PAC dans les systèmes énergétiques décentralisés ouvre des perspectives nouvelles pour la production d'électricité autonome et propre [31].

Parmi les technologies exploitant le potentiel de l'hydrogène, la pile à combustible (PAC) occupe une place stratégique. Il s'agit d'un dispositif électrochimique capable de convertir l'énergie chimique d'un combustible (généralement l'hydrogène) et d'un oxydant (souvent l'oxygène de l'air) en électricité, en produisant pour seuls sous-produits de la chaleur et de l'eau [32].

Cette conversion directe, sans combustion, se distingue par un rendement énergétique supérieur à celui des moteurs thermiques classiques, et par une réduction significative des émissions polluantes [33].

Ce type de pile fournit une source d'électricité continue tant que les réactifs (hydrogène et oxygène) sont alimentés, ce qui en fait une alternative aux batteries classiques, surtout pour des applications de longue durée [32].

2.5 Types de piles à combustible

Les piles à combustible sont des systèmes électrochimiques qui convertissent l'énergie chimique de l'hydrogène directement en électricité. Leurs types varient en fonction de la nature de l'électrolyte, de la température et des applications possibles. Le tableau suivant (2.2) présente une comparaison entre les principaux types de piles à combustible en termes de composants et de caractéristiques opérationnelles.

2.5.1 PEMFC – Pile à combustible à membrane échangeuse de protons

La PEMFC (Pile à combustible à membrane échangeuse de protons), ou pile à combustible à membrane échangeuse de protons, est une technologie de conversion électrochimique de l'énergie, fonctionnant à basse température (environ 60 à 80 °C) [32]. Les piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC) représentent une technologie prometteuse dans le domaine des systèmes de conversion d'énergie propre [33].

Type de pile	Anode (catalyseur)	Électrolyte	Cathode (catalyseur)	Température	Applications
Membrane échangeuse de protons (PEMFC)	$H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$ (Pt)	Polymère perfluoré (SO_3H^+) $H^+ \rightarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2O$ (Pt)	60–90 °C	Portable Transport Stationnaire
Méthanol direct (DMFC)	$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6 H^+ + 6 e^-$ (Pt)	Polymère perfluoré (SO_3H^+) $H^+ \rightarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2O$ (Pt)	60–90 °C	Portable Transport
Acide phosphorique (PAFC)	$H_2 \rightarrow 2 H^+ + 2 e^-$ (Pt)	PO_4H_3 (85–100%) $H^+ \rightarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2 H^+ + 2 e^- \rightarrow H_2O$ (Pt)	160–220 °C	Stationnaire
Alcaline (AFC)	$H_2 + 2 OH^- \rightarrow 2 H_2O + 2 e^-$ (Pt, Ni)	KOH (8–12 N) $OH^- \rightarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + H_2O + 2 e^- \rightarrow 2 OH^-$ (Pt-Au, Ag)	50–250 °C	Spatial Transport
Carbonate fondu (MCFC)	$H_2 + CO_3^{2-} \rightarrow H_2O + CO_2 + 2 e^-$ (Ni + 10% Cr)	$Li_2CO_3/K_2CO_3/Na_2CO_3$ $CO_3^{2-} \rightarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + CO_2 + 2 e^- \rightarrow CO_3^{2-}$ ($NiO_x + Li$)	650 °C	Stationnaire
Oxyde solide (SOFC)	$H_2 + O^{2-} \rightarrow H_2O + 2 e^-$ (cermet Ni-ZrO ₂)	$ZrO_2-Y_2O_3$ $O^{2-} \rightarrow$	$\frac{1}{2} O_2 + 2 e^- \rightarrow O^{2-}$ (perovskites $La_xSr_{1-x}MnO_3$)	750–1050 °C	Stationnaire APU

Tableau 2.2 LES Différents types de piles à combustible [25].

2.5.2 AFC – Pile à combustible alcaline

La pile à combustible alcaline (AFC) est un dispositif électrochimique qui convertit l'énergie chimique d'un combustible (généralement l'hydrogène) et d'un oxydant (souvent l'oxygène ou l'air) en électricité, chaleur et eau, sans combustion directe [33].

2.5.3 PAFC – Pile à combustible à acide phosphorique

La pile à combustible à acide phosphorique (PAFC) est une technologie électrochimique qui convertit l'énergie chimique d'un combustible, généralement l'hydrogène, en électricité, chaleur et eau [33]. Elle est principalement utilisée dans des applications stationnaires pour la cogénération (production combinée de chaleur et d'électricité), en raison de sa robustesse, de sa durabilité et de sa capacité à fonctionner en continu [34].

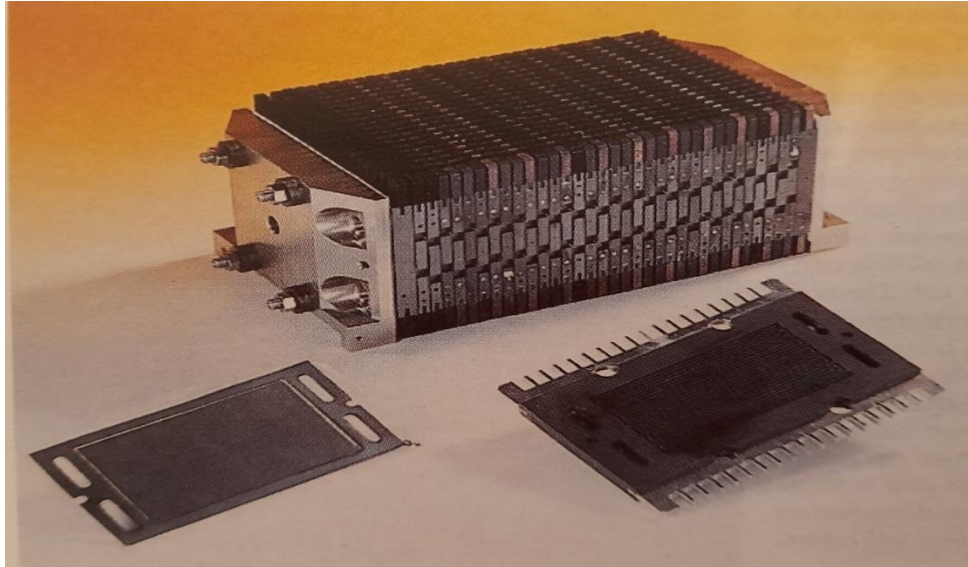


Fig. 2.2 Module de pile à combustible PEMFC de 1kW [7].

