

UNIVERSITÉ KASDI MERBAH - OUARGLA
FACIÈRE DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE



Mémoire présenté en vue de l'obtention d'une maîtrise

Domaine : Sciences technologique

Spécialité : Génie mécanique

Option : Ingénierie fabrication

Thème

**Conception et Optimisation d'un Générateur d'Hydrogène par
Électrolyse pour Applications Energétiques**

**Par :
BENDELLALI BELKHIR
BELAHCEN SIF EL ISLAM**

**Soutenu publiquement sur
08/06/2026**

Devant le jury composé de :

Mrs AMER TOUFIK	MCB	President
Mr KHALIF MAHDI	MCB	Examinator
Mr BOUOKBA MOUSTAPHA	MCB	Promoter

Année academies: 2025/2026

Résumé

Face à la dépendance aux énergies fossiles et aux émissions de CO₂, l'hydrogène vert apparaît comme un vecteur énergétique prometteur pour la décarbonation. Ce travail porte sur la conception et l'optimisation d'un générateur d'hydrogène par électrolyse, adapté au contexte algérien grâce à son fort potentiel solaire et éolien. Une revue des technologies d'électrolyse (alcalin, PEM, SOEC) met en évidence les critères de performance, de durabilité et de flexibilité. L'étude évalue également l'injection d'hydrogène vert dans un moteur diesel en mode dual fuel. Les résultats montrent une réduction significative de la consommation de gazole (jusqu'à 21,5 %) et des émissions de CO₂, CO et particules, mais une augmentation des NO_x. La solution la plus performante repose sur un compromis optimisé : un ajout modéré d'hydrogène (HES < 10 %) avec des réglages précis d'injection. Ce mémoire démontre le potentiel de l'hydrogène vert pour la transition énergétique en Algérie.

Mots-clés :

Hydrogène vert, électrolyse, électrolyseur PEM, moteur diesel dual fuel, énergies renouvelables, Algérie, réduction de consommation, émissions polluantes, optimisation énergétique.

الملخص

في ظل الاعتماد على الوقود الأحفوري وانبعاثات ثاني أكسيد الكربون، يظهر الهيدروجين الأخضر كحامل طاقة واعد لإزالة الكربون. يركز هذا العمل على تصميم وتحسين مولد هيدروجين عن طريق التحليل الكهربائي، بما يتناسب مع السياق الجزائري بفضل إمكانياته الشمسية والريحية العالية. يسلط استعراض الضوء على معايير الأداء (SOEC، PEM القلوي،) تقنيات التحليل الكهربائي والمتانة والمرونة. كما تقيم الدراسة حقن الهيدروجين الأخضر في محرك ديزل يعمل بالوضع المزدوج (ثنائي الوقود). تظهر النتائج انخفاضًا كبيرًا في استهلاك ، والجسيمات، CO، CO₂ الديزل (يصل إلى 21.5%) وانخفاضًا في انبعاثات يعتمد الحل الأكثر كفاءة على (NO_x) ولكن مع زيادة في أكاسيد النيتروجين مع إعدادات (HES < 10%) حل وسط محسّن: إضافة معتدلة للهيدروجين حقن دقيقة. تظهر هذه الأطروحة إمكانات الهيدروجين الأخضر للانتقال الطاقوي في الجزائر.

:الكلمات المفتاحية

، محرك PEM هيدروجين أخضر، تحليل كهربائي، محلل كهربائي من نوع ديزل ثنائي الوقود، طاقات متجددة، الجزائر، تقليل الاستهلاك، انبعاثات ملوثة، تحسين الطاقة.

Abstract

Faced with dependence on fossil fuels and CO₂ emissions, green hydrogen appears as a promising energy vector for decarbonization.

This work focuses on the design and optimization of a hydrogen generator by electrolysis, adapted to the Algerian context thanks to its high solar and wind potential. A review of electrolysis technologies (alkaline, PEM, SOEC) highlights the criteria of performance, durability, and flexibility. The study also evaluates the injection of green hydrogen into a diesel engine in dual fuel mode. The results show a significant reduction in diesel consumption (up to 21.5%) and CO₂, CO, and particulate emissions, but an increase in NO_x. The most efficient solution is based on an optimized compromise: moderate hydrogen addition (HES < 10%) with precise injection settings. This theme demonstrates the potential of green hydrogen for the energy transition in Algeria.

Keywords:

Green hydrogen, electrolysis, PEM electrolyzer, dual fuel diesel engine, renewable energy, Algeria, consumption reduction, pollutant emissions, energy optimization.



Remerciement

À Dieu,

Qui m'a donné la force, le courage et la persévérance pour accomplir ce chemin.

Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail de fin d'études.

je tiens à exprimer ma sincère gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail de fin d'étude.

Tout d'abord, je remercie chaleureusement à l'ensemble des enseignants et mon encadreur, pour son encadrement, ses précieux conseils et le temps qu'il/elle m'a accordé tout au long de ce projet et notre universités

KASDI MARBAH OUARGLA.

Mes plus profonds remerciements vont à mes parents et tout ma famille,, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien indéfectible tout au long de mes études. Ils ont toujours cru en moi et m'ont donné la force de poursuivre mes rêves. Rien de ce que j'ai accompli n'aurait été possible sans eux.

Enfin, un grand merci à mes amis pour leur soutien moral, leurs précieux conseils, et pour avoir su me changer les idées quand j'en avais besoin. Leur amitié m'a été d'un grand réconfort tout au long de cette aventure.



Dédicace

***Je dédie ce travail. ***

+À mes chers parents,

Pour votre amour, vos sacrifices et votre soutien sans faille tout au long de mon parcours. Rien de ce que j'ai accompli ne serait possible sans vous. Ce travail est le vôtre.

À mon/mes frère(s) et sœur(s),

Pour votre présence, vos encouragements et votre complicité.

À mon tuteur / ma tutrice de stage,

Pour votre disponibilité, votre patience et tous les précieux conseils que vous m'avez donnés.

À tous mes amis et proches,

Pour votre soutien moral et les moments de partage qui m'ont donné la force d'aller jusqu'au bout.

À toutes les personnes qui ont croisé mon chemin et m'ont appris quelque chose.

Liste des figures

Figure 2: Consommation énergétique mondiale 2024 [15].....6

Figure 3: Perspectives énergétiques mondiales 2050 [16].....7



Figure 4: Énergie mondiale liée aux émissions de CO2 [18].	11
Figure 5 : Évolution des émissions de CO2 en Algérie de 2016 à 2023 [17].	12
Figure 6 : Statistiques de l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA) pour 2021.	14
Figure 7 : Atlas des vents en Algérie à une altitude de 10 m au-dessus du sol [14].	15
Figure 8 : Illustration conceptuelle d'une éolienne couplée à un système d'électrolyse pour la production d'hydrogène vert.	26
Figure 9 : graphe représente une comparaison qualitative des trois principales technologies d'électrolyseurs	30
Figure 10 : Schéma illustrant le concept de stockage et d'utilisation de l'hydrogène, potentiellement à partir de l'énergie solaire.	32
Figure 11 : Données mondiales sur l'hydrogène bas carbone et le déploiement des électrolyseurs.	36
Figure 12 . Schéma général de la production d'hydrogène vert par électrolyse à partir d'énergies renouvelables.	38
Figure 13 . Plages d'indicateurs techniques rapportées pour les systèmes d'électrolyse.	39
Figure 14. Schéma explicatif d'un moteur diesel fonctionnant en mode dual fuel avec injection d'hydrogène.	41
Figure 15. Comparaison de la consommation de diesel dans plusieurs configurations expérimentales avec et sans hydrogène.	42
Figure 16. Tendance générale des émissions lors de l'ajout d'hydrogène dans un moteur diesel.	43
Figure 17. Chaîne de travail pour l'acquisition, l'analyse et l'interprétation des résultats.	46
Figure 18. Exemple de comparaison par graphique à barres entre plusieurs configurations diesel et diesel–hydrogène.	47
Figure 19. Exemple de synthèse visuelle des tendances d'émissions avec ajout d'hydrogène.	48
Figure 20 . Comparaison de la consommation avec et sans injection d'hydrogène vert dans plusieurs cas expérimentaux.	52

Figure 21 Comparaison du compromis entre un ajout modéré et un ajout élevé d'hydrogène.	53
Figure 22 . Démarche logique de sélection de la solution la plus performante.	54

Liste des tableaux

Tableau 1 : Comparaison du paysage énergétique mondial et algérien	10
Tableau 2: Potentiel solaire en Algérie [5].....	15
Tableau 3 : Comparaison entre l'hydrogène vert et l'hydrogène gris selon leurs caractéristiques énergétiques, économiques et environnementales	19
Tableau 4 : résumé les principales caractéristiques des trois technologies d'électrolyseurs.....	29
Tableau 5. Synthèse des critères de production d'hydrogène vert	40
Tableau 6. Paramètres expérimentaux importants pour l'injection d'hydrogène dans un moteur diesel.....	44
Tableau 7. Exemples de résultats rapportés dans la littérature	44
Tableau 8 Variables à acquérir pour l'analyse expérimentale	49
Tableau 9. Choix du mode de représentation graphique	49
Tableau 10 . Exemples d'indicateurs utiles pour l'interprétation	50
Tableau 11. Comparaison directe de la consommation avec et sans injection d'hydrogène vert	55
Tableau 12 . Principaux compromis à considérer pour choisir la solution la plus performante	55
Tableau 13. Critères de sélection de la solution la plus performante.....	56

Table des matières

Remerciement	5
<i>À Dieu, Qui m'a donné la force, le courage et la persévérance pour accomplir ce chemin.</i>	5
<i>Je tiens à adresser mes plus sincères remerciements à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail de fin d'études.</i>	5
<i>je tiens à exprimer ma sincère gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail de fin d'étude.</i>	5
<i>Tout d'abord, je remercie chaleureusement à l'ensemble des enseignants et mon encadreur, pour son encadrement, ses précieux conseils et le temps qu'il/elle m'a accordé tout au long de ce projet et notre universités KASDI MARBAH OUARGLA.</i>	5
<i>Mes plus profonds remerciements vont à mes parents et tout ma famille,, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien indéfectible tout au long de mes études. Ils ont toujours cru en moi et m'ont donné la force de poursuivre mes rêves. Rien de ce que j'ai accompli n'aurait été possible sans eux.</i>	5
<i>Enfin, un grand merci à mes amis pour leur soutien moral, leurs précieux conseils, et pour avoir su me changer les idées quand j'en avais besoin. Leur amitié m'a été d'un grand réconfort tout au long de cette aventure.</i>	5
Dédicace	6
Liste des figures	6
Liste des tableaux	9
Introduction générale	1
Introduction générale	1
Chapitre I : Contexte énergétique et potentiel de l'hydrogène par électrolyse	1
Chapitre I – Contexte énergétique et potentiel de l'hydrogène par électrolyse	4
1.2 Paysage énergétique mondial et algérien	5
1.2.1 Paysage énergétique mondial	5

1.2.1.1 Structure du mix énergétique mondial	5
1.2.1.2 Production énergétique mondiale.....	7
1.2.1.3 Transition énergétique et décarbonation	7
1.2.1.4 Rôle croissant de l'hydrogène	8
1.2.2 Paysage énergétique en Algérie	8
1.2.2.1 Structure du mix énergétique national	8
1.2.2.2 Consommation énergétique et évolution.....	8
1.2.2.3 Politique nationale de transition énergétique	9
1.2.2.4 Développement des énergies renouvelables.....	9
1.2.2.5 Position stratégique de l'Algérie dans l'hydrogène	9
1.2.3 Comparaison et enjoin	10
1.2.4 Dépendance aux combustibles fossiles et émissions (CO ₂)	10
1.2.5 Potentiel des énergies renouvelables en Algérie (solaire, éolien).....	13
Potentiel solaire-éolien en Algérie	16
Complémentarité solaire-éolien.....	16
1.3 Importance pour l'hydrogène vert.....	17
1.3 L'hydrogène vert comme vecteur énergétique durable.....	17
1.3.1.1 Principe de l'électrolyse de l'eau	17
1.3.1.2 Sources d'électricité renouvelable (PV, éolien).....	17
1.3.1.3 Types d'électrolyseurs (alcalin, PEM, SOEC).....	17
1.4 Rôle dans la décarbonation et l'économie de l'énergie	18
1.5.1 Comparaison avec la production d'hydrogène conventionnel (vaporeformage) ...	19
1.5.2 Avantages Économiques et Environnementaux pour l'Algérie.....	20
1.6 Conclusion	22

Chapitre 2 :	Revue de la littérature : électrolyseurs pour applications	
énergétiques		23
2.1 introductions		24
2.2 Technologies des Énergies Renouvelables Associées à l'Électrolyse		24
2.2.1 Énergie Éolienne pour l'Électrolyse : Exploiter la Puissance du Vent		25
2.2.1.1. Avantages et Défis du Couplage Éolien-Électrolyse		25
2.2.2 Énergie Solaire Photovoltaïque pour l'Électrolyse		26
2.2.2.1 Synergies et Optimisations dans les Systèmes PV-Électrolyse		26
2.3 Production d'Hydrogène Vert par Électrolyse		27
2.3.1 Électrolyseurs Alcalins, PEM et à Oxyde Solide :		27
2.3.1.1 Électrolyseurs Alcalins (AEL)		27
2.3.1.2 Électrolyseurs à Membrane Échangeuse de Protons (PEMEL)		27
2.3.1.3 Électrolyseurs à Oxyde Solide (SOEL)		28
2.4 Stockage et Utilisation de l'Hydrogène		31
2.4.1 Compression, Liquéfaction et Hydrures Métalliques : Solutions de Stockage		31
2.4.1.1 Stockage par Compression Gazeuse		31
2.4.1.2 Stockage par Liquéfaction Cryogénique		31
2.4.1.3 Stockage sous Forme d'Hydrures Métalliques		32
2.4.2 Applications Énergétiques : Carburant de l'Avenir		32
Piles à Combustible		33
Mobilité		33
Injection dans le Réseau		33
2.5 Conclusion		34
Chapitre 3 : Stimulations et résultats		35
3.1. Critères de production d'hydrogène vert par électrolyse		37

3.2. Injection d'hydrogène vert pour réduire la consommation de gazole dans un moteur diesel.....	40
3.3. Acquisition, analyse et interprétation des résultats à l'aide de circuits proportionnels ou de graphiques à barres	45
3. 4. Comparaison de la consommation avec et sans injection d'hydrogène vert et détermination de la solution la plus performante	51
3.5 conclusions	57
Conclusion.....	1
Les référencés	1

Introduction

générale

Introduction générale

Face aux enjeux énergétiques et environnementaux actuels, le monde connaît une transition progressive vers des systèmes énergétiques plus durables. La dépendance aux combustibles fossiles, responsables de la majorité des émissions de gaz à effet de serre, constitue une contrainte majeure pour le développement durable et la lutte contre le changement climatique. Dans ce contexte, la diversification du mix énergétique et l'intégration des énergies renouvelables apparaissent comme des solutions incontournables.

Cependant, le caractère intermittent des sources renouvelables telles que le solaire et l'éolien pose un défi important en matière de stockage et de gestion de l'énergie. Pour répondre à cette problématique, l'hydrogène s'impose comme un vecteur énergétique prometteur, capable de stocker l'énergie sous forme chimique et de la restituer selon les besoins. Selon les analyses de International Energy Agency et de International Renewable Energy Agency, l'hydrogène vert, produit par électrolyse de l'eau à partir d'énergies renouvelables, constitue un pilier stratégique pour la transition énergétique mondiale.

Dans ce cadre, l'Algérie dispose d'atouts considérables grâce à son important potentiel en énergies renouvelables, notamment solaire et éolien. Ce potentiel offre des perspectives prometteuses pour le développement de systèmes de production d'hydrogène vert à grande échelle. Néanmoins, la mise en œuvre de ces systèmes nécessite une maîtrise approfondie des technologies d'électrolyse, ainsi qu'une optimisation des performances énergétiques et économiques.

L'électrolyse de l'eau, en tant que technologie clé de production d'hydrogène vert, repose sur des processus électrochimiques complexes influencés par plusieurs paramètres tels que la température, la pression, la densité de courant et les caractéristiques des matériaux utilisés. Par conséquent, la conception d'un générateur d'hydrogène efficace nécessite une approche intégrée combinant modélisation, dimensionnement, choix technologique et optimisation.

A. Problématique

Malgré les avancées technologiques récentes, les systèmes d'électrolyse présentent encore plusieurs limitations, notamment :

- un rendement énergétique limité en raison des pertes électrochimiques et thermiques,
- un coût de production de l'hydrogène encore élevé,
- des contraintes liées à la durabilité des composants (membranes, électrodes, catalyseurs),
- une intégration complexe avec les sources d'énergies renouvelables intermittentes.

Ainsi, la problématique principale de ce travail peut être formulée comme suit :

B. Hypothèses de recherche

Afin de répondre à cette problématique, les hypothèses suivantes sont proposées :

1. **Hypothèse 1** : Une modélisation électrochimique et thermique précise permet de mieux comprendre les phénomènes internes de l'électrolyseur et d'identifier les sources principales de pertes énergétiques.
2. **Hypothèse 2** : L'optimisation des paramètres de fonctionnement (courant, température, pression) peut améliorer significativement le rendement global du générateur d'hydrogène.
3. **Hypothèse 3** : Le choix approprié des matériaux (membranes, électrodes, catalyseurs) contribue à augmenter la durabilité et les performances du système.
4. **Hypothèse 4** : L'intégration du générateur d'hydrogène avec des sources d'énergies renouvelables (solaire et éolien) permet de réduire le coût de production de l'hydrogène vert et d'améliorer la viabilité économique du système.

C. Objectif du travail (optionnel mais recommandé)

Ce travail vise à concevoir et optimiser un générateur d'hydrogène par électrolyse destiné à des applications énergétiques, en s'appuyant sur une approche intégrée combinant modélisation, simulation, conception et analyse technico-économique.

Chapitre I :

**Contexte énergétique et potentiel
de l'hydrogène par électrolyse**

Chapitre I – Contexte énergétique et potentiel de l'hydrogène par électrolyse

1.1 Introduction

Face à l'épuisement des réserves de combustibles fossiles et à l'urgence climatique liée aux émissions de gaz à effet de serre, la transition énergétique est devenue une priorité mondiale. Les énergies renouvelables, bien qu'abondantes, souffrent d'une intermittence qui limite leur intégration massive dans les réseaux électriques. Dans ce contexte, l'hydrogène vert apparaît comme un vecteur énergétique prometteur, capable de stocker et de transporter l'énergie renouvelable sur de longues périodes et de longues distances.

L'électrolyse de l'eau, alimentée par des sources d'électricité propre (solaire, éolien), constitue la méthode la plus durable pour produire de l'hydrogène à haute pureté, sans émission directe de CO₂. L'Algérie, grâce à son ensoleillement exceptionnel et à son potentiel éolien non négligeable, dispose d'atouts majeurs pour se positionner sur ce créneau stratégique.

