

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Energétique

Présenté par :

GHEHIOUECHE Ayoub & OUALI Ahmed

Thème

METHODOLOGIE DE PRODUCTION D'HYDROGENE

VERT PAR ELECTROLYSE DE L'EAU

Devant le jury composé de :

| Nom et Prénom | Grade | Qualité |
|------------------|-------|-----------|
| | | Président |
| BELKHIRI Khellaf | | Encadreur |
| | | Examineur |

Année Universitaire : 2023 / 2024

N° d'ordre : GM/...../2024

People's Democratic Republic of Algeria
Ministry of Higher Education and Scientific Research
Mohamed Boudiaf University of M'sila
Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة المسيلة
كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Energétique

Présenté par :

GHEHIOUECHE Ayoub & OUALI Ahmed

Thème

METHODOLOGIE DE PRODUCTION D'HYDROGENE

VERT PAR ELECTROLYSE DE L'EAU

Devant le jury composé de :

| Nom et Prénom | Grade | Qualité |
|------------------|-------|-----------|
| SAIB Cherif | MCA | Président |
| BELKHIRI Khellaf | MCB | Encadreur |
| BOUDILMI Aissa | Prof. | Examineur |

Année Universitaire : 2023 / 2024

N° d'ordre : GM/...../2024

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

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

AHMED ET AYOUB

Remerciements

Nous remercions Allah, qui nous a aidés à accomplir cet humble travail, et nous adressons toute notre reconnaissance et notre sincère gratitude au 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.

Nous adressons également nos sincères remerciements et notre gratitude aux membres jurys pour nous avoir donné part de leur temps et accepté l'étude et la discussion de notre mémoire à bras ouverts.

Nous remercions tous ceux qui nous ont soutenus dans la préparation de ce mémoire, que ce soit par la prière ou par l'information, que Dieu les récompense et les bénisse.

الملخص :

يمكن إنتاج الهيدروجين باستخدام مصادر طاقة متجددة مثل الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح، مما يجعله مستدامًا على المدى الطويل، على عكس الوقود الأحفوري الذي يعتمد على موارد محدودة

تعد عملية إنتاج الهيدروجين الأخضر عن طريق التحليل الكهربائي للماء واحدة من الطرق الواعدة لإنتاج الهيدروجين بشكل مستدام وصديق للبيئة. فيما يلي ملخص للمنهجية المتبعة في هذه العملية:

التحليل الكهربائي للماء هو عملية فصل جزيئات الماء (H_2O) إلى غازي الهيدروجين (H_2) والأكسجين (O_2) باستخدام تيار كهربائي. يُعتبر الهيدروجين الناتج عن هذه العملية "أخضر" إذا تم توليد الكهرباء المستخدمة من مصادر طاقة متجددة مثل الطاقة الشمسية أو طاقة الرياح.

ويتم تخزين الهيدروجين بطرق مختلفة لضمان الأمان والكفاءة. فيما يلي طرق التخزين الرئيسية

تخزين الهيدروجين الغازي تحت الضغط

تخزين الهيدروجين السائل

تخزين الهيدروجين في مواد صلبة

تخزين الهيدروجين في مواد كيميائية

Résumé :

L'hydrogène peut être produit à partir de sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire ou éolienne, ce qui le rend durable à long terme, contrairement aux combustibles fossiles qui dépendent de ressources limitées.

Le processus de production d'hydrogène vert par électrolyse de l'eau est l'un des moyens les plus prometteurs de produire de l'hydrogène de manière durable et respectueuse de l'environnement. Vous trouverez ci-dessous un résumé de la méthodologie suivie dans ce processus :

L'électrolyse de l'eau est le processus de séparation des molécules d'eau (H_2O) en gaz hydrogène (H_2) et oxygène (O_2) à l'aide d'un courant électrique. L'hydrogène produit par ce procédé est considéré comme « vert » si l'électricité utilisée est produite à partir de sources d'énergie renouvelables telles que l'énergie solaire ou éolienne.

L'hydrogène est stocké de différentes manières pour garantir la sécurité et l'efficacité.

Les principales méthodes de stockage sont les suivantes :

Stockage d'hydrogène gazeux sous pression

Stockage d'hydrogène liquide

Stocker l'hydrogène dans des solides

Stocker l'hydrogène dans des produits chimiques

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– GENERALITES SUR L'ENERGIE

| | |
|---|----|
| 1.1 Introduction | 6 |
| 1.2 Définition de l'énergie | 6 |
| 1.3 Les énergies renouvelables et les énergies non renouvelables..... | 8 |
| 1.3.1 Les énergies non renouvelables (combustibles fossiles)..... | 10 |
| 1.3.1.1 Définition des combustibles fossiles | 10 |
| 1.3.1.2 Le pétrole..... | 11 |
| 1.3.1.3 Le gaz naturel | 12 |
| 1.3.1.4 Le charbon | 13 |
| 1.3.1.5 Combustibles fossiles et pollution de l'environnement..... | 15 |
| 1.3.1.6 Les avantages et les inconvénients d'une énergie non renouvelable | 15 |
| 1.3.2 Les énergies renouvelables | 16 |
| 1.3.3 Définition des énergies renouvelables..... | 16 |
| 1.3.3.1 Types d'énergie renouvelable..... | 18 |
| 1.3.3.2 Avantages et inconvénients des énergies renouvelables..... | 21 |
| 1.4 L'Hydrogène : Un Porteur d'énergie..... | 23 |

CHAPITRE 2– PRODUCTION D'HYDROGENE

| | |
|--|----|
| 2.1 Introduction | 25 |
| 2.2 L'hydrogène comme vecteur d'énergie..... | 25 |
| 2.3 Pile à combustible à hydrogène..... | 28 |

| | |
|--|----|
| 2.4 La production d'hydrogène | 32 |
| 2.4.1 Le vaporeformage d'hydrocarbures | 32 |
| 2.4.2 Le vaporeformage de gaz naturel | 33 |
| 2.4.3 Oxydation partielle d'hydrocarbures | 33 |
| 2.4.4 Oxydation partielle de résidu sous vide..... | 34 |
| 2.4.5 Gazéification de la biomasse | 34 |

CHAPITRE 3– L'ELECTROLYSE DE L'EAU ET LE STOCKAGE DE L'HYDROGENE

| | |
|--|-----------|
| 3.1 Introduction | 36 |
| 3.2 La production par électrolyse de l'eau..... | 36 |
| 3.3 Les différentes techniques de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau | 38 |
| 3.3.1 Electrolyse alcaline..... | 38 |
| 3.3.2 Electrolyse à haute température..... | 39 |
| 3.3.3 Electrolyse de l'eau à membrane échangeuse de protons..... | 40 |
| 3.4 Comparaison des techniques de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau..... | 41 |
| 3.5 Technologies de stockage de l'hydrogène..... | 42 |
| 3.6 Comment fonctionne le stockage de l'hydrogène ? | 45 |
| 3.7 Stockage physique de l'hydrogène..... | 47 |
| 3.8 Objectifs techniques et statut..... | 48 |
| 3.8.1 État et cibles pour la densité gravimétrique et volumétrique densité et coût | 48 |
| 3.8.2 Performance par rapport à tous les ministères de l'énergie | 49 |
| 3.8.3 Coûts du système à hydrogène | 49 |
| CONCLUSION GENERALE | 50 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 54 |

Liste des Figures

| | |
|--|----|
| Fig. 1.1 Les Sources d'énergie | 08 |
| Fig. 1.2 Consommation mondiale d'énergie primaire en 2022 | 09 |
| Fig. 1.3 Part de la consommation d'énergie par source, Monde en 2020..... | 09 |
| Fig. 1.4 Production d'énergie primaire en Algérie..... | 11 |
| Fig. 1.5 Production pétrolière en Algérie 2022..... | 12 |
| Fig. 1.6 Production de gaz naturel en Algérie 2022..... | 13 |
| Fig. 1.7 Production de charbon | 14 |
| Fig. 1.8 Panneaux solaires | 18 |
| Fig. 1.9 Parc éolien | 20 |
| Fig. 1.10 Barrage d'eau avec systèmes hydroélectriques | 21 |
| Fig. 2.1 Lancement de la navette | 27 |
| Fig. 2.2 Future infrastructure énergétique à hydrogène | 27 |
| Fig. 2.3 Pile à combustible à hydrogène | 28 |
| Fig. 2.4 Mécanismes et réactions mis en jeu lors du processus de gazéification | 35 |
| Fig. 3.1 Électrolyseur pour la production d'hydrogène | 37 |
| Fig. 3.2 Schéma de production d'hydrogène par l'électrolyse alcaline | 38 |
| Fig. 3.3. Schéma de production d'hydrogène par l'électrolyse à haute température | 40 |
| Fig. 3.4 Aperçu des technologies de stockage de l'hydrogène | 46 |
| Fig. 3.5 Dispositif de décompression à activation thermique | 47 |
| Fig. 3.6 Performance par rapport à tous les objectifs 2020 du DOE | 49 |

Liste des Tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 3.1 Comparatif des technologies de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau...42 | |
| Tableau 3.2 de performance du projet | 48 |

Introduction Générale

Le Soleil est la seule étoile de notre système solaire située en son centre. La Terre et les autres planètes de notre système solaire tournent autour du soleil. L'énergie du soleil sous forme de rayonnement solaire soutient presque toute la vie sur Terre via la photosynthèse et détermine le climat et la météo de la Terre.

Environ 74 % de la masse du Soleil est constituée d'hydrogène, 25 % d'hélium et le reste est constitué de traces d'éléments plus lourds. Le soleil a une température de surface d'environ 5 500 K, ce qui lui confère une couleur blanche qui, en raison de la diffusion atmosphérique, apparaît jaune. Le soleil génère son énergie par fusion nucléaire de noyaux d'hydrogène en hélium. La lumière du soleil est la principale source d'énergie à la surface de la Terre qui peut être exploitée via divers processus naturels et synthétiques. La plus importante est la photosynthèse, utilisée par les plantes pour capter l'énergie du rayonnement solaire et la convertir sous forme chimique. Généralement, la photosynthèse est la synthèse du glucose à partir de la lumière du soleil, du dioxyde de carbone et de l'eau, avec l'oxygène comme déchet. Il s'agit sans doute de la voie biochimique connue la plus importante, et presque toute la vie sur Terre en dépend.

Fondamentalement, toutes les formes d'énergie dans le monde tel que nous le connaissons sont d'origine solaire. Le pétrole, le charbon, le gaz naturel et le bois étaient à l'origine produits par des processus photosynthétiques, suivis de réactions chimiques complexes au cours desquelles la végétation en décomposition était soumise à des températures et des pressions très élevées sur une longue période de temps. Même l'énergie du vent et de la marée a une origine solaire, car elle est provoquée par les différences de température dans les différentes régions de la Terre. Depuis la préhistoire, le soleil sèche et conserve la nourriture de l'humanité. Il a également évaporé l'eau de mer pour produire du sel.

Depuis que les humains ont commencé à raisonner, ils ont reconnu le soleil comme une force motrice derrière chaque phénomène naturel. C'est pourquoi de nombreuses tribus préhistoriques considéraient le soleil comme un dieu. De nombreuses écritures de l'Égypte ancienne disent que la Grande Pyramide, l'une des plus grandes réalisations techniques de l'humanité, a été construite comme un escalier menant au soleil.

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.

Si l'économie mondiale se développe pour répondre aux attentes des pays du monde entier, la demande d'énergie augmentera probablement, même si des efforts laborieux sont déployés pour accroître l'efficacité de l'utilisation de l'énergie. Il est désormais généralement admis que les technologies d'énergies renouvelables peuvent répondre à une grande partie de la demande croissante à des prix égaux ou inférieurs à ceux habituellement prévus pour l'énergie conventionnelle. D'ici le milieu du 21^{ème} siècle, les sources d'énergie renouvelables pourraient représenter une part substantielle du marché mondial de l'électricité et du marché des combustibles utilisés directement. De plus, la transition vers une économie à forte intensité d'énergie renouvelable apporterait des avantages environnementaux et autres non mesurés en termes économiques standards. Une première analyse prévoyait que d'ici 2050, les émissions mondiales de dioxyde de carbone (CO₂) seraient réduites à 75 % de leurs niveaux de 1985, à condition que l'efficacité énergétique et les énergies renouvelables soient largement adoptées. De plus, de tels avantages pourraient être obtenus sans frais supplémentaires, car les énergies renouvelables devraient être compétitives par rapport à l'énergie conventionnelle.

Ces perspectives prometteuses pour les énergies renouvelables reflètent les progrès techniques impressionnants réalisés au cours des trois dernières décennies, les systèmes d'énergie renouvelable bénéficiant des développements dans les domaines de l'électronique, de la biotechnologie, des sciences des matériaux et dans d'autres domaines. Par exemple, les piles à combustible développées à l'origine pour le programme spatial ont ouvert la porte à l'utilisation de l'hydrogène comme carburant non polluant pour les transports.

L'un des problèmes majeurs des sources d'énergie renouvelables est l'incapacité de stocker l'énergie produite de manière viable. Ce n'est pas un problème avec la biomasse puisque les carburants produits à partir de la biomasse, comme l'éthanol et le biodiesel, peuvent être stockés et utilisés à tout moment. Cependant, l'électricité produite par les systèmes solaires, les barrages hydroélectriques, les centrales géothermiques et les éoliennes ne peut pas être stockée pour une utilisation ultérieure. Les batteries ne constituent pas une option viable dans la technologie actuelle

en raison de leur capacité limitée. Une solution possible à ce problème est la production d'hydrogène à partir d'électricité renouvelable par électrolyse de l'eau. Une fois produit, l'hydrogène peut être stocké et utilisé à tout moment.

L'hydrogène est un gaz diatomique incolore, inodore, non métallique, insipide et hautement inflammable de formule moléculaire H_2 . C'est aussi l'élément le plus léger avec une masse moléculaire de 2,016 kg/kmole. L'hydrogène est un combustible avec un pouvoir calorifique supérieur de 141 800 kJ/kg et un pouvoir calorifique inférieur de 120 000 kJ/kg. Notez cependant que l'hydrogène n'est pas une source d'énergie comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel puisqu'il n'y a pas de réserves d'hydrogène sur terre. Bien que l'hydrogène soit l'élément le plus abondant dans l'univers, représentant environ les trois quarts de toute la matière, l'hydrogène libre est rare. L'hydrogène doit être produit à partir d'autres combustibles comme le gaz naturel ou à partir d'eau par électrolyse en consommant de l'électricité. Par conséquent, l'hydrogène devrait être qualifié de vecteur énergétique plutôt que de source d'énergie.

L'hydrogène est l'élément le plus simple et le plus abondant sur Terre : l'atome d'hydrogène compose d'un seul proton et d'un électron. L'hydrogène peut être stocké et livré utilisable énergie mais elle n'existe généralement pas par elle-même dans la nature et doit être produite à partir de les composés qui en contiennent, qui comprennent diverses ressources nationales. Actuellement, la majeure partie de l'hydrogène est produite à partir de combustibles fossiles, en particulier du gaz naturel. Électricité du réseau ou de sources renouvelables telles que la biomasse, la géothermie, le solaire ou l'énergie éolienne est également actuellement utilisée pour produire de l'hydrogène. A plus long terme, l'énergie solaire et la biomasse peut être utilisée plus directement pour produire de l'hydrogène grâce aux nouvelles technologies rendre les méthodes de production alternatives compétitives en termes de coûts.

L'hydrogène, bien que l'élément le plus répandu dans l'univers, ne se trouve pas sous sa forme pure sur terre et doit être soit électrolysé de l'eau, soit extrait du gaz naturel, deux processus énergivores qui entraînent des émissions de GES. L'hydrogène est un vecteur d'énergie et non un carburant, comme on le prétend souvent à tort. L'hydrogène produit par électrolyse à partir de sources d'énergie éolienne ou solaire directe et utilisé dans les véhicules à pile à combustible peut assurer un transport sans émissions. Comme pour tout carburant, des procédures de sécurité

appropriées doivent être suivies. Bien que les dangers de l'hydrogène soient différents de ceux des divers carburants à base d'hydrocarbures actuellement utilisés, ils ne sont pas plus grands.

La question fondamentale est de savoir comment produire de l'hydrogène de manière propre et efficace. Utiliser le gaz naturel, le charbon ou même l'énergie nucléaire pour produire de l'hydrogène va à bien des égards à l'encontre de l'objectif d'un avenir alimenté par l'hydrogène. Dans les deux premiers cas, des GES sont émis lors du processus de production d'hydrogène, tandis que dans le dernier cas, des déchets nucléaires sont générés.

En tant que vecteur énergétique presque idéal, l'hydrogène jouera un rôle essentiel dans une nouvelle infrastructure énergétique décentralisée capable de fournir de l'énergie aux véhicules, aux habitations et aux industries. Cependant, le processus de production d'hydrogène à partir d'énergie fossile peut impliquer l'émission de niveaux importants de GES.