2.5.4 MCFC – Pile à carbonate fondu

Les piles à carbonate fondu (MCFC) sont un type de piles à combustible à haute température qui utilisent un électrolyte composé de carbonates fondus (souvent un mélange de carbonates de lithium, de potassium et/ou de sodium) maintenus à l'état liquide à une température d'environ 600 à 700 °C. Ces piles fonctionnent généralement à partir de gaz naturel, de biogaz ou d'autres combustibles riches en hydrocarbures [33].

2.5.5 SOFC – Pile à oxyde solide

Les piles à combustible de la famille des SOFC fonctionnent selon le principe suivant. L'air est acheminé à la cathode où l'oxygène est dissocié pour donner des anions O^{2-} . Ceux-ci migrent à travers la structure cristalline de l'électrolyte pour venir oxyder les atomes d'hydrogène qui sont amenés à l'anode par le combustible. Cette réaction libère des électrons et de l'eau. La spécificité des SOFC réside dans leur haute température de fonctionnement, située dans une gamme de 700 à 950 °C, nécessaire à l'établissement d'une conductivité ionique suffisante de l'électrolyte céramique [25].

2.6 La production d'hydrogène

Si l'hydrogène venait à devenir une source majeure d'énergie dans l'avenir, il serait très probablement produit – du moins dans les premières étapes – à partir de ressources fossiles,

comme c'est déjà le cas dans ses applications industrielles actuelles. Ce qui rend l'hydrogène si attrayant, c'est sa capacité à réagir facilement avec l'oxygène de l'air pour libérer de l'énergie, tout en ne produisant que de l'eau comme sous-produit – un exemple de propreté énergétique.

Cependant, cette qualité a un prix : la production d'hydrogène demande une quantité importante d'énergie, car elle repose sur des molécules contenant de l'hydrogène mais très stables chimiquement, comme l'eau (H_2O) ou le méthane (CH_4). Historiquement, l'industrie a logiquement opté pour les procédés les plus efficaces sur le plan économique, et c'est le gaz naturel – riche en méthane – qui s'est imposé comme matière première dominante.

D'autres sources fossiles peuvent également être utilisées, car elles contiennent elles aussi de l'hydrogène, que l'on peut extraire par des réactions d'oxydation partielle. Tous ces procédés, qu'ils reposent sur des combustibles fossiles ou sur la biomasse, passent généralement par la production d'un « gaz de synthèse » – un mélange d'hydrogène (H_2) et de monoxyde de carbone (CO).

Toutes ces solutions qui partent des énergies fossiles (ou éventuellement de la biomasse) passent par le gaz de synthèse, mélange d'oxyde de carbone (CO) et d'hydrogène (H_2).

Cependant la configuration optimale des procédés dépend de l'usage final du gaz de synthèse : produit dans des unités intégrées, il peut conduire à l'ammoniacs et ses dérivés ou bien au méthanol, ou encore via la synthèse Fischer-Tropsch (FT), à des gazoles de synthèse. Les technologies dominantes aujourd'hui pour la production de gaz de synthèse à partir des hydrocarbures sont le reformage à la vapeur, (réaction 1), l'oxydation partielle et le reformage autothermique, combinaison des deux précédentes, surtout utilisé pour la production de carburant liquide de synthèse [8].

2.6.1 Le vaporeformage d'hydrocarbures

Le vaporeformage d'hydrocarbures est un procédé industriel utilisé pour produire de l'hydrogène à partir d'hydrocarbures légers, principalement du méthane (CH_4) contenu dans le gaz naturel [9]. Ce procédé consiste à faire réagir l'hydrocarbure avec de la vapeur d'eau à haute température (700 à 1100 °C), en présence d'un catalyseur métallique, généralement à base de nickel [35].

La réaction principale est endothermique, ce qui signifie qu'elle consomme de l'énergie sous forme de chaleur [36]. Elle produit un mélange de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrogène (H₂), souvent appelé *gaz de synthèse* ou *syngas* [37]. Une étape supplémentaire, appelée réaction gaz-eau, permet ensuite de convertir le monoxyde de carbone en dioxyde de carbone (CO₂) et de générer davantage d'hydrogène [38].

Le vaporeformage est actuellement la méthode la plus répandue pour la production mondiale d'hydrogène, mais elle est également la plus émettrice de CO₂, posant des enjeux environnementaux majeurs [39].

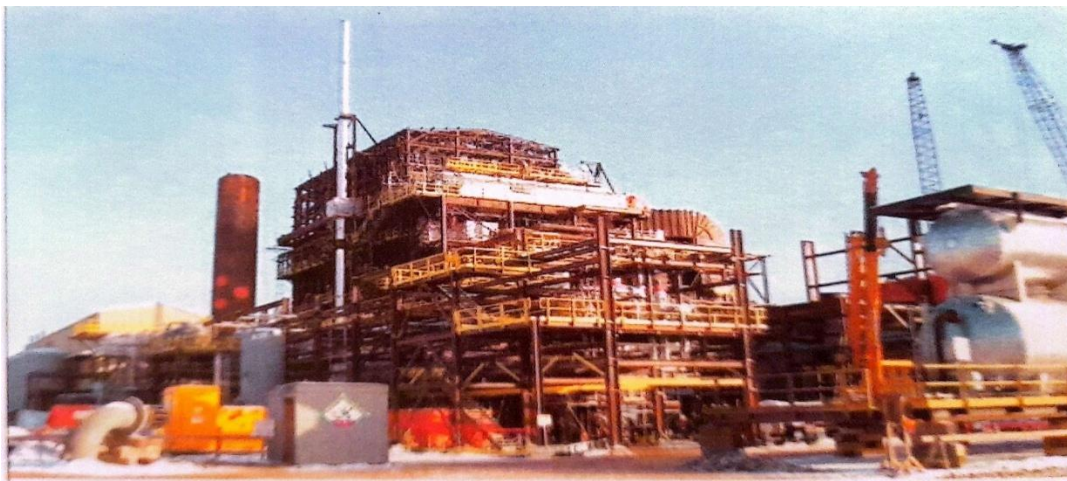


Fig. 2.3 L'unité de vaporeformage construite par Technip pour Sync rude Canada [25].

2.6.2 Le vaporeformage de gaz naturel

Le gaz naturel contient essentiellement du méthane. Toutefois, il doit généralement être désulfuré avant d'être dirigé vers l'unité de vaporeformage. Pour maximiser la production d'hydrogène, les deux principales réactions chimiques à mettre en œuvre sont la production de gaz de synthèse et la conversion du CO.