Ce premier chapitre a pour objectifs de :

- Présenter le paysage énergétique mondial et algérien, en soulignant la dépendance aux fossiles et le potentiel renouvelable local.
- Décrire le principe de l'électrolyse de l'eau et les différentes technologies d'électrolyseurs (alcalin, PEM, SOEC).
- Analyser le rôle de l'hydrogène vert dans la décarbonation des secteurs industriels et énergétiques.
- Comparer la production d'hydrogène par électrolyse verte avec la voie conventionnelle (vaporeformage du gaz naturel).

Ainsi, ce chapitre pose les bases nécessaires pour comprendre l'intérêt et la faisabilité d'un générateur d'hydrogène par électrolyse couplé aux énergies renouvelables en Algérie.

La transition énergétique vise le passage d'un système carboné à un système durable, impliquant une électrification massive des usages. Néanmoins, certains secteurs tels que l'industrie lourde (sidérurgie, chimie), le transport lourd ou maritime et le stockage saisonnier d'énergie sont dits "hard-to-abate" (difficiles à décarboner par électrification directe). L'hydrogène intervient ici comme une passerelle indispensable. Le concept de "Power-to-X" (PtX) illustre cette synergie : l'électricité excédentaire est convertie en gaz (hydrogène ou méthane de synthèse) ou en liquides (ammoniac, méthanol) via l'électrolyse (Buttler & Spliethoff, 2018).

Selon l'Agence Internationale de l'Énergie, la demande mondiale en hydrogène a atteint près de 97 millions de tonnes ces dernières années, majoritairement satisfaite par des ressources fossiles. Les capacités installées d'électrolyseurs, qui ne représentaient que quelques dizaines de mégawatts au début des années 2010, connaissent une croissance exponentielle pour atteindre plusieurs gigawatts aujourd'hui (International Energy Agency, 2025). Le cadre conceptuel de l'économie de l'hydrogène repose donc sur un triptyque : (i) une électricité abondante et bas-carbone, (ii) des électrolyseurs efficaces et flexibles, (iii) une infrastructure de stockage et de distribution adéquate.

1.2 Paysage énergétique mondial et algérien

Le paysage énergétique mondial connaît une transformation profonde sous l'effet combiné de la croissance de la demande, des préoccupations climatiques et des avancées technologiques. Dans ce contexte, l'Algérie, pays fortement dépendant des hydrocarbures, s'inscrit progressivement dans une dynamique de transition énergétique visant à diversifier son mix énergétique.

1.2.1 Paysage énergétique mondial

1.2.1.1 Structure du mix énergétique mondial

À l'échelle mondiale, le système énergétique reste dominé par les énergies fossiles (pétrole, gaz naturel et charbon), qui représentent encore près de 80 % de la consommation primaire. Cependant, la part des énergies renouvelables (solaire, éolien, hydraulique, biomasse) connaît une croissance rapide, portée par les politiques climatiques et les engagements internationaux tels que l'Accord de Paris.

Les énergies renouvelables modernes, notamment le solaire photovoltaïque et l'éolien, enregistrent les taux de croissance les plus élevés grâce à la baisse significative des coûts technologiques et à leur modularité.

D'ici 2025, les marchés mondiaux de l'énergie sont sur le point de connaître une transformation continue. Si les prix du pétrole devraient généralement subir une pression à la baisse, en raison d'un excédent pétrolier mondial anticipé, la part des énergies renouvelables poursuit sa forte progression. Ces tendances convergentes soulignent une accélération de la mutation du paysage énergétique mondial.

Accélération de la demande énergétique mondiale : Contrairement au ralentissement observé lors des périodes précédentes, la demande énergétique mondiale a progressé de 2,2 % en 2024, un rythme nettement supérieur à la croissance annuelle moyenne de 1,3 % enregistrée entre 2013 et 2023. Cette accélération a été principalement tirée par le secteur de l'électricité, la consommation mondiale d'électricité ayant bondi de 4,3 %, soit près du double de la moyenne annuelle de la dernière décennie. [39].

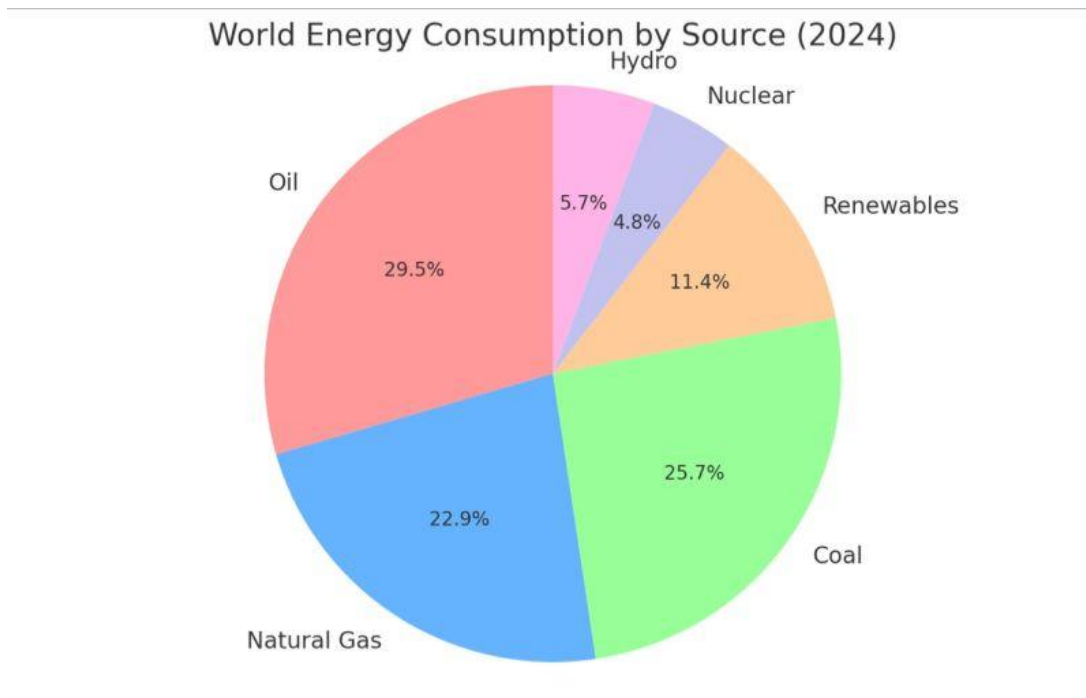


Figure 1: Consommation énergétique mondiale 2024 [15].

1.2..1.2 Production énergétique mondiale

Les combustibles fossiles (charbon, pétrole et gaz) sont la principale source d'émissions de dioxyde de carbone (CO₂) d'origine humaine, contribuant de manière significative au changement climatique mondial. Les estimations indiquent que la combustion de combustibles fossiles pour la production d'énergie est le principal facteur d'émissions, représentant plus de 75 % des émissions mondiales de gaz à effet de serre et près de 90 % des émissions totales de CO₂. [8].

D'ici 2025, la production et la consommation mondiales devraient se poursuivre, sous l'effet d'une croissance démographique qui dépassera les 8,2 milliards d'habitants (Bureau du recensement des États-Unis). Cette croissance devrait se maintenir, notamment dans les pays à forte population comme l'Inde (OCDE).

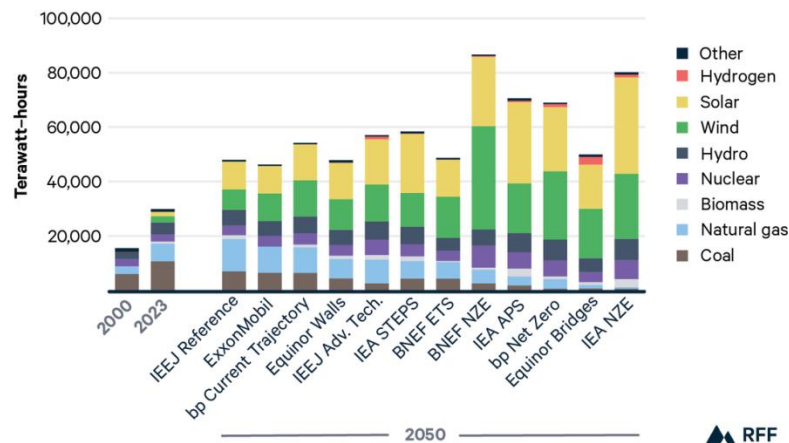


Figure 2: Perspectives énergétiques mondiales 2050 [16].

1.2.1.3 Transition énergétique et décarbonation

La transition énergétique mondiale vise à réduire les émissions de gaz à effet de serre, responsables du réchauffement climatique. Cette transition repose sur :

- le développement massif des énergies renouvelables
- l'amélioration de l'efficacité énergétique
- l'électrification des usages (transport, industrie)
- le développement de vecteurs énergétiques propres comme l'hydrogène

L'hydrogène, en particulier, est considéré comme un élément clé pour décarboner les secteurs difficiles à électrifier (industrie lourde, transport maritime, aviation).

1.2.1.4 Rôle croissant de l'hydrogène

L'hydrogène connaît un intérêt croissant à l'échelle internationale. Plusieurs pays (Allemagne, Japon, Chine) ont lancé des stratégies nationales pour développer une économie de l'hydrogène, avec un accent particulier sur l'hydrogène vert produit à partir d'énergies renouvelables.

Les principaux enjeux actuels sont :

- la réduction des coûts de production
- l'amélioration du rendement des électrolyseurs
- le développement des infrastructures de transport et de stockage

1.2.2 Paysage énergétique en Algérie

1.2.2.1 Structure du mix énergétique national

L'économie énergétique algérienne est fortement dominée par les hydrocarbures, qui représentent plus de 90 % de la production d'énergie primaire et des exportations. Le gaz naturel occupe une place centrale dans la production d'électricité, suivi du pétrole.

Cette dépendance expose le pays à :

- la volatilité des prix internationaux
- l'épuisement progressif des ressources
- les contraintes environnementales

1.2.2.2 Consommation énergétique et évolution

La demande énergétique en Algérie est en forte croissance, en raison :

- de l'augmentation de la population
- de l'urbanisation
- du développement industriel

Le secteur résidentiel et la climatisation contribuent fortement à cette hausse, notamment en période estivale.

1.2.2.3 Politique nationale de transition énergétique

Face à ces enjeux, l'Algérie a engagé une stratégie de transition énergétique visant à :

- diversifier le mix énergétique
- développer les énergies renouvelables
- réduire la consommation interne d'hydrocarbures

Le programme national prévoit le déploiement de plusieurs gigawatts de capacités renouvelables, principalement dans le solaire.

1.2.2.4 Développement des énergies renouvelables

Le potentiel solaire exceptionnel du pays constitue un atout majeur pour la transition énergétique. L'éolien, bien que moins développé, offre également des perspectives intéressantes.

Des projets pilotes ont été lancés pour :

- la production d'électricité solaire
- le développement de systèmes hybrides
- la production d'hydrogène vert

1.2.2.5 Position stratégique de l'Algérie dans l'hydrogène

Grâce à sa proximité géographique avec l'Europe, à l'existence d'importantes infrastructures gazières déjà développées ainsi qu'à son vaste potentiel en énergies renouvelables, notamment solaire et éolienne, l'Algérie dispose d'atouts stratégiques majeurs qui pourraient lui permettre de devenir un acteur clé dans la production et l'exportation de l'hydrogène vert vers les marchés internationaux.

Des initiatives de coopération internationale sont en cours pour explorer cette opportunité.

1.2.3 Comparaison et enjoin

Le tableau 1 présente une synthèse comparative du paysage énergétique à l'échelle mondiale et en Algérie. Il met en évidence les différences en termes de dépendance aux énergies fossiles, de développement des énergies renouvelables, ainsi que du rôle stratégique de l'hydrogène et du niveau d'avancement de la transition énergétique. Cette comparaison permet de situer la position de l'Algérie dans le contexte énergétique global et d'identifier les principaux défis et opportunités liés à sa transition vers un système énergétique durable.

Tableau 1 : Comparaison du paysage énergétique mondial et algérien

Critère	Monde	Algérie
Dépendance fossile	Élevée mais en baisse	Très élevée
Développement ENR	Rapide	En croissance
Hydrogène	Priorité stratégique	Opportunité émergente
Transition énergétique	Avancée	En phase initiale

1.2.4 Dépendance aux combustibles fossiles et émissions (CO₂)

L'Algérie est un pays riche en ressources fossiles et son économie est intrinsèquement liée à leur exploitation. En 2022, elle était le 16e producteur de pétrole et le 10e producteur de gaz naturel au monde. Les hydrocarbures représentaient 47% des recettes budgétaires et 86% des recettes d'exportation entre 2019 et 2023. Cette manne financière a permis au pays d'offrir une électricité bon marché et fiable à sa population, avec un taux d'accès à l'électricité de 99,8% en 2020. Cependant, cette dépendance a regalement des consequences significative:

A. Émissions de CO₂ : La production d'électricité en Algérie dépend à 99% du gaz naturel, ce qui génère d'importantes émissions de CO₂.

Les émissions mondiales de CO₂ liées à l'énergie ont poursuivi leur progression en 2024, atteignant un niveau record de 37,8 Gt de CO₂, soit une hausse de 0,8 % par rapport à 2023. Cette augmentation a contribué à des concentrations atmosphériques de CO₂ record, atteignant 422,5 parties par million (ppm), soit environ 3 ppm de plus qu'en 2023 et 50 % au-dessus des niveaux préindustriels. [10].

Principaux facteurs d'augmentation :

- B. **Gaz naturel** : Le gaz naturel a été le principal responsable de la croissance des émissions mondiales de carbone en 2024, avec une hausse d'environ 2,5 % (180 Mt CO₂). Cette augmentation est due à une consommation accrue dans des pays comme la Chine, les États-Unis, le Moyen-Orient et l'Inde. Il est de plus en plus admis que le gaz naturel, malgré sa réputation de « combustible de transition », contribue significativement à la croissance des émissions. [10].
- C. **Charbon** : La demande mondiale de charbon a augmenté de 1 % en 2024, principalement en raison des fortes vagues de chaleur en Chine et en Inde, qui ont accru les besoins en climatisation et, par conséquent, la production d'électricité à partir du charbon. La Chine est restée le plus grand consommateur de charbon. [10].
- D. **Électricité** : L'augmentation significative de la demande mondiale d'électricité (4,3 % en 2024) a contribué à la hausse des émissions, les combustibles fossiles continuant de satisfaire une part importante de cette demande. [11].

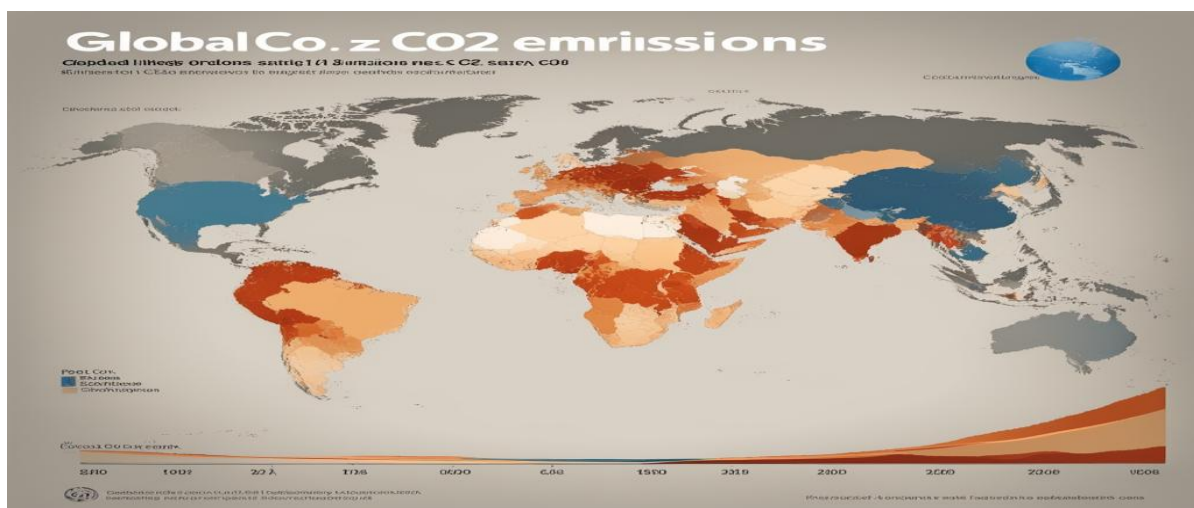


Figure 3: Énergie mondiale liée aux émissions de CO₂ [18].

Cette partie du travail porte sur l'Algérie, dont les émissions de dioxyde de carbone sont fortement influencées par la production d'énergie à partir du pétrole et du gaz. En 2018, l'Algérie se classait 83e sur 180 pays à l'Indice de performance environnementale (IPE). [2]. L'Algérie s'est engagée à respecter sa contribution déterminée au niveau national (CPDN) et a convenu de réduire ses émissions de gaz à effet de serre de 7 % d'ici 2030. Cet objectif est soutenu par le Programme national pour les énergies renouvelables, qui vise à ce que l'énergie solaire et éolienne représente 27 % du mix énergétique d'ici 2030. La figure 4 ci-dessous illustre l'évolution des émissions de dioxyde de carbone du pays. Ces émissions ont atteint 180 millions de tonnes en 2023. La tendance des émissions de dioxyde de carbone est à la hausse depuis une décennie, avec un taux de croissance moyen de 4,1 %, en raison de la demande énergétique croissante qui a entraîné une augmentation de la production d'électricité à partir de combustibles fossiles. [4].

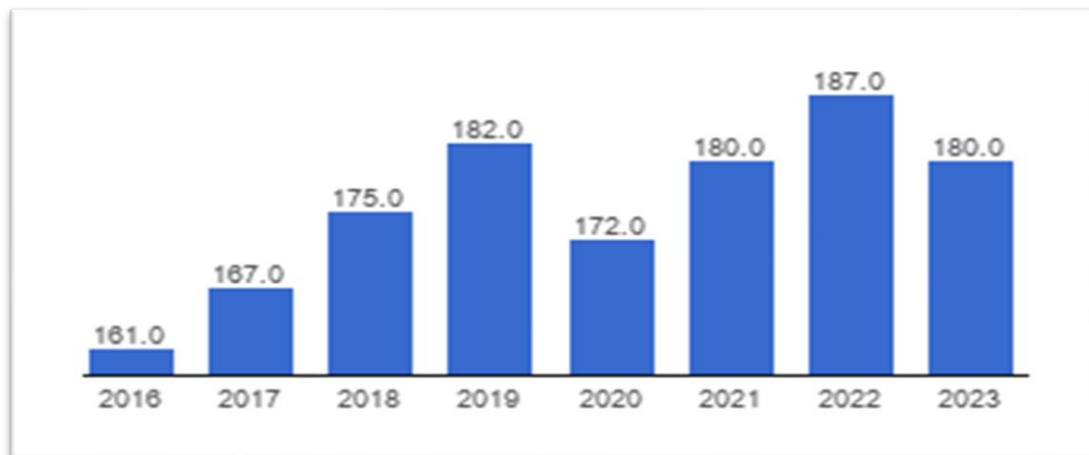


Figure 4 : Évolution des émissions de CO₂ en Algérie de 2016 à 2023 [17].