Bien que l'élément hydrogène soit l'élément le plus abondant dans l'univers, il doit être extrait de la biomasse, de l'eau ou des combustibles fossiles avant de pouvoir prendre la forme d'un vecteur énergétique. Un enjeu clé pour l'avenir est de promouvoir la production d'électricité à partir du vent et d'utiliser ensuite cette électricité pour produire de l'hydrogène.

L'extraction de l'hydrogène de l'eau implique un processus appelé électrolyse, défini comme la séparation des éléments à l'aide d'un courant électrique. L'énergie fournie par une source externe, telle que le vent ou la combustion d'un combustible fossile, est nécessaire pour conduire la réaction électrochimique. Un électrolyseur utilise le courant continu pour séparer l'eau en ses composants, l'hydrogène et l'oxygène. Les composants supplémentaires de l'électrolyseur, tels que les pompes, les vannes et les commandes, sont généralement alimentés en courant alternatif à partir d'une connexion secteur. L'eau est « dissociée » et les ions sont transportés à travers l'électrolyte. L'hydrogène est collecté à la cathode et l'oxygène à l'anode. Le processus nécessite de l'eau pure.

L'électrolyse de l'eau est la décomposition de l'eau (H_2O) en oxygène (O_2) et hydrogène (H_2). Ceci est réalisé en faisant passer un courant électrique dans l'eau.

L'hydrogène est riche en énergie, mais un moteur qui brûle de l'hydrogène pur produit presque pas de pollution. L'Administration nationale de l'aéronautique et de l'espace (NASA) utilise de l'hydrogène liquide depuis les années 1970 pour propulser la navette spatiale et d'autres

fusées en orbite. Les piles à combustible à hydrogène alimentent les systèmes électriques de la navette, produisant un sous-produit propre : de l'eau pure, que boit l'équipage.

Une pile à combustible combine l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité, de la chaleur et de l'eau. Les piles à combustible sont souvent comparées aux batteries, car toutes deux convertissent l'énergie produite par une réaction chimique en énergie électrique utilisable. Cependant, la pile à combustible produira l'électricité tant que le combustible (hydrogène) est fourni, sans jamais perdre sa charge.

Dans ce contexte, ce manuscrit de mémoire comprend trois chapitres qui sont précédés d'une introduction générale.

Le premier chapitre couvre une brève introduction aux systèmes d'énergie renouvelable et une discussion sur divers combustibles fossiles. Le chapitre 2 fournit un aperçu complet de la production d'hydrogène. Le chapitre 3 porte sur les principes fondamentaux de l'extraction de l'hydrogène de l'eau (électrolyse de l'eau). Enfin, la conclusion générale présentera certaines des limites de la présente étude.

Chapitre 1 :

Généralité sur l'Energie

1.1 Introduction

L'énergie est la pierre angulaire de l'existence de la vie et du développement de la civilisation humaine. C'est la force qui anime le monde et forme la base de tous les processus dans l'univers. L'énergie peut être définie comme la capacité de provoquer un changement ou la force capable d'accomplir un travail.

Les sources d'énergie sont très diverses, y compris les combustibles fossiles tels que le pétrole et le charbon, l'énergie nucléaire, et les énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, éolienne et hydraulique. L'utilisation de ces sources est liée à leur impact environnemental et à leur durabilité, reflétant les défis auxquels le monde est confronté pour répondre de manière durable à ses besoins énergétiques. Les questions énergétiques sont aujourd'hui d'une grande importance, avec l'accélération du développement technologique et l'augmentation des besoins mondiaux en énergie. La communauté internationale doit chercher des solutions durables et efficaces pour répondre à ces besoins, tout en préservant l'environnement et en réduisant les impacts négatifs. Dans ce contexte, les individus, les gouvernements et les industries doivent s'engager à développer et à adopter de nouvelles technologies durables pour produire et consommer de l'énergie. L'innovation dans le domaine de l'énergie doit être soutenue par des politiques gouvernementales efficaces et la promotion de l'investissement dans la recherche et le développement. Ce changement dans le domaine de l'énergie s'accompagne de développements dans les concepts économiques et sociaux, où l'adoption de sources d'énergie renouvelables entraîne des transformations sur le marché du travail et ouvre de nouveaux horizons pour l'innovation et la durabilité. La gestion durable de l'énergie nécessite une réflexion stratégique et une coopération internationale. Fournir de l'énergie de manière durable est un défi nécessaire qui exige des efforts communs pour préserver les ressources de la planète et améliorer la qualité de vie [1].

1.2 Définition de l'énergie

L'énergie est définie comme la capacité d'effectuer un travail. C'est une quantité physique mesurable qui décrit la quantité de travail effectué par une force. L'énergie peut être stockée, et alors elle est appelée énergie potentielle) ou elle peut être active et effectuer réellement un travail, et alors elle est appelée (énergie cinétique).

D'un autre côté, il existe plusieurs types d'énergie et chacune d'entre elles peut être dans un état latent ou cinétique, notamment :

- L'énergie mécanique existe sous plusieurs formes, notamment l'énergie cinétique, sonore, de tension superficielle, l'énergie stockée sous forme de pression de gaz ou l'énergie dans une spirale comprimée.
- L'énergie électromagnétique, dont des exemples incluent l'électricité ordinaire circulant dans les réseaux et les outils électriques et électrostatiques, et dont des exemples incluent également la foudre aérienne et l'énergie magnétique.
- L'énergie thermique est présente dans tous les objets dont la température dépasse le zéro absolu (273 degrés Celsius).
- L'énergie chimique est l'énergie contenue dans les liaisons des atomes qui relient les atomes, dont nous bénéficions lors du changement (rupture ou connexion de ces liaisons, comme ce qui se produit lorsque du carburant est brûlé.
- L'énergie nucléaire est l'énergie contenue dans le noyau d'un atome qui lie entre elles les particules nucléaires telles que les protons et les neutrons. Cette énergie est libérée soudainement lors de réactions de fission ou de fusion. Cette énergie est également libérée lentement par fission naturelle de certains noyaux (comme cela arrive dans les réacteurs).

Tous les types d'énergie sont soumis à la loi de conservation de l'énergie qui stipule : L'énergie ne peut pas être détruite. Elle ne se crée que parce qu'elle est susceptible de passer d'un type à un autre, c'est-à-dire par exemple de l'énergie thermique de la vapeur à l'énergie mécanique cinétique, comme dans une turbine à vapeur. Ou de l'énergie chimique (dans le processus de combustion) à l'énergie mécanique cinétique, comme dans une turbine à combustion de gaz thermique de la vapeur à l'énergie mécanique cinétique, comme dans une turbine à vapeur. Ou de l'énergie chimique (dans le processus de combustion) à l'énergie mécanique cinétique, comme dans une turbine à combustion de gaz [2].

1.3 Les énergies renouvelables et les énergies non renouvelables

Les ressources naturelles peuvent être classées dans l'une des deux catégories suivantes : les ressources épuisables et les ressources renouvelables, Les ressources épuisables sont celles qui sont utilisées plus rapidement que la nature ne peut les reproduire ou les reconstituer. Aujourd'hui, notre principale ressource énergétique est constituée de combustibles fossiles, notamment le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Ces ressources ne peuvent jamais être remplacées car cela prend énormément de temps.

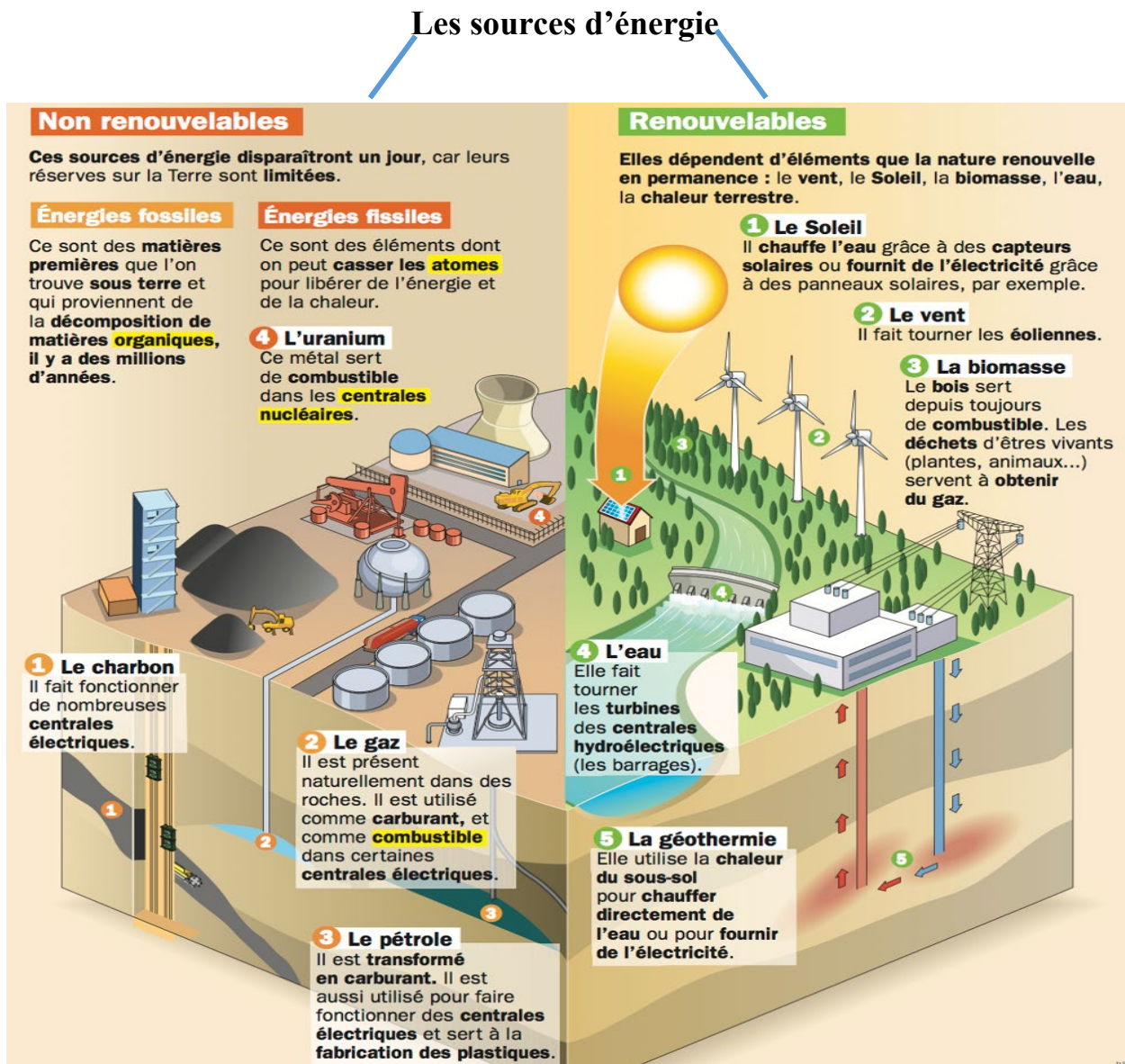


Fig. 1.1 Les sources d'énergie [3].

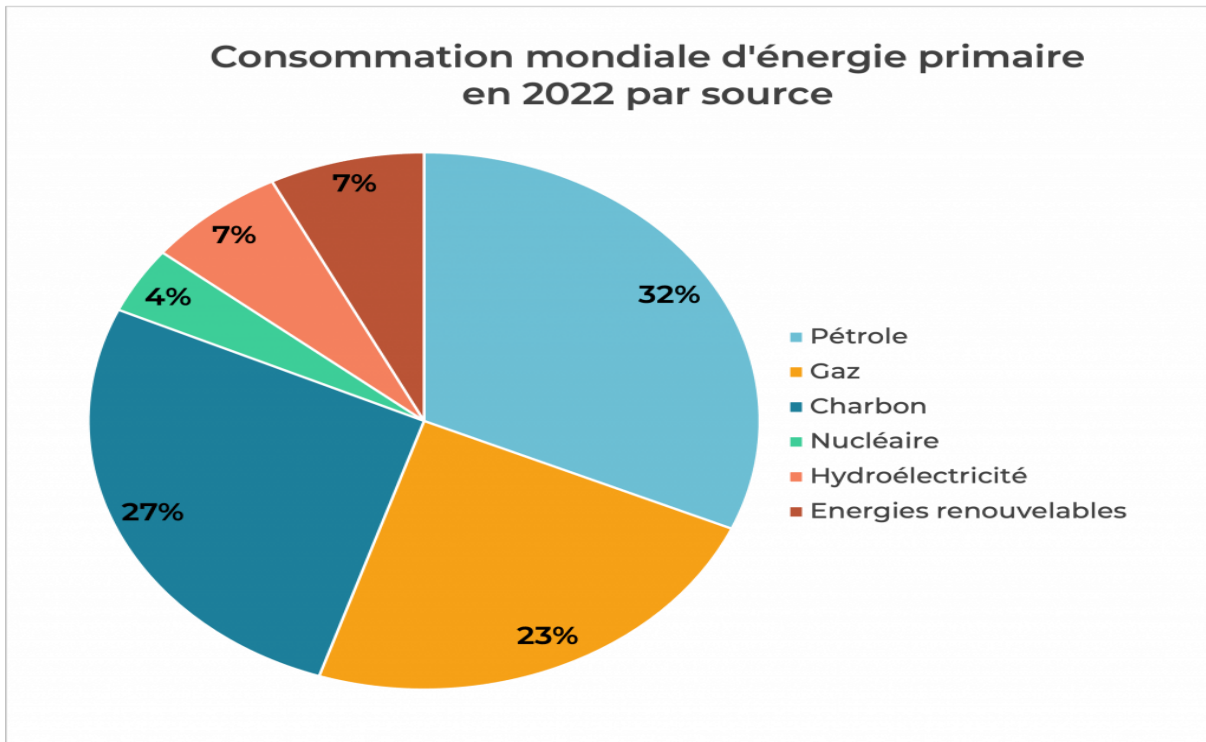


Fig. 1.2 Consommation mondiale d'énergie primaire en 2022 [4].

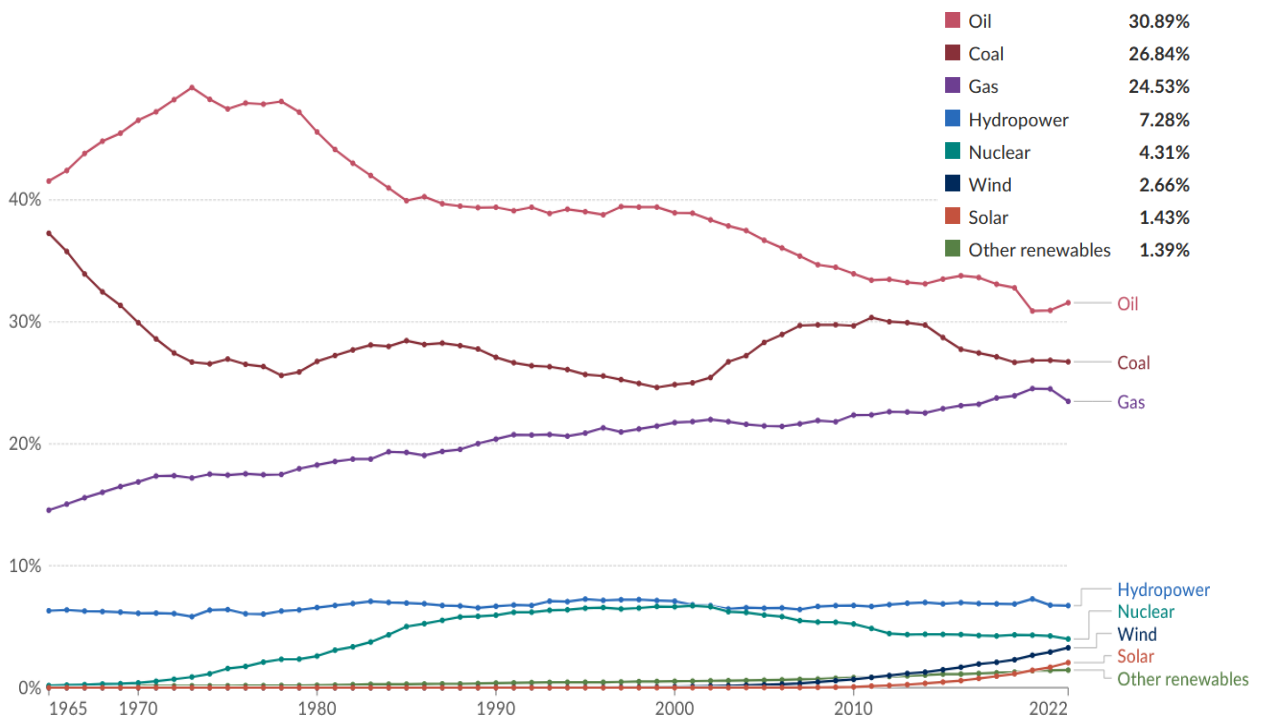


Fig. 1.3 Part de la consommation d'énergie par source, Monde en 2020 [5].