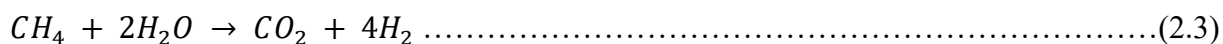
Actuellement, la majeure partie de l'hydrogène est produite à partir du gaz naturel par le biais d'un procédé de reformage à la vapeur. Cette réaction peut s'écrire :



La réaction de reformage à la vapeur peut être suivie d'une réaction de conversion eau-gaz pour obtenir plus d'hydrogène :



La combinaison des deux réactions donne :



Ainsi, pour 1 kmole (environ 16 kg) de méthane utilisé dans cette réaction, 4 kmoles (environ 8 kg) d'hydrogène sont produits. Le processus de reformage à la vapeur est endothermique nécessitant un apport énergétique de 206000 kJ/kmole H₂, tandis que la réaction de conversion eau-gaz est exothermique avec un apport énergétique de 41000 kJ/kmole H₂. Le résultat net est un apport énergétique de 165000 kJ/kmole H₂. Cela équivaut à un apport énergétique de 81850 kJ (ou 22,73 kWh) par kg d'hydrogène produit. L'hydrogène est également produit à partir du pétrole, du charbon et de la biomasse.

La première réaction correspond au vaporeformage proprement dit. Elle est endothermique et se caractérise par un rapport H₂/CO de l'ordre de 3. La seconde réaction correspond à la conversion du CO (décalage eau-gaz). Elle est légèrement exothermique et plus ou moins complète, selon qu'elle est effectuée en 1 ou 2 étapes. Globalement, le bilan des deux réactions est endothermique. Les deux dernières étapes consistent à séparer le CO₂ et l'hydrogène puis à éliminer les dernières traces d'impuretés [25].

2.6.3 Oxydation partielle d'hydrocarbures

L'oxydation partielle des hydrocarbures est un procédé chimique fondamental en pétrochimie, servant notamment à produire des composés organiques intermédiaires de grande valeur, comme l'éthylène, le propylène, le méthanol, ou encore le syngas (mélange CO + H₂) [40].

Contrairement à l'oxydation totale (qui produit principalement du CO₂ et de l'eau), l'oxydation partielle est contrôlée pour ne pas "brûler" complètement l'hydrocarbure, mais pour obtenir des produits utilisables [41].

2.6.4 Oxydation partielle de résidu sous vide

L'oxydation partielle des résidus pétroliers sous vide est un procédé thermochimique utilisé pour valoriser les fractions lourdes issues de la distillation du pétrole brut. Selon Speight (2014), ce procédé consiste à réagir les résidus lourds avec une quantité contrôlée d'oxygène ou d'air, de manière à favoriser une oxydation incomplète générant principalement du monoxyde de carbone (CO) et de l'hydrogène (H₂), plutôt que du dioxyde de carbone (CO₂) [42].

Ce processus est généralement effectué à haute température (entre 1200 et 1500 °C) et sous haute pression, en présence de vapeur d'eau pour améliorer la production d'hydrogène par

réaction de gaz à l'eau (réaction de décalage eau-gaz) [43]. Il permet non seulement de produire un gaz de synthèse, mais aussi de réduire le volume de résidu lourd difficilement valorisable [44].

2.6.5 Gazéification de la biomasse

La gazéification de la biomasse est un procédé thermochimique qui convertit la matière organique en un gaz de synthèse, composé principalement de monoxyde de carbone (CO), d'hydrogène (H₂), de méthane (CH₄) et de dioxyde de carbone (CO₂), en présence limitée d'un agent oxydant tel que l'air, l'oxygène ou la vapeur d'eau [45].

Ce processus se déroule à haute température (800–1000 °C) et comprend plusieurs étapes : séchage, pyrolyse, oxydation partielle et réduction, chacune jouant un rôle dans la qualité du gaz produit. La gazéification permet de valoriser des résidus agricoles ou forestiers tout en réduisant les émissions de gaz à effet de serre, ce qui en fait une technologie prometteuse dans la transition énergétique [46].

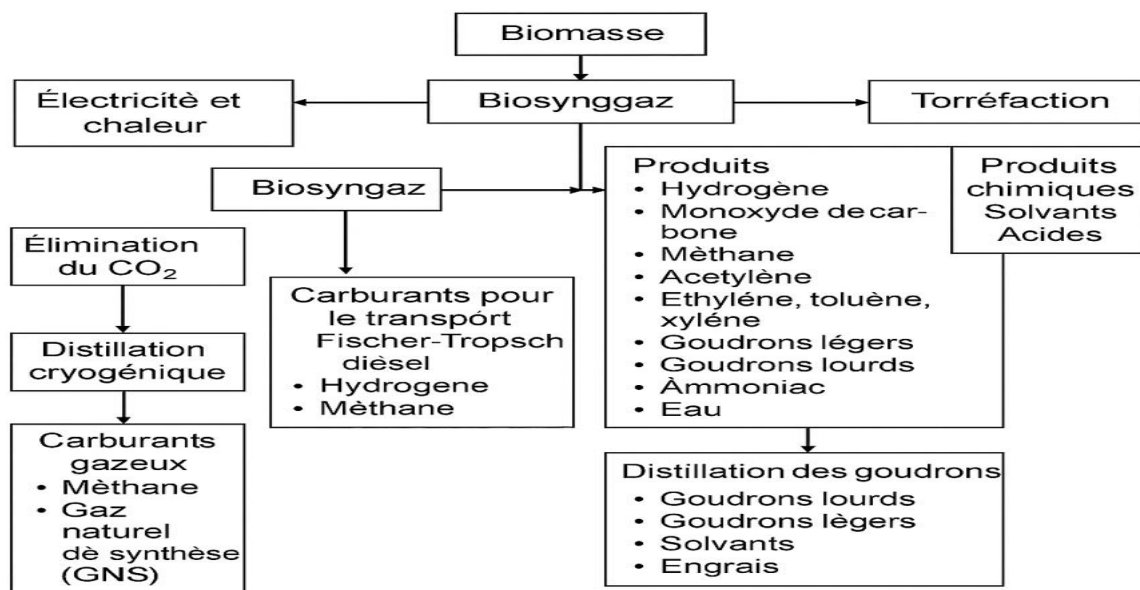


Fig. 2.4 Produits issus du processus de gazéification [8].

Chapitre 3 :

Production d'Hydrogène à Partir de Biomasse

3.1 Introduction

La biomasse est une matière organique renouvelable issue des plantes et des animaux. Elle contient l'énergie chimique stockée par le soleil, produite par les plantes grâce à la photosynthèse. Elle peut être brûlée directement pour produire de la chaleur ou transformée en combustibles liquides et gazeux par divers procédés. La biomasse est utilisée pour le chauffage, la production d'électricité et comme carburant pour les transports. Elle demeure un combustible important dans de nombreux pays, notamment pour la cuisine et le chauffage dans les pays en développement [47].