- **2016–2019** : L'Algérie a connu une augmentation constante de ses émissions de CO₂, passant de 154,6 à 168,2 millions de tonnes.
- **2020** : Une baisse notable a été observée, les émissions chutant à 161,6 millions de tonnes, probablement en raison de la réduction de l'activité industrielle pendant la pandémie de COVID-19.
- **2021** : Les émissions ont fortement rebondi pour atteindre 180,2 millions de tonnes, dépassant les niveaux d'avant la pandémie.
- **2022** : On a observé une légère baisse à 176,3 millions de tonnes.

- **2023** : Les émissions ont de nouveau augmenté pour atteindre 180,4 millions de tonnes, ce qui indique un retour à des niveaux d'émission plus élevés.

Cette tendance reflète l'évolution des activités économiques et des modes de consommation énergétique de l'Algérie au fil des ans.

- A. **Vulnérabilité Économique** : L'économie algérienne est très sensible aux fluctuations des prix du pétrole et du gaz, ce qui rend difficile la diversification et la stabilité à long terme.
- B. **Obstacles à la Transition** : Le puissant "lobby fossile", incarné par l'État lui-même et les entreprises publiques, freine le développement des énergies renouvelables et la transition énergétique.

Malgré les engagements pris dans le cadre de l'accord de Paris, l'Algérie peine à réduire sa dépendance aux énergies fossiles. Son programme de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique de 2012, qui visait une puissance installée de 22 000 MW d'origine renouvelable d'ici 2030, a eu du mal à se concrétiser.

1.2.5 Potentiel des énergies renouvelables en Algérie (solaire, éolien)

L'énergie solaire représente la ressource renouvelable la plus abondante en Algérie. Le pays est considéré comme l'un des plus riches au monde en termes de gisement solaire.

La durée moyenne d'ensoleillement varie entre **2 000 et 3 000 heures par an**, pouvant atteindre **3 900 heures dans les régions sahariennes**. L'irradiation solaire moyenne est estimée entre **1 700 kWh/m²/an au nord** et **plus de 2 500 kWh/m²/an dans le sud**. En termes d'énergie quotidienne, le rayonnement reçu peut atteindre **5 à 6,6 kWh/m²/jour** sur une grande partie du territoire.

Cette forte disponibilité solaire s'explique par :

- La localisation de l'Algérie dans la ceinture solaire mondiale,
- Une superficie composée à plus de **80 % de zones désertiques**,
- Une faible couverture nuageuse dans le sud.

Le potentiel photovoltaïque national est estimé à **plusieurs millions de TWh/an**, ce qui dépasse largement la consommation énergétique nationale et ouvre la voie à l'exportation d'électricité ou d'hydrogène.

Sur le plan stratégique, l'Algérie ambitionne de développer massivement cette ressource, avec des objectifs atteignant plusieurs gigawatts de capacité installée à l'horizon 2035

L'Algérie possède un potentiel important en énergies renouvelables, notamment solaire et éolienne, grâce à ses conditions géographiques et climatiques favorables. Le pays s'emploie activement à diversifier son mix énergétique, à réduire sa dépendance aux énergies fossiles (qui dominant actuellement son économie) et à satisfaire la demande intérieure croissante, tout en contribuant aux efforts mondiaux de décarbonation.

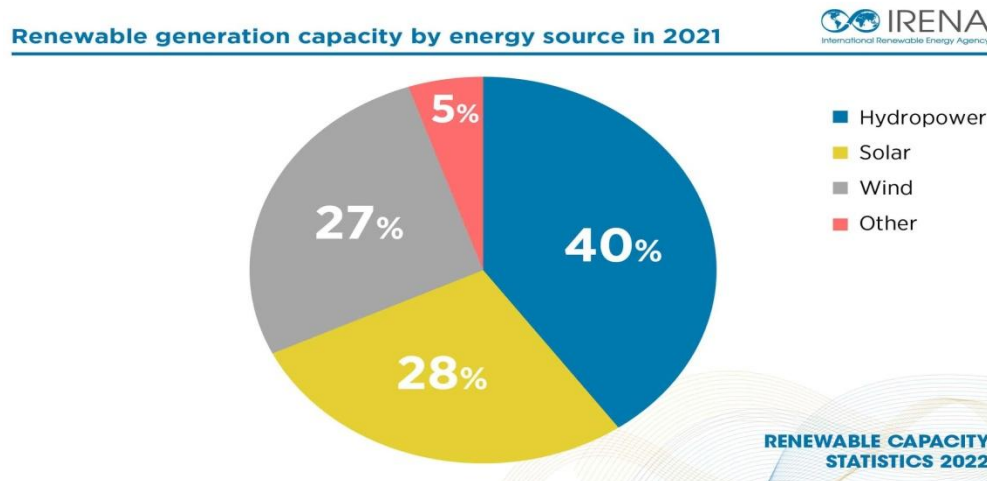


Figure 5 : Statistiques de l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA) pour 2021.

Énergie éolienne : Les ressources éoliennes en Algérie varient d'un endroit à l'autre en fonction de la topographie et du climat. Le pays est divisé en deux régions géographiques distinctes. Le nord du pays présente un littoral de plus de 1 600 kilomètres carrés et un relief montagneux, tandis que le désert se situe au sud. Plusieurs études ont été menées pour analyser le potentiel éolien du pays. Récemment, Y. Hamri et al. ont réalisé une étude afin de déterminer la faisabilité de la production d'énergie éolienne dans le sud-ouest de l'Algérie. [1].

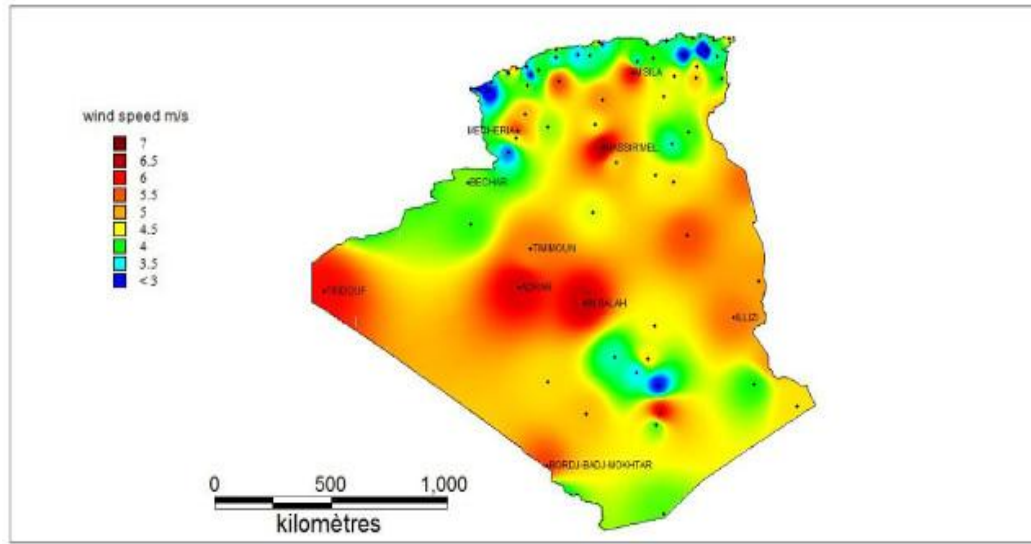


Figure 6 : Atlas des vents en Algérie à une altitude de 10 m au-dessus du sol [14].

Énergie solaire_: L'Algérie possède un potentiel considérable en matière d'énergies renouvelables, notamment solaire, grâce à ses vastes étendues désertiques, son fort ensoleillement et ses conditions climatiques favorables. Le pays bénéficie de 2 500 à 3 500 heures d'ensoleillement par an, avec un rayonnement solaire moyen de 5 à 7 kilowattheures (kWh), l'un des plus élevés au monde. Ceci s'explique par le fait que le désert couvre plus de 80 % du territoire algérien, offrant ainsi de vastes zones peu peuplées, idéales pour l'implantation de grandes centrales solaires. [5].

Tableau 2: Potentiel solaire en Algérie [5].

Métrique	Zone côtière	Zone intérieure
Surface (%)	4%	10%
Durée moyenne du lever du soleil (heures/an)	2650 heures/an	3000 heures/an
Énergie moyenne reçue (kWh/m²/ année)	1700 kWh/m ² /année	1900 kWh/m ² /année

Potentiel solaire–éolien en Algérie

Bien que moins exploité que le solaire, le potentiel éolien en Algérie reste significatif, notamment dans certaines régions spécifiques.

Les vitesses de vent varient généralement entre **2 et 6 m/s**, avec des zones favorables situées dans :

- les hauts plateaux,
- les régions du sud (Adrar, Tindouf),
- certaines zones côtières .

Selon des études internationales, le potentiel éolien théorique de l'Algérie pourrait atteindre environ **7 700 GW**, ce qui place le pays parmi les régions prometteuses en Afrique.

Cependant, le développement réel reste limité :

- Capacité installée encore faible (quelques dizaines de MW),
- contraintes liées à l'intermittence,
- nécessité d'infrastructures adaptées.

L'exemple de la centrale éolienne de Kabertène (Adrar) illustre les premières étapes de l'exploitation de cette ressource.

Complémentarité solaire–éolien

L'un des principaux avantages du mix énergétique algérien réside dans la complémentarité entre ces deux ressources :

- Le **solaire** est maximal en journée et en été
- L'**éolien** peut être plus important la nuit et en hiver

Cette complémentarité permet :

- Une meilleure stabilité de la production
- Une alimentation plus régulière des électrolyseurs
- une réduction de l'intermittence

1.3 Importance pour l'hydrogène vert

Le potentiel combiné solaire-éolien offre des conditions idéales pour :

- Alimenter des électrolyseurs à grande échelle
- Produire de l'hydrogène vert à faible coût
- Développer une économie basée sur l'export d'énergie propre

1.3 L'hydrogène vert comme vecteur énergétique durable

L'hydrogène vert est considéré comme une solution incontournable pour la décarbonation et la lutte contre le changement climatique. Sa production par électrolyse de l'eau, alimentée par des sources d'électricité renouvelable, en fait un vecteur énergétique propre et durable.

1.3.1.1 Principe de l'électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau est un processus électrochimique qui consiste à décomposer l'eau (H_2O) en hydrogène (H_2) et en oxygène (O_2) en utilisant un courant électrique. La réaction fondamentale est la suivante :

Pour que l'hydrogène produit soit qualifié de "vert", l'électricité utilisée pour l'électrolyse doit provenir de sources d'énergie renouvelable, telles que l'énergie solaire ou éolienne.

1.3.1.2 Sources d'électricité renouvelable (PV, éolien)

L'Algérie, avec son fort potentiel solaire et éolien, est idéalement positionnée pour produire de l'hydrogène vert. L'intégration de l'électrolyseurs aux parcs solaires et éoliens permet de maximiser l'utilisation de l'énergie renouvelable et de produire de l'hydrogène de manière durable. L'eau utilisée pour l'électrolyse doit être déminéralisée pour assurer un fonctionnement optimal des cellules d'électrolyse.

1.3.1.3 Types d'électrolyseurs (alcalin, PEM, SOEC)

Il existe principalement trois types d'électrolyseurs pour la production d'hydrogène à partir de l'eau, chacun ayant ses propres caractéristiques, avantages et inconvénients :

1. Électrolyseurs Alcalins (AEL) :

- Utilisent une solution d'hydroxyde de potassium (KOH) comme électrolyte.
- Technologie mature et moins coûteuse.
- Moins adaptés aux variations rapides de charge, ce qui peut être un inconvénient pour le couplage direct avec des énergies renouvelables intermittentes.

2. Électrolyseurs à Membrane Échangeuse de Protons (PEMEL) :

- Utilisent une membrane polymère solide comme électrolyte.
- Plus compacts et réactifs, ils sont particulièrement adaptés au couplage avec des sources d'énergie renouvelable intermittentes (solaire, éolien).
- Coût plus élevé et nécessitent des matériaux plus rares (platine, iridium).

3. Électrolyseurs à Oxyde Solide (SOEC) :

- Fonctionnent à haute température (700-1000 °C).
- Offrent une efficacité électrique supérieure en utilisant la chaleur résiduelle de processus industriels.
- Encore en développement et plus complexes à mettre en œuvre.

Le choix de l'électrolyseur dépendra des conditions spécifiques du projet, notamment la disponibilité de l'énergie renouvelable, les exigences de flexibilité et les contraintes économiques.

Le graphique radar ci-dessus compare les principaux types d'électrolyseurs selon des critères tels que le coût initial, la flexibilité, la maturité technologique, l'efficacité et la maintenance, offrant une perspective sur leurs atouts et faiblesses respectifs dans le contexte de la production d'hydrogène vert.

1.4 Rôle dans la décarbonation et l'économie de l'énergie

L'hydrogène vert est bien plus qu'un simple combustible ; il est un vecteur énergétique polyvalent qui peut jouer un rôle crucial dans la décarbonation de plusieurs secteurs difficiles à électrifier directement, tels que l'industrie lourde, les transports et la production d'engrais. Pour l'Algérie, l'investissement dans l'hydrogène vert représente une opportunité de diversifier son économie, de réduire sa dépendance aux combustibles fossiles et de devenir un acteur clé de la transition énergétique mondiale.

1.5.1 Comparaison avec la production d'hydrogène conventionnel (vaporeformage)

Actuellement, la majeure partie de l'hydrogène est produite à partir de combustibles fossiles, principalement par vaporeformage du gaz naturel. Ce processus, bien que mature et moins coûteux, est fortement émetteur de CO₂. La distinction entre l'hydrogène "gris" (issu des fossiles sans capture de carbone), "bleu" (avec capture de carbone) et "vert" (issu des énergies renouvelables) est essentielle pour comprendre l'impact environnemental de sa production.

Tableau 3 : Comparaison entre l'hydrogène vert et l'hydrogène gris selon leurs caractéristiques énergétiques, économiques et environnementales

Caractéristique	Hydrogène Vert (Électrolyse Renouvelable)	Hydrogène Gris (Vaporeformage)
Source d'énergie	Énergies renouvelables (solaire, éolien, hydraulique)	Gaz naturel, charbon, pétrole
Émissions de CO ₂	Très faibles ou nulles (si l'électricité est verte)	Élevées
Coût de production	Actuellement plus élevé, mais en baisse rapide	Moins élevé actuellement
Impact environnemental	Faible, contribue à la décarbonation	Élevé, contribue au changement climatique
Flexibilité de production	Élevée, peut s'adapter aux variations des EnR	Stable, dépend de l'approvisionnement en fossiles
Maturité technologique	En développement rapide et déploiement croissant	Très mature et répandue

Ce tableau compare les principales caractéristiques de l'hydrogène vert produit par électrolyse à partir de sources renouvelables et de l'hydrogène gris produit par vaporeformage, soulignant les avantages environnementaux de l'hydrogène vert malgré un coût de production encore plus élevé.

L'analyse comparative entre l'hydrogène vert et l'hydrogène gris met en évidence une opposition claire entre performance environnementale et maturité technico-économique. En effet, l'hydrogène gris, produit principalement à partir du vaporeformage des hydrocarbures, demeure aujourd'hui la technologie dominante à l'échelle mondiale en raison de son faible coût et de sa maturité industrielle. Toutefois, cette filière est associée à des émissions significatives de CO₂, ce qui constitue un frein majeur dans le contexte actuel de lutte contre le changement climatique.

À l'inverse, l'hydrogène vert, produit par électrolyse de l'eau alimentée par des sources renouvelables, présente un avantage environnemental considérable, avec des émissions quasi nulles. Selon les rapports de International Energy Agency et de International Renewable Energy Agency, cette technologie joue un rôle clé dans les stratégies de décarbonation à long terme, notamment pour les secteurs difficiles à électrifier.

Cependant, malgré ses avantages, l'hydrogène vert reste actuellement plus coûteux en raison du prix de l'électricité renouvelable et des investissements nécessaires pour les électrolyseurs. Néanmoins, plusieurs études scientifiques montrent que la baisse rapide des coûts des énergies renouvelables et les progrès technologiques devraient rendre cette filière compétitive dans les prochaines décennies.

Par ailleurs, la flexibilité de production de l'hydrogène vert constitue un atout majeur, car elle permet une intégration efficace avec les énergies renouvelables intermittentes, contrairement à l'hydrogène gris qui dépend d'un approvisionnement continu en ressources fossiles. Enfin, bien que la technologie du vaporeformage soit largement maîtrisée, les systèmes d'électrolyse connaissent un développement rapide, soutenu par des politiques énergétiques internationales ambitieuses.

L'hydrogène vert est la seule voie viable pour atteindre les objectifs de décarbonation à long terme. L'Algérie, en tirant parti de ses vastes ressources renouvelables, peut se positionner comme un exportateur majeur d'hydrogène vert, créant de nouvelles opportunités économiques et renforçant sa souveraineté énergétique.

1.5.2 Avantages Économiques et Environnementaux pour l'Algérie

- **Diversification Économique :** Réduction de la dépendance aux revenus des hydrocarbures et création de nouvelles industries.
- **Sécurité Énergétique :** Diminution de la vulnérabilité aux fluctuations des prix mondiaux des fossiles.
- **Leadership Régional :** Positionnement de l'Algérie comme un acteur clé dans la production et l'exportation d'hydrogène vert en Afrique et en Europe.

- **Réduction des Émissions :** Contribution significative aux objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre du pays.

L'Algérie demeure fortement dépendante des combustibles fossiles, le gaz naturel assurant près de 99 % de la production nationale d'électricité. Le secteur des hydrocarbures représente également une part essentielle de l'économie nationale, contribuant à environ 47 % des recettes budgétaires et à 86 % des exportations. Cette forte dépendance rend l'économie vulnérable aux fluctuations des marchés énergétiques internationaux et ralentit la transition vers des sources d'énergie plus durables.

Toutefois, le pays dispose d'un potentiel considérable en énergies renouvelables. Grâce à l'un des gisements solaires les plus importants au monde, l'Algérie a lancé des projets visant à développer jusqu'à 3200 MW de capacité solaire photovoltaïque. Le potentiel éolien est également significatif, avec des projets prévus pouvant atteindre 1000 MW, notamment dans les régions sahariennes.

Dans ce contexte, l'hydrogène vert apparaît comme une solution prometteuse pour accompagner la transition énergétique. Il est produit par électrolyse de l'eau selon la réaction :



Cette technologie utilise de l'électricité issue de sources renouvelables telles que l'énergie solaire photovoltaïque et l'énergie éolienne. Plusieurs technologies d'électrolyse sont actuellement disponibles, notamment l'électrolyse alcaline (AEL), l'électrolyse à membrane échangeuse de protons (PEM) et l'électrolyse à oxyde solide (SOEC).