Il existe d'autres ressources remplaçables ou inépuisables, l'énergie de l'eau et de la matière végétale (appelée biomasse) se renouvellent d'elles-mêmes si on les permet, elles sont donc véritablement renouvelables, Quant aux autres, comme l'énergie solaire et l'énergie éolienne, elles ne sont pas épuisables, elles sont donc de type inépuisable, mais elles entrent dans la catégorie des énergies renouvelables. Les gens de l'ère préindustrielle ont d'abord eu recours à ces ressources renouvelables. Le bois, par exemple, était le combustible utilisé pour se chauffer ou cuisiner, le vent fournissait l'énergie nécessaire au déplacement des voiliers et l'énergie hydraulique faisait tourner la roue des moulins à grains. Mais depuis le début de l'ère industrielle, nous sommes devenus de plus en plus dépendants des énergies fossiles.

Les États-Unis tirent 89 % de l'énergie dont ils ont besoin du carburant des fossiles, alors que leur nombre dans le monde entier est de 80 pour cent [2].

1.3.1 Les énergies non renouvelables (combustibles fossiles)

Les énergies fossiles font partie des énergies non renouvelables (qui regroupent également les énergies dites fissiles). Les principales sources d'énergies fossiles sont le charbon, le pétrole et le gaz naturel Ces ressources sont dites conventionnelles, par opposition aux combustibles fossiles dits non conventionnels, qui, eux, ne se présentent pas sous leur forme courante et qui sont présents dans des gisements difficiles d'accès (gaz de schiste, sables bitumineux, schistes bitumineux, etc.).

Elles sont présentes en quantité limitée et ne sont pas renouvelables à l'échelle de temps humaine (leur formation nécessite des dizaines de millions d'années). Leur consommation intensive soulève deux problèmes majeurs pour les sociétés : une crise énergétique liée à l'épuisement des gisements, et une crise climatique liée au dégagement excessif de gaz à effet de serre produits par leur combustion [6].

1.3.1.1 Définition des combustibles fossiles

Les combustibles fossiles sont des sources d'énergie dérivées de matières organiques issues de la décomposition de plantes et d'organismes marins sur de longues périodes géologiques.

Ces matières organiques sont ensuite transformées en substances riches en carbone, telles que le charbon, le pétrole et le gaz naturel. Ces combustibles fossiles sont utilisés comme principales sources d'énergie dans le monde moderne [6].

| Source | 1990 | % | 2000 | % | 2010 | % | 2015 | 2019 | % 2019 | var. 2019/1990 |
|-----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|-------------------|
| Pétrole | 2 564 | 61,2 | 3 028 | 50,8 | 3 447 | 53,3 | 3 129 | 3 007 | 48,4 % | +17 % |
| Gaz naturel | 1 627 | 38,8 | 2 925 | 49,1 | 3 013 | 46,6 | 2 990 | 3 203 | 51,6 % | +97 % |
| Total fossiles | 4 191 | 99,98 | 5 953 | 99,96 | 6 460 | 99,96 | 6 119 | 6 210 | 99,9 % | +48 % |
| Hydraulique | 0,5 | 0,01 | 0,2 | 0,003 | 0,6 | 0,01 | 0,5 | 0,5 | 0,01 % | +13 % |
| Solaire, éolien | | | | | | | 0,3 | 2,5 | 0,04 % | ns |
| Biomasse-déchets | 0,4 | 0,01 | 2,2 | 0,04 | 2,2 | 0,03 | 0,3 | 0,4 | 0,01 % | -5 % |
| Total EnR | 0,9 | 0,02 | 2,4 | 0,04 | 2,8 | 0,04 | 1,1 | 3,4 | 0,1 % | +271 % |
| Total | 4 192 | 100 | 5 955 | 100 | 6 463 | 100 | 6 120 | 6 213 | 100 % | +48 % |

Fig 1.4 Production d'énergie primaire en Algérie [7].

1.3.1.2 Le pétrole

Huile minérale naturelle, de couleur très foncée, d'une densité variant de 0,8 à 0,95, composée essentiellement d'hydrocarbures paraffiniques, naphéniques et aromatiques. (On dit aussi pétrole brut et, dans les opérations d'exploration et de production, huile.)

Le pétrole est le résultat de la lente dégradation bactériologique d'organismes aquatiques végétaux et animaux qui, il y a des dizaines, voire des centaines de millions d'années, ont proliféré dans les mers et se sont accumulés en couches sédimentaires. L'ensemble des produits issus de cette dégradation, hydrocarbures et composés volatils, mêlé aux sédiments et aux résidus organiques, est contenu dans la roche-mère ; c'est de celle-ci que le pétrole, expulsé sous l'effet du compactage provoqué par la sédimentation, a migré pour imprégner des sables ou des roches plus poreuses et plus perméables, telles que grès ou calcaires. Les gisements se localisent toujours en un point singulier ou dans une anomalie naturelle de ces roches, que l'on appelle roches-réservoirs ou roches-magasins. Une couche imperméable, marne ou argile, par exemple, formant piège permet l'accumulation des hydrocarbures et les empêche ainsi de s'échapper.

Le pétrole se présente le plus souvent surmonté d'une couche d'hydrocarbures gazeux et se situe généralement au-dessus d'une couche d'eau salée, plus dense que lui. L'épaisseur d'un gisement varie entre quelques mètres et plusieurs centaines de mètres. Sa longueur peut atteindre plusieurs dizaines de kilomètres au Moyen-Orient [8].



Fig. 1.5 Production pétrolière en Algérie 2022 [9].

1.3.1.3 Le gaz naturel

Le gaz naturel se compose de plancton, d'organismes microscopiques qui comprennent des algues et des organismes primaires qui sont morts et se sont accumulés dans les couches océaniques et terrestres, et les restes comprimés sous les couches sédimentaires. Pendant des milliers d'années, la pression et la chaleur des couches sédimentaires ont transformé ces matières organiques en gaz naturel, et le gaz naturel dans sa composition n'est pas très différent des autres combustibles fossiles tels que le charbon et le pétrole. Puisque le pétrole et le gaz naturel se forment dans les mêmes conditions naturelles, ces hydrocarbures se trouvent généralement ensemble dans des champs souterrains ou aquatiques, et généralement des couches sédimentaires organiques enfouies à des profondeurs allant de 1000 à 6000 mètres (à des températures allant de 60 à 150 degrés Celsius) produit du pétrole, tandis que ceux enfouis plus profondément et à des températures plus élevées produisent du gaz naturel, et plus la source est profonde, plus elle est sèche (c.-à-d. plus la proportion de condensats de gaz est faible). Après une formation progressive dans la croûte

terrestre, le gaz naturel et le pétrole s'infiltrent lentement dans de petits cratères de pores dans les roches poreuses voisines qui servent de dépôts de minerai, et parce que ces roches sont habituellement remplies d'eau, de pétrole et de gaz naturel. à la fois plus léger que l'eau et moins dense que les roches environnantes - parfois voyager vers le haut à travers la croûte terrestre sur de longues distances. Finalement, certains de ces hydrocarbures se déplaçant vers le haut sont piégés dans une couche de roche non poreuse (non imperméable à l'eau) connue sous le nom de Cap Rock, et le gaz naturel est plus léger que le pétrole, formant une couche au-dessus du pétrole appelée Gas Cap. Le pétrole doit être accompagné de gaz appelé gaz associé. Les mines de charbon contiennent également des quantités de méthane -- la principale composante du gaz naturel -- et dans les couches de charbon sédimentaires, le méthane est souvent dispersé pendant les pores et les fissures de la mine, généralement appelées mines de méthane [10].



Fig. 1.6 Production de gaz naturel en Algérie 2022 [11].

1.3.1.4 Le charbon

Le charbon est une roche sédimentaire combustible, riche en carbone, de couleur noire ou marron foncé, formée à partir de la dégradation partielle de la matière organique des végétaux. Il est exploité dans des mines, appelées charbonnages.

Couvrant 27,2 % des besoins énergétiques mondiaux en 2021, le charbon est la seconde ressource énergétique de l'humanité, derrière le pétrole (29,5 %) et devant le gaz naturel (23,6 %),

et la première source d'électricité avec 35,9 % de la production d'électricité en 2021 contre 38,3 % en 1973.

Ce sont les observations au microscope d'Hutton et de Link, vers 1840, qui ont permis la découverte de la composition du charbon. Il se forme sur plusieurs millions d'années à partir de l'accumulation de débris végétaux qui vont sédimenter et carboniser progressivement à la suite d'une modification graduelle des conditions de température et de pression. Ses propriétés physicochimiques dépendent donc essentiellement du « lithotype », qui reflète le degré de carbonisation du charbon (le « rang » du charbon) ; Plus le rang est élevé plus sa teneur en eau est faible et sa teneur en carbone est forte plus son pouvoir calorifique est important.

Les charbons de rang supérieur sont donc des combustibles de meilleure qualité. Les charbons de rang inférieur sont plus brunâtres, plus ternes et plus friables tandis que les charbons de rang supérieur sont plus noirs, plus durs et plus résistants [12].



Fig. 1.7 Production de charbon [13].

1.3.1.5 Combustibles fossiles et pollution de l'environnement

Quand on parle du charbon, du pétrole ou même du gaz naturel, autrement dit des ressources d'énergie primaire, une image nous vient très vite en tête : la pollution. En effet, la combustion de ces combustibles fossiles émet du dioxyde de soufre, de l'oxyde d'azote et des particules fines, des gaz qui ont tous la particularité d'être extrêmement polluants.

En plus de souiller notre atmosphère et d'avoir un impact direct sur la qualité de l'air, ces substances sont aussi capables de nous tuer, car les particules fines sont responsables de l'apparition de nombreuses maladies respiratoires, cardiovasculaires, et même de certains types de cancer : selon un rapport de l'OMS, la pollution de l'air est responsable de plus de 4,2 millions de décès prématurés chaque année

Toujours d'un point de vue écologique, l'utilisation des énergies est la première source d'émissions de GES, à commencer par le dioxyde de carbone, le méthane ou encore le protoxyde d'azote. Ces gaz, qui viennent piéger la chaleur dans l'atmosphère, vont peu à peu augmenter la température de l'air, principales responsables du réchauffement climatique mondial [14].

1.3.1.6 Les avantages et les inconvénients d'une énergie non renouvelable

L'utilisation d'une énergie non renouvelable présente certains avantages, mais aussi des inconvénients à prendre en compte.

Avantages de l'énergie non renouvelable

- Abondance et fiabilité : Les énergies non renouvelables, telles que le pétrole, le charbon et le gaz naturel, sont souvent disponibles en grande quantité, ce qui garantit une stabilité dans l'approvisionnement énergétique.
- Efficacité énergétique : Les sources d'énergie non renouvelables ont une densité énergétique élevée, ce qui signifie qu'elles peuvent fournir beaucoup d'énergie avec une petite quantité de combustible.

- Coût relativement bas : Comparées aux énergies renouvelables, les énergies non renouvelables sont généralement moins chères à produire et à exploiter

Inconvénients des énergies non renouvelables

- Impact environnemental : L'extraction, la combustion et l'utilisation des énergies non renouvelables entraînent d'importants problèmes environnementaux, tels que la pollution de l'air, de l'eau et du sol, ainsi que les émissions de gaz à effet de serre responsables du changement climatique.
- Épuisement des ressources : Les énergies non renouvelables sont limitées en quantité et s'épuisent progressivement. Leur utilisation excessive peut entraîner une diminution des réserves exploitables dans le futur.
- Dépendance géopolitique : La plupart des énergies non renouvelables sont concentrées dans certaines régions du monde, ce qui peut créer une dépendance économique et politique à l'égard de ces pays producteurs.

Il est important de noter que ces avantages et inconvénients peuvent varier en fonction du contexte socio-économique et des technologies disponibles. Le passage à des énergies renouvelables plus durables est souvent considéré comme une solution à long terme pour réduire les impacts négatifs des énergies non renouvelables [15].

1.3.2 Les énergies renouvelables

La plupart des énergies renouvelables proviennent directement ou indirectement du soleil. La lumière du soleil, ou énergie solaire, peut être utilisée directement pour chauffer et éclairer les maisons et autres bâtiments, pour produire de l'électricité, pour chauffer l'eau chaude, pour le refroidissement solaire et pour diverses utilisations commerciales et industrielles. La chaleur du soleil entraîne également les vents, dont l'énergie est captée par les éoliennes. Ensuite, les vents et la chaleur du soleil provoquent l'évaporation de l'eau. Quand cette eau la vapeur se transforme en pluie ou en neige et s'écoule vers les rivières ou les ruisseaux, son énergie peut être capté grâce à l'énergie hydroélectrique.

Il existe de nombreuses sources d'énergie qui sont renouvelables et considérées comme respectueuses de l'environnement et exploiter les processus naturels.

Ces sources d'énergie fournir une autre source d'énergie « plus propre », ce qui aide à neutraliser les effets de certaines formes de pollution. Toutes ces techniques de décrits comme renouvelables puisqu'ils n'épuisent aucune ressource pour créer de l'énergie. Bien qu'il existe de nombreux projets et productions d'énergie renouvelable à grande échelle, les technologies renouvelables sont également adaptées aux petites applications hors réseau, parfois dans les zones rurales et éloignées, où l'énergie est souvent cruciale pour l'homme.

L'hydrogène peut également être trouvé dans de nombreux composés organiques, ainsi que dans l'eau. C'est l'élément le plus abondant sur Terre. Mais il n'existe pas naturellement sous forme de gaz. Il est toujours combiné avec d'autres éléments comme l'oxygène pour produire de l'eau. Une fois séparé d'un autre élément, l'hydrogène peut être brûlé comme combustible ou converti en électricité [16].

1.3.3 Définition des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables (ou EnR) désignent un ensemble de moyens de produire de l'énergie à partir de sources ou de ressources théoriquement illimitées, disponibles sans limite de temps ou reconstituables plus rapidement qu'elles ne sont consommées.

On parle généralement des énergies renouvelables par opposition aux énergies fossiles dont les stocks sont limités et non renouvelables à l'échelle du temps humain : charbon, pétrole, gaz naturel... Au contraire, les énergies renouvelables sont produites à partir de sources comme les rayons du soleil, ou le vent, qui sont théoriquement illimitées à l'échelle humaine.

Les énergies renouvelables sont également parfois désignées par les termes « énergies vertes » ou « énergies propres », par abus de langage. En effet, si les énergies renouvelables ont bien souvent des avantages écologiques, elles ne sont pas pour autant « vertes » ou « propres » dans le sens où elles ont aussi des conséquences environnementales importantes [17].

La part des énergies renouvelables dans la consommation finale mondiale d'énergie était estimée en 2018 à 17,9 %, dont 6,9 % de biomasse traditionnelle (bois, déchets agricoles, etc.) et 11,0 % d'énergies renouvelables « modernes » : 4,3 % de chaleur produite par les énergies

renouvelables thermiques (biomasse, géothermie, solaire thermique), 3,6 % d'hydroélectricité, 2,1 % pour les autres renouvelables électriques (éolien, solaire photovoltaïque, géothermie, biomasse, biogaz) et 1 % pour les biocarburants ; leur part dans la production d'électricité était estimée en 2018 à 26,4 % [18].

1.3.3.1 Types d'énergie renouvelable

- **Énergie solaire**

Photovoltaïque (PV) L'énergie solaire exploite l'énergie du soleil pour produire de l'électricité. L'une des sources d'énergie connaissant la croissance la plus rapide, les nouvelles technologies se développent à un rythme rapide. Les cellules solaires deviennent de plus en plus efficaces, transportables et même flexibles, permettant une installation facile.

Le photovoltaïque a principalement été utilisé pour alimenter des applications de petite et moyenne taille, depuis le calculateur alimenté par une seule cellule solaire jusqu'aux maisons hors réseau alimentées par un panneau photovoltaïque.

La crise pétrolière de 1973 a stimulé une augmentation rapide de la production photovoltaïque au cours des années 1970 et au début des années 1980. La chute constante des prix du pétrole au début des années 1980 a toutefois conduit à une réduction du financement de la R&D photovoltaïque et à l'arrêt des crédits d'impôt associés à l'énergie.



Fig. 1.8 Panneaux solaires [16].

Ces dernières années, les installations solaires ont également commencé à se développer dans les zones résidentielles, les gouvernements proposant des programmes d'incitation pour faire de l'énergie « verte » une option plus viable économiquement.

- **L'énergie éolienne**

L'énergie éolienne est la conversion de l'énergie éolienne par des éoliennes en une forme utile, telle que l'électricité ou l'énergie mécanique. Les parcs éoliens à grande échelle sont généralement connectés au réseau de transport d'électricité local avec de petites turbines utilisées pour fournir de l'électricité aux zones isolées. Les unités résidentielles entrent en production et sont capables d'alimenter de gros appareils électroménagers dans des maisons entières, en fonction de leur taille.