La biomasse, qu'elle soit d'origine agricole, forestière ou urbaine, offre un double avantage d'une part, elle constitue un réservoir énergétique riche en carbone organique d'autre part, son utilisation permet une valorisation des résidus et sous-produits souvent négligés, contribuant ainsi à une économie circulaire [48].

Les procédés thermochimiques, tels que la gazéification, la pyrolyse ou encore le reformage, permettent d'extraire de l'hydrogène de la biomasse avec des rendements variables, selon les conditions opératoires et la nature du substrat utilisé [49].

Cependant, malgré ses promesses, la production d'hydrogène à partir de biomasse demeure confrontée à plusieurs défis : efficacité énergétique, purification du gaz produit, gestion des sous-produits (notamment le goudron), et compétitivité économique par rapport aux procédés traditionnels. De plus, la durabilité environnementale des procédés doit être rigoureusement évaluée afin d'éviter un simple déplacement des impacts [50].

L'utilisation de la biomasse permettra de créer une méthode très efficace et propre pour produire de grandes quantités d'hydrogène. Par conséquent, la dépendance aux combustibles fossiles dangereux sera moindre. Les procédés thermochimiques et biochimiques constituent les deux catégories de techniques de conversion de l'hydrogène en énergie. Généralement, les procédés thermochimiques sont moins coûteux car ils permettent d'atteindre une vitesse de réaction plus élevée lorsqu'ils sont utilisés à haute température [51].

3.2 Motivations de l'utilisation de la biomasse comme source d'hydrogène

L'hydrogène, reconnu pour sa densité énergétique élevée et sa combustion propre (ne produisant que de l'eau), est aujourd'hui envisagé comme un vecteur énergétique clé de la

transition énergétique. Cependant, les procédés conventionnels de production d'hydrogène, tels que le reformage du gaz naturel, restent fortement émetteurs de CO₂.

C'est dans cette optique que la biomasse émerge comme une alternative prometteuse, car elle est abondante, renouvelable, et permet une neutralité carbone sur le cycle de vie : le CO₂ émis lors de la conversion énergétique peut théoriquement être réabsorbé par la croissance de nouvelles plantes.

En outre, la valorisation énergétique de déchets organiques (agricoles, forestiers, industriels ou municipaux) contribue non seulement à la production d'énergie propre, mais aussi à la réduction des nuisances environnementales liées à l'enfouissement ou à l'incinération des déchets. La biomasse permet également une production décentralisée d'hydrogène, ce qui est particulièrement intéressant pour les zones rurales ou isolées. Ainsi, elle s'inscrit dans une logique d'économie circulaire et de développement durable [52].

La production d'hydrogène à partir de biomasse peut être réalisée par une variété de procédés, que l'on peut généralement regrouper en procédés thermochimiques, procédés biologiques, ainsi que des procédés hybrides combinant les deux. Parmi les procédés thermochimiques, on retrouve notamment la pyrolyse et la gazéification, où la biomasse est chauffée dans des conditions spécifiques afin de produire un gaz de synthèse riche en hydrogène. Les procédés biologiques, quant à eux, reposent sur l'action de micro-organismes pour dégrader la matière organique et produire du gaz, comme dans le cas de la fermentation sombre. Certains de ces procédés peuvent être optimisés par l'ajout d'étapes complémentaires, telles que le reformage à la vapeur, ou encore la séparation de l'hydrogène par des membranes ou par adsorption. Le choix du procédé dépend de plusieurs facteurs, dont la nature de la biomasse, les conditions opératoires, ainsi que la viabilité économique et environnementale du système.

3.3 La pyrolyse

La pyrolyse est un procédé chimique qui consiste à décomposer des matières organiques en les chauffant en l'absence d'oxygène. Lors de la pyrolyse, la matière est soumise à des températures élevées (généralement entre 400 et 800 °C) dans un récipient fermé, où elle se décompose en molécules plus petites telles que des gaz, des liquides et des solides. Le procédé de production d'hydrogène par pyrolyse (Figure 1.1) utilise la décomposition thermique des déchets organiques ou de la biomasse pour produire de l'hydrogène. La matière organique est

chauffée dans un réacteur à des températures élevées (généralement entre 700 et 1 000 °C) en présence de vapeur d'eau. La vapeur se combine à la matière pour produire de l'hydrogène gazeux (H_2) et d'autres sous-produits tels que le dioxyde de carbone (CO_2), le monoxyde de carbone (CO) et le méthane (CH_4). L'hydrogène pyrolysé brûlant proprement et ne libérant que de la vapeur d'eau lors de sa combustion, il peut être utilisé comme carburant pour les transports et la production d'électricité. De plus, l'hydrogène peut être utilisé comme matière première dans la synthèse de composés tels que le méthanol et l'ammoniac. Pouvant utiliser diverses ressources organiques, notamment la biomasse, les déchets municipaux et les déchets agricoles, la pyrolyse peut être une méthode intéressante pour produire de l'hydrogène. Pour fournir une source fiable d'hydrogène, ce procédé peut également être combiné à d'autres sources d'énergie renouvelables comme l'énergie solaire et éolienne. Dans la Figure (3.1), nous voyons comment ce processus se déroule [51].