Contrairement à l'hydrogène conventionnel produit par vaporeformage du gaz naturel, qui génère d'importantes émissions de dioxyde de carbone (CO₂), l'hydrogène vert constitue une alternative propre contribuant à la décarbonation des secteurs industriels et énergétiques. Pour l'Algérie, son développement représente une opportunité stratégique de diversification économique, de renforcement de la sécurité énergétique, de positionnement comme leader régional dans les énergies propres et de réduction des émissions de gaz à effet de serre (GES).

Cette carte mentale illustre le parcours de l'Algérie, de sa forte dépendance aux énergies fossiles à son immense potentiel en énergies renouvelables, et le rôle pivot de l'hydrogène vert dans sa stratégie de décarbonation et de développement économique.

Le graphique à barres ci-dessus illustre la situation actuelle de l'Algérie en matière de transition énergétique, mettant en évidence sa forte dépendance aux fossiles et ses importants potentiels solaire et éolien, tout en signalant les défis liés à l'investissement dans l'hydrogène vert et la maturité du cadre légal.

1.6 Conclusion

L'Algérie est à un moment charnière de son développement énergétique. Sa richesse en hydrocarbures lui confère un rôle stratégique sur la scène mondiale, mais cette dépendance est insoutenable à long terme face aux impératifs climatiques et à la volatilité des marchés. Le potentiel immense du pays en énergies renouvelables, notamment solaire et éolien, offre une voie prometteuse pour une transition énergétique réussie. L'hydrogène vert, produit par électrolyse à partir de ces sources propres, se présente comme un pilier essentiel de cette transition, permettant à l'Algérie non seulement de décarboner son économie mais aussi de se positionner comme un acteur majeur dans la production et l'exportation de cette énergie du futur. Pour concrétiser cette vision, des investissements massifs dans les infrastructures renouvelables et les technologies d'électrolyse, ainsi qu'un cadre réglementaire incitatif, seront cruciaux pour surmonter les obstacles existants et libérer le plein potentiel de l'Algérie dans l'ère de l'énergie verte.

Chapitre 2 :

**Revue de la littérature :
électrolyseurs pour
applications énergétiques**

2.1 introductions

En tant qu'étudiant en maîtrise en énergies renouvelables, votre recherche sur les électrolyseurs pour les applications énergétiques est cruciale pour l'avancement des technologies d'hydrogène vert. Ce plan détaillé de revue de la littérature vous guidera à travers les aspects fondamentaux, les technologies clés, les défis et les opportunités liés à la production, au stockage et à l'utilisation de l'hydrogène vert. L'hydrogène vert, produit par l'électrolyse de l'eau à l'aide d'énergies renouvelables, est un pilier essentiel de la transition énergétique mondiale, offrant une solution pour décarboniser divers secteurs comme l'industrie lourde, le transport et le stockage d'énergie à grande échelle.

Points Saillants

- **L'électrolyse alimentée par les énergies renouvelables** est la pierre angulaire de la production d'hydrogène vert, avec des avancées significatives dans l'intégration de l'énergie solaire et éolienne.
- Les **électrolyseurs alcalins, PEM et à oxyde solide** sont les principales technologies, chacune ayant des caractéristiques uniques en termes d'efficacité, de coût et de durabilité, dictant leur application optimale.
- La **gestion du caractère intermittent des énergies renouvelables** est un défi majeur, mais l'électrolyse offre une solution de stockage d'énergie flexible, améliorant la stabilité du réseau.

2.2 Technologies des Énergies Renouvelables Associées à l'Électrolyse

L'intégration de l'électrolyse avec les sources d'énergie renouvelables est fondamentale pour la production d'hydrogène vert. Cette section explorera les spécificités de l'énergie éolienne et solaire photovoltaïque en tant que moteurs de l'électrolyse, soulignant leurs avantages, défis et les progrès réalisés.

2.2.1 Énergie Éolienne pour l'Électrolyse :

L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable de plus en plus populaire pour alimenter les électrolyseurs. Sa disponibilité croissante et son coût en baisse en font un candidat idéal pour la production d'hydrogène vert. L'intégration de l'énergie éolienne avec l'électrolyse peut se faire de différentes manières, notamment par couplage direct où les éoliennes alimentent directement les électrolyseurs, ou par couplage indirect via le réseau électrique.

2.2.1.1. Avantages et Défis du Couplage Éolien-Électrolyse

L'un des principaux avantages de l'énergie éolienne est sa capacité à produire de l'électricité à grande échelle, en particulier avec les parcs éoliens offshore. Cette approche permet de produire de l'hydrogène vert avec des émissions de gaz à effet de serre (GES) très faibles ou nulles. De plus, l'utilisation de l'excédent d'électricité éolienne, qui pourrait autrement être mis en veille en raison de la variabilité de la production et des contraintes du réseau, peut être efficacement convertie en hydrogène, offrant une forme de stockage d'énergie.

Cependant, la nature intermittente de l'énergie éolienne pose des défis importants. Les électrolyseurs doivent être capables de s'adapter aux fluctuations de puissance. Les systèmes modernes, en particulier les électrolyseurs à membrane échangeuse de protons (PEM), sont bien adaptés à cette variabilité grâce à leur temps de réponse rapide et leur large plage de fonctionnement dynamique. Des projets de recherche, tels que le projet H2Mare, visent à intégrer directement les électrolyseurs dans les éoliennes offshore pour une production d'hydrogène encore plus efficace, réduisant le besoin de connexions réseau coûteuses et complexes.



Figure 7 : Illustration conceptuelle d'une éolienne couplée à un système d'électrolyse pour la production d'hydrogène vert.

2.2.2 Énergie Solaire Photovoltaïque pour l'Électrolyse

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est une autre source d'énergie renouvelable majeure pour la production d'hydrogène vert. Les panneaux solaires convertissent la lumière du soleil en électricité, qui est ensuite utilisée pour alimenter les électrolyseurs. L'avantage du solaire est sa large disponibilité et sa modularité, permettant des installations à petite et grande échelle.

2.2.2.1 Synergies et Optimisations dans les Systèmes PV-Électrolyse

Les systèmes PV-électrolyseurs fonctionnent en convertissant directement l'énergie solaire en énergie électrique pour l'électrolyse. Des avancées significatives ont été réalisées dans l'amélioration de l'efficacité de conversion solaire-hydrogène (STH), avec des systèmes atteignant des rendements supérieurs à 30 %. Ces systèmes sont prometteurs pour la production d'hydrogène vert à grande échelle. L'intégration directe des modules photovoltaïques avec les électrolyseurs est une approche courante, bien que la variabilité du rayonnement solaire présente des défis pour le dimensionnement efficace.

La recherche se concentre sur des systèmes PV-électrolyseurs plus efficaces et à faible coût, capables de récolter l'ensemble du spectre de la lumière du soleil. De plus, l'utilisation de l'énergie

solaire pour produire de l'hydrogène offre une alternative aux batteries pour le stockage d'énergie, particulièrement pour le stockage saisonnier où les batteries peuvent être moins pratiques en raison de leur capacité limitée. Des solutions innovantes incluent le refroidissement des panneaux PV flottants par l'eau pour améliorer leur efficacité de conversion d'énergie solaire, qui est ensuite utilisée pour produire de l'hydrogène vert à partir de la même eau.

2.3 Production d'Hydrogène Vert par Électrolyse

L'électrolyse est le processus central de la production d'hydrogène vert. Elle utilise l'électricité pour diviser l'eau en hydrogène et en oxygène. Cette section détaillera les principaux types d'électrolyseurs et leurs caractéristiques distinctives.

2.3.1 Électrolyseurs Alcalins, PEM et à Oxyde Solide :

Il existe trois principales technologies d'électrolyseurs utilisées pour la production d'hydrogène vert, chacune avec ses propres avantages et inconvénients, qui les rendent plus ou moins adaptées à des applications spécifiques.

2.3.1.1 Électrolyseurs Alcalins (AEL)

Les électrolyseurs alcalins sont une technologie mature et bien établie, souvent utilisée pour des productions d'hydrogène à grande échelle. Ils fonctionnent en utilisant une solution aqueuse alcaline (généralement KOH) comme électrolyte et des électrodes non nobles.

- **Avantages :** Coût relativement faible, longue durée de vie, grande capacité de production, peuvent utiliser des matériaux d'électrodes moins chers.
- **Défis :** Temps de réponse plus lent, moins adaptés aux sources d'énergie intermittentes, pureté de l'hydrogène souvent inférieure, fonctionnement à des densités de courant plus faibles.

2.3.1.2 Électrolyseurs à Membrane Échangeuse de Protons (PEMEL)

Les électrolyseurs PEM utilisent une membrane polymère solide comme électrolyte, ce qui permet des densités de courant élevées et une production d'hydrogène très pure. Ils sont particulièrement bien adaptés aux sources d'énergie renouvelables variables comme le vent et le solaire.

- **Avantages :** Temps de réponse rapide, compacts, pureté élevée de l'hydrogène, adaptés aux sources d'énergie intermittentes, grande plage de fonctionnement dynamique.
- **Défis :** Coût plus élevé en raison de l'utilisation de matériaux précieux (platine, iridium) comme catalyseurs, exige de l'eau ultra-pure.

2.3.1.3 Électrolyseurs à Oxyde Solide (SOEL)

Les électrolyseurs à oxyde solide fonctionnent à des températures très élevées (500-850 °C), ce qui leur permet d'utiliser la chaleur résiduelle de processus industriels ou de la vapeur pour réduire la consommation électrique nécessaire à la division de l'eau. Ils sont également capables de co-électrolyse, divisant H₂O et CO₂ pour produire de l'hydrogène et du monoxyde de carbone (syngas).

- **Avantages :** Efficacité électrique élevée grâce à l'utilisation de la chaleur, potentiel de production de syngas, absence de métaux précieux.
- **Défis :** Fonctionnement à haute température, ce qui entraîne des contraintes matérielles et des temps de démarrage/arrêt plus lents, rendant difficile leur couplage direct avec des sources d'énergie renouvelables intermittentes sans tampon.

2.3.3 Comparaisons de l'Efficacité, du Coût et de la Durabilité

La sélection d'une technologie d'électrolyseur dépend de plusieurs facteurs, notamment l'efficacité énergétique, le coût d'investissement et d'exploitation, la durabilité et l'adaptabilité à la source d'énergie renouvelable. Le tableau ci-dessous résume les principales caractéristiques de ces technologies.

Tableau 4 : résumé les principales caractéristiques des trois technologies d'électrolyseurs.

Caractéristique	Électrolyseurs Alcalins (AEL)	Électrolyseurs PEM (PEMEL)	Électrolyseurs à Oxyde Solide (SOEL)
Température de Fonctionnement	50-90 °C	50-80 °C	500-850 °C
Électrolyte	Solution aqueuse de KOH	Membrane polymère solide	Céramique solide (oxyde)
Maturité Technologique	Établie, mature	Commerciale, en croissance rapide	En développement commercial
Coût d'Investissement	Faible à modéré	Modéré à élevé (catalyseurs)	Élevé (matériaux haute temp.)
Efficacité Électrique	50-70%	50-80%	70-90% (avec récupération de chaleur)
Temps de Réponse	Lent	Rapide	Lent
Pureté de l'Hydrogène	Bonne (nécessite purification)	Élevée	Élevée
Durabilité	Élevée, longue durée de vie	Bonne, en amélioration	Dépend de la stabilité des matériaux à haute temp.
Adaptabilité aux Renouvelables	Moyenne (moins pour intermittence)	Très bonne (pour intermittence)	Moyenne (nécessite gestion thermique)

Le choix entre ces technologies dépendra des objectifs spécifiques du projet, tels que la disponibilité de la chaleur résiduelle, la variabilité de la source d'énergie renouvelable, les exigences de pureté de l'hydrogène et les contraintes budgétaires.

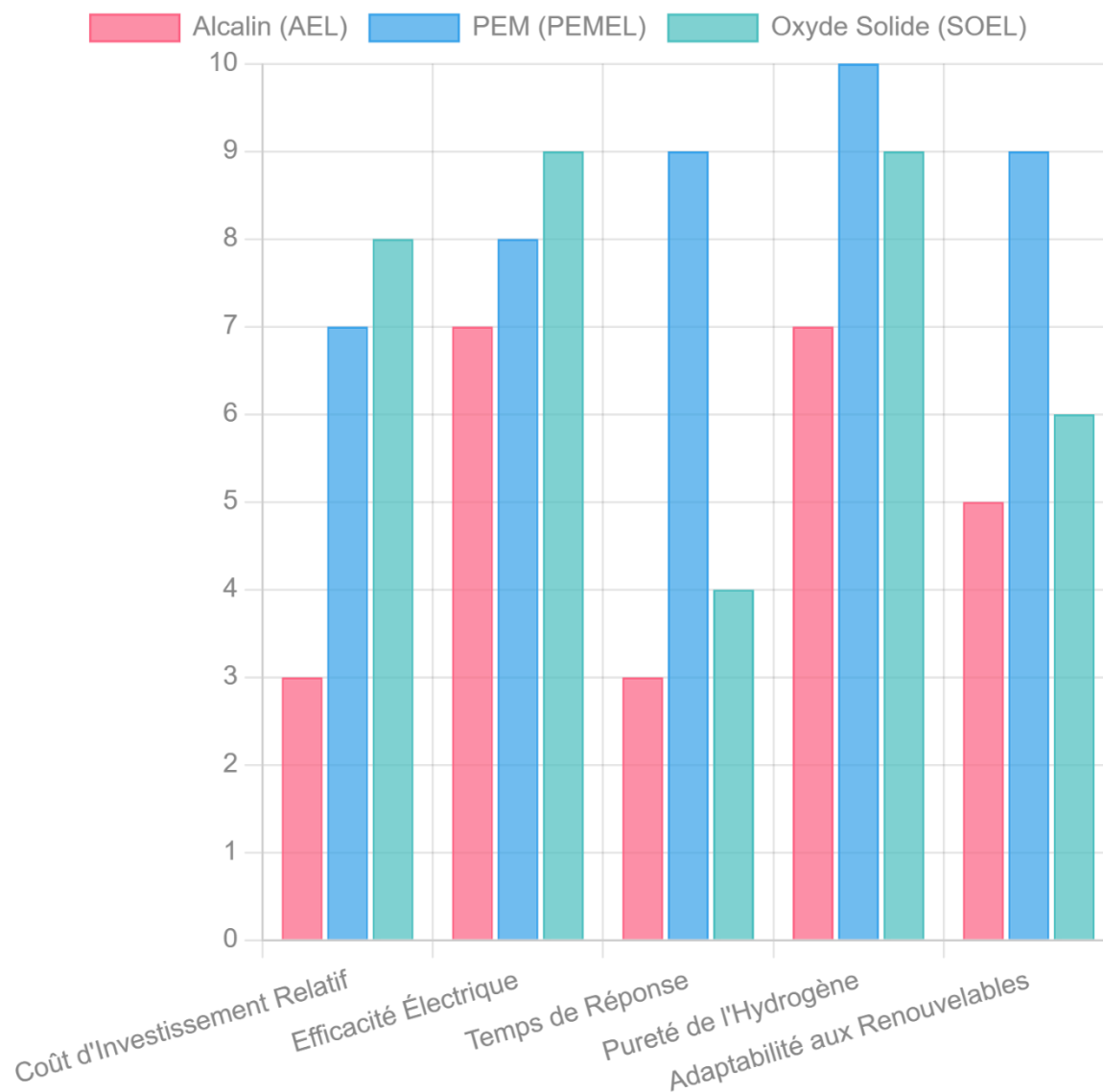


Figure 8 : graphe représente une comparaison qualitative des trois principales technologies d'électrolyseurs

Le graphique à barres ci-dessus illustre une comparaison qualitative des trois principales technologies d'électrolyseurs basées sur des critères clés tels que le coût d'investissement relatif, l'efficacité électrique, le temps de réponse, la pureté de l'hydrogène et l'adaptabilité aux sources d'énergie renouvelables intermittentes. Ces valeurs sont opinionnées et représentent une évaluation générale des technologies dans l'état actuel de la recherche et du déploiement. Il met en évidence que, bien que les électrolyseurs PEM aient un coût d'investissement relatif plus élevé, leurs avantages en termes de temps de réponse et d'adaptabilité aux énergies renouvelables les rendent très attrayants pour l'hydrogène vert.

2.4 Stockage et Utilisation de l'Hydrogène

Une fois l'hydrogène vert produit, son stockage et son utilisation efficaces sont essentiels pour sa viabilité en tant que vecteur énergétique. Cette section examine les méthodes de stockage et les applications énergétiques potentielles.

2.4.1 Compression, Liquéfaction et Hydrures Métalliques : Solutions de Stockage

Le stockage de l'hydrogène est un défi en raison de sa faible densité énergétique volumétrique. Plusieurs méthodes sont à l'étude et en développement pour stocker l'hydrogène de manière sûre et efficace.

2.4.1.1 Stockage par Compression Gazeuse

C'est la méthode de stockage la plus courante et la plus mature. L'hydrogène est comprimé à haute pression (généralement 350 ou 700 bars) dans des réservoirs spécialement conçus.

- **Avantages :** Technologie bien établie, relativement simple, rapide à remplir et vider.
- **Défis :** La haute pression nécessite des réservoirs robustes et lourds, ce qui limite la capacité et augmente le coût, la compression consomme de l'énergie.

2.4.1.2 Stockage par Liquéfaction Cryogénique

L'hydrogène peut être liquéfié en le refroidissant à très basse température (-253 °C). L'hydrogène liquide (LH2) a une densité énergétique volumétrique beaucoup plus élevée que l'hydrogène gazeux comprimé.

- **Avantages :** Haute densité énergétique volumétrique, permet le transport de grandes quantités d'hydrogène.
- **Défis :** Processus énergivore (environ 30-35% de l'énergie contenue dans l'hydrogène), nécessite des équipements cryogéniques coûteux et complexes, risque d'évaporation (boil-off).

2.4.1.3 Stockage sous Forme d'Hydrures Métalliques

Cette méthode implique que l'hydrogène réagit chimiquement avec certains métaux ou alliages pour former des hydrures métalliques solides. L'hydrogène est stocké dans la structure du matériau et peut être libéré en chauffant.

- **Avantages :** Densité volumétrique élevée (par rapport au gaz comprimé), sécurité accrue (pas de haute pression), stockage à des températures et pressions modérées.
- **Défis :** Poids élevé du matériau de stockage, cinétique de charge/décharge lente, dégradation du matériau à long terme, capacité de stockage réversible encore limitée, coût.