L'énergie éolienne est l'une des sources d'énergie qui connaît la croissance la plus rapide au monde. Grâce aux installations récentes dans le monde entier, la capacité totale d'énergie éolienne mondiale est passée à 539 GW fin 2017.

Les parcs éoliens installés sur des terres agricoles ou des zones de pâturage ont l'un des impacts environnementaux les plus faibles de toutes les sources d'énergie.

L'énergie éolienne a toujours été utilisée directement pour propulser des voiliers ou convertie en énergie mécanique pour pomper de l'eau ou moulin des céréales, mais la principale application de l'énergie éolienne l'énergie aujourd'hui est la production d'électricité.

Depuis 2008, l'Europe est à la pointe du développement de l'énergie éolienne offshore, en raison de ses fortes ressources éoliennes et des eaux peu profondes de la mer du Nord et de la mer Baltique, ainsi que des limites des emplacements appropriés sur terre en raison de la densité des populations et des développements existants.

Le Danemark a installé les premiers parcs éoliens offshore et a été pendant des années le leader mondial de l'énergie éolienne offshore jusqu'à ce que le Royaume-Uni prenne la tête en octobre 2008. D'autres grands marchés de l'énergie éolienne, notamment les États-Unis et la Chine, se sont d'abord concentrés sur le développement de leurs parcs éoliens offshore.



Fig. 1.9 Parc éolien [16].

- **Hydroélectricité**

L'hydroélectricité est l'électricité produite par l'hydroélectricité, c'est-à-dire la production d'énergie grâce à l'utilisation de la force gravitationnelle de l'eau qui tombe ou qui coule. C'est la forme d'énergie renouvelable la plus utilisée. Une fois le complexe hydroélectrique construit, le projet ne produit aucun déchet direct.

La petite hydroélectricité ou la micro-hydroélectricité est une source d'énergie alternative de plus en plus populaire, en particulier dans les zones reculées où les autres sources d'énergie ne sont pas viables.

Des systèmes hydroélectriques à petite échelle peuvent être installés dans de petites rivières ou ruisseaux avec peu ou pas d'effet environnemental perceptible ou de perturbation de la migration des poissons. La plupart des systèmes hydroélectriques à petite échelle n'utilisent pas de barrage ou de détournement d'eau majeur, mais utilisent plutôt des roues hydrauliques pour produire de l'énergie. Cela représentait environ 19 % de l'électricité mondiale (contre 16 % en 2003) et plus de 63 % de l'électricité provenant de sources renouvelables. Même si de nombreux projets hydroélectriques alimentent les réseaux publics d'électricité, certains sont créés pour desservir des entreprises industrielles spécifiques.

Des projets hydroélectriques dédiés sont souvent construits pour fournir les quantités substantielles d'électricité nécessaires aux usines d'électrolyse de l'aluminium [12].



Fig. 1.10 Barrage d'eau avec systèmes hydroélectriques [16].

1.3.3.2 Avantages et inconvénients des énergies renouvelables

Pour être plus précis, il faudrait se pencher sur les avantages et inconvénients que présentent chaque source d'énergie renouvelable. En voici quelques exemples :

- **Les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne**

L'énergie éolienne permet de transformer l'énergie du vent en électricité. Il en existe deux types : les éoliennes terrestres et les éoliennes en mer. Ce type d'énergie renouvelable présente plusieurs avantages comme par exemple le fait de pouvoir produire en moyenne 4 000 MWh par an, ce qui correspond à la consommation électrique moyenne de plus de 800 foyers. De plus, l'énergie éolienne permet de limiter les émissions de gaz à effet de serre. En 2018 par exemple, les éoliennes ont permis d'éviter l'émission de 12 millions de tonnes de CO₂ (ce qui représente la circulation de près de 7 millions de véhicules sur une année).

Les éoliennes sont également une source de revenus pour les collectivités. Il faut savoir qu'en moyenne une éolienne terrestre leur rapporte entre 10 000 à 12 000 € par MW chaque année.

L'inconvénient majeur des éoliennes est qu'elles ne peuvent pas fonctionner en continu. En effet, elles ne peuvent pas tourner si le vent est trop faible, voire même trop puissant. En moyenne, les éoliennes tournent 2200 heures par an (soit environ 25 % du temps).

Le temps de mise en place d'un parc éolien est également un frein au développement de ce type d'énergie : il faut compter en moyenne entre 4 et 10 ans pour mettre en œuvre un projet global. Enfin, les éoliennes présentent également des inconvénients en matière d'impact visuel pour les habitants de la zone où elles sont installées mais aussi de préservation de la biodiversité : elles peuvent notamment tuer des oiseaux par exemple. C'est pour cette raison que des études sont réalisées avant l'installation d'un parc éolien pour éviter de l'installer sur un couloir migratoire.

- **Les avantages et inconvénients de l'énergie solaire**

L'énergie solaire permet d'utiliser le rayonnement du soleil pour le transformer en électricité. Il existe 3 technologies principales pour produire de la chaleur ou de l'électricité grâce à l'énergie solaire :

- ✓ Les panneaux photovoltaïques : les cellules intégrées dans les panneaux permettent de transformer les rayons du soleil en électricité.
- ✓ Le solaire thermique : il s'agit d'une technologie qui permet de transformer les rayons du soleil en énergie thermique (en chaleur).
- ✓ Le solaire thermodynamique : ces technologies permettent de produire de l'électricité grâce à la production de chaleur.

L'avantage principal de l'énergie solaire est que c'est une source d'énergie 100 % renouvelable qui est déjà relativement bien développée.

Le photovoltaïque devrait représenter à lui seul 28 % de la production électrique renouvelable d'ici 2028. De plus, la plupart des panneaux photovoltaïques (90 % environ) sont recyclables et la France est l'un des premiers pays européens à détenir un centre de traitement des modules photovoltaïques usagés.

Le principal inconvénient de l'énergie solaire est qu'elle ne peut produire de l'électricité ou de la chaleur qu'en journée. De plus, la production d'électricité via le photovoltaïque est très volatile et dépend de plusieurs facteurs : la puissance de l'installation, l'orientation, l'ombre, l'inclinaison des panneaux ainsi que la localisation géographique.

- **Les avantages et inconvénients de l'énergie hydraulique**

L'énergie hydraulique qui consiste à utiliser la force de l'eau pour produire de l'électricité présente le principal avantage de produire de l'énergie de façon plus régulière et à grande échelle puisqu'elle n'est pas directement liée au climat, à l'ensoleillement ou à la force du vent par exemple. Elle permet aussi de stocker une part de l'électricité produite et de la réutiliser en cas de pic de consommation, durant l'hiver par exemple.

En revanche, la construction de barrages hydrauliques peut parfois détruire certains écosystèmes et s'avère souvent très coûteuse car ces derniers doivent répondre à un cahier des charges spécifique, notamment en matière de résistance aux crues, etc. [19].

1.4 L'Hydrogène : Un Porteur d'énergie

L'un des problèmes majeurs des sources d'énergie renouvelables est l'incapacité de stocker l'énergie produite de manière viable. Ce n'est pas un problème avec la biomasse puisque les carburants produits à partir de la biomasse, comme l'éthanol et le biodiesel, peuvent être stockés et utilisés à tout moment. Cependant, l'électricité produite par les systèmes solaires, les barrages hydroélectriques, les centrales géothermiques et les éoliennes ne peut pas être stockée pour une utilisation ultérieure. Les batteries ne constituent pas une option viable dans la technologie actuelle en raison de leur capacité limitée. Une solution possible à ce problème est la production d'hydrogène à partir d'électricité renouvelable par électrolyse de l'eau. Une fois produit, l'hydrogène peut être stocké et utilisé à tout moment.

L'hydrogène est un gaz diatomique incolore, inodore, non métallique, insipide et hautement inflammable de formule moléculaire H_2 . C'est aussi l'élément le plus léger avec une masse moléculaire de 2,016 kg/kmole. L'hydrogène est un combustible avec un pouvoir calorifique supérieur de 141 800 kJ/kg et un pouvoir calorifique inférieur de 120 000 kJ/kg. Notez cependant que l'hydrogène n'est pas une source d'énergie comme le charbon, le pétrole et le gaz naturel

puisque'il n'y a pas de réserves d'hydrogène sur terre. Bien que l'hydrogène soit l'élément le plus abondant dans l'univers, représentant environ les trois quarts de toute la matière, l'hydrogène libre est rare. L'hydrogène doit être produit à partir d'autres combustibles comme le gaz naturel ou à partir d'eau par électrolyse en consommant de l'électricité. Par conséquent, l'hydrogène devrait être qualifié de vecteur énergétique plutôt que de source d'énergie.

Chapitre 2 :

Production

d'Hydrogène

2.1 Introduction

L'hydrogène peut être considéré comme l'élément le plus simple qui existe. Un atome d'hydrogène est constitué d'un seul proton et d'un électron. C'est aussi l'élément le plus abondant dans l'univers. Malgré sa simplicité et son abondance, l'hydrogène n'est pas présent naturellement sous forme de gaz sur Terre ; il est toujours combiné avec d'autres éléments. L'eau, par exemple, est une combinaison d'hydrogène et d'oxygène (H₂O). L'hydrogène est également l'un des éléments les plus abondants dans la croûte terrestre. L'hydrogène sous forme de gaz n'est pas présent naturellement sur Terre et doit être fabriqué. En effet, l'hydrogène gazeux est plus léger que l'air et s'élève donc dans l'atmosphère. L'hydrogène naturel est toujours associé à d'autres éléments sous forme composée tels que l'eau, le charbon et le pétrole. L'hydrogène a la teneur énergétique la plus élevée de tous les carburants courants en termes de poids. En revanche, l'hydrogène a le contenu énergétique en volume le plus faible. C'est l'élément le plus léger et c'est un gaz à température et pression normale. L'hydrogène peut également être trouvé dans de nombreux composés organiques, ainsi que dans l'eau. C'est l'élément le plus abondant sur Terre. Mais il n'existe pas naturellement sous forme de gaz. Il est toujours combiné avec d'autres éléments, comme l'oxygène pour produire de l'eau. Une fois séparé d'un autre élément, l'hydrogène peut être brûlé comme combustible ou converti en électricité [20].

2.2 L'hydrogène comme vecteur d'énergie

L'hydrogène peut être considéré comme un vecteur d'énergie propre similaire à l'électricité. L'hydrogène peut être produit à partir de diverses ressources nationales telles que les énergies renouvelables et l'énergie nucléaire. A long terme, l'hydrogène réduira simultanément la dépendance au pétrole étranger et les émissions de gaz à effet de serre et d'autres polluants.

L'hydrogène est également considéré comme une source d'énergie secondaire, communément appelée vecteur énergétique. Les vecteurs énergétiques sont utilisés pour déplacer, stocker et fournir de l'énergie sous une forme facilement utilisable. L'électricité est l'exemple le plus connu de vecteur énergétique. L'hydrogène, en tant que vecteur énergétique important à l'avenir, présente de nombreux avantages. Par exemple, un grand volume d'hydrogène peut être facilement stocké de différentes manières. L'hydrogène est également considéré comme un carburant à haut rendement et peu polluant qui peut être utilisé pour le transport, le chauffage et la

production d'électricité dans les endroits où il est difficile d'utiliser l'électricité. Dans certains cas, il est moins coûteux d'expédier de l'hydrogène par pipeline que d'envoyer de l'électricité sur de longues distances par fil. Actuellement, l'hydrogène est principalement utilisé comme carburant dans le programme spatial de la NASA, comme l'illustre la figure (2. 1). L'hydrogène liquide est utilisé pour propulser la navette spatiale et d'autres fusées, tandis que les piles à combustible à hydrogène alimentent les systèmes électriques de la navette. La pile à combustible à l'hydrogène est également utilisée pour produire de l'eau pure pour l'équipage de la navette [1]. À l'avenir, l'hydrogène rejoindra l'électricité comme vecteur énergétique important, car il peut être fabriqué en toute sécurité à partir de sources d'énergie renouvelables et est pratiquement non polluant. Il sera également utilisé comme carburant pour les véhicules < zéro émission >, pour chauffer les maisons et les bureaux, pour produire de l'électricité et pour alimenter les avions. L'hydrogène est riche en énergie, mais un moteur qui brûle de l'hydrogène pur ne produit pratiquement aucune pollution. La NASA utilise l'hydrogène liquide depuis les années 1970 pour propulser la navette spatiale et d'autres fusées en orbite. Les piles à combustible à hydrogène alimentent les systèmes électriques de la navette, produisant un sous-produit propre - de l'eau pure - que boit l'équipage. A l'avenir, l'hydrogène pourrait également rejoindre l'électricité en tant que vecteur énergétique important. Un vecteur énergétique déplace et fournit de l'énergie sous une forme utilisable aux consommateurs. Les sources d'énergie renouvelables, comme le soleil et le vent, ne peuvent pas produire de l'énergie en permanence. Mais ils pourraient, par exemple, produire de l'énergie électrique et de l'hydrogène, qui pourraient être stockés jusqu'à ce que l'on en ait besoin. L'hydrogène peut également être transporté (comme l'électricité) vers les endroits où il est nécessaire. L'hydrogène présente un grand potentiel pour réduire la dépendance à l'égard de l'énergie importée de sources telles que le pétrole. Avant que l'hydrogène puisse jouer un rôle énergétique plus important et devenir une alternative largement utilisée à l'essence, de nombreuses nouvelles installations et systèmes doivent être construits [21]. Comme le montre la figure (2.2), la future infrastructure énergétique à l'hydrogène est illustrée.

L'hydrogène est produit grâce à un système d'électrolyse éolienne. L'hydrogène est comprimé jusqu'à atteindre la pression du pipeline, puis introduit dans un pipeline de transport. Le pipeline transporte l'hydrogène vers un terminal de gaz comprimé où est l'hydrogène chargé dans des remorques à tubes de gaz comprimé. Un camion livre les remorques tubulaires à une station de

stationnement où L'hydrogène est ensuite comprimé, stocké et distribué aux véhicules à pile combustible.



Fig. 2. 1 Lancement de la navette [12]

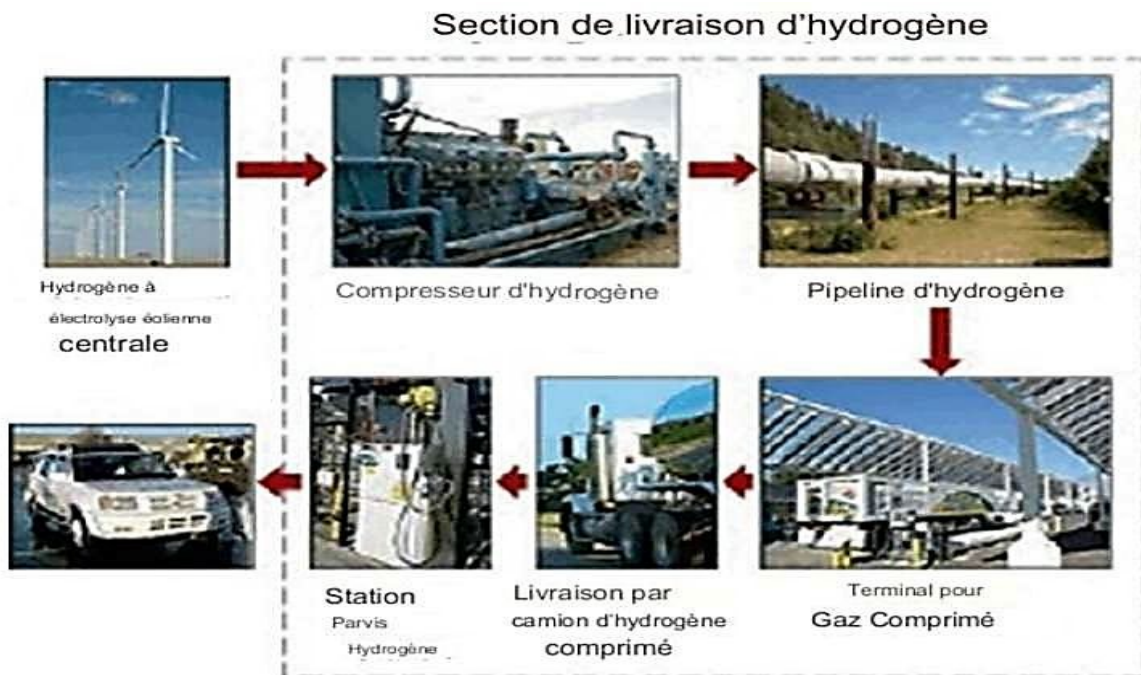


Fig.2.2 Future infrastructure énergétique hydrogène [21].