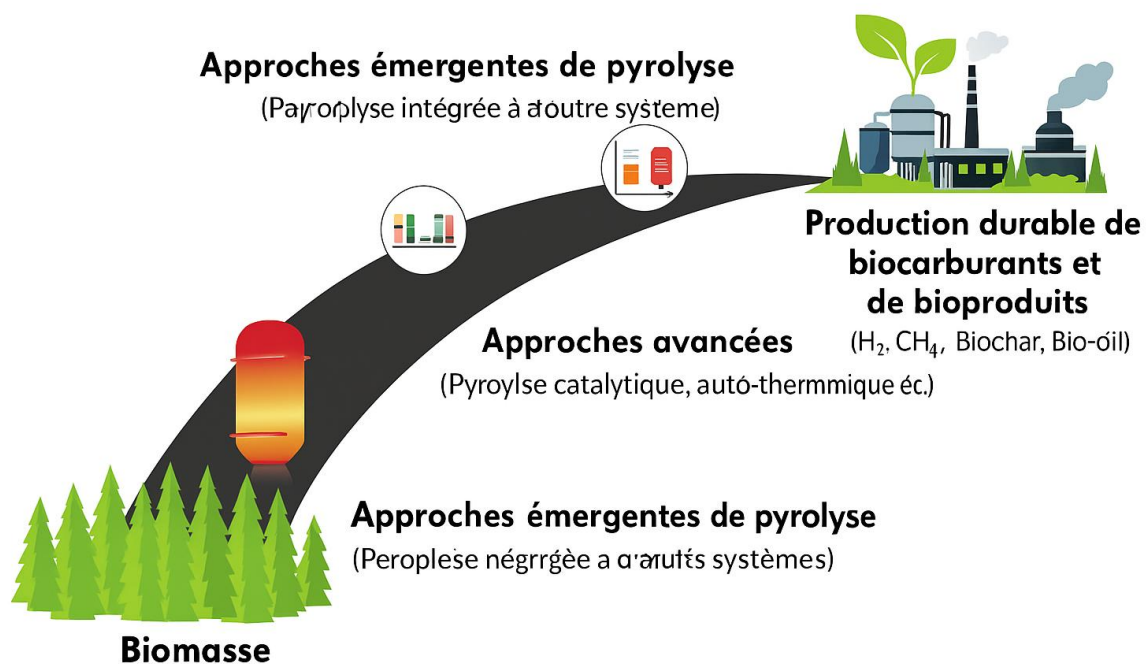


Fig. 3.1 Biomasse pyrolyse [51].

3.3.1 Comparaison des types de pyrolyse de la biomasse

Il existe plusieurs types de pyrolyse, selon la vitesse de chauffage, le temps de séjour et la température, qui influencent considérablement les proportions de produits (gaz, goudron et charbon). On peut les classer en trois principaux types, comme indiqué dans le Tableau (3.1) :

Type de pyrolyse	Température (°C)	Vitesse de chauffage	Temps de séjour	Produit principal
Pyrolyse lente	300-500	Faible (<10°C/min)	Long (minutes à heures)	Biochar (charbon biologique)
Pyrolyse rapide	450-600	Moyenne à élevée	Court (<2 secondes)	Bio-huile (bio-oil)
Pyrolyse flash	>600	Très élevée (>1000°C/s)	Très court (fractions de seconde)	Bio-huile (bio-oil)

Tableau 3.1 Types de pyrolyses

3.4 La gazéification

La gazéification est un procédé thermochimique de conversion de la biomasse (ou d'autres matières carbonées) en un gaz de synthèse (ou « syngas ») composé principalement de monoxyde de carbone (CO), hydrogène (H₂), méthane (CH₄) et dioxyde de carbone (CO₂) Comme le montre la Figure (3.2). Ce processus se déroule à haute température (généralement entre 800°C et 1000°C) et en présence d'un agent gazéifiant tel que la vapeur d'eau, l'air, ou l'oxygène pur, mais en quantité limitée pour éviter la combustion complète [45].

L'objectif principal de la gazéification est de produire un gaz combustible pouvant être utilisé pour la production d'énergie, la synthèse de carburants, ou encore comme vecteur d'hydrogène.

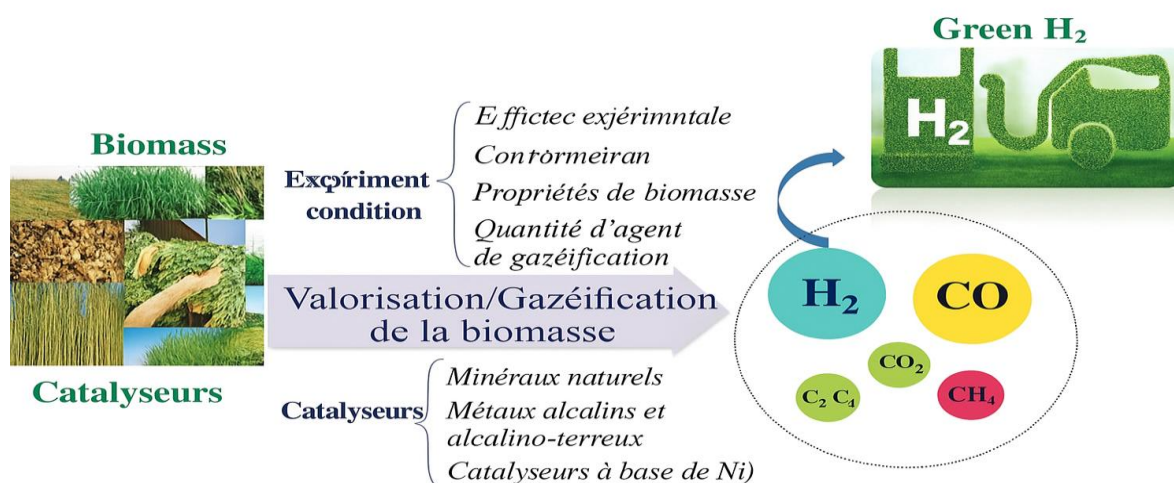


Fig. 3.2 Gazéification de la biomasse pour obtenir de l'hydrogène vert [51].

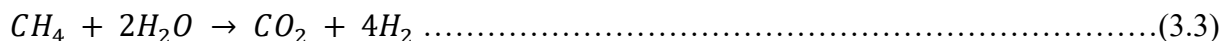
L'Hydrogène est produit à partir du gaz naturel par le biais d'un procédé de reformage à la vapeur. Cette réaction peut s'écrire :



La réaction de reformage à la vapeur peut être suivie d'une réaction de conversion eau-gaz pour obtenir plus d'hydrogène :



La combinaison des deux réactions donne :



3.5 La fermentation sombre

La fermentation sombre est un processus biologique anaérobie dans lequel des micro-organismes dégradent la biomasse ou des substrats organiques (comme le glucose, le lactosérum ou les déchets agricoles) en absence de lumière pour produire de l'hydrogène (H₂), du CO₂, et des acides organiques (comme l'acide acétique, butyrique, etc.) [53].

Ce procédé est prometteur pour la production durable d'hydrogène vert à partir de déchets organiques, notamment grâce à sa simplicité et à sa capacité de fonctionner à température ambiante ou modérée [53].

3.5.1 Conditions opératoires de la fermentation sombre

La performance de la fermentation sombre dépend fortement de plusieurs paramètres physico-chimiques qui influencent à la fois la croissance des micro-organismes et le rendement en hydrogène :

Température : La fermentation sombre se déroule typiquement à température mésophile (30–40°C) ou thermophile (50–60°C).

- Les températures mésophiles favorisent la diversité microbienne.
- Les températures thermophiles augmentent le taux de production d'hydrogène mais réduisent parfois la stabilité du système.

Ph : Le pH optimal se situe généralement entre 5,0 et 6,5.

