

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد - تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de MASTER**

En : Génie mécanique

Spécialité : Energie Renouvelable en Mécanique

Par: KEÏTA Makan

Sujet

Production de l'hydrogène vert en Algérie, les stratégies pour une transition énergétique durable : cas de Tlemcen et de Laghouat

Soutenu publiquement, le 10 / 06 / 2024, devant le jury composé de :

M. ALIANE Abdennour

M. BENMANSOUR Abdelkrim

M. SELADJI Chakib

MAA

MCB

Prof

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Université de Tlemcen

Président

Examineur

Encadreur

Année universitaire: 2023/2024

Remerciements

Tout d’abord, je tiens à remercier « ALLAH » le TOUT PUISSANT de m’avoir donnée la force, le courage et la patience de suivre le chemin du savoir et de la connaissance.

J’adresse mes vifs et chaleureux remerciement à mon encadreur le Professeur **SELADJI Chakib** pour la qualité de son enseignement, son accompagnement, ses précieux conseils et son soutien indéfectibles. Son expertise et sa disponibilité ont été essentiels à l’élaboration de ce travail.

Je tiens à remercier le Docteur **ALIANE Abdennour** d’avoir accepté de présider le jury, et Monsieur **BENMANSOUR Abdelkrim** de m’avoir fait l’honneur d’examiner ce travail.

Ma reconnaissance, mes remerciements et ma profonde gratitude aussi à tous mes enseignants de l’Université **ABOU BEKR BELKAID** et en particulier ceux du département de **GENIE MECANIQUE** pour leur enseignement de qualité et leur accompagnement tout au long de mon cursus. Leur passion pour la dispensation du savoir et de la connaissance ont grandement enrichi mon parcours académique.

Enfin je remercie toutes les personnes qui, de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

Je dédie ce travail à mes parents, dont leurs soutiens et encouragements constants ont été une source inépuisable de motivation et de force. Leurs amours, leurs sacrifices et leurs confiances en moi ont été primordial pour mener à bien ce projet.

A toute ma famille, qui a toujours été présente pour moi, m'offrant soutien, conseil et réconfort tout au long de ce parcours académique, en particulier ma bien aimé
sœur 'Djélika'.

Trouvez ici ma profonde reconnaissance.

Sans oublier mes regretter grandes mères qui portaient en mon égard un amour
sans faille.

Résumé

Ce mémoire explore la production de l'hydrogène vert en Algérie et les stratégies nécessaires pour une transition énergétique durable. L'Algérie, riche en ressources énergétique notamment renouvelable est idéalement positionnée pour développer l'hydrogène vert produit par électrolyse de l'eau en utilisant de l'électricité renouvelable. Le potentiel des énergies renouvelables en particulier solaire est immense et constitue le fondement de cette transition. Les technologies de production de l'hydrogène, notamment les électrolyseurs sont examinés en détail pour évaluer leur efficacité. Une analyse de l'impact environnemental montre que l'hydrogène vert peut significativement réduire les émissions de carbone en se basant sur un changement de comportement d'utilisation et non de carburants, contribuant ainsi aux objectifs climatiques. Suivi par une analyse du marché qui met le point sur la proximité de l'Algérie vis-à-vis du marché international dans un but d'approvisionnement en hydrogène vert. L'étude de faisabilité réalisée à l'aide du logiciel HOMER démontre que l'intégration de l'hydrogène vert dans le mix énergétique algérien est non seulement possible mais également avantageuse sur le plan économique. Enfin des recommandations stratégiques sont proposées pour promouvoir le développement de l'hydrogène vert en Algérie. Celles-ci incluent le soutien à la recherche et au développement, la mise en place d'infrastructures adéquates, des incitations financières etc... En adoptant ces stratégies, l'Algérie peut non seulement diversifier son économie et améliorer sa sécurité énergétique, mais aussi jouer un rôle clé dans la transition énergétique mondiale vers des sources d'énergie propres.

Abstract

This memo explores the production of green hydrogen in Algeria and the strategies needed for a sustainable energy transition. Algeria, rich in renewable energy resources, is ideally positioned to develop green hydrogen produced by water electrolysis using renewables. The potential of renewable energies, especially solar, is immense and forms the basis of this transition. Hydrogen production technologies, including electrolyzers, are examined in detail to assess their effectiveness. An environmental impact analysis shows that green hydrogen can significantly reduce carbon emissions by relying on a change in fuel rather than fuel use behavior, thus contributing to climate targets. Followed by a market analysis that points to Algeria's proximity to the international market for the purpose of supplying green hydrogen. The feasibility study conducted using the HOMER software demonstrates that integrating green hydrogen into the Algerian energy mix is not only possible but also economically beneficial. Finally, strategic recommendations are proposed to promote the development of green hydrogen in Algeria. These include support for research and development, the establishment of adequate infrastructure, financial incentives, etc. By adopting these