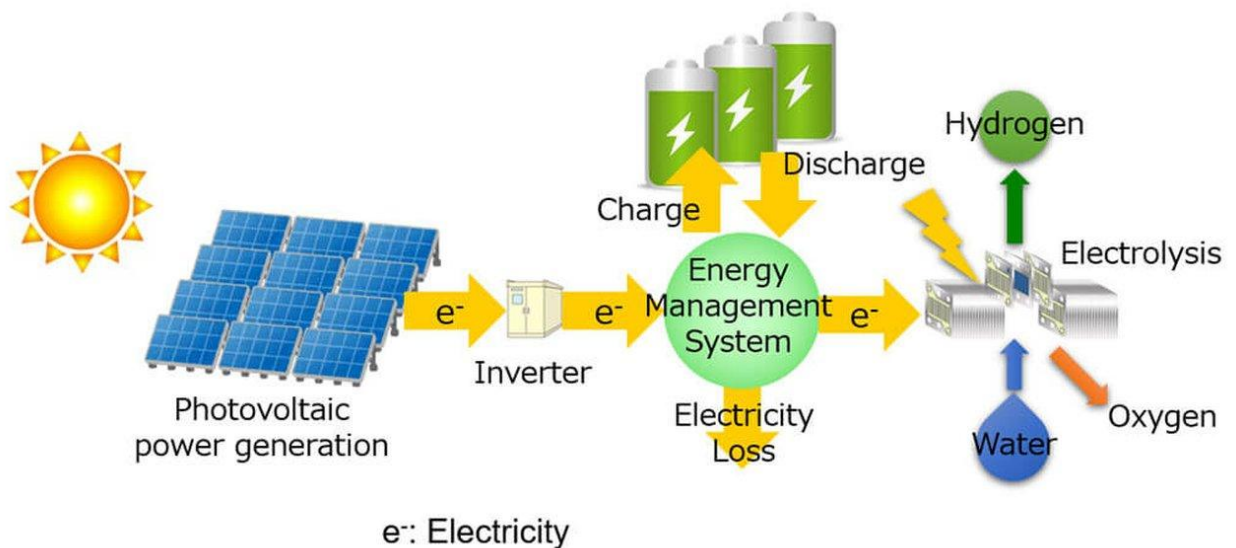


Figure 9 : Schéma illustrant le concept de stockage et d'utilisation de l'hydrogène, potentiellement à partir de l'énergie solaire.

Le choix de la méthode de stockage dépendra de l'application finale, de la quantité d'hydrogène à stocker, des contraintes de poids et d'espace, ainsi que des exigences en matière de sécurité et de coût.

2.4.2 Applications Énergétiques : Carburant de l'Avenir

L'hydrogène vert a un large éventail d'applications énergétiques, allant de la production d'électricité à la mobilité en passant par l'intégration dans les réseaux existants.

Piles à Combustible

Les piles à combustible convertissent l'énergie chimique de l'hydrogène et de l'oxygène en électricité, avec de l'eau comme seul sous-produit. Elles sont utilisées dans une variété d'applications.

- **Production d'électricité stationnaire :** Alimentation de bâtiments, de centres de données, et de systèmes de secours.
- **Transport :** Véhicules électriques à pile à combustible (FCEV) tels que les voitures, bus, camions et trains. Ils offrent une autonomie comparable aux véhicules à essence et un temps de ravitaillement rapide.

Mobilité

L'hydrogène peut servir de carburant propre pour une multitude de modes de transport, réduisant les émissions de carbone dans des secteurs difficiles à décarboniser.

- **Transport routier :** Camions lourds, bus et véhicules utilitaires.
- **Transport maritime et aérien :** Recherche et développement sur les navires et avions propulsés à l'hydrogène ou à des carburants synthétiques dérivés de l'hydrogène (e-carburants comme l'e-méthanol ou l'e-kérosène).

Injection dans le Réseau

L'hydrogène peut être mélangé au gaz naturel et injecté dans les infrastructures gazières existantes, ou utilisé pour produire du méthane synthétique (power-to-gas).

- **Flexibilité du réseau :** Le réseau de gaz peut servir de moyen de stockage et de transport pour l'énergie renouvelable excédentaire convertie en hydrogène.
- **Réduction des émissions :** Contribue à la décarbonisation du chauffage et de certains processus industriels qui dépendent actuellement du gaz naturel.

Applications de l'Hydrogène Vert Production d'Hydrogène Vert Électrolyse de l'Eau Énergies Renouvelables Énergie Solaire PV Énergie Éolienne Types d'Électrolyseurs Alcalins (AEL) PEM (Proton Exchange Membrane) Oxyde Solide (SOEL) Stockage de l'Hydrogène Compression Gazeuse

Liquéfaction CryogéniqueHydrures MétalliquesUtilisation de l'HydrogènePiles à CombustibleÉlectricité StationnaireMobilité (FCEV)Mobilité (Autres)Transport Routier (camions,bus)Transport Maritime &AérienApplications IndustriellesProduction d'AmmoniacRaffinageSidérurgieInjection dans le RéseauGazierPower-to-Gas(méthanation)Mélange avec Gaz Naturel

Ce mindmap représente de manière synthétique les différentes facettes de la chaîne de valeur de l'hydrogène vert, de sa production via l'électrolyse et les énergies renouvelables à ses diverses applications en passant par les méthodes de stockage. Il met en lumière l'interconnexion des technologies et leur rôle dans l'écosystème énergétique futur.

2.5 Conclusion

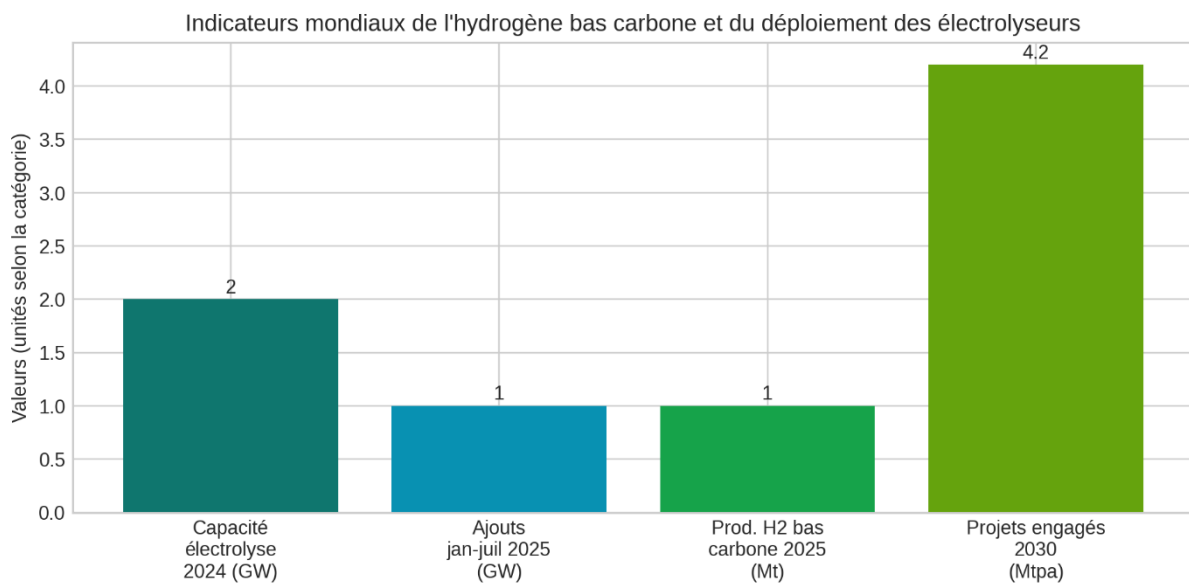
La production d'hydrogène vert par électrolyse alimentée par des énergies renouvelables est une voie prometteuse pour décarboniser notre économie mondiale. L'intégration de l'énergie solaire photovoltaïque et éolienne avec les technologies d'électrolyse, telles que les électrolyseurs alcalins, PEM et à oxyde solide, est en constante évolution. Chaque technologie présente un équilibre unique entre efficacité, coût et durabilité, influençant son application optimale. Bien que des défis subsistent, notamment en matière d'intermittence des énergies renouvelables et de réduction des coûts, les progrès rapides dans ces domaines renforcent le rôle de l'hydrogène vert en tant que vecteur énergétique clé. Le développement de solutions de stockage efficaces (compression, liquéfaction, hydrures métalliques) et l'élargissement de ses applications (piles à combustible, mobilité, injection dans le réseau) sont essentiels pour réaliser pleinement le potentiel de l'hydrogène vert et soutenir la transition vers un avenir énergétique durable et à faibles émissions de carbone.

Chapitre 3 :

Stimulations et résultats

Ce chapitre présente l'application pratique de l'hydrogène vert produit par électrolyse dans le contexte d'un moteur diesel fonctionnant en mode dual fuel. Il vise à relier la production d'hydrogène par un procédé électrochimique propre aux performances énergétiques observées lors de son injection en complément du gazole. L'analyse repose sur des sources institutionnelles et scientifiques récentes, afin d'assurer une rédaction conforme aux exigences d'un mémoire universitaire.(63)

Au niveau international, la filière hydrogène bas carbone continue de progresser malgré des contraintes de coût, de demande et d'infrastructure. L'Agence internationale de l'énergie indique que la capacité mondiale installée d'électrolyse de l'eau a atteint 2 GW en 2024 et que plus de 1 GW supplémentaire a été ajouté entre janvier et juillet 2025. La production d'hydrogène bas carbone devrait atteindre environ 1 Mt en 2025, tandis que les projets déjà opérationnels ou ayant atteint une décision finale d'investissement pourraient représenter 4,2 Mt/an à l'horizon 2030. Ces chiffres montrent que l'hydrogène vert s'inscrit dans une dynamique de montée en puissance industrielle, tout en restant encore marginal dans la production mondiale totale d'hydrogène.(63)



Source : IEA, Global Hydrogen Review 2025

Figure 10 : Données mondiales sur l'hydrogène bas carbone et le déploiement des électrolyseurs.

3.1. Critères de production d'hydrogène vert par électrolyse

L'hydrogène est qualifié de vert lorsqu'il est produit par électrolyse de l'eau à partir d'une électricité d'origine renouvelable telle que l'énergie solaire, éolienne, hydraulique ou géothermique. Le premier critère de production est donc l'origine de l'électricité utilisée, car une électrolyse alimentée par une électricité fortement carbonée ne peut pas être considérée comme totalement verte. Le Department of Energy souligne ainsi que l'intérêt environnemental de l'électrolyse dépend directement de la source électrique, de son coût, de son efficacité et des émissions associées à sa production. [48]

Le deuxième critère concerne le type d'électrolyseur employé. Les technologies les plus connues sont l'électrolyse alcaline, l'électrolyse à membrane échangeuse de protons (PEM), l'électrolyse à membrane échangeuse d'anions (AEM) et l'électrolyse à oxyde solide (SOE). Chaque technologie possède des caractéristiques propres en matière de température de fonctionnement, de rendement, de pureté de l'hydrogène, de temps de réponse et de coût d'investissement. Selon le DOE, les électrolyseurs PEM fonctionnent généralement entre 70 et 90 °C, les électrolyseurs alcalins commerciaux à moins de 100 °C, tandis que les électrolyseurs à oxyde solide fonctionnent à haute température, autour de 700 à 800 °C. [48]

Un autre critère fondamental est la qualité de l'eau utilisée pour l'électrolyse. Une eau insuffisamment purifiée peut dégrader les électrodes, réduire le rendement du système et affecter la pureté du gaz produit. Dans les travaux scientifiques sur l'électrolyse, la stabilité chimique du milieu, la concentration de l'électrolyte, le pH et la circulation du fluide sont considérés comme des variables essentielles, car ils influencent directement la vitesse de production d'hydrogène et les pertes énergétiques du système. [49]

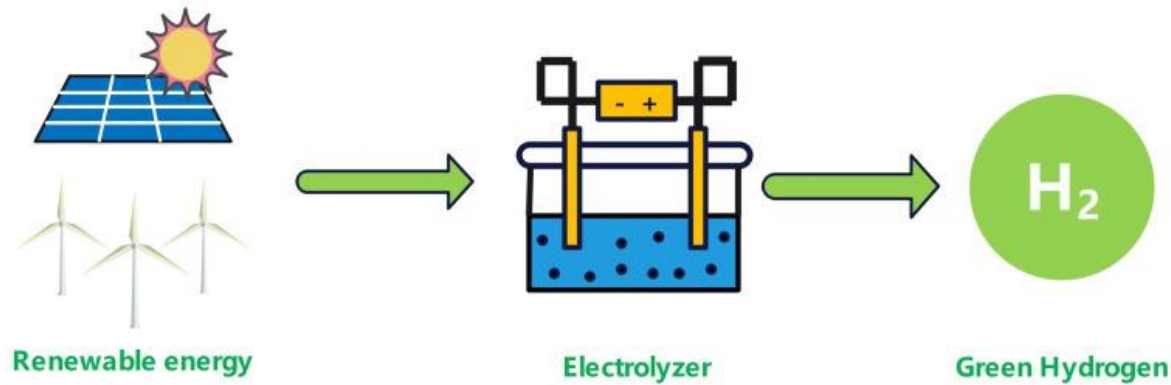
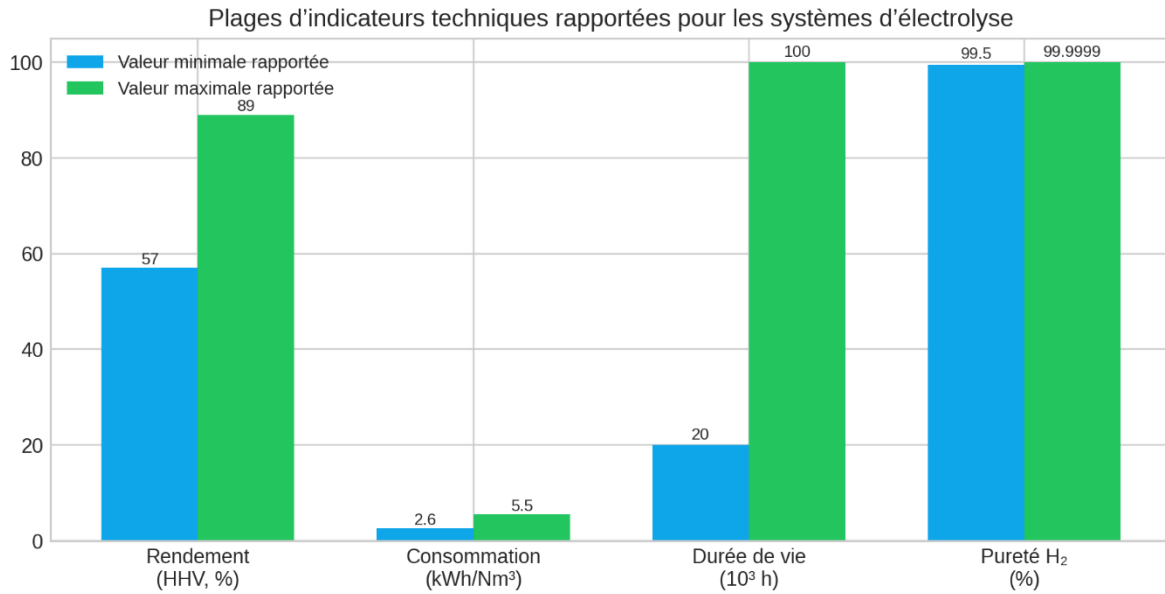


Figure 11 . Schéma général de la production d'hydrogène vert par électrolyse à partir d'énergies renouvelables.

La performance énergétique constitue également un critère central. Elle est généralement évaluée à travers le rendement du système, la consommation énergétique spécifique, la tension de fonctionnement et la densité de courant. Une revue scientifique récente indique que, selon la technologie utilisée, le rendement global peut varier entre 57 % et 89 % sur base HHV, la consommation énergétique entre 2,6 et 5,5 kWh/Nm³, et la densité de courant entre 0,2 et 2,5 A/cm². Ces indicateurs permettent d'apprécier la capacité du système à produire un hydrogène abondant tout en minimisant la consommation d'électricité. [49]

La pureté de l'hydrogène produit représente un critère de qualité très important, notamment lorsque l'hydrogène est destiné à une utilisation énergétique dans des piles à combustible, des procédés industriels ou l'alimentation d'un moteur. La littérature rapporte des puretés comprises entre 99,5 % et 99,9999 % selon les technologies d'électrolyse. Plus l'hydrogène est pur, plus son utilisation est fiable et sûre, notamment dans les systèmes où la présence d'impuretés peut affecter la combustion ou endommager les composants. [49]

La durabilité de l'installation est aussi un critère déterminant. Elle se mesure par la durée de vie du stack, le taux de dégradation des cellules et la résistance des matériaux à la corrosion et aux sollicitations thermiques. Les études comparatives mentionnent des durées de vie pouvant aller de 20 000 à 100 000 heures selon la technologie, ce qui montre que le choix de l'électrolyseur ne dépend pas seulement de la performance immédiate, mais aussi de sa stabilité à long terme. [48]



Source : revue scientifique PMC sur les technologies d'électrolyse

Figure 12 . Plages d'indicateurs techniques rapportées pour les systèmes d'électrolyse.