2.3 Pile à combustible à hydrogène

Comme nous l'avons indiqué au début de ce chapitre, une pile à combustible utilise l'énergie chimique de l'hydrogène ou d'un autre combustible pour produire de l'électricité de manière propre et efficace. Si l'hydrogène est le carburant, l'électricité, l'eau et la chaleur sont les seuls produits. Les piles à combustible sont uniques en termes de variété de leurs applications potentielles ; ils peuvent alimenter des systèmes aussi grands qu'une centrale électrique et aussi petits qu'un ordinateur portable a figure (2.3) montre comment les piles à combustible convertissent directement l'énergie chimique de l'hydrogène en électricité, avec de l'eau pure et de la chaleur comme seuls sous-produits. Les piles à combustible alimentées à l'hydrogène sont non seulement non polluantes, mais leur efficacité peut être multipliée par deux à trois par rapport aux technologies de combustion traditionnelles. Les piles à combustible peuvent alimenter presque tous les appareils portables qui utilisent normalement des piles. Les piles à combustible peuvent également alimenter des moyens de transport tels que des véhicules, des camions, des autobus et des navires, ainsi que fournir une énergie auxiliaire aux technologies de transport traditionnelles. L'hydrogène peut jouer un rôle particulièrement important à l'avenir en remplaçant le pétrole importé que nous utilisons actuellement dans nos voitures et nos camions [22].

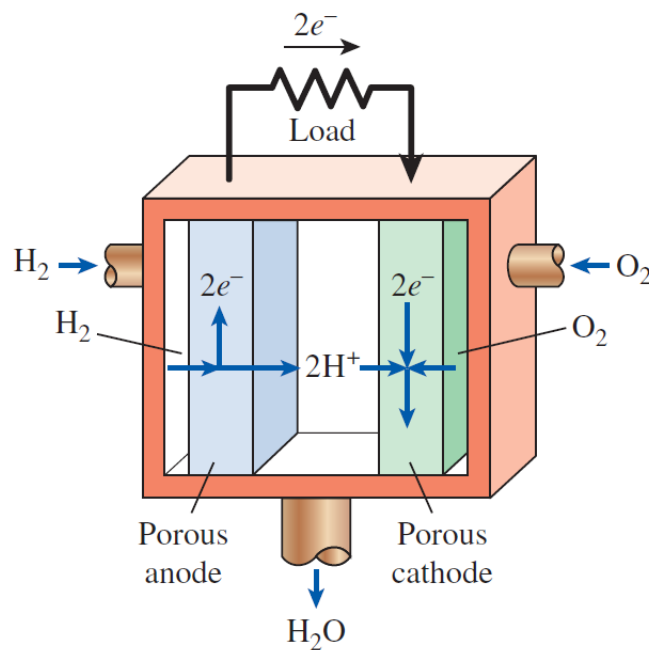


Fig. 2.3 Pile à combustible à hydrogène [16]

Une pile à combustible combine l'hydrogène et l'oxygène pour produire de l'électricité de la chaleur et de l'eau. Comme nous l'avons dit, le but d'une pile à combustible est de produire un courant électrique qui peut être dirigé à l'extérieur de la cellule pour effectuer un travail, comme alimenter un moteur électrique ou éclairer une ampoule ou une ville. En raison du comportement de l'électricité, ce courant retourne vers la pile à combustible, complétant ainsi un circuit électrique. Les réactions chimiques qui produisent ce courant sont la clé du fonctionnement d'une pile à combustible. Le fonctionnement de la pile à combustible, comme on peut l'observer sur la figure (2.3), est que l'oxygène pénètre dans la pile à combustible au niveau de la cathode et, dans certains types de pile (comme celle illustrée ci-dessus), il se combine là avec les électrons revenant du circuit électrique. et les ions hydrogène qui ont traversé l'électrolyte depuis l'anode. Dans d'autres types de cellules, l'oxygène capte les électrons puis traverse l'électrolyte jusqu'à l'anode, où il se combine avec les ions hydrogène. L'électrolyte joue un rôle clé. Il doit laisser passer uniquement les ions appropriés entre l'anode et la cathode. Si des électrons libres ou d'autres substances pouvaient voyager à travers l'électrolyte, ils perturberaient la réaction chimique. Qu'ils se combinent à l'anode ou à la cathode, l'hydrogène et l'oxygène forment ensemble l'eau qui s'écoule de la cellule. Tant qu'une pile à combustible est alimentée en hydrogène et de l'oxygène, il produira de l'électricité mieux encore, puisque les piles à combustible créent de l'électricité par voie chimique plutôt que par combustion, ils ne sont pas soumis aux lois thermodynamiques qui limitent une puissance conventionnelle plante.

La chaleur perdue de certaines cellules peut également être exploitée augmentant encore d'avantage l'efficacité du système. Les piles à combustible sont souvent comparées aux batteries. Tous deux convertissent l'énergie produite par une réaction chimique en énergie électrique utilisable. Cependant, la pile à combustible produira l'électricité tant que le combustible (hydrogène) est fourni, sans jamais perdre sa charge.

Les piles à combustible constituent une technologie prometteuse, utilisable comme source de chaleur et d'électricité pour les bâtiments et comme source d'énergie électrique pour les moteurs électriques propulsant les véhicules. Les piles à combustible fonctionnent mieux avec de l'hydrogène pur. Mais des carburants comme le gaz naturel, le méthanol ou même l'essence peuvent être reformés pour produire l'hydrogène nécessaire aux piles à combustible certaines piles à combustible peuvent même être alimentées directement avec du méthanol, sans utiliser de

reformeur es piles à combustible peuvent être utilisées dans un large éventail d'applications, notamment les applications transport, de manutention, d'alimentation de secours stationnaires, portables et d'urgence. Les piles à combustible présentent plusieurs avantages par rapport aux technologies conventionnelles basées sur la combustion actuellement utilisées dans de nombreuses centrales électriques et véhicules de tourisme. Les piles à combustible peuvent fonctionner à des rendements plus élevés que les moteurs à combustion et peuvent convertir l'énergie chimique contenue dans le carburant en énergie électrique avec des rendements allant jusqu'à 60 %. Les piles à combustible émettent moins d'émission que les moteurs à combustion. Les piles à combustible à hydrogène n'émettent que de l'eau. Il n'y a donc pas d'émissions de dioxyde de carbone ni de polluants atmosphériques qui créent du smog et causent des problèmes de santé au point de fonctionnement. De plus, les piles à combustible sont silencieuses pendant leur fonctionnement car elles comportent moins de pièces mobiles. Des recherches sont menées sur divers types de piles à combustible : piles à combustible à membrane échangeuse de protons (PEMFC), à membrane alcaline (AMFC) et à méthanol direct (DMFC), qui se différencient généralement selon le combustible utilisé.

Les piles à combustible fonctionnent comme des batteries, mais elles ne s'épuisent pas et n'ont pas besoin d'être rechargées. Ils produisent de l'électricité et de la chaleur tant qu'ils disposent de combustible. Une pile à combustible se compose de deux électrodes, une électrode négative (ou anode) et une électrode positive (ou cathode), prises en sandwich autour d'un électrolyte. Un combustible, tel que l'hydrogène, est introduit dans l'anode et de l'air est introduit dans la cathode. Dans une pile à combustible à hydrogène, un catalyseur situé à l'anode sépare les molécules d'hydrogène en protons et en électrons, qui empruntent des chemins différents jusqu'à la cathode. Les électrons traversent un circuit externe créant un flux d'électricité. Les protons migrent à travers l'électrolyte jusqu'à la cathode, où ils s'unissent l'oxygène et aux électrons pour produire de l'eau et de la chaleur [24].

Le Fuel à combustible Technologies Office (FCTO) se concentre sur la recherche appliquée, le développement et l'innovation pour faire progresser l'hydrogène et les piles à combustible pour les transports et diverses applications permettant la sécurité énergétique, la résilience et une économie nationale forte dans les technologies émergentes. Les efforts du Département américain de l'énergie (DOE ou Département) en matière d'hydrogène et de piles à

combustible font partie d'un vaste portefeuille d'activités visant à construire une économie d'énergie propre compétitive et durable afin d'assurer l'avenir énergétique du pays Réduire les émissions de gaz à effet de serre de 80 % d'ici 2050 [24] et éliminer la dépendance aux carburants importés nécessitera l'utilisation de diverses sources d'énergie nationales et de carburants et technologies avancés dans tous les secteurs de l'économie. Atteindre ces objectifs nécessite un portefeuille de recherche et développement (R&D) robuste et complet qui équilibre les projets à court terme objectifs avec les besoins à long terme et la durabilité.

Les piles à combustible, qui convertissent divers carburants directement en électricité sans combustion, et L'hydrogène, un carburant sans carbone lorsqu'il est produit à partir de ressources renouvelables, constituent des éléments clés du portefeuille du DOE. Les efforts du DOE pour permettre la commercialisation généralisée des technologies de l'hydrogène et des piles à combustible forment un programme intégré : le programme du DOE sur l'hydrogène et les piles à combustible le programme), comme le reflète le plan du programme sur L'hydrogène et les piles à combustible [25].

Durabilité : un facteur de performance clé est la durabilité, en termes de durée de vie du système de pile à combustible qui répondra aux attentes des applications. Les objectifs de durabilité du DOE pour les piles à combustible stationnaires et de transport sont respectivement de 40 000 et 5 000 h, dans des conditions de fonctionnement réalistes. Dans les applications les plus exigeantes, les conditions de fonctionnement réalistes incluent les impuretés dans le carburant et l'air, le démarrage et l'arrêt, le gel et le dégel, ainsi que les cycles d'humidité et de charge qui entraînent des contraintes sur la stabilité chimique et mécanique des matériaux et des composants du système de pile à combustible.

La R&D se concentre sur la compréhension des mécanismes de dégradation des piles à combustible et développer du matériel et des stratégies qui permettront de les atténuer. Plus de détails sur les objectifs et objectifs techniques, ainsi que sur les Tableaux d'objectifs individuels, peuvent être se trouve dans la section Piles à combustible du Plan pluriannuel de recherche, de développement et de démonstration du Bureau des technologies des piles à combustible [23].

2.4 La production d'hydrogène

La production à partir de combustibles fossiles Si l'hydrogène devient un vecteur énergétique, il sera très certainement produit, au moins dans un premier temps, à partir d'énergies fossiles, comme il l'est déjà actuellement pour ses applications industrielles. Si l'hydrogène présente tant d'attraits, C'est que cette molécule chimiquement réductrice se combine aisément à l'oxygène de l'air pour donner de l'énergie et de l'eau comme seul sous-produit. Le revers de la médaille est que sa production exige beaucoup d'énergie car elle s'appuie sur des molécules riches en hydrogène mais foncièrement stables telles que l'eau (H₂O) ou le méthane (CH₄).

Dans le passé, la production industrielle de l'hydrogène à partir des hydrocarbures s'est orientée vers les options les plus performantes d'un point de vue économique. Sans surprise, la matière première utilisée de façon dominante est loin, le gaz naturel, constitué principalement de méthane. Les énergies fossiles sont parfois utilisées puisqu'elles contiennent aussi de l'hydrogène qui peut être produit par la réaction d'oxydation partielle.

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 (H₂). 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'ammoniac 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.

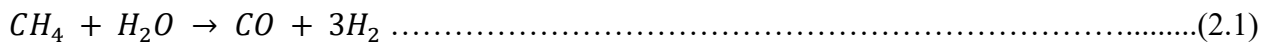
2.4.1 Le vaporeformage d'hydrocarbures

Le reformage à la vapeur consiste à transformer les charges légères d'hydrocarbures en gaz de synthèse (mélange H₂, CO, CO₂, CH₄, HO et autres impuretés) par réaction avec la vapeur d'eau sur un catalyseur au nickel. Cette transformation a lieu à haute température (840 à 950 °C) et à pression modérée (de l'ordre de 20 à 30 bars). Elle peut être suivie par différentes opérations qui conduisent à la production d'hydrogène mais donc aussi à l'obtention de carburant de synthèse. Dans tous les cas, la charge d'une unité de vaporeformage peut être du gaz naturel [26].

2.4.2 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 :



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 (ou water gas shif). 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.

2.4.3 Oxydation partielle d'hydrocarbures

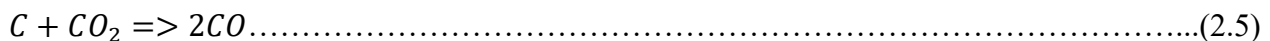
L'oxydation partielle des hydrocarbures est un processus chimique où un mélange sous-stœchiométrique de composés carbonés réagit pour produire des produits tels que du monoxyde de carbone et de l'hydrogène, formant ainsi un gaz de synthèse. Ce processus peut être réalisé par vaporeformage à la vapeur ou par oxydation partielle, utilisant diverses matières premières allant du gaz naturel aux résidus lourds, au charbon ou à la biomasse. L'oxydation partielle est une étape clé dans la production d'hydrogène et d'autres composés à haute valeur ajoutée à partir d'hydrocarbures bruts, nécessitant des conditions spécifiques de température et de pression pour favoriser les réactions désirées.

2.4.4 Oxydation partielle de résidu sous vide

L'oxydation partielle de résidu sous vide est un processus qui transforme les hydrocarbures en gaz de synthèse par une oxydation contrôlée en présence d'oxygène. Ce procédé est utilisé pour produire de l'hydrogène et du monoxyde de carbone à partir de résidus pétroliers lourds comme le résidu de distillation sous vide. Il implique des réactions exothermiques et endothermiques, nécessitant des conditions spécifiques de température, pression et catalyseurs pour obtenir un gaz de synthèse contenant principalement du CO et de l'H₂. Ce processus peut être réalisé avec différentes charges carbonées, mais il est crucial de purifier le gaz produit pour éliminer les impuretés telles que le monoxyde de carbone, qui peut être nocif pour certaines applications comme les piles à combustible.

2.4.5 Gazéification de la biomasse

Pour produire de l'hydrogène à partir de la biomasse, des différentes méthodes se présentent. La gazéification nous permis d'obtenir un gaz riche en hydrogène. L'obtention d'un produit intermédiaire tel que le biogaz ou du méthanol est sa transformation en hydrogène. La gazéification est une transformation thermochimique d'un solide combustible (charbon, bois, paille, ...) en présence d'un composé gazeux (O₂, air, CO₂, vapeur d'eau.). Le but de cette transformation est généralement de convertir le solide en un mélange gazeux combustible (Figure 2.4). Il se distingue donc de la pyrolyse, opération thermique s'effectuant en l'absence de gaz réagissant avec le solide, et de la combustion dans laquelle la plus grande partie du carbone contenu dans le solide est transformée en CO₂. La gazéification, d'un point de vue purement scientifique, se décrit comme une réaction endothermique hétérogène entre le carbone (C) contenu dans le solide et un gaz réactant qui peut être de la vapeur d'eau (H₂O) ou du dioxyde de carbone (CO₂) [27].



Sur le plan industriel, lorsqu'on parle de gazéification, l'objectif est donc de favoriser ces deux réactions (2.4) et (2.5), qui vont produire le gaz combustible. Cependant, pour se faire, il faudra préalablement ou simultanément générer les éléments nécessaires à ces deux réactions ; le

charbon (ou char) très concentré en carbone, les réactants CO_2 et H_2O ainsi qu'une quantité importante d'énergie.

Dans les procédés de gazéification, ces trois composantes sont produites par les réactions de pyrolyse ainsi que les oxydations homogène et hétérogène qui interviennent classiquement en combustion. Le pouvoir calorifique du gaz de synthèse obtenu varie classiquement de 3,5 à 6 MJ/Nm^3 selon sa concentration en divers gaz inertes tels que l'azote et dioxyde de carbone et dont la concentration dépend essentiellement des agents de gazéification utilisés et des procédés mis en œuvre. Cette valeur est largement supérieure dans les procédés de gazéification à l'oxygène ou la vapeur d'eau. Ce gaz contient aussi divers composés à l'état de traces, HCl , HF , NH_3 , HCN , métaux alcalins à l'état de vapeur et dont les proportions sont directement liées à la nature du combustible. Enfin, il contient une part plus ou moins importante de composés hydrocarbonés, plus communément appelés goudrons, résultant d'une réduction incomplète des produits de l'électrolyse de la première étape de la transformation. Leur concentration dans les gaz es fortement liée au type de réacteurs utilisés et, une fois encore, à la matière première [28].