- Un pH trop bas (<5) inhibe l'activité des bactéries productrices d'hydrogène.
- Un pH trop élevé (>7) favorise la production de méthane au lieu de l'hydrogène.

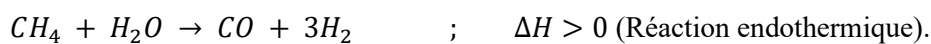
Type de substrat : Les substrats les plus utilisés sont :

- Sucres simples (glucose, fructose) ;
- Déchets alimentaires, eaux usées, lactosérum, déchets lignocellulosiques prétraités.

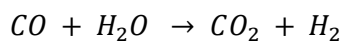
Le glucose est souvent utilisé comme modèle pour l'étude en laboratoire, mais l'usage de déchets organiques améliore la viabilité économique.

3.6 Le reformage à la vapeur

Le reformage à la vapeur est un procédé chimique thermique basé sur la réaction primaire entre des hydrocarbures (généralement le méthane, CH₄) et la vapeur d'eau (H₂O), à haute température (700–1100 °C) et sous pression faible à modérée, en présence d'un catalyseur métallique (souvent du nickel supporté sur un oxyde). Cette réaction se déroule dans des réacteurs industriels selon l'équation suivante :



Elle est suivie par la réaction de décalage eau-gaz (Water-Gas Shift Reaction), où le monoxyde de carbone (CO) réagit avec la vapeur.



Le résultat est un mélange gazeux riche en hydrogène, utilisé dans diverses applications industrielles telles que la production d'ammoniac, l'hydrogène "propre", et la synthèse de carburants. Ce procédé exige une grande quantité d'énergie thermique en raison de son caractère endothermique. Le choix des conditions opératoires et la conception du catalyseur visent à maximiser le rendement en hydrogène tout en minimisant la formation indésirable de carbone (coke) [54].

3.6.1 Étapes mécaniques du processus

- Dissociation thermique des molécules, générant CO et H₂.
- Réaction du CO avec la vapeur d'eau pour former davantage d'hydrogène (Water Gas Shift).
- Séparation des gaz pour obtenir de l'hydrogène purifié
- Adsorption des hydrocarbures (ex. : CH₄) sur la surface du catalyseur

3.7 Comparaison des méthodes

Plusieurs méthodes permettent de produire de l'hydrogène à partir de la biomasse. Le Tableau (3.2) présente une comparaison simplifiée entre les principales techniques.

Méthode	Température	Type de procédé	Avantages	Inconvénients
Fermentation sombre	30–37 °C	Biologique (anaérobie)	- Conditions douces - Utilise des déchets organiques	- Rendement H ₂ modéré - Sensible au pH, à la température
Gazéification	800–1000 °C	Thermochimique (aérobie partielle)	- Rendement élevé - Large gamme de biomasse utilisable	- Production de goudrons et CO - Nécessite un prétraitement
Reformage à la vapeur	700–900 °C	Catalytique (thermique)	- Haute pureté du H ₂ - Bien maîtrisé industriellement	- Formation de coke - Dépend du gaz de synthèse ou CH ₄ purifié

Tableau 3.2 Comparatif des méthodes de production d'hydrogène à partir de la biomasse [55].

3.8 Applicabilité industrielle : coût et impact environnemental

Parmi les différentes voies de production d'hydrogène à partir de la biomasse, le reformage à la vapeur demeure la plus mature sur le plan industriel, notamment grâce à sa stabilité, son rendement élevé et sa compatibilité avec les infrastructures existantes du gaz naturel. La gazéification, bien qu'efficace, requiert des conditions sévères et des systèmes de traitement des sous-produits, ce qui en limite l'adoption à grande échelle. Quant à la fermentation sombre, elle est encore au stade de développement, avec un potentiel intéressant pour le traitement des déchets organiques, mais nécessite des optimisations pour un passage au niveau industriel [55].

3.9 Stockage de l'hydrogène

À l'heure actuelle, le stockage de l'hydrogène est le plus gros problème, et il doit être résolu avant qu'un système de carburant à base d'hydrogène puisse être mis en place qui soit à la fois techniquement et économiquement viable (Balla, 2009). En général, il existe deux méthodes pour faire fonctionner les véhicules fonctionnant à l'hydrogène sur la route. Premièrement, dans le cas d'un moteur à combustion interne, l'hydrogène est rapidement brûlé avec l'oxygène présent dans l'air. Deuxièmement, dans une pile à combustible 234 Véhicules de transport à hydrogène, l'hydrogène est « brûlé » électro chimiquement avec l'oxygène de

l'air, produisant de la chaleur et alimentant un moteur électrique (Schlapbach Louis, 2001). En raison de la faible densité de l'hydrogène, son énorme réservoir de stockage embarqué est le plus grand inconvénient de son utilisation comme carburant de transport (M. B., 2008). Trouver un support de stockage qui réponde à trois critères essentiels est le défi immédiat, à savoir : (1) une densité d'hydrogène élevée ; (2) pour être compatible avec la génération actuelle de FC, le cycle de libération et de charge doit être réversible à des températures douces dans la plage de 70 à 100 °C ; et (3) une cinétique de libération et de charge d'hydrogène rapide et présentant de faibles barrières énergétiques. La première exigence est que le matériau du réservoir soit chimiquement résistant et étroitement compacté au niveau atomique. Et le deuxième matériau nécessite des liaisons hydrogène faibles, susceptibles de se rompre à des températures modérées. Le troisième nécessite un compactage atomique libre pour permettre une diffusion rapide de l'hydrogène entre la masse et la surface. Pour minimiser la détérioration induite par le rejet de chaleur pendant l'hydratation, le matériau doit avoir une conductivité thermique adéquate (Sharma, 2015). En modifiant les conditions d'état, l'hydrogène peut être physiquement stocké en raison de sa légèreté, de sa simplicité et de sa disponibilité aisée, et peut être stocké chimiquement sous forme solide et liquide (Shakya, 2005). Les différents types de stockage de l'hydrogène sont illustrés dans un organigramme (Figure 10.8). Le transport et le stockage de l'hydrogène posent des défis de recherche importants pour les matériaux. Parce qu'ils ne répondent pas aux exigences matérielles, de nombreux matériaux en vrac courants ont déjà été envisagés comme options de stockage, mais rejetés. Cependant, les nanosciences offrent de nouvelles possibilités pour surmonter cette difficulté [51].

3.10 Biocarburants

Le principal intérêt revendiqué par le biocarburant est de ne pas être une énergie fossile et de fournir une énergie renouvelable, contribuant très peu à l'augmentation du taux de CO₂ présent dans l'atmosphère. En effet, la plante, durant sa croissance, consomme par la photosynthèse une quantité de dioxyde de carbone qui sera dégagée lors de la combustion du biocarburant [56].