Enfin, la production d'hydrogène vert doit satisfaire un critère de souplesse de fonctionnement vis-à-vis des énergies renouvelables, souvent caractérisées par leur intermittence. Un bon système d'électrolyse doit pouvoir supporter les variations de charge, les démarrages et arrêts fréquents, ainsi que les fluctuations de puissance sans perdre fortement en rendement ni accélérer sa dégradation. Cette flexibilité est particulièrement importante dans les projets associant l'électrolyse à des installations solaires ou éoliennes. [48]

En résumé, les principaux critères de production d'hydrogène vert par électrolyse sont l'origine renouvelable de l'électricité, le choix de la technologie d'électrolyseur, la qualité de l'eau, les conditions opératoires, le rendement énergétique, la pureté de l'hydrogène, la durabilité du système et sa flexibilité face aux variations de l'alimentation électrique. L'ensemble de ces critères permet de juger si la production d'hydrogène répond réellement aux exigences techniques, économiques et environnementales d'un procédé durable. [49]

Tableau 5. Synthèse des critères de production d'hydrogène vert

Critère	Description	Référence principale
Origine de l'électricité	Doit être renouvelable pour qualifier l'hydrogène de vert.	DOE
Technologie d'électrolyse	Alcalin, PEM, AEM, SOE selon les besoins de performance.	DOE / PMC
Qualité de l'eau	Influence la stabilité, la pureté et le rendement.	PMC
Performance énergétique	Rendement, tension, densité de courant, consommation spécifique.	PMC
Pureté de l'hydrogène	Critère essentiel pour l'utilisation finale.	PMC
Durabilité	Durée de vie, dégradation, résistance des matériaux.	PMC
Flexibilité de fonctionnement	Adaptation à l'intermittence des renouvelables.	DOE

3.2. Injection d'hydrogène vert pour réduire la consommation de gazole dans un moteur diesel

L'injection d'hydrogène vert dans un moteur diesel constitue une solution étudiée pour diminuer la consommation de gazole tout en conservant la structure générale du moteur à allumage par compression. Dans ce fonctionnement dit dual fuel, le gazole reste le carburant pilote responsable de l'auto-inflammation, tandis que l'hydrogène est introduit en complément, généralement dans le collecteur d'admission ou à l'aide d'un système d'injection dédié. Ce principe permet de profiter de la vitesse de flamme élevée de l'hydrogène, de sa large plage d'inflammabilité et de l'absence de carbone dans sa composition. [50]

Sur le plan expérimental, l'objectif recherché est d'améliorer la combustion du mélange admis afin de réduire la quantité de gazole nécessaire pour produire le même effet utile. Une étude publiée dans la revue *Energies* montre que la diminution de la consommation de diesel suit une dépendance presque linéaire avec la part énergétique de l'hydrogène, appelée Hydrogène Energy Share (HES). Les auteurs indiquent que la baisse relative de la consommation de diesel est approximativement égale à 0,6 fois la HES, ce qui fait de cet indicateur un paramètre central pour caractériser l'intensité de l'hydrogénation. [50]

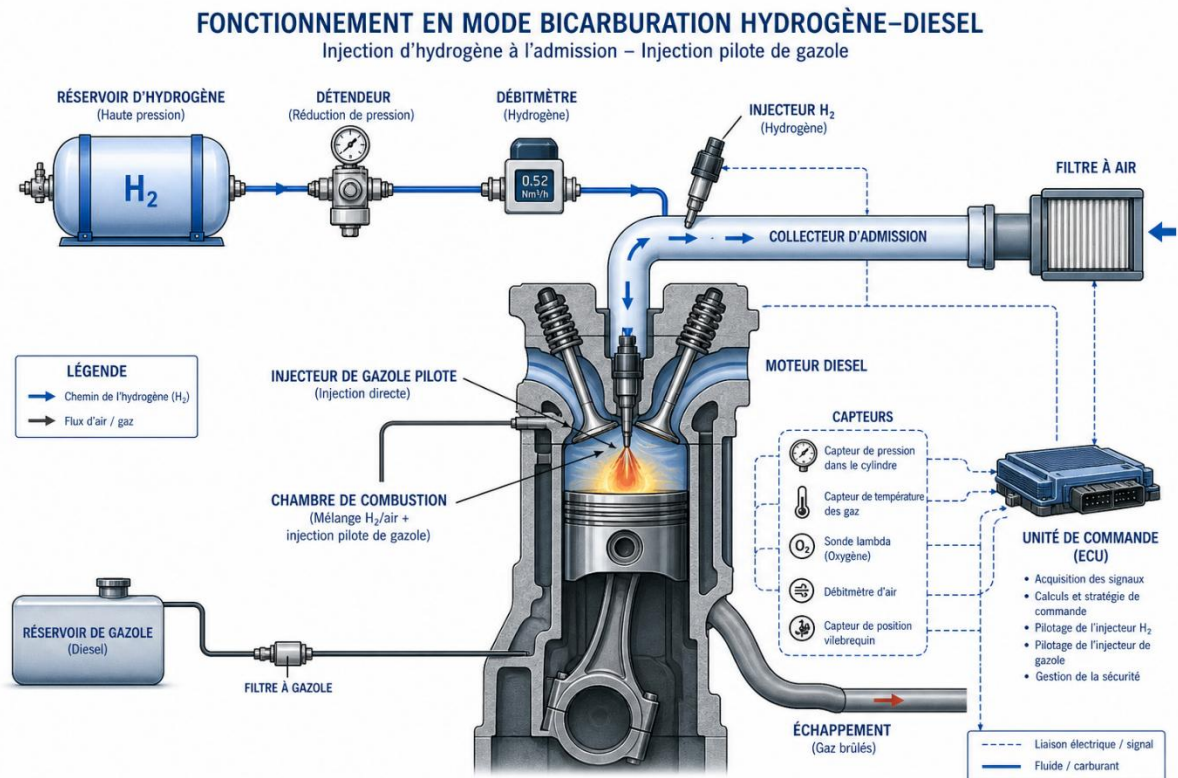
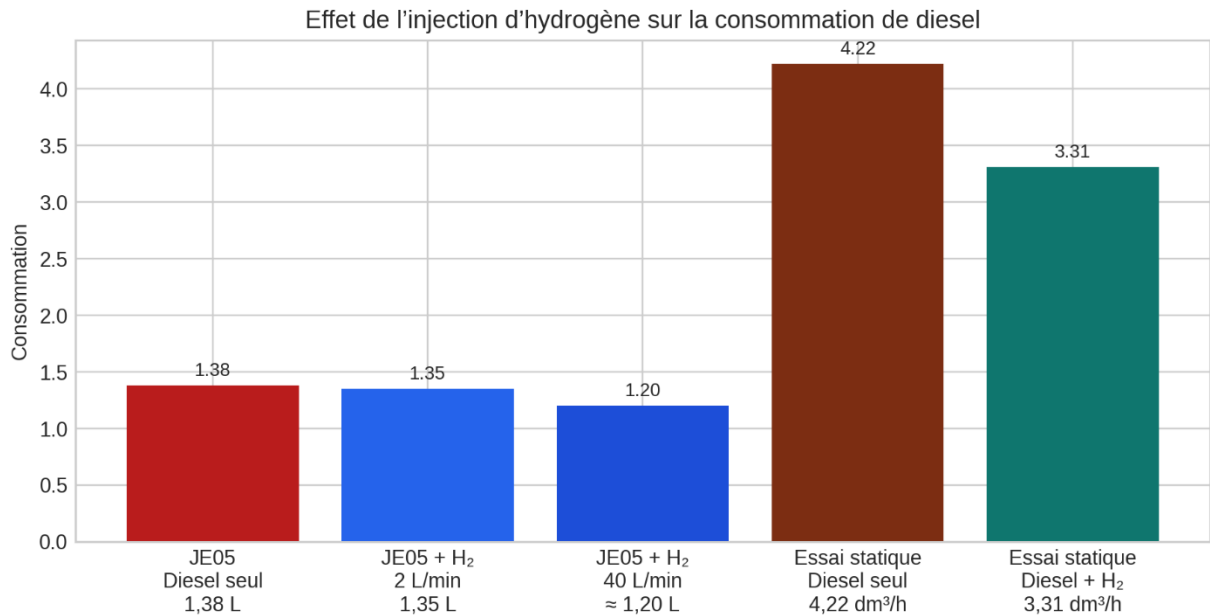


Figure 13. Schéma explicatif d'un moteur diesel fonctionnant en mode dual fuel avec injection d'hydrogène.

La méthodologie expérimentale décrite dans la littérature repose souvent sur une comparaison entre un mode diesel seul et un mode diesel-hydrogène, à régime et charge comparables. Dans les essais menés à l'Université de Technologie de Lublin sur un moteur 1.3 MultiJet installé sur véhicule, les mesures ont été réalisées sur dynamomètre en comparant l'alimentation classique en diesel à une configuration avec injection séquentielle d'hydrogène dans le collecteur d'admission. Les paramètres d'essai incluaient notamment des pressions d'injection de 0,15 à 0,20 MPa et des temps d'ouverture de 2,5 à 3,5 ms. [51]

Les résultats de cette étude montrent qu'au point de fonctionnement optimisé, la consommation de diesel a diminué de 4,22 dm³/h à 3,31 dm³/h, soit une réduction absolue de 0,91 dm³/h. Les auteurs rapportent une diminution moyenne de 21,5 % de la consommation de diesel lorsque l'injection d'hydrogène est correctement réglée. Les meilleures performances instantanées ont été obtenues pour un temps d'ouverture de 3,5 ms et une pression d'hydrogène de 0,20 MPa, tandis que la réduction maximale de consommation a été observée à 3,5 ms et 0,18 MPa. [51]



Sources : MDPI Energies 16(11):4466 ; Combustion Engines DOI 10.19206/CE-169485

Figure 14. Comparaison de la consommation de diesel dans plusieurs configurations expérimentales avec et sans hydrogène.

D'autres résultats publiés dans la littérature montrent également une baisse de consommation en cycle de conduite. Dans l'étude MDPI sur un camion diesel à injection directe, la consommation sur le cycle JE05 est passée de 1,38 L en mode sans hydrogène à 1,35 L avec un débit d'hydrogène de 2 L/min, soit une réduction de 2,3 %. Pour un débit d'hydrogène de 40 L/min, la réduction de consommation a atteint environ 13 %, avec une consommation ramenée à environ 1,20 L. Ces observations confirment que l'ajout d'hydrogène peut réduire la part de diesel consommée, surtout lorsque le débit d'hydrogène devient significatif. [52]

Cependant, l'intérêt énergétique de l'injection d'hydrogène doit être évalué conjointement avec ses effets sur les émissions et sur la stabilité de la combustion. L'étude MDPI montre que les émissions de CO₂ diminuent globalement dans une relation proche de la baisse de la consommation de diesel. Les émissions de CO, de particules et, dans plusieurs cas, d'hydrocarbures, diminuent également. En revanche, les NOx ont tendance à augmenter avec l'accroissement de la part d'hydrogène. À titre indicatif, à 10 % de HES et à vitesse constante de 80 km/h, l'augmentation des NOx a atteint environ 20 %, soit presque le double de la HES. [51]

Les essais publiés dans SAGE Journals confirment également le caractère contrasté du fonctionnement diesel-hydrogène. Les auteurs observent une forte diminution des émissions de CO, de CO₂ et des fumées, mais aussi une augmentation importante des NOx et une hausse de la pression maximale dans le cylindre. Dans leur étude, l'ajout de 25 % d'énergie sous forme d'hydrogène a conduit à une baisse du rendement thermique de 3,3 % à 8,1 %, tandis qu'une part de 50 % d'hydrogène a conduit à une baisse de 8,2 % à 15,5 %, avec des augmentations de NOx allant jusqu'à plus de 200 % dans certains cas. Ces résultats montrent que la solution la plus performante n'est pas l'augmentation maximale de l'hydrogène, mais le réglage le plus équilibré entre économie de diesel, rendement, émissions et sécurité de fonctionnement. [50]

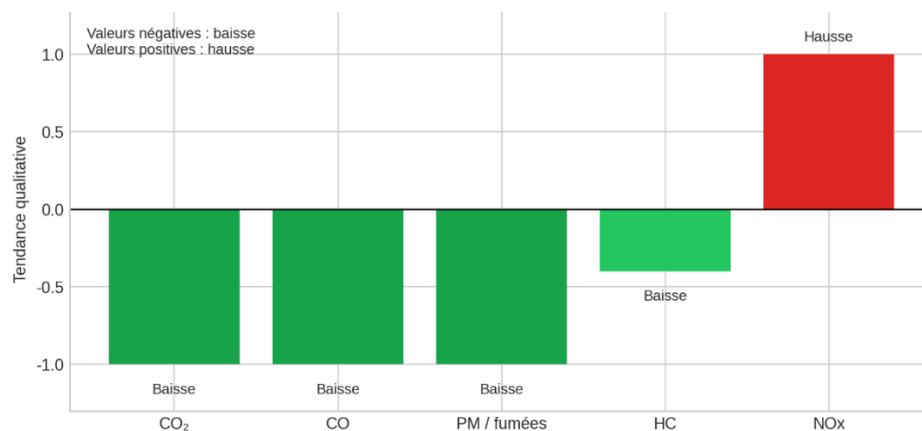


Figure 15. Tendance générale des émissions lors de l'ajout d'hydrogène dans un moteur diesel.

En pratique, la réduction de la consommation de gazole par injection d'hydrogène dépend donc de plusieurs paramètres : le débit d'hydrogène, la pression d'injection, la durée d'ouverture de l'injecteur, le régime moteur, la charge et la fraction énergétique de l'hydrogène dans le mélange total. Pour un projet de fin d'études, il est donc indispensable de comparer systématiquement les résultats obtenus avec et sans hydrogène sur les mêmes points de fonctionnement, puis d'analyser ces écarts à l'aide de tableaux de synthèse et de représentations graphiques. [53]

Tableau 6. Paramètres expérimentaux importants pour l'injection d'hydrogène dans un moteur diesel

Paramètre	Description	Source
Hydrogen Energy Share (HES)	Part énergétique de l'hydrogène dans l'énergie totale du mélange.	MDPI
Débit d'hydrogène	Quantité d'hydrogène admise, souvent exprimée en L/min.	MDPI
Pression d'injection	Valeurs expérimentales typiques de 0,15 à 0,20 MPa.	Combustion Engines
Temps d'ouverture	Durées testées de 2,5 à 3,5 ms selon les essais.	Combustion Engines
Régime / charge moteur	Conditions indispensables pour comparer les performances.	SAGE / Combustion Engines

Tableau 7. Exemples de résultats rapportés dans la littérature

Étude	Condition	Résultat sur la consommation	Observation principale
MDPI Energies	JE05, 2 L/min H ₂	1,38 L → 1,35 L (-2,3 %)	Baisse modérée de la consommation
MDPI Energies	JE05, 40 L/min H ₂	≈ -13 %	Réduction plus nette avec débit élevé
Combustion Engines	3,5 ms ; 0,18 MPa	4,22 → 3,31 dm ³ /h	Réduction absolue de 0,91 dm ³ /h
Combustion Engines	Réglage optimisé	-21,5 % en moyenne	Gain élevé sous conditions ajustées

SAGE Journals	25 à 50 % énergie H ₂	BSFC en hausse / rendement en baisse	Compromis entre émissions et efficacité
---------------	-------------------------------------	---	--

Ainsi, l'injection d'hydrogène vert dans un moteur diesel peut effectivement réduire la consommation de gazole, mais cette amélioration dépend étroitement des conditions de fonctionnement et du réglage des paramètres d'injection. Les résultats les plus convaincants apparaissent lorsque l'hydrogène est introduit dans des proportions contrôlées et lorsque l'analyse ne se limite pas à la consommation, mais inclut aussi le rendement, les émissions et la sécurité de combustion. [53]

3.3. Acquisition, analyse et interprétation des résultats à l'aide de circuits proportionnels ou de graphiques à barres

L'acquisition, l'analyse et l'interprétation des résultats constituent une étape essentielle dans l'étude expérimentale de l'injection d'hydrogène vert dans un moteur diesel. Cette étape permet de transformer les mesures brutes obtenues sur le banc ou sur le véhicule en informations quantitatives exploitables pour la comparaison scientifique des différents modes de fonctionnement. Dans un projet de fin d'études, cette phase doit être structurée autour de trois volets complémentaires : la collecte rigoureuse des données, leur traitement méthodique et leur représentation graphique à l'aide de tableaux, de circuits proportionnels ou de graphiques à barres. [56]

La littérature montre que l'acquisition des données doit porter simultanément sur les variables liées à la production et à l'injection d'hydrogène, ainsi que sur les performances du moteur et les émissions. Du côté de l'électrolyse, le Department of Energy souligne l'importance de surveiller la source d'électricité, le rendement, la stabilité de fonctionnement et l'énergie consommée pour produire l'hydrogène. Une fois l'hydrogène injecté dans le moteur, les paramètres classiquement suivis deviennent le débit d'hydrogène, la pression d'injection, le temps d'ouverture de l'injecteur, la consommation de diesel, le régime moteur, la charge, le débit d'air, la pression dans le cylindre et les émissions polluantes. [54]

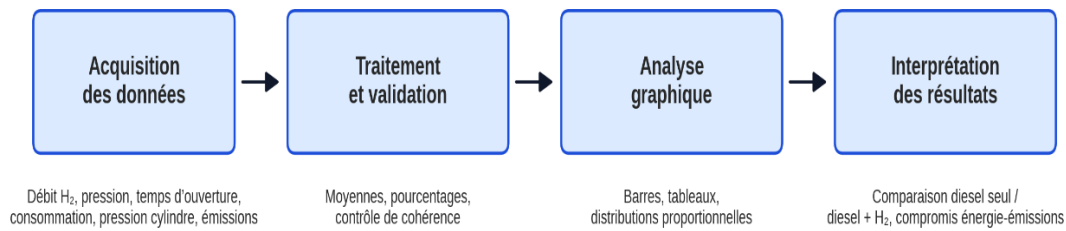


Figure 16. Chaîne de travail pour l'acquisition, l'analyse et l'interprétation des résultats.

Dans l'étude publiée par MDPI sur un camion diesel à injection directe alimenté en hydrogène additionnel, les mesures ont été réalisées sur un châssis dynamométrique en utilisant un analyseur HORIBA MEXA-7200 pour les gaz d'échappement et une analyse gravimétrique sur filtre pour les particules. Les variables acquises comprenaient la consommation de carburant, les émissions de CO, CO₂, NO_x, CH₄, THC et PM, ainsi que la part énergétique de l'hydrogène, notée HES. Les résultats ont ensuite été présentés sous forme de tableaux récapitulatifs et de figures illustrant les relations entre l'ajout d'hydrogène, la réduction de consommation et l'évolution des émissions. [55)

L'étude parue dans Combustion Engines fournit un exemple particulièrement utile pour la partie acquisition. Les auteurs ont testé un moteur 1.3 MultiJet sur dynamomètre, à 2600 rpm en quatrième vitesse, en comparant un fonctionnement diesel seul à un fonctionnement diesel-hydrogène. Les mesures ont été effectuées à l'aide du système AVL IndiMicro 602 pour la pression dans le cylindre, du logiciel AVL IndiCom pour l'analyse de combustion, d'un analyseur MAHA MET 6.3 pour les émissions, d'une interface OBD II pour les grandeurs de fonctionnement et d'un débitmètre pour la consommation de carburant. Les paramètres expérimentaux comprenaient notamment des pressions d'injection de 0,15 à 0,20 MPa et des temps d'ouverture de 2,5 à 3,5 ms. [54)

Pour l'analyse des résultats, les graphiques à barres sont particulièrement adaptés lorsqu'il s'agit de comparer plusieurs états de fonctionnement : diesel seul, diesel + hydrogène faible débit, diesel + hydrogène fort débit ou encore différentes combinaisons de pression et de temps d'ouverture d'injecteur. Ce type de représentation permet de visualiser clairement les écarts absolus entre les essais. Les circuits proportionnels, quant à eux, peuvent être utilisés pour illustrer la part

relative d'un phénomène, par exemple la contribution énergétique de l'hydrogène dans le mélange total ou la répartition relative de certaines émissions. Toutefois, dans le cas d'une comparaison expérimentale avant/après, les graphiques à barres restent généralement plus lisibles et plus pertinents. [56]

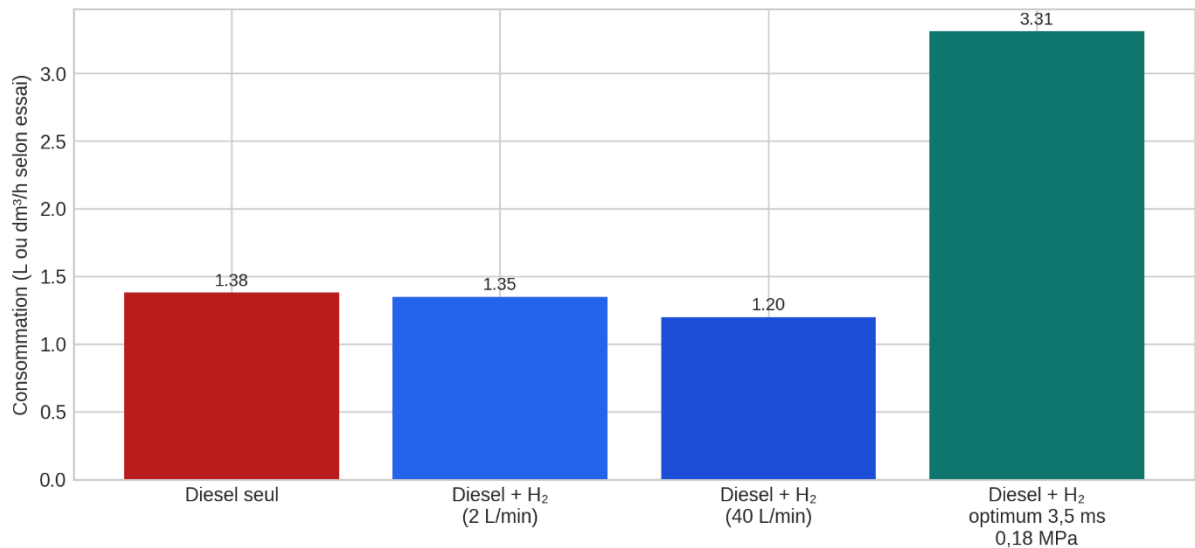


Figure 17. Exemple de comparaison par graphique à barres entre plusieurs configurations diesel et diesel–hydrogène.