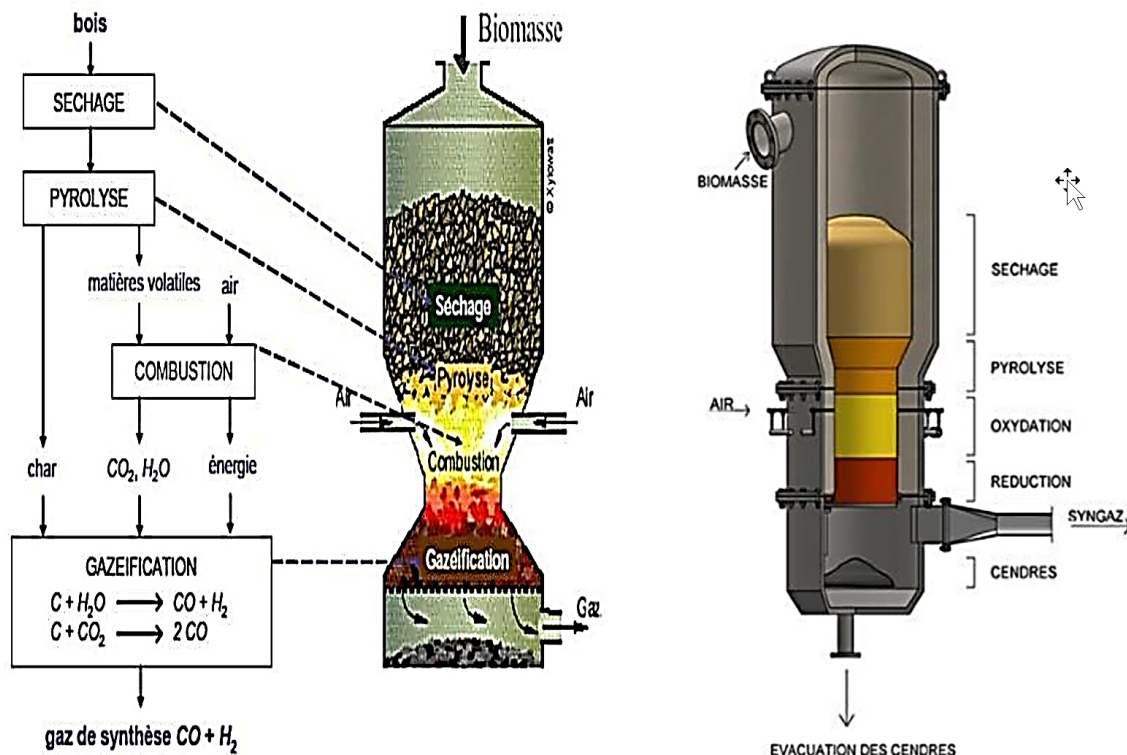


Fig. 2.4 Mécanismes et réactions mis en jeu lors du processus de gazéification [27].

Chapitre 3 :

L'Electrolyse de l'Eau et le Stockage de l'Hydrogène

3.1 Introduction

A ce jour, l'hydrogène est principalement obtenu 96 % de la production mondiale par reformage de gaz naturels ou d'hydrocarbures tels que le propane, l'essence, le gazole, le méthanol ou l'éthanol [28,29]. L'hydrogène produit de cette manière comporte un fort pourcentage d'impuretés gazeuses (CO, CO₂, composés soufrés...) et nécessite obligatoirement une étape de purification gazeuse. Mais surtout, utiliser les énergies fossiles pour produire de l'hydrogène, ne résout en rien les problèmes environnementaux liés à l'utilisation de ces énergies polluantes et non renouvelables. La qualification de l'hydrogène comme vecteur d'énergie « propre » dépend de la source d'énergie utilisée pour sa production. L'électrolyse de l'eau, même si elle ne représente aujourd'hui que quelques pourcents de la totalité de l'hydrogène produit, est néanmoins du plus haut intérêt car elle est un mode de production propre (pas d'émission carbone lorsqu'elle est couplée à une source d'énergie renouvelable) qui fournit de l'hydrogène de pureté élevée. Lors des dernières décennies, le prix de l'électricité a limité l'utilisation de cette technique ; cependant, avec l'émergence de l'exploitation des sources d'énergies renouvelables au caractère intermittent, l'électrolyse de l'eau, au vu de sa très bonne réactivité vis-à-vis des changements de régime, pourrait devenir le moyen de production d'hydrogène privilégié [30,31].

3.2 La production par électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau est un procédé aujourd'hui coûteux de production d'hydrogène, mis en œuvre industriellement, dans des installations de plusieurs mégawatts, pour produire de l'hydrogène de grande pureté lorsque l'électricité est disponible à faible coût. Elle pourrait se développer aussi bien dans de petites installations utilisant des énergies renouvelables que réalisée à grande échelle avec le recours à des réacteurs nucléaires à

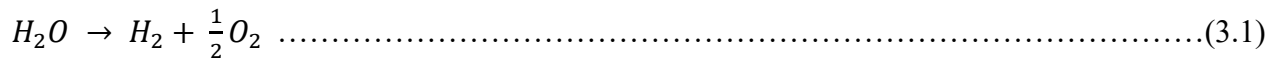
L'électrolyse de l'eau est, avec le vaporeformage ou la gazéification d'hydrocarbures, l'un des principaux procédés disponibles pour la production d'hydrogène, même si l'hydrogène ainsi produit ne représente aujourd'hui qu'une part négligeable, de l'ordre de 1%, de la production mondiale.



Fig. 3.1 Électrolyseur pour la production d'hydrogène conçu par Hydro Electrolyser [32].

Ce procédé est mis en œuvre industriellement, dans des installations de plusieurs mégawatts, pour produire de l'hydrogène de grande pureté lorsque l'électricité est disponible à faible coût ou en excès, par exemple, auprès du barrage d'Assouan en Égypte. Un principe simple

La décomposition de l'eau par électrolyse s'écrit globalement



Avec une enthalpie de réaction de 285 kJ/mole (à 298 K et 1 bar). L'apport d'énergie électrique dépend de cette enthalpie de réaction, de l'entropie de réaction et de la température. Le potentiel théorique de la décomposition à 298 K est de 1,481 V. Les valeurs classiques des potentiels de cellule dans les installations industrielles sont de l'ordre de 1,7 à 2,1 V. L'alimentation en eau d'un électrolyseur est de 0,8 L/Nm³ d'hydrogène, en pratique proche de 1 L/Nm³. L'eau utilisée doit être la plus pure possible, afin d'éviter l'accumulation de boues et les phénomènes de corrosion aux électrode Une cellule d'électrolyse est constituée de deux électrodes (anode et cathode, conducteurs électroniques) reliées à un générateur de courant continu et d'un électrolyte (milieu conducteur ionique). Dans l'électrolyse conventionnelle à basse température, l'électrolyse est généralement une solution aqueuse alcaline (hydroxyde de potassium - électrolyse industrielle) ou une membrane polymère échangeuse de protons (électrolyse de faible capacité).

Dans le cas de l'électrolyse avancée où l'eau est à l'état de vapeur, l'électrolyte est une membrane céramique conductrice d'ions [32].

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

3.3.1 Electrolyse alcaline

Depuis sa découverte en 1789 [33,34], l'électrolyse alcaline est devenue un procédé mature employé massivement par l'industrie [15]. Les électrodes sont plongées dans une solution aqueuse d'hydroxyde de potassium dont la concentration varie en fonction de la température (typiquement de 25 % en masse à 80 °C jusqu'à 40 % à 160 °C) ; les deux électrodes sont séparées par un diaphragme qui a pour fonction de séparer les gaz produits. Ce diaphragme n'étant pas complètement imperméable aux gaz, le mélange gazeux peut conduire à des conditions potentiellement dangereuses d'inflammabilité ou d'explosivité [16]. Du fait de la chute ohmique à travers le diaphragme et l'électrolyte liquide, les densités de courant applicables sont limitées, de l'ordre de 0,2-0,4 A cm⁻². De plus, à cause de l'utilisation d'un électrolyte liquide, cette technique peut difficilement être couplée à une source d'énergie intermittente (problèmes liés à la gestion thermique et à la modification de la conductivité de l'électrolyte lors de la mise en régime dans les périodes d'arrêt/démarrage et de variation de charge). L'électrolyte liquide limite aussi les pressions d'opération applicables (classiquement entre 30 et 50 bars). L'électrolyse alcaline est principalement développée au Canada et en Norvège par Hydrogenics® et NEL Hydrogen® en couplage avec l'énergie électrique d'origine nucléaire, récupérée pendant les heures creuses, pour la production d'ammoniaque [18]. Le coût de l'hydrogène produit varie fortement en fonction du prix de l'électricité ; il est de l'ordre de 3 € kg⁻¹ H₂ pour un prix de l'électricité de 40 €MWh⁻¹.

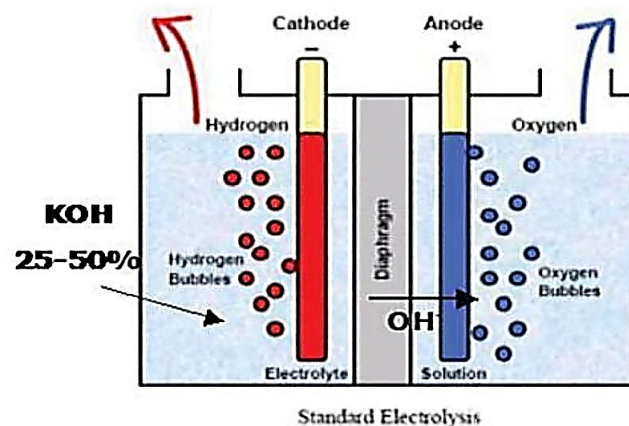
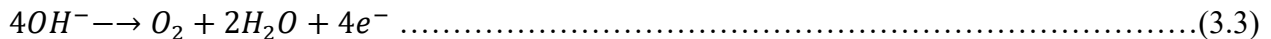
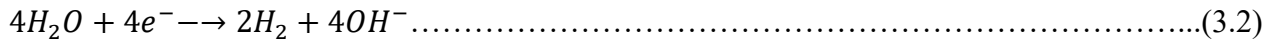


Fig. 3.2 Schéma de production d'hydrogène par l'électrolyse alcaline [35]



3.3.2 Electrolyse à haute température

Contrairement aux technologies d'électrolyse à basse température pour lesquelles le coût de production de l'hydrogène est constitué à 80 % par le coût d'approvisionnement en électricité, la technologie d'Electrolyse de la Vapeur d'Eau à Haute Température (EVHT) est basée sur l'apport d'une partie de l'énergie nécessaire à la décomposition de la molécule d'eau sous forme thermique, la chaleur étant a minima trois fois moins chère que l'électricité surtout lorsqu'elle provient des réacteur nucléaires. Au-delà de 600 °C, il existe des céramiques conductrices anioniques qui permettent de transporter les charges O^{2-} de la cathode vers l'anode ; contrairement aux autres techniques d'électrolyse, ce sont les ions O^{2-} qui traversent l'électrolyte pour se recombiner sous forme d'oxygène à l'anode. A la cathode, le gaz s'enrichit progressivement d'hydrogène pour délivrer un mélange de vapeur d'eau et d'hydrogène. Il est alors nécessaire de séparer l'hydrogène et l'eau par condensation et faire recirculer l'eau liquide qui doit de nouveau être vaporisée. L'assemblage des cellules d'électrolyse est assez complexe dans le cas de la haute température du fait de l'utilisation de fragiles céramiques, d'interconnecteurs rigides et de joints en verre ou en vitrocéramique (permettant d'éviter la recombinaison de l'hydrogène et de l'oxygène produit). La limitation intrinsèque à cette technologie provient alors du fonctionnement à ces niveaux de température ; les principaux enjeux identifiés sont la tenue des matériaux à ces températures (fragilisation des céramiques, endommagement lié aux contraintes lors de la dilatation des matériaux), la durabilité pendant les cycles (cycles redox en cas d'arrêts) et le coût. Les travaux sur l'EVHT, qui avaient débuté dans les années 80, ont repris début 2000 après une interruption faute de perspective de marché et ont bénéficié des recherches menées sur les piles à combustible à oxyde solide. Ces travaux ont principalement été soutenus par le DoE (Department of Energy) aux Etats-Unis et par la Commission Européenne. De bonnes performances ont été atteintes dès 2006 dans le cadre du projet européen Hi2H2 à des températures assez élevées (> 850 °C) grâce à la très bonne conductivité ionique de l'oxyde de zirconie utilisé comme électrolyte. D'après l'étude technico-économique réalisée dans le cadre de ce projet, le coût de production de l'hydrogène est de l'ordre de 2,3 € kg⁻¹ avec un coût d'électricité de 39 € MWh⁻¹ et une énergie thermique « gratuite » (couplage à une installation nucléaire). Cependant, certaines données ayant un impact majeur sur

le coût de l'hydrogène produit ont été omises dans les hypothèses de calcul (investissement initial et coût de maintenance sous-évalués, actualisation, durée d'exploitation, taux de disponibilité, dégradation, régularisation, on obtient un coût d'hydrogène de $3,8 \text{ € kg}^{-1} \text{ H}_2$.

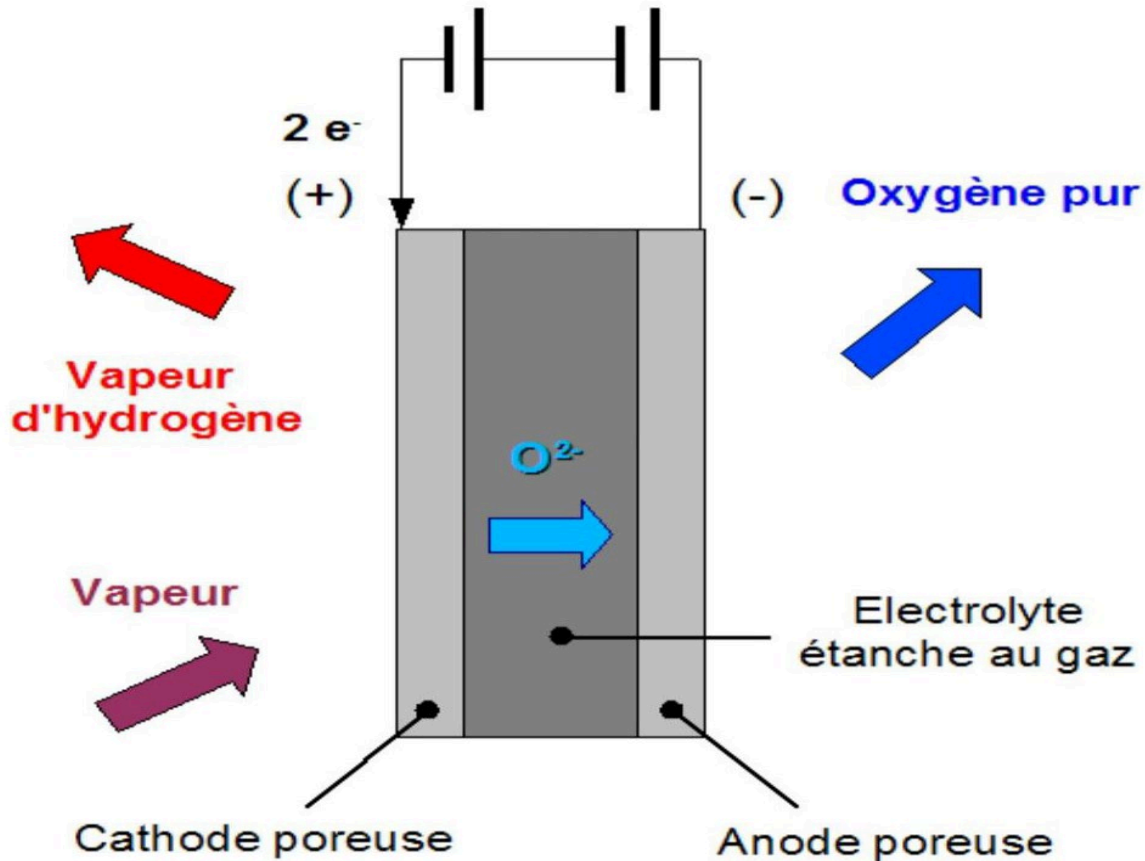


Fig. 3.3 Schéma de production d'hydrogène par l'électrolyse à haute température [36]

3.3.3 Electrolyse de l'eau à membrane échangeuse de protons

Le principe de l'électrolyse PEM diffère de celui de l'électrolyse alcaline par le fait que l'électrolyte est un électrolyte solide, composé d'une membrane conductrice de protons ; les électrodes sont déposées de part et d'autre de ce matériau polymère. Le premier électrolyseur basé sur un électrolyte solide a été développé dans les années 1960 par General Electric [37] ; le concept a ensuite été amélioré par W.T. Grubb avec l'utilisation d'une membrane de polystyrène sulfoné [38,39].