Plusieurs types de biocarburants sont utilisés Comme le montre la Figure (3.3), principalement le GNV (gaz naturel véhicule), les alcools et les huiles estérifiées. Les biocarburants liquides sont classés en trois générations selon la matière première utilisée [56].

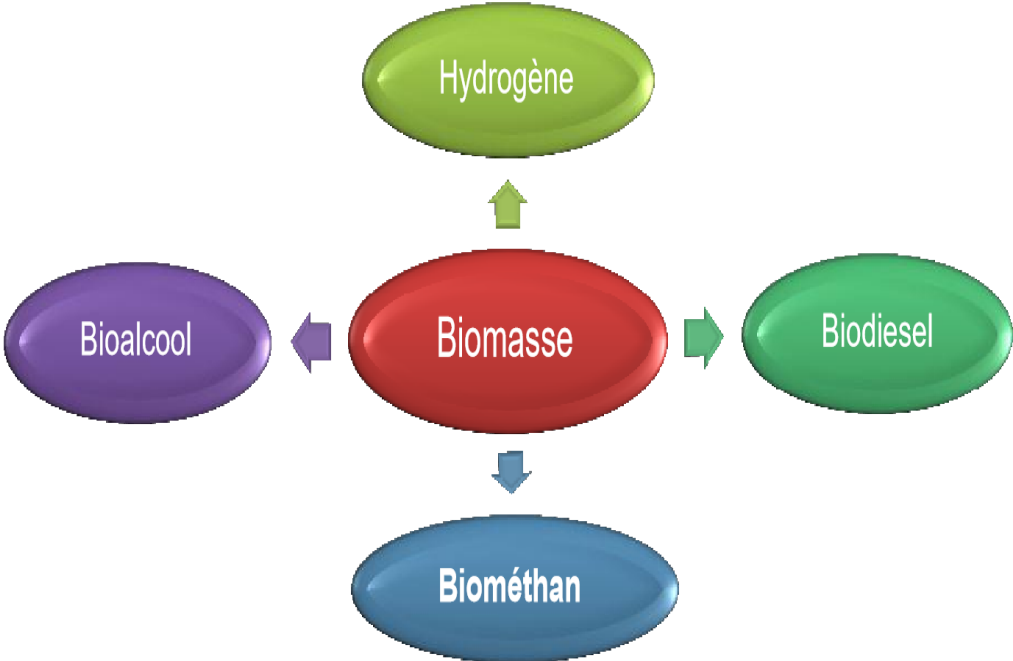


Fig. 3.3 Les différents biocarburants produits à partir de biomasse

Conclusion Générale

L'énergie est vitale pour l'économie mondiale et le développement durable. Fournir une énergie suffisante et durable contribue à améliorer la qualité de vie et à promouvoir la croissance économique. La recherche continue de nouvelles sources d'énergie propres constitue donc l'un des défis les plus importants auxquels est confrontée la communauté mondiale au XXI^e siècle.

L'énergie est l'épine dorsale d'une vie humaine durable et d'un développement économique efficace, et nécessite donc des orientations et des investissements judicieux pour garantir qu'elle soit utilisée de la manière la plus efficace et la plus respectueuse de l'environnement.

Avec l'engagement du gouvernement algérien à stimuler les investissements dans les infrastructures d'énergies renouvelables, l'hydrogène vert pourrait jouer un rôle de plus en plus important dans le développement durable et la création de nouvelles opportunités d'emploi dans le pays. Si les investissements et les efforts sont correctement orientés, l'Algérie pourrait devenir une puissance régionale dans le domaine de l'énergie propre et de l'hydrogène vert.

L'hydrogène vert est considéré comme un élément important de la voie des énergies renouvelables et de la durabilité, car il joue un rôle essentiel dans la réalisation des objectifs de réduction des émissions de carbone et dans l'évolution des économies vers une voie plus propre et plus durable à l'avenir.

L'objectif de ce travail était d'explorer le potentiel de la biomasse en tant que ressource renouvelable pour la production d'hydrogène vert, à travers les trois principales voies technologiques : la combustion, la gazéification et la fermentation. Chaque technologie présente des avantages distincts, ainsi que des défis techniques et économiques qu'il convient d'évaluer avec rigueur.

La gazéification de la biomasse s'est révélée être la méthode la plus efficace en termes de rendement énergétique et de flexibilité industrielle. En particulier, lorsqu'elle est combinée à des procédés de purification tels que la reformulation du gaz de synthèse, elle permet d'atteindre des taux élevés de production d'hydrogène avec une empreinte carbone réduite. Cette technologie offre également une adaptabilité importante pour l'intégration dans des systèmes de production à moyenne ou grande échelle.

En revanche, la fermentation biologique — notamment la fermentation sombre — bien que moins performante en termes de rendement, se distingue par sa simplicité de mise en œuvre,

ses faibles besoins énergétiques et son aptitude à valoriser des déchets organiques peu coûteux, ce qui la rend idéale pour des applications locales et décentralisées.

La combustion directe, quant à elle, reste une méthode plus conventionnelle et moins attractive pour la production d'hydrogène en raison de sa faible sélectivité et de son impact environnemental plus important. Néanmoins, elle conserve un rôle dans les systèmes hybrides ou couplés à des dispositifs de capture du carbone.

Ce travail met également en lumière les limites actuelles des filières de production d'hydrogène à partir de la biomasse, notamment en ce qui concerne la rentabilité économique, la disponibilité des matières premières, les coûts de logistique, et le niveau de maturité technologique. Pour surmonter ces obstacles, une volonté politique forte, un cadre réglementaire incitatif, et un investissement soutenu dans la recherche sont indispensables.

En définitive, l'exploitation de la biomasse pour produire de l'hydrogène vert ne constitue pas une simple alternative, mais une opportunité stratégique pour concilier développement énergétique et respect de l'environnement. Elle offre une réponse concrète à la double exigence de sécurité énergétique et de décarbonation, à condition que les efforts scientifiques, technologiques et institutionnels convergent dans cette direction.