L'interprétation des résultats doit reposer sur des indicateurs explicites. Dans l'étude MDPI, la réduction de la consommation de diesel est liée à la HES selon une relation approximative de $0,6 \times \text{HES}$. Les auteurs montrent également que les émissions de CO₂ suivent globalement la baisse de la consommation de diesel, tandis que les émissions de CO et de PM diminuent de manière comparable ou supérieure. En revanche, les NO_x augmentent avec l'ajout d'hydrogène. Ces tendances sont des exemples typiques de résultats qui peuvent être synthétisés par des graphiques à barres ou des représentations proportionnelles pour rendre la lecture plus immédiate. [55]

Les travaux de Combustion Engines apportent, quant à eux, des indicateurs intéressants pour l'interprétation de la combustion. Les graphiques de cette étude montrent l'évolution de la pression moyenne indiquée, de la pression maximale de combustion, du taux maximal de montée en pression, du débit d'air, du débit d'hydrogène et de la consommation de diesel. Les auteurs rapportent notamment une augmentation de 13,7 % de la pression moyenne indiquée dans une configuration d'injection, une pression maximale atteignant 7,51 MPa, soit 11,2 % de plus que le diesel seul, et une réduction de la consommation de diesel de 4,22 à 3,31 dm³/h dans le réglage le

plus favorable. Ces résultats se prêtent très bien à une analyse comparative par histogrammes ou tableaux de synthèse. [54]

Les mesures de performance et d'émissions retenues dans l'étude de SAGE Journals complètent utilement cette démarche d'interprétation. Les auteurs ont suivi le couple, la puissance, la consommation spécifique de carburant, le rendement thermique, les émissions de CO, CO₂, THC, NO_x, les fumées, la pression en cylindre et le taux de dégagement de chaleur à différentes vitesses de rotation. Ils montrent que l'ajout d'hydrogène réduit fortement CO, CO₂ et les fumées, mais peut faire croître significativement les NO_x et modifier le rendement thermique. Ce type de résultat illustre l'importance d'une lecture globale, où l'amélioration d'un indicateur ne suffit pas à elle seule pour conclure à la supériorité d'une configuration expérimentale. [57]

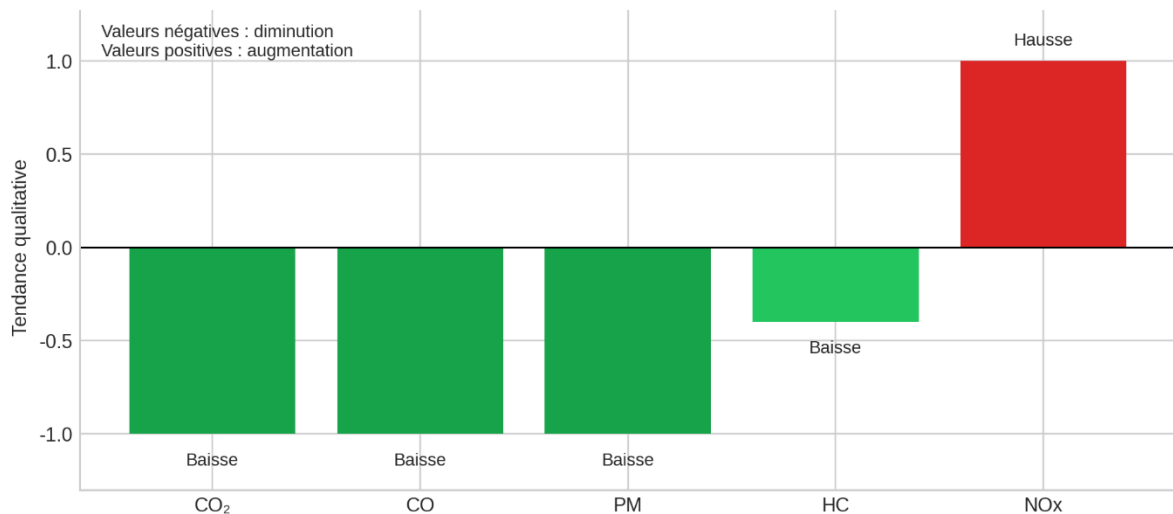


Figure 18. Exemple de synthèse visuelle des tendances d'émissions avec ajout d'hydrogène.

En pratique, l'interprétation correcte des résultats passe par quelques règles méthodologiques simples : comparer les essais à régime et charge identiques, distinguer les variations absolues des variations relatives, calculer les pourcentages de gain ou de perte, vérifier la cohérence entre consommation, combustion et émissions, puis choisir la représentation graphique la plus adaptée. Les graphiques à barres permettent de comparer des valeurs mesurées ; les circuits proportionnels illustrent des parts relatives ; et les tableaux conservent les valeurs numériques exactes nécessaires à la rigueur scientifique. [58]

Tableau 8 Variables à acquérir pour l'analyse expérimentale

Famille	Variable	Utilité pour l'analyse	Source
Hydrogène	Débit H ₂ / HES	Quantifier la contribution de l'hydrogène	MDPI
Injection	Pression et temps d'ouverture	Comparer les réglages expérimentaux	Combustion Engines
Performance	Consommation diesel, couple, puissance	Évaluer l'économie de carburant et le comportement moteur	SAGE / MDPI
Combustion	Pression cylindre, taux de montée en pression	Interpréter la qualité de combustion	Combustion Engines
Émissions	CO, CO ₂ , HC, NOx, PM	Évaluer l'impact environnemental	MDPI / SAGE
Production H ₂	Énergie électrique, stabilité, rendement	Relier l'électrolyse aux essais moteur	DOE

Tableau 9. Choix du mode de représentation graphique

Outil graphique	Usage recommandé	Exemple dans l'étude
Graphique à barres	Comparer diesel seul et diesel + H ₂ sur une même variable	Consommation, NOx, PM, pression maximale
Circuit proportionnel	Montrer une part relative ou une répartition	Part énergétique HES ou distribution relative d'émissions
Tableau comparatif	Conserver les valeurs exactes et les conditions d'essai	Débits H ₂ , pressions, temps d'ouverture, valeurs mesurées

Tableau 10 . Exemples d'indicateurs utiles pour l'interprétation

Indicateur	Valeur ou tendance rapportée	Interprétation	Source
Réduction diesel $\approx 0,6 \times \text{HES}$	Tendance quasi linéaire	L'hydrogène réduit la part de diesel consommée	MDPI
4,22 $\rightarrow$ 3,31 dm ³ /h	Baisse de 0,91 dm ³ /h	Gain notable au réglage optimal	Combustion Engines
PM et CO en baisse	Amélioration globale	Combustion plus propre	MDPI / SAGE
NOx en hausse	Tendance défavorable	Compromis à surveiller	MDPI / SAGE
Pression max 7,51 MPa	+11,2 %	Combustion plus intense avec H ₂	Combustion Engines

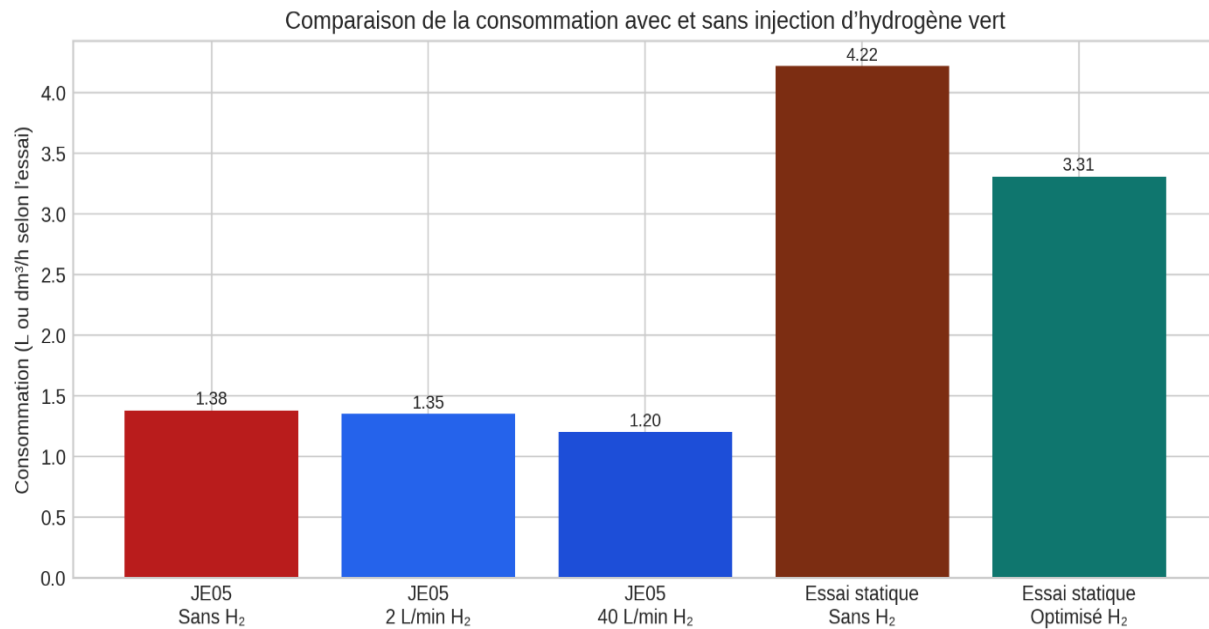
En résumé, l'acquisition, l'analyse et l'interprétation des résultats ne consistent pas seulement à accumuler des mesures, mais à construire une lecture cohérente de l'effet de l'hydrogène sur le moteur diesel. Une bonne exploitation des données doit associer des mesures fiables, des tableaux bien structurés et des représentations visuelles adaptées afin de dégager clairement la solution la plus intéressante du point de vue énergétique et environnemental. [57]

3. 4. Comparaison de la consommation avec et sans injection d'hydrogène vert et détermination de la solution la plus performante

La comparaison de la consommation avec et sans injection d'hydrogène vert constitue l'étape centrale de l'analyse expérimentale, car elle permet d'évaluer de manière concrète l'intérêt énergétique de la solution dual fuel. Dans cette partie, la performance ne doit pas être jugée sur la seule baisse de la quantité de gazole consommée, mais sur un ensemble d'indicateurs comprenant également les émissions polluantes, la stabilité de fonctionnement, la consommation énergétique totale et les conséquences sur la combustion. [58]

Les résultats de la littérature montrent que l'ajout d'hydrogène conduit généralement à une baisse de la consommation de diesel, mais que l'ampleur de cette amélioration dépend fortement du débit injecté et des conditions de fonctionnement. Dans l'étude publiée par MDPI Energies sur un moteur diesel à injection directe, la consommation sur le cycle JE05 est passée de 1,38 L sans hydrogène à 1,35 L avec un débit d'hydrogène de 2 L/min, soit une réduction de 2,3 %. Lorsque le débit d'hydrogène a été porté à 40 L/min, la consommation a été ramenée à 1,20 L, soit une réduction de 13 %. Des tendances similaires ont été observées à vitesse constante, avec des gains plus marqués lorsque la quantité d'hydrogène injectée augmentait. [58]

Les essais publiés dans Combustion Engines confirment cette tendance dans un cadre expérimental plus fin, basé sur la variation de la pression d'injection et du temps d'ouverture de l'injecteur. Dans cette étude, le moteur a consommé en moyenne 4,22 dm³/h en mode diesel seul, contre 3,31 dm³/h au point de fonctionnement le plus favorable en mode diesel–hydrogène, soit une réduction absolue de 0,91 dm³/h. Les auteurs indiquent en outre que le système de commande ajusté a permis une réduction moyenne de 21,5 % de la consommation de diesel. [59]



Sources : MDPI Energies 16(11):4466 ; Combustion Engines DOI 10.19206/CE-169485

Figure 19 . Comparaison de la consommation avec et sans injection d'hydrogène vert dans plusieurs cas expérimentaux.

La détermination de la solution la plus performante ne consiste toutefois pas à retenir automatiquement le cas où la consommation de diesel est la plus faible. L'étude MDPI souligne qu'à faible ajout d'hydrogène, autour de 2 L/min ou d'environ 1 % de HES, l'énergie contenue dans l'hydrogène ajouté reste globalement cohérente avec l'énergie du diesel économisé. En revanche, à fort ajout d'hydrogène, à partir d'environ 40 L/min ou de 10 % de HES, le pouvoir calorifique inférieur de l'hydrogène introduit devient supérieur à l'énergie économisée sur le diesel, ce qui signifie qu'une partie importante de l'énergie de l'hydrogène n'est pas convertie utilement en travail moteur. Cette observation montre qu'une baisse plus forte de la consommation de diesel n'implique pas nécessairement une meilleure efficacité énergétique globale. [59]

Le choix de la solution la plus performante doit donc intégrer l'analyse des émissions. Les résultats publiés indiquent que l'injection d'hydrogène permet généralement de réduire les émissions de CO₂, de CO et de particules, ce qui représente un avantage environnemental important. Cependant, cette amélioration s'accompagne souvent d'une augmentation des NO_x, conséquence de la hausse de la température de combustion. Dans l'étude MDPI, l'augmentation des NO_x peut atteindre environ 1,5 à 2 fois la HES, tandis que les travaux publiés dans SAGE Journals montrent qu'avec une fraction énergétique d'hydrogène de 25 %, les NO_x augmentent de 15,2 % à 39,6 %, et qu'avec 50 % d'hydrogène, ils peuvent augmenter de 68,6 % à 212,7 %. [59]

Les données de SAGE Journals montrent également que les solutions fortement enrichies en hydrogène ne sont pas toujours favorables du point de vue des performances moteur. Les auteurs rapportent une diminution du rendement thermique effectif de 3,3 % à 8,1 % avec 25 % d'énergie fournie par l'hydrogène, et de 8,2 % à 15,5 % avec 50 % d'hydrogène. De même, la consommation spécifique de carburant augmente lorsque la part d'hydrogène devient trop importante. Cela signifie qu'un apport excessif en hydrogène peut améliorer certains indicateurs environnementaux, mais au prix d'une dégradation du rendement et parfois de la puissance. [60]

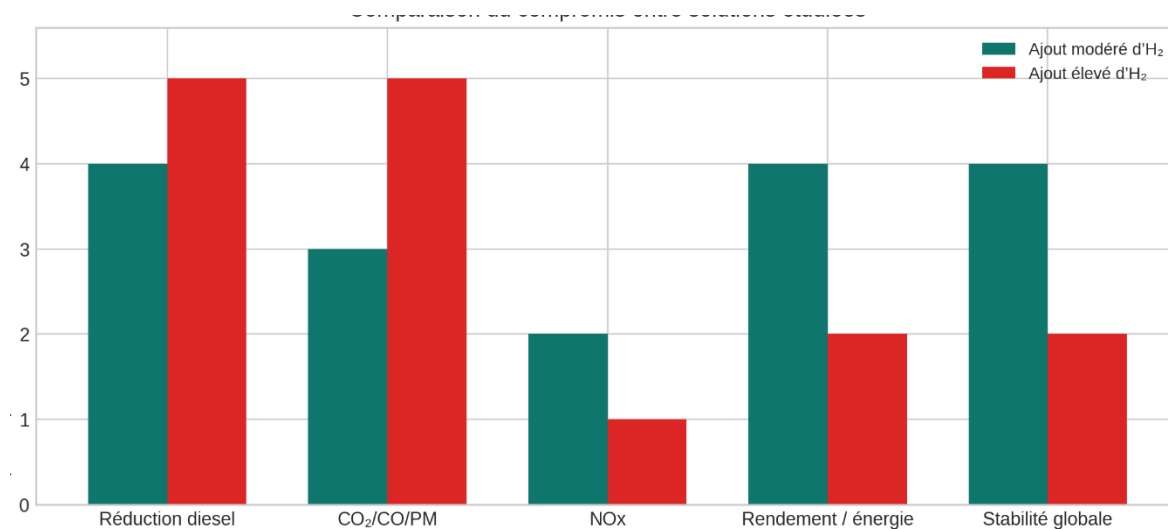


Figure 20 Comparaison du compromis entre un ajout modéré et un ajout élevé d'hydrogène.

Dans ce contexte, la solution la plus performante est celle qui réalise le meilleur compromis entre économie de gazole, amélioration environnementale et maintien de bonnes performances moteur. Les résultats de Combustion Engines suggèrent qu'un réglage autour de 3,5 ms pour le temps d'ouverture, avec une pression de 0,18 MPa pour minimiser la consommation ou de 0,20 MPa pour obtenir les meilleurs paramètres rapides de combustion, représente une zone particulièrement intéressante. De son côté, l'étude MDPI laisse entendre qu'un ajout modéré d'hydrogène, inférieur à 10 % de HES, offre souvent un compromis plus équilibré entre économie de diesel et efficacité énergétique globale que des ajouts plus élevés. [60]

Ainsi, la meilleure solution n'est pas nécessairement la plus extrême, mais la plus stable et la plus rationnelle du point de vue énergétique. Une solution performante est celle qui réduit clairement la consommation de diesel, limite l'augmentation des NOx, conserve un rendement acceptable et n'impose pas une dépense énergétique excessive pour produire l'hydrogène en amont. Dans une logique de projet de fin d'études, cela conduit à privilégier une stratégie d'injection optimisée, à débit modéré ou réglage précis, plutôt qu'une substitution maximale et non maîtrisée. [61]

Démarche de détermination de la solution la plus performante

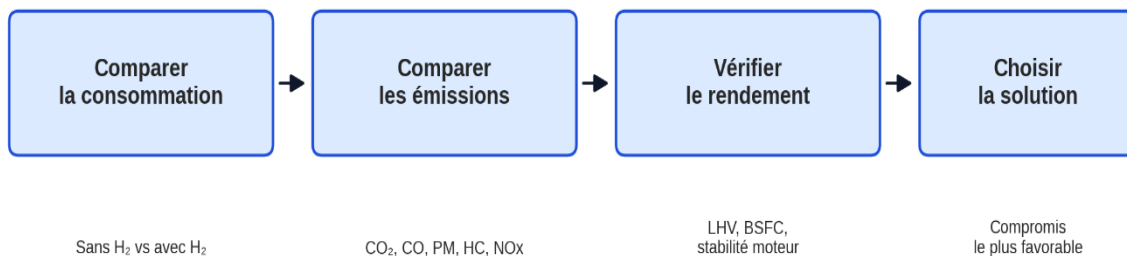


Figure 21 . Démarche logique de sélection de la solution la plus performante.