3.4 Comparaison des différentes techniques de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau

Le Tableau (3.1) suivant résume les principaux avantages et inconvénients des différentes techniques de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau.

| | Electrolyse alcaline | Electrolyse PEM | Electrolyse à haute température |
|-----------|---|---|--|
| Avantages | Technologie mature - Catalyseur non noble - Stack au niveau du MW | - Réponse rapide aux variations de charge - Compacité du système (fonctionnement à fortes densités de courant) - Haute pureté des gaz produits - Durabilité - Fonctionnement à haute pression | - Rendement électrique élevé - Diminution des coûts d'électricité nécessaire - Fonctionnement à haute pression - Catalyseur non noble - Compacité du système (fonctionnement à fortes densités de courant) |

| | | | |
|---------------|--|---|--|
| Inconvénients | <ul style="list-style-type: none"> - Faibles densités de courant - Faible pureté des gaz à cause de la perméation à travers le diaphragme - Systèmes non compacts à cause de l'utilisation d'un électrolyte liquide - Faibles pressions de fonctionnement - Délai de réponse lors de variations de régime | <ul style="list-style-type: none"> - Environnement très oxydant qui limite l'éventail de matériaux potentiellement utilisables - Coût des catalyseurs (métaux nobles), de l'électrolyte solide, des plaques bipolaires et des collecteurs de courant en titane - Stack inférieur au MW | <ul style="list-style-type: none"> - Développement à l'échelle du laboratoire - Durabilité |
|---------------|--|---|--|

Tableau 3.1 Comparatif des technologies de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau [40]

3.5 Technologies de stockage de l'hydrogène

Comme déjà indiqué, la demande d'hydrogène destiné à être consommé en tant que source d'énergie propre' accompagne d'une demande de stockage de cette source d'énergie propre, que ce soit pour stockage à bord des véhicules ou stockage en vrac stationnaire, comme les stations de ravitaillement en carburant pour les véhicules ou les usines de production d'hydrogène côte à côte destinés à l'industrie. Le stockage de l'hydrogène est problématique en raison de sa faible densité volumétrique et le coût élevé qui en résulte, et dans cette section, j'évalue l'aperçu de l'hydrogène technologies de stockage, tant du point de vue mobile que stationnaire. Les méthodes suivantes de stockage de l'hydrogène sont intéressantes [41] :

- Hydrogène liquide (LH2) : le stockage de l'hydrogène liquide est actuellement l'hydrogène en vrac support de stockage de choix et possède un bilan de sécurité très impressionnant. L'hydrogène est généralement liquéfié sur le site de production en grandes quantités (10 à 30 tonnes

par jour) puis transporté par camion à travers le pays dans des camions-citernes LH₂ de 11000 gallons sans aucune perte par évaporation. Malheureusement, les besoins énergétiques de la liquéfaction sont élevés, généralement 30 % de le pouvoir calorifique de l'hydrogène, ce qui entraîne un coût de l'hydrogène relativement élevé par rapport avec de l'hydrogène gazeux. LH₂ restera probablement la principale technique, stockage stationnaire d'hydrogène dans un avenir prévisible.

Les systèmes LH₂ des véhicules ont les fractions massiques d'hydrogène (H₂) les plus élevées et une des volumes système les plus bas, avec un risque de développement proche de zéro, bon rapide capacité de remplissage et caractéristiques de sécurité acceptables. Ils ont l'air d'être excellents choix, sauf deux facteurs défavorables : la dormance et l'impact sur les infrastructures. Des problèmes de dormance surviennent en raison des pertes par évaporation qui concerneront inévitablement le propriétaire de voiture moyen, même si utilisation quotidienne ou planification appropriée de l'itinéraire ou de la flotte les applications peuvent éliminer la plupart, sinon la totalité, des problèmes de dormance :

- (i) La liquéfaction le processus est coûteux ;
- (ii) La production de LH₂ à petite échelle n'est pas pratique

La distribution de faible volume de LH₂ est coûteuse. Par conséquent, LH₂ les systèmes ne supporteront pas facilement la transition d'un démarrage faible à un S2 robuste économie. Dans l'ensemble, le stockage de LH₂ est le plus approprié pour une économie de H₂ mature où les difficultés inhérentes (et le coût élevé) de la production à distance de LH₂ à grande échelle la distribution de LH₂ à très petite échelle sont les moins rencontrées.

- Hydrogène gazeux comprimé (GH₂) : systèmes d'hydrogène comprimé pour véhicules constitué d'hydrogène gazeux de 34,5 MPa dans un revêtement métallique ou plastique, les récipients sous pression enroulés en fibre de carbone offrent une simplicité de conception et d'utilisation, une teneur élevée en H₂ fraction, capacité de ravitaillement rapide, excellentes caractéristiques de dormance, minimum impact sur les infrastructures, sécurité élevée grâce à la force inhérente de la pression navire, et peu ou pas de risque de développement. Les inconvénients sont le volume du système et l'utilisation de haute pression. L'intégration du volume système modéré à important permettra défie clairement le concepteur automobile, mais un tel volume de

réservoir peut être emballé dans un véhicule « feuille propre ». De l'avis de cet auteur, les nombreuses avancées Les caractéristiques importantes du stockage de gaz comprimé l'emportent sur son volume plus important. Comme le stockage du gaz pressé peut être supporté par des installations de production de H₂ à petite échelle (sur site) usines de reformage de gaz naturel, brûleurs à oxydation partielle et stations d'électrolyse) ainsi que des installations de production de LH₂ à plus grande échelle. Ainsi, une infrastructure H₂ plausible il existe une voie de transition naturelle. Pour ces raisons, la température ambiante comprimée le stockage du gaz est considérée comme le système de stockage de carburant le plus approprié pour le carburant PEM véhicules cellulaires. Pour le stockage stationnaire de l'hydrogène, le GH₂ offre également les avantages de la simplicité et un stockage stable (pas de pertes par évaporation) mais à un volume considérablement supérieur à celui LH₂. Même en tenant compte des coûts de compression, l'hydrogène gazeux à haute pression est moins cher que le LH₂. Cependant, à l'exception du transport par pipeline, GH₂ ne dispose pas de l'essentiel transportabilité du LH₂. Par conséquent, le GH₂ sera principalement utilisé pour le stockage de quantités limitées d'hydrogène, pour un stockage à long terme, ou lorsque le coût de la liquéfaction est prohibitif. Les problèmes restants pour le GH₂ incluent sa perception de la sécurité, et le coût élevé actuel des appareils à pression et des compresseurs à hydrogène.

- Hydrures métalliques : les hydrures métalliques peuvent être subdivisés en deux catégories : faibles hydrures à température de dissociation et hydrures à température de dissociation élevée. Les hydrures à basse température souffrent d'une faible fraction H₂ (2 %). Le haut de température nécessite une source de chaleur pour générer la température élevée de dissociation (300 °C). Les deux systèmes offrent un stockage d'H₂ assez dense et une bonne caractéristique de sécurité. En effet, ce sont les mauvaises caractéristiques de dissociation (forte température, apport d'énergie élevé) qui créent de bonnes caractéristiques de sécurité (pas ou libération lente de H₂ lors d'un crash). Combinaison pour le stockage d'hydrogène dans les véhicules, en métal les hydrures sont soit beaucoup trop lourds, soit leurs besoins opérationnels sont médiocres adapté aux systèmes de véhicules PEM. Sans une percée spectaculaire fraction pondérale élevée, basse température, faible dissociation énergétique et charge rapide Avec le temps, les hydrures métalliques ne constitueront pas un support de stockage efficace pour les piles à combustible PEM. Véhicules. Pour le stockage stationnaire, le poids élevé du système à hydrure métallique n'est pas un problème. Par conséquent, leurs attributs de haute densité volumétrique de stockage et leur stabilité les

rendent très attrayants. Améliorer la résistance aux contaminants gazeux, les assurances et l'augmentation de la durée de vie des systèmes restent des obstacles à surmonter.

- *Adsorption du carbone* : l'hydrogène gazeux peut être adsorbé à la surface du carbone pour atteindre des densités volumétriques de stockage supérieures à celles de l'hydrogène liquide. Adhérer la capacité de soin est fortement augmentée par les basses températures (notamment températures cryogéniques) et par haute pression. En effet, des fractions importantes de l'hydrogène contenus dans les systèmes adsorbants de carbone sont en fait conservés sous forme gazeuse dans le volume interstitiel de l'adsorbant carboné. Les nanofibres de carbone sont particulières type de systèmes adsorbants de carbone qui peuvent exploiter un système fondamentalement différent mécanisme de stockage de l'hydrogène et permet ainsi d'améliorer considérablement la capacité de stockage. Cependant, le développement et l'évaluation des nanofibres sont à portée de main les premiers stades de développement et de caractérisation du système sont spéculatifs.

- *Microsphères* : les systèmes de stockage d'hydrogène à microsphères sont constitués de verre creux des sphères « chargées » d'hydrogène (300-500 °C, 27-62 MPa pendant une heure), et déchargé par chauffage (200-250 °C) et réduction de la pression. Les microsphères peuvent être pompées ou versées d'un réservoir à un autre, ce qui les rend viables pour le stockage d'hydrogène dans les véhicules. Dans l'ensemble, la caractérisation du système est immature. La durée de conservation des microsphères reste une préoccupation. En résumé, plusieurs techniques de stockage de l'hydrogène sont viables à la fois pour les véhicules, stockage populaire et stockage stationnaire en vrac. Cependant, aucun mécanisme de stockage n'est idéal. À mesure que la demande d'hydrogène augmente, l'industrie doit réagir en fournissant (et le stockage de l'hydrogène est adapté à la nouvelle classe de consommateurs et doit être sensibilisé le public dans son utilisation en toute sécurité [41]).

3.6 Comment fonctionne le stockage de l'hydrogène ?

Le stockage de l'hydrogène est une technologie clé pour le progrès de l'hydrogène et technologies de piles à combustible dans des applications telles que l'énergie stationnaire, l'énergie portable, et le transport. L'hydrogène possède l'énergie par masse la plus élevée de tous les carburants ; cependant, sa température ambiante basse La densité de température se traduit par une faible

énergie par unité de volume, nécessitant le développement de méthodes de stockage avancées offrant un potentiel d'augmentation de la densité énergétique.

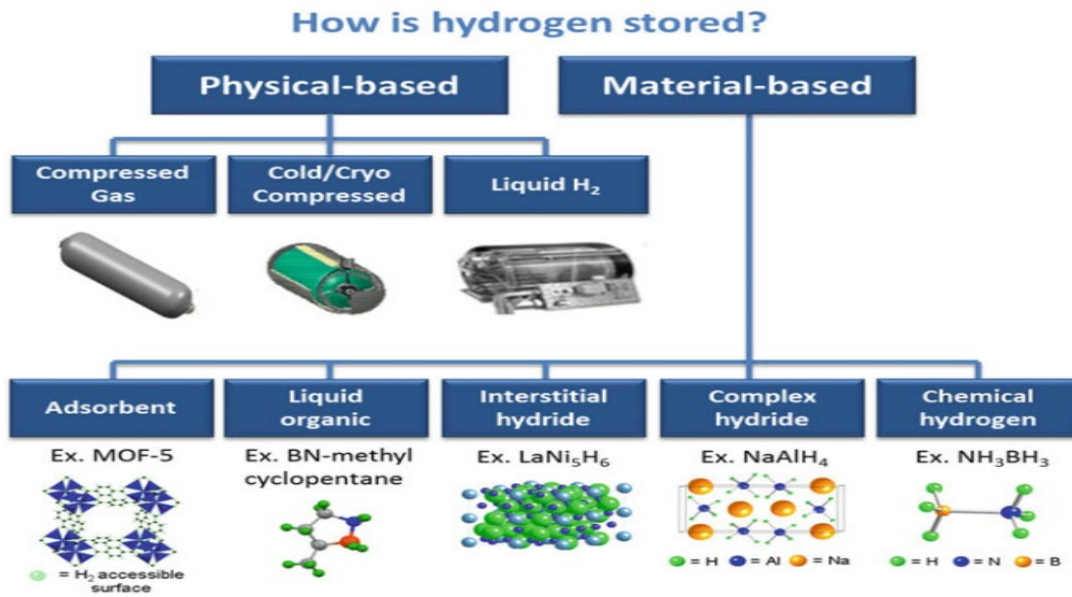


Fig. 3.4 Aperçu des technologies de stockage de l'hydrogène. (Avec l'aimable autorisation du Département américain de l'énergie) [43].

L'hydrogène peut être stocké physiquement sous forme gazeuse ou liquide. Stockage de l'hydrogène car un gaz nécessite généralement des réservoirs à haute pression (réservoir de 350 à 700 bars). Le stockage de l'hydrogène sous forme liquide nécessite des températures cryogéniques car le point d'ébullition de l'hydrogène à une pression de 1 atmosphère est de 252,8 C. L'hydrogène peut également être stocké à la surface des solides (par adsorption) ou à l'intérieur des solides par absorption. Comment stocker l'hydrogène de manière efficace, économique et sûre est l'un des défis à relever pour faire de l'hydrogène une source d'énergie économique. Un aperçu des technologies actuelles de stockage de l'hydrogène, à savoir les composés de gaz à haute pression La pression, la liquéfaction, le stockage des hydrures métalliques et l'adsorption des nanotubes de carbone sont illustré sur la figure 3.4. L'efficacité énergétique, les aspects économiques et les enjeux environnementaux et de sécurité de diverses technologies de stockage de l'hydrogène ont été comparées. Actuellement, la haute pression la compression du gaz est favorable en raison de son efficacité énergétique élevée ainsi que de son faible investissement et les coûts d'exploitation. La liquéfaction est principalement utilisée dans les applications spatiales car de sa haute efficacité

volumétrique et gravimétrique. Les inconvénients sont la faible consommation d'énergie efficacité et coût élevé. En raison de leur efficacité volumétrique élevée, les hydrures métalliques le stockage et l'adsorption des nanotubes de carbone sont des technologies prometteuses de stockage de l'hydrogène et devraient jouer un rôle clé dans l'économie de l'hydrogène à l'avenir.

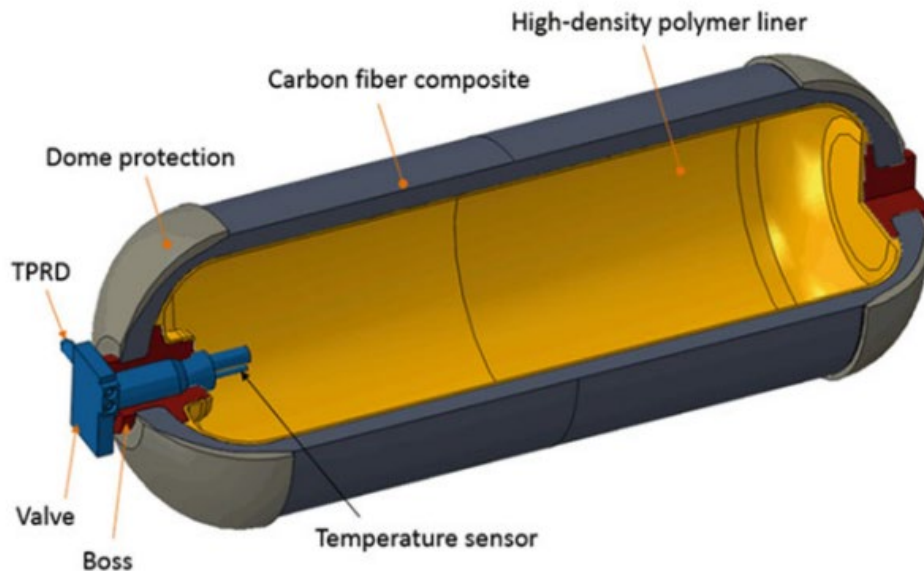


Fig. 3.5 Dispositif de décompression à activation thermique (TPRD). (Avec l'aimable autorisation de Process Modeling Groupe, Division Génie Nucléaire du Laboratoire National d'Argonne) [43].

3.7 Stockage physique de l'hydrogène

Le stockage physique est la technologie de stockage d'hydrogène la plus mature. La durée de la technologie pour le stockage physique de l'hydrogène à bord des véhicules automobiles est de 350 et Pression nominale de service de 700 bars pour les réservoirs de gaz comprimé. Alors que l'hydrogène liquide à basse pression, proche du point d'ébullition normal de 20 K, est couramment utilisé pour le stockage et le transport d'hydrogène en vrac, il existe actuellement peu d'activité de développement pour une utilisation à bord de l'automobile. Bien que l'eau comprimée soit généralement stocké à des températures proches de la température ambiante, supérieure à 150 K) et le stockage d'hydrogène comprimé « cryogénique » (150 K et moins) sont à l'étude en raison des densités d'hydrogène plus élevées qui peuvent être obtenues à températures réduites (Fig. 3.5).