Références Bibliographiques

- [1] Smil, V. (2017). *Energy and Civilization: A History*. MIT Press.
- [2] International Energy Agency (IEA). (2022). *World Energy Outlook*.
- [3] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *AR6 Synthesis Report*.
- [4] REN21. (2023). *Renewables Global Status Report*.
- [5] OPEC. (2023). *Annual Statistical Bulletin*.
- [6] Baird, D. G., et al. (2012). *Introduction to Energy: Resources, Technology, and Society*. Cambridge University Press.
- [7] CEA, *Nouvelles technologies de L'énergie, CELFS CEA n 44, hiver 2000-2001*.
- [8] Guehiouche Ayoub et Ouali Ahmed sur le thème de la méthodologie de production d'hydrogène vert par électrolyse de l'eau, Université de M'Sila
- [9] Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). (2023). *Rapport de synthèse du 6e rapport d'évaluation*.
- [10] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). (2023). *Summary for Policymakers, AR6 Synthesis Report*.
- [11] World Health Organization (WHO). (2021). *Air Pollution*.
- [12] United Nations Environment Programme (UNEP). (2020). *Emissions Gap Report*.
- [13] National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). (2022). *Ocean Acidification*.
- [14] IEA. (2023); GIEC. (2023); Commission européenne; PNUE; IEA. (2022).
- [15] International Energy Agency (IEA). (2023). *Solar Energy: Tracking Report*.
- [16] Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2009). *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application (2nd ed.)*. Wiley.
- [17] EDF Renouvelables. (s.d.). *Éolien terrestre*. Consulté le 22 mai 2025, à partir de <https://edf-renouvelables.com/en/nos-solutions/eolien-terrestre/>
- [18] *Le Journal de l'Éolien. Éolien en mer : posé ou flottant*.
- [19] Boyle, G. (2004). *Renewable Energy: Power for a Sustainable Future*. Oxford University Press.
- [20] Naghizadeh, R. A., Jazebi, S., & Vahidi, B. (2012). *Modeling Hydro Power Plants and Tuning Hydro Governors as an Educational Guideline*. ResearchGate.
- [21] ADEME. (2021). *La biomasse-énergie : un gisement de ressources au service de la transition énergétique*.
- [22] International Energy Agency (IEA). (2019). *The Future of Hydrogen*. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [23] *Highly Efficient Thermal Renewable Energy System*.
- [24] Dincer, I., & Acar, C. (2015). *Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(34), 11094–11111.
- [25] CEA, *l'hydrogène : les Nouvelles technologies de L'énergie, CELFS CEA n 50/51, hiver 2004/2005*
- [26] Hydrogen Council. (2021). *Hydrogen Insights*. <https://hydrogencouncil.com/en/hydrogen-insights-2021/>
- [27] Agence Internationale de l'Énergie (IEA). *Hydrogen: A Renewable Energy Perspective*. <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>
- [28] Zhang, X. et al. (2021). *Progress and challenges in hydrogen energy*. *Nature Energy*.
- [29] *HYDROGEN ENERGY PC*.
- [30] EG&G Technical Services, Inc. (2004). *Fuel Cell Handbook (7th ed.)*. U.S. Department of Energy.
- [31] U.S. Department of Energy, EERE. (2022). *Hydrogen and Fuel Cell Technologies Office*. <https://www.energy.gov/eere/fuelcells>
- [32] Barbir, F. (2013). *PEM Fuel Cells: Theory and Practice*. Academic Press.
- [33] Larminie, J., & Dicks, A. (2003). *Fuel Cell Systems Explained*. Wiley.
- [34] Hoogers, G. (Ed.). (2003). *Fuel Cell Technology Handbook*. CRC Press.

- [35] Zhou et al. (2021). Hydrogen production from steam methane reforming process: Current status and future trends. *International Journal of Hydrogen Energy*.
- [36] Rostrup-Nielsen, J.R. (1993). Steam Reforming Catalysts. *Applied Catalysis A*.
- [37] Twigg, M.V. (1989). *Catalyst Handbook* (2nd ed.). Wolfe Publishing Ltd.
- [38] Smith, J.M. et al. (2005). *Chemical Engineering Thermodynamics*. McGraw-Hill.
- [39] IEA. (2021). *Global Hydrogen Review*.
- [40] Rostrup-Nielsen, J. R. (2002). Syngas in perspective. *Catalysis Today*, 71(3–4), 243–247. [https://doi.org/10.1016/S0920-5861\(01\)00455-6](https://doi.org/10.1016/S0920-5861(01)00455-6)
- [41] Armor, J. N. (1999). The multiple roles for catalysis in the production of H₂. *Applied Catalysis A: General*, 176(2), 159–176.
- [42] Speight, J. G. (2014). *The Chemistry and Technology of Petroleum*. CRC Press.
- [43] Gary, J. H., Handwerk, G. E., & Kaiser, M. J. (2007). *Petroleum Refining: Technology and Economics*. CRC Press.
- [44] Ancheyta, J. (2013). *Modeling and Simulation of Catalytic Reactors for Petroleum Refining*. John Wiley & Sons.
- [45] Basu, P. (2010). *Biomass Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory*. Academic Press.
- [46] McKendry, P. (2002). Energy production from biomass (part 2): Conversion technologies. *Bioresource Technology*, 83(1), 47–54.
- [47] HYDROGEN ENERGIE PRINCIPALES AND APPLICATIONS.
- [48] Demirbas, A. (2009). Biohydrogen: For Future Engine Fuel Demands. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 31(16), 1436–1443.
- [49] Chen, W.-H., Lin, B.-J., & Huang, M.-Y. (2010). Thermochemical conversion of biomass into hydrogen: A review of catalytic processes. *International Journal of Hydrogen Energy*, 35(17), 8866–8886.
- [50] Cherubini, F. (2010). The biorefinery concept: Using biomass instead of oil for producing energy and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 51(7), 1412–1420.
- [51] Prospects of Hydrogen Fueled Power Generation.
- [52] Demirbaş, A. (2001). Biomass resource facilities and biomass conversion processing for fuels and chemicals. *Energy Conversion and Management*, 42(11), 1357–1378. [https://doi.org/10.1016/S0196-8904\(00\)001370](https://doi.org/10.1016/S0196-8904(00)001370)
- [53] Kapdan, I.K., & Kargi, F. (2006). Bio-hydrogen production from waste materials. *Enzyme and Microbial Technology*, 38(5), 569–582.
- [54] Rostrup-Nielsen, J. R., Sehested, J., & Nørskov, J. K. (2002). Hydrogen and Synthesis Gas by Steam- and CO₂ Reforming. *Advances in Catalysis*, 47, 65–139. [https://doi.org/10.1016/S0360-0564\(02\)47005-6](https://doi.org/10.1016/S0360-0564(02)47005-6)
- [55] Kapdan, I. K., & Kargi, F. (2006). Bio-hydrogen production from waste materials. *Enzyme and Microbial Technology*, 38(5), 569–582.
- [56] Wertz, J.-L. (2010). *Le bioraffinage ou valorisation optimale de la biomasse*. ValBiom, Belgique.