Tableau 11. Comparaison directe de la consommation avec et sans injection d'hydrogène vert

Étude	Condition	Sans H ₂	Avec H ₂	Conclusion
MDPI Energies	JE05, 2 L/min	1,38 L	1,35 L	Réduction de 2,3 %
MDPI Energies	JE05, 40 L/min	1,38 L	1,20 L	Réduction de 13 %
Combustion Engines	Réglage optimal 3,5 ms ; 0,18 MPa	4,22 dm ³ /h	3,31 dm ³ /h	Baisse de 0,91 dm ³ /h
Combustion Engines	Système ajusté	Référence diesel	—	Réduction moyenne de 21,5 %

Tableau 12 . Principaux compromis à considérer pour choisir la solution la plus performante

Critère	Ajout modéré d'H ₂	Ajout élevé d'H ₂	Interprétation
Réduction diesel	Modérée	Élevée	L'ajout élevé réduit plus le diesel
CO ₂ / CO / PM	Amélioration	Amélioration forte	Bénéfice environnemental net sur ces polluants
NOx	Hausse limitée à modérée	Hausse forte	Compromis défavorable à fort ajout
Rendement énergétique	Plus équilibré	Moins favorable	L'énergie H ₂ ajoutée peut dépasser l'énergie diesel économisée
Puissance / stabilité	Meilleur compromis	Dégradation possible	Une substitution excessive peut nuire aux performances

Tableau 13. Critères de sélection de la solution la plus performante

Question de décision	Réponse attendue	Choix recommandé
La consommation de diesel baisse-t-elle réellement ?	Oui, de manière mesurable	Conserver l'injection d'H ₂
Les NOx restent-ils dans une zone acceptable ?	Hausse limitée ou maîtrisée	Préférer l'ajout modéré
Le rendement global reste-t-il acceptable ?	Oui, sans surconsommation énergétique excessive	Éviter la substitution trop forte
Le moteur reste-t-il stable ?	Combustion régulière et paramètres contrôlés	Choisir le réglage optimisé
Quelle solution retenir ?	Compromis global favorable	Réglage précis plutôt qu'injection maximale

En conclusion, la comparaison de la consommation avec et sans injection d'hydrogène vert montre que l'hydrogène peut effectivement réduire la dépendance au gazole, mais que la solution la plus performante est celle qui optimise l'ensemble du système. Les données scientifiques disponibles conduisent à recommander une stratégie d'injection modérée et précisément réglée, capable d'assurer un gain réel sur la consommation tout en limitant les effets secondaires sur le rendement et les émissions d'oxydes d'azote. (62)

3.5 conclusions

Ce chapitre a montré que l'application de l'hydrogène vert dans un moteur diesel suppose d'abord une production fiable et performante par électrolyse, puis une intégration maîtrisée dans un système d'alimentation dual fuel. Les critères de production de l'hydrogène doivent être évalués à travers le rendement, la consommation énergétique, la durée de vie des équipements, la pureté du gaz et la flexibilité du système face aux variations d'alimentation électrique. (63)

L'analyse des résultats expérimentaux met en évidence une réduction potentielle significative de la consommation de gazole lorsque les paramètres d'injection d'hydrogène sont correctement optimisés. Toutefois, la meilleure solution est celle qui améliore simultanément la performance énergétique, la stabilité du moteur et le bilan environnemental. Ainsi, l'hydrogène vert apparaît comme une voie prometteuse de transition énergétique dans les moteurs diesel, sous réserve d'une approche technique rigoureuse et d'une évaluation complète des compromis de fonctionnement. (63)

Conclusion

Conclusion générale

Ce travail de recherche, consacré à la conception et à l'optimisation d'un générateur d'hydrogène par électrolyse pour applications énergétiques, a permis de parcourir l'ensemble de la chaîne de valeur de l'hydrogène vert, depuis son potentiel théorique jusqu'à son utilisation pratique dans un moteur thermique. Les principaux apports de cette étude sont résumés ci-dessous.

Synthèse des résultats

Le premier chapitre a mis en évidence la dépendance critique de l'Algérie aux hydrocarbures, qui représentent plus de 99 % de sa production d'électricité et génèrent des émissions de CO₂ en constante augmentation (atteignant 180,4 millions de tonnes en 2023). Parallèlement, le pays dispose d'un potentiel solaire exceptionnel, avec une irradiation moyenne de 1 700 à plus de 2 500 kWh/m²/an, et d'un potentiel éolien estimé à environ 7 700 GW. L'hydrogène vert, produit par électrolyse, apparaît ainsi comme une opportunité stratégique pour diversifier l'économie, réduire les émissions et positionner l'Algérie comme un exportateur clé vers l'Europe.

Le second chapitre, consacré à la revue de littérature, a comparé les trois principales technologies d'électrolyseurs. Il en ressort que les électrolyseurs alcalins (AEL), bien que matures et moins coûteux, sont moins adaptés aux sources intermittentes. Les électrolyseurs à oxyde solide (SOEC), très efficaces (70-90 %), souffrent de contraintes liées aux hautes températures. En revanche, les électrolyseurs à membrane échangeuse de protons (PEM) offrent le meilleur compromis pour un couplage direct avec le solaire et l'éolien, grâce à leur temps de réponse rapide, leur large plage de fonctionnement et leur pureté d'hydrogène élevée.

Le troisième chapitre a analysé l'impact de l'injection d'hydrogène vert dans un moteur diesel en mode dual fuel. Les résultats expérimentaux tirés de la littérature montrent que :

- La consommation de gazole diminue de manière significative, avec une réduction pouvant atteindre 21,5 % dans des conditions optimisées.
- Les émissions de CO₂, CO et de particules (PM) diminuent nettement, ce qui représente un bénéfice environnemental majeur.
- En revanche, les émissions d'oxydes d'azote (NO_x) augmentent proportionnellement à la part énergétique d'hydrogène (HES), pouvant doubler pour une HES de 10 %.

- Une injection excessive d'hydrogène dégrade le rendement thermique et peut rendre le bilan énergétique global défavorable.

Solution la plus performante

La meilleure solution n'est donc pas celle qui maximise la substitution du gazole par l'hydrogène, mais celle qui réalise le meilleur compromis entre économie de carburant, réduction des émissions et stabilité du moteur. Un ajout modéré d'hydrogène (HES inférieure à 10 %), associé à un réglage précis des paramètres d'injection (pression de 0,18-0,20 MPa, temps d'ouverture de 3,5 ms), permet d'obtenir les gains les plus équilibrés.

Limites et perspectives

Ce travail présente certaines limites. Il s'appuie principalement sur des données de la littérature et des simulations, sans validation expérimentale sur un banc d'essai réel. De plus, l'analyse technico-économique complète, incluant le coût de l'électrolyseur, du stockage et de l'hydrogène produit, n'a pu être détaillée faute de données locales précises.

Pour de futurs travaux, plusieurs perspectives sont envisageables :

1. Réaliser une campagne expérimentale sur un moteur diesel instrumenté pour valider les tendances observées.
2. Étudier le couplage direct d'un électrolyseur PEM avec un champ photovoltaïque ou éolien en conditions réelles en Algérie.
3. Évaluer la viabilité économique d'une installation pilote, en tenant compte des subventions et des prix de l'électricité locale.
4. Explorer d'autres applications de l'hydrogène vert, comme l'injection dans les réseaux de gaz naturel ou l'alimentation de piles à combustible stationnaires.

En définitive, ce mémoire démontre que l'hydrogène vert constitue une voie crédible et prometteuse pour la transition énergétique de l'Algérie. Sa production par électrolyse à partir de ressources renouvelables abondantes et son utilisation dans les moteurs diesel existants (en mode dual fuel) peuvent réduire significativement l'empreinte carbone du pays tout en améliorant sa sécurité énergétique. Toutefois, la réussite de cette filière repose sur une approche rigoureuse

d'optimisation systémique, associant choix technologiques éclairés, réglages précis et analyse multicritère des performances. L'hydrogène vert n'est pas une solution miracle, mais un outil puissant — à condition de l'utiliser avec intelligence et parcimonie.

Références

1. [1.Points Clés de la Révolution Énergétique Algérienne](#heading-1)
2.)[]!https://t3.gstatic.com/faviconV2?client=SOCIAL&type=FAVICON&fallback_opts=TYPE,SIZE,URL&url=https://enectiva.cz(enectiva.cz
3.)[]!https://t3.gstatic.com/faviconV2?client=SOCIAL&type=FAVICON&fallback_opts=TYPE,SIZE,URL&url=https://power-h2.com(power-h2.com
4.)[]!https://t3.gstatic.com/faviconV2?client=SOCIAL&type=FAVICON&fallback_opts=TYPE,SIZE,URL&url=https://lhyfe
5.)[]!https://t3.gstatic.com/faviconV2?client=SOCIAL&type=FAVICON&fallback_opts=TYPE,SIZE,URL&url=https://meco.com(meco.com
6.)[]!https://t3.gstatic.com/faviconV2?client=SOCIAL&type=FAVICON&fallback_opts=TYPE,SIZE,URL&url=https://quebec.ca(quebec.ca
7.)[]!https://t3.gstatic.com/faviconV2?client=SOCIAL&type=FAVICON&fallback_opts=TYPE,SIZE,URL&url=https://tni.org(tni.org
8.)[]!https://t3.gstatic.com/faviconV2?client=SOCIAL&type=FAVICON&fallback_opts=TYPE,SIZE,URL&url=https://youssafir.com(youssafir.com
9.)[]!https://t3.gstatic.com/faviconV2?client=SOCIAL&type=FAVICON&fallback_opts=TYPE,SIZE,URL&url=https://jne-asso.org(jne-asso.org
10.)[]!https://t3.gstatic.com/faviconV2?client=SOCIAL&type=FAVICON&fallback_opts=TYPE,SIZE,URL&url=https://lechiffredaffaires.dz(lechiffredaffaires.dz
11.)[]!https://t3.gstatic.com/faviconV2?client=SOCIAL&type=FAVICON&fallback_opts=TYPE,SIZE,URL&url=https://squatex.com(squatex.com
12.)[]!https://t3.gstatic.com/faviconV2?client=SOCIAL&type=FAVICON&fallback_opts=TYPE,SIZE,URL& /16/15)
13.)[]!https://t3.gstatic.com/faviconV2?client=SOCIAL&type=FAVICON&fallback_opts=TYPE,SIZE,URL&url=https://fr.wikipedia.org(fr.wikipedia.org
14.)[]!https://t3.gstatic.com/faviconV2?client=SOCIAL&type=FAVICON&fallback_opts=TYPE,SIZE,URL&url=https://ritimo.org(ritimo.org
15.)[]!https://t3.gstatic.com/faviconV2?client=SOCIAL&type=FAVICON&fallback_opts=TYPE,SIZE,URL&url=https://reveildalgerie.com(reveildalgerie.com
16.)[]!https://t3.gstatic.com/faviconV2?client=SOCIAL&type=FAVICON&fallback_opts=TYPE,SIZE,URL&url=https://cairn.info(cairn.info

17.)[]!https://t3.gstatic.com/faviconV2?client=SOCIAL&type=FAVICON&fallback_opts=TYPE,SIZE,URL&url=https://elwatan.dz(elwatan.dz
18.)[]!https://t3.gstatic.com/faviconV2?client=SOCIAL&type=FAVICON&fallback_opts=TYPE,SIZE,URL&url=https://inc.cnrs.fr(inc.cnrs.fr
19.)[]!https://t3.gstatic.com/faviconV2?client=SOCIAL&type=FAVICON&fallback_opts=TYPE,SIZE,URL&url=https://iris-france.org(iris-france.org
20.)[]!https://t3.gstatic.com/faviconV2?client=SOCIAL&type=FAVICON&fallback_opts=TYPE,SIZE
21. .fr(teamfrance-export.fr
22. ?
23. [2.Contexte Énergétique Mondial et Algérien : Entre Dépendance et Potentiel](#heading-2)
24. [2] U.S. Department of Energy, Hydrogen Production: Electrolysis, disponible sur : <https://www.energy.gov/cmei/fuels/hydrogen-production-electrolysis>
25. [3.L'Hydrogène Vert : Un Vecteur Énergétique Durable](#heading-3)
26. [3] Article scientifique en libre accès sur les technologies d'électrolyse et la production d'hydrogène vert, PMC : <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12609772/>
27. [4.Rôle de l'Hydrogène Vert dans la Décarbonation et l'Économie de l'Énergie](#heading-4)
28. [4] Energies (MDPI), Impact of Hydrogen Mixture on Fuel Consumption and Exhaust Gas Emissions in a Direct-Injection Diesel Engine, disponible sur : <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/11/4466>
29. [5.Conclusion](#heading-5)
30. [5] Combustion Engines, Preliminary tests of a diesel engine powered by diesel-hydrogen co-combustion, disponible sur : <https://www.combustion-engines.eu/pdf-169485-96305?filename=Preliminary-tests-of-a-Di.pdf>
31. [6.FAQ](#heading-6)
32. [7.Recommandations](#heading-7)
33. [8.Références](#heading-8)
34. [Comment l'hydrogène vert est-il produit ? - MECO](https://www.meco.com/fr/how-is-green-hydrogen-produced/)
35. [Comparaison de différents types d'électrolyseurs pour la production ... - Enectiva](https://www.enectiva.cz/fr/blog/2023/08/comparaison-de-diff%C3%A9rents-types-d%C3%A9lectrolyseurs-pour-la-production-dhydrog%C3%A8ne/)

36. [Énergie en Algérie Wikipédia](https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_en_Alg%C3%A9rie)
37. [Énergie solaire : l'Algérie, deuxième puissance du continent - El Watan](https://elwatan.dz/energie-solaire-lalgerie-deuxieme-puissance-du-continent/)
38. [Hydrocarbures : l'Algérie devient une "urgence" pour la Chine | Youssafir](https://youssafir.com/fr/blog/hydrocarbures-lalgerie-devient-une-urgence-pour-la-chine)
39. [Hydrocarbures : pourquoi la Chine se tourne-t-elle vers l'Algérie ?](https://reveildalgerie.com/fr/hydrocarbures-pourquoi-la-chine-se-tourne-t-elle-vers-lalgerie/)
40. [Hydrogène vert | Gouvernement du Québec](https://www.quebec.ca/agriculture-environnement-et-ressources-naturelles/energie/sources-energie/hydrogene-vert)
41. [Hydrogène vert issu d'énergies renouvelables : quelles perspectives - Connaissance des Énergies](https://www.connaissancedesenergies.org/hydrogene-perspectives-pour-les-energies-renouvelables-240426)
42. [Le marché des énergies renouvelables et de l'efficacité ...](https://www.teamfrance-export.fr/fiche-marche/transition-ecologique/enr-et-efficacite-energetique/DZ)
43. [Les défis de la transition énergétique dans les pays exportateur ...](https://www.tni.org/fr/article/the-challenges-of-the-energy-transition-in-fossil-fuel-exporting-countries)
44. [Les énergies renouvelables : un potentiel très peu exploité ...](https://www.ritimo.org/Les-energies-renouvelables-un-potentiel-tres-peu-exploite)
45. [LES ENJEUX ÉNERGÉTIQUES EN AFRIQUE DU NORD Focus sur l'Algérie](https://www.iris-france.org/wp-content/uploads/2021/09/OSFME_2021_06_08_Enjeux_energetiques_AfriqueduNord_Focus_Algerie.pdf)
46. [Les hydrocarbures : atout ou frein pour le développement de ...](https://www.cairn.info/revue-tiers-monde-2012-2-page-69.htm)
47. [Qu'est-ce qu'une usine de production d'hydrogène vert ? — Squatex](https://www.squatex.com/blog/comprendre-lhydrogene-vert)

48. [Tensions énergétiques mondiales : le positionnement stratégique de l'Algérie ! - Le Chiffre d'Affaires](<https://lechiffredaffaires.dz/lalgerie-face-a-la-recomposition-du-marche-gazier-mondial-opportunite-strategique-en-periode-de-tensions-energetiques/>)
49. [Transition énergétique en Algérie : les énergies fossiles ont ...](<https://www.jne-asso.org/2023/06/24/transition-energetique-en-algerie-les-energies-fossiles-ont-toujours-lavantage/>)
50. [Types of Electrolysers - Power to Hydrogen](<https://www.power-h2.com/insights/electrolyser-types>)
51. [Vers une production électrolytique d'hydrogène « vert - CNRS Chimie](<https://www.inc.asso.org/2023/06/24/transition-energetique-en-algerie-les-energies-fossiles-ont-toujours-lavantage/>)
52. Article scientifique en libre accès sur les technologies d'électrolyse — <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12609772/>
53. *Champs automatiques inclus : sommaire, numérotation des figures et des tableaux, pagination.*
54. Combustion Engines, Preliminary tests of a diesel engine powered by diesel-hydrogen co-combustion — <https://www.combustion-engines.eu/pdf-169485-96305?filename=Preliminary-tests-of-a-Di.pdf>
55. Combustion Engines, Preliminary tests of a diesel engine powered by diesel-hydrogen co-combustion — <https://www.combustion-engines.eu/pdf-169485-96305?filename=Preliminary-tests-of-a-Di.pdf>
56. Combustion Engines, Preliminary tests of a diesel engine powered by diesel-hydrogen co-combustion — <https://www.combustion-engines.eu/pdf-169485-96305?filename=Preliminary-tests-of-a-Di.pdf>
57. disponible sur : <https://www.iea.org/reports/global-hydrogen-review-2025/executive-summary>
58. Energies (MDPI), Impact of Hydrogen Mixture on Fuel Consumption and Exhaust Gas Emissions in a Direct-Injection Diesel Engine — <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/11/4466>
59. Energies (MDPI), Impact of Hydrogen Mixture on Fuel Consumption and Exhaust Gas Emissions in a Direct-Injection Diesel Engine — <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/11/4466>
60. Energies (MDPI), Impact of Hydrogen Mixture on Fuel Consumption and Exhaust Gas Emissions in a Direct-Injection Diesel Engine — <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/11/4466>

61. SAGE Journals, Effect of hydrogen–diesel dual-fuel usage on performance, emissions and diesel combustion in diesel engines —
<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1687814016664458>
62. SAGE Journals, Effect of hydrogen–diesel dual-fuel usage on performance, emissions and diesel combustion in diesel engines —
<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1687814016664458>
63. SAGE Journals, Effect of hydrogen–diesel dual-fuel usage on performance, emissions and diesel combustion in diesel engines —
<https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1687814016664458>
64. U.S. Department of Energy, Hydrogen Production: Electrolysis —
<https://www.energy.gov/cmei/fuels/hydrogen-production-electrolysis>
65. U.S. Department of Energy, Hydrogen Production: Electrolysis —
<https://www.energy.gov/cmei/fuels/hydrogen-production-electrolysis>