3.8 Objectifs techniques et statut

Les systèmes de stockage d'hydrogène comprimé ont été démontrés dans des centaines de prototypes de véhicules à pile à combustible et sont disponibles dans le commerce à faible production. Bien que le stockage physique n'ait pas encore atteint tous les objectifs du DOE en matière de stockage embarqué automobile, de nombreux objectifs ont été atteints avec seulement quelques domaines clés nécessitant des améliorations supplémentaires, notamment la densité gravimétrique, la densité volumétrique, et le coût (Tableau 3.2) [42].

| Cibles du système de stockage | Densité gravimétrique [Système kWh/kg (kg H ₂ /kg système)] | Densité volumétrique [Système kWh/L (kg H ₂ /L système)] | Coût [USD/kWh (USD/kg H ₂)] |
|---|--|---|---|
| 2020 | 1,5 (0,045) | 1,0 (0,030) | 10 (333) |
| Ultime | 2,2 (0,065) | 1,7 (0,050) | 8 \$ (266) |
| Situation actuelle (d'Argonne Laboratoire National) | | | |
| 700 bars comprimés (type IV, | 1,4 (0,042) | 0,8 (0,024) | 15 cents (500 \$) |

Tableau 3.2 de performance du projet [43].

3.8.1 État et cibles pour la densité gravimétrique et volumétrique densité et coût

Le tableau 3.2 présente les performances projetées et le coût des produits automobiles comprimés et systèmes de stockage d'hydrogène par rapport à 2020 et aux objectifs ultimes du DOE.

3.8.2 Performance par rapport à tous les ministères de l'énergie

Le graphique des projections du système de la Fig. 3.6 montre comment un système conventionnel de type IV à 700 bars le système de stockage d'hydrogène comprimé à 300 K se compare à tous les systèmes du DOE Objectifs 2020 de stockage à bord des véhicules. L'espace bleu indique les performances actuelles et l'espace blanc indique les zones dans lesquelles les systèmes comprimés à 700 bars sont actuellement en deçà des objectifs du DOE pour 2020.

3.8.3 Coûts du système à hydrogène

Le coût des systèmes de gaz comprimé actuels pour les applications automobiles est dominant par le composite de fibre de carbone avec un impact significatif sur l'équilibre des plantes Composants. Les efforts actuels de recherche et de développement en matière de stockage physique se concentrent sur réduisant le coût de la partie composite renforcée par des fibres du récipient sous pression à aider à atteindre les objectifs du DOE. La figure3.5 montre la répartition des coûts pour 350 bars et 700 bars. Systèmes à hydrogène comprimé à réservoir unique de type IV à 500 000 unités [42].

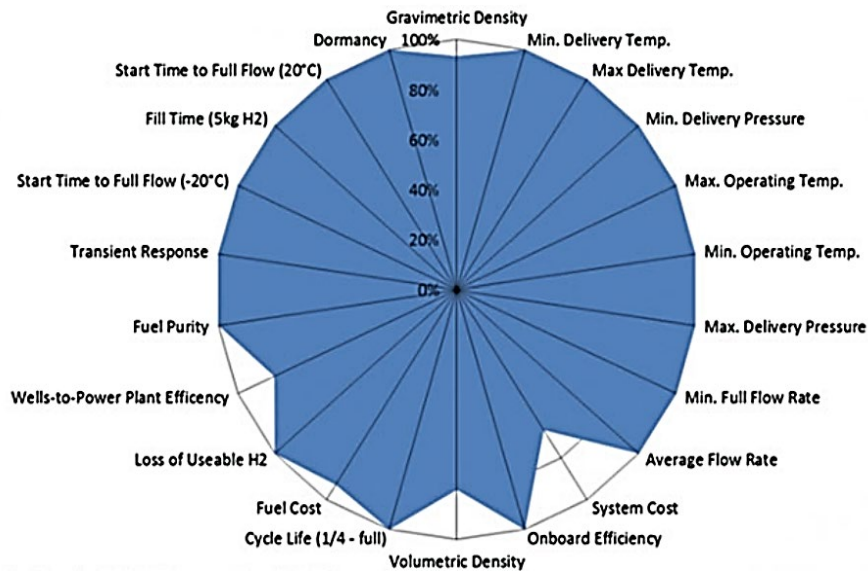


Fig. 3.6 Performance par rapport à tous les objectifs 2020 du Département américain de l'énergie (DOE). (Avec l'aimable autorisation du Département américain de l'énergie) [43].

Conclusion Générale

En raison de l'épuisement des réserves mondiales de combustible organique, qui est un vecteur énergétique pour les énergies non renouvelables, l'humanité est confrontée à la tâche de trouver et d'apprendre rapidement à utiliser efficacement de nouvelles sources d'énergie et de nouveaux vecteurs énergétiques. Le principal candidat au rôle d'un tel vecteur énergétique est l'hydrogène.

L'hydrogène a un avenir prometteur comme vecteur énergétique, mais des défis techniques et économiques restent à relever pour son déploiement à grande échelle. Bien que sa combustion soit non polluante, sa production doit être améliorée pour être plus propre et économique. Le stockage et la distribution de l'hydrogène sont également des points clés à développer.

Il existe deux variantes du procédé de base : l'électrolyse à haute pression et l'électrolyse à haute température. Dans l'électrolyse à haute pression, l'hydrogène est comprimé à environ 120 à 200 bars. En pressurant l'hydrogène dans l'électrolyseur, il n'est plus nécessaire d'utiliser un compresseur d'hydrogène externe, tandis que la consommation énergétique moyenne pour la compression interne est très faible, de l'ordre de 3 %. L'électrolyse à haute température, également appelée électrolyse à la vapeur, peut combiner l'électrolyse avec un moteur thermique. La température élevée augmente l'efficacité de la réaction d'électrolyse et le procédé est très efficace car l'énergie thermique est généralement moins chère que l'électricité.

L'électrolyse à haute température est une voie intéressante car elle permet une production plus efficace d'hydrogène à partir de l'eau, en utilisant moins d'électricité. Couplée à des sources d'énergie renouvelables, elle offre une solution durable. Cependant, les coûts actuels de l'hydrogène restent élevés comparés aux carburants fossiles. Malgré ces défis, de nombreux pays ont inscrit l'hydrogène dans leurs plans de développement durable, en y consacrant des moyens importants. Son utilisation dans les piles à combustible pour produire de l'électricité ou comme carburant contribue à réduire les émissions de CO₂. Avec les progrès attendus, l'hydrogène a donc un rôle clé à jouer dans la transition énergétique, en complément d'autres solutions renouvelables.

Malgré l'intérêt considérable que suscite l'hydrogène, sa production à partir d'électricité produite à partir de combustibles fossiles présente toutefois un inconvénient majeur, en raison des émissions liées au processus d'électrolyse. L'hydrogène n'est pas très prometteur en termes de réduction des émissions de gaz à effet de serre si le développement de l'économie de l'hydrogène

accroît la demande d'électricité produite à partir de combustibles fossiles. En revanche, l'utilisation d'hydrogène produit de manière propre peut changer fondamentalement notre relation avec l'environnement naturel.

L'hydrogène électrolytique pourrait être intéressant dans des régions comme l'Europe, l'Asie du Sud et de l'Est, l'Afrique du Nord et le sud-ouest des États-Unis, où les perspectives de combustibles dérivés de la biomasse sont limitées en raison de la forte densité de population ou du manque d'eau. Les besoins en terres sont faibles pour les sources éoliennes et solaires directes, par rapport à ceux des combustibles issus de la biomasse. De plus, comme pour l'électricité éolienne, la production d'hydrogène à partir du vent serait compatible avec l'utilisation simultanée des terres à d'autres fins telles que l'élevage ou l'agriculture. L'implantation dans des régions désertiques, où les terres sont bon marché et l'ensoleillement est bon, pourrait être privilégiée pour les systèmes PV-hydrogène car l'électrolyse nécessite peu d'eau. L'équivalent de 2 à 3 cm de pluie par an sur les capteurs – représentant une petite fraction des précipitations totales, même pour les régions arides – serait suffisant.

L'hydrogène produit par électrolyse ne sera probablement pas bon marché. Si l'hydrogène est produit à partir d'énergie éolienne ou photovoltaïque, le coût correspondant de l'hydrogène électrolytique sous pression pour le consommateur serait environ deux fois plus élevé que celui du méthanol issu de la biomasse. De plus, une voiture à pile à combustible à hydrogène coûterait plus cher qu'une voiture à pile à combustible au méthanol en raison du coût supplémentaire du système de stockage de l'hydrogène. Malgré ces dépenses supplémentaires, le coût du cycle de vie d'une voiture à pile à combustible à hydrogène serait légèrement plus élevé que celui d'une voiture à moteur à combustion interne à essence, soit à peu près le même que celui d'un véhicule électrique à batterie.

La transition vers une économie énergétique dans laquelle l'hydrogène joue un rôle majeur pourrait être lancée avec l'hydrogène issu de la biomasse. L'hydrogène peut être produit par voie thermochimique à partir de la biomasse en utilisant la même technologie de gazéification que celle utilisée pour la production de méthanol. Bien que les technologies de traitement du gaz en aval diffèrent de celles utilisées pour la production de méthanol, dans chaque cas, les technologies de traitement sont bien établies. Par conséquent, d'un point de vue technologique, produire de l'hydrogène à partir de la biomasse n'est pas plus difficile que produire du méthanol. L'hydrogène

issu de la biomasse livré aux utilisateurs du secteur des transports ne coûterait généralement que la moitié de l'hydrogène produit par électrolyse à partir de sources éoliennes ou photovoltaïques.

La meilleure façon d'utiliser l'hydrogène est probablement d'utiliser une pile à combustible. Une pile à combustible est un dispositif de conversion d'énergie électrochimique dans lequel l'hydrogène est converti en électricité. En général, les piles à combustible produisent de l'électricité à partir de sources externes de combustible (côté anode) et d'oxydant (côté cathode). Ces éléments réagissent en présence d'un électrolyte. En général, les réactifs entrent et les produits de réaction sortent tandis que l'électrolyte reste dans la pile. Les piles à combustible peuvent fonctionner en continu tant que les flux nécessaires sont maintenus. Une pile à hydrogène utilise l'hydrogène comme combustible et l'oxygène comme oxydant. Les piles à combustible diffèrent des batteries en ce qu'elles consomment des réactifs, qui doivent être réapprovisionnés, tandis que les batteries stockent l'énergie électrique chimiquement dans un système fermé. De plus, alors que les électrodes d'une batterie réagissent et changent lorsque celle-ci est chargée ou déchargée, les électrodes d'une pile à combustible sont catalytiques et relativement stables.

L'électrolyse de l'eau sous pression présente un grand intérêt technique. Lorsque 1 litre d'eau se décompose, il se forme ~ 1242 litres d'hydrogène et 621 litres d'oxygène, ce qui permet d'augmenter la pression d'environ 1800 fois lors d'une électrolyse en cuve fermée.

La réalisation du processus d'électrolyse de l'eau sous pression simplifie le schéma de production, car elle permet d'éviter l'installation de réservoirs de gaz et de compresseurs. Dans ce cas, l'hydrogène et l'oxygène sont immédiatement obtenus sous pression, sans dépenser d'énergie supplémentaire pour comprimer les gaz.

La production d'hydrogène par électrolyse de l'eau basée sur les technologies modernes est estimée à un coût compris entre 3 et 20 dollars par GJ, en fonction du coût de l'électricité et des investissements en capital dans les électrolyseurs.

On s'attend à ce que dans 10 à 15 ans, l'hydrogène dans les pays techniquement développés commence à remplacer activement et progressivement les vecteurs énergétiques organiques du marché de l'énergie.

Pendant la période de transition, des méthodes de transformation chimique des vecteurs énergétiques organiques et une transition progressive vers des méthodes directes de production par électrolyse seront activement utilisées pour produire de l'hydrogène.

Références Bibliographiques

- [1] Smil, Vaclav. *Energy and Civilization: A History*. Cambridge, Massachusetts, The MIT Press, 2017.
- [2] Cassedy, Edward S., and Peter Z. Grossman. *Introduction to Energy: Resources, Technology, and Society*. Second edition. Cambridge, United Kingdom, Cambridge University Press, 1998.
- [3] Kalogirou, Soteris. *Solar Energy Engineering: Processes and Systems*. Burlington, MA, Elsevier/Academic Press, 2023.
- [4] Mehmet Kanoglu, Yunus Cengel, John Cimbala. *Fundamentals and Applications of Renewable Energy*. McGraw-Hill Education, 2019.
- [5] Sit website [ourworldindata]
<https://ourworldindata.org/grapher/global-energy-consumption-source>.
- [6] https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/%C3%A9nergie_fossile/53118.
- [7] Sit website [Wikipedia]
https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_en_Alg%C3%A9rie
- [8] <https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/p%C3%A9trole/78896>
- [9] Sit website [lalgerieaujourd'hui]
<https://lalgerieaujourd'hui.dz/petrole-lalgerie-en-tete-de-ce-classement/>.
- [10] https://ar.wikipedia.org/wiki/%D8%BA%D8%A7%D8%B2_%D8%B7%D8%A8%D9%8A%D8%B9%D9%8A
- [11] Sit website [lapatrienews]
<https://lapatrienews.dz/gaz-naturel-lalgerie-a-exporte-56-milliards-de-m3-en-2022/>
- [12] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Charbon#Exploitation>
- [13] Sit website [ibelieveinsci]
<https://ibelieveinsci.com/wp-content/uploads/32055.jpg>
- [14] <https://deklic.eco/pollution-changement-climatiques-et-menaces-limpact-energies-fossiles/>
- [15] <https://acapros.fr/finance-et-eco/les-avantages-et-les-inconvenients-des-energies-non-renouvelables/?ext=yes>

- [16] Zohuri, Bahman. Hybrid Energy Systems: Driving Reliable Renewable Sources of Energy Storage. 2017.
- [17] <https://youmatter.world/fr/definition/energies-renouvelables-definition/>
- [18] https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_renouvelable
- [19] <https://particuliers.alpiq.fr/guide-energie/energie-renouvelable/energies-renouvelables-avantages-inconvenients>
- [20] Zohuri, Bahman. Physics of Cryogenic and Ultra-Low Temperature Phenomena. Elsevier, 2017.
- [21] <https://www.azocleantech.com/article.aspx?ArticleID=29>
- [22] Zohuri, Bahman. Nuclear Energy for Hydrogen Generation through Intermediate Heat Exchangers: A Renewable Source of Energy. Springer Cham, 2016.
- [23] <https://energy.gov/eere/fuelcells/fuel-cells>
- [24] http://change.gov/agenda/energy_and_environment_agenda/
- [25] CLEFS CEA - N50/51 - HIVER 2004-2005
- [26] J. LABBE l'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité thèse de doctorat l'école des mines paris 2006
- [27] Ni, M., Leung, D. Y. C. & Leung, M. K. H. A review on reforming bio-ethanol for hydrogen production. *Int. J. Hydrogen Energy* 32, 3238–3247 (2007)
- [28] Rostrup-Nielsen, J. R., Sehested, J. & Nørskov, J. K. Hydrogen and synthesis gas by steam- and CO₂ reforming. *Adv. Catal.* 47, (2002)
- [29] Gutiérrez-Martín, F. & Guerrero-Hernández, I. Balancing the grid loads by large scale integration of hydrogen technologies: The case of the Spanish power system. *Int. J. Hydrogen Energy* 37, 1151–1161 (2012).
- [30] Pickard, W. F., Shen, A. Q. & Hansing, N. J. Parking the power: Strategies and physical limitations for bulk energy storage in supply–demand matching on a grid whose input power is provided by intermittent sources. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 13, 1934–1945 (2009).
- [31] CLEFS CEA - N50/51 - HIVER 2004-2005
- [32] Trasatti, S. Water electrolysis: who first? *J. Electroanal. Chem.* 476, 90–91 (1999)
- [33] Troostwijk, A. P. van & Deiman, J. R. *Obs. Phys.* 35, 369 (1789)
- [34] Sit website [discover the greentech]

- <https://www.discoverthegreentech.com/hydrogene/production/electrolyse/alcaline/>
- [35] Sit website [Wikipedia]
https://fr.m.wikipedia.org/wiki/%C3%89lectrolyse_%C3%A0_haute_temp%C3%A9ra-ture.
- [36] Russel, J. H., Nuttall, L. J. & Fickett, A. P. Hydrogen generation by solid polymer electrolyte water electrolysis. *Chem. Soc. Div. Fuel Chem. Prepr.* 18, 24–40 (1973).
- [37] Grubb, W. T. Ionic migration in ion-exchange membranes. *J. Phys. Chem.* 63, 55–67 (1959).
- [38] Grubb, W. T. Batteries with solid ion exchange electrolyte I. secondary cells employing metal electrodes. *J. Electrochem. Soc.* 106, 275–278 (1959).
- [39] Sit website [Hal open science] submitted on 2 jan 2014
<https://theses.hal.science/tel-00923169>
- [40] B. D. James, Overview of Hydrogen Storage Technologies (Directed Technologies, Inc., Arlington)
- [41] Onboard type IV compressed hydrogen storage system-cost and performance status 2015, DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Record #: 15013, Dated: 9/30/2015, Update to: 13010, Originated by Grace Odaz, Cassidy Hochins, and Thanh Hua
- [42] Bahman, Zohuri. *Hydrogen Energy: Challenges and Solutions for a Cleaner Future.* Springer International Publishing, 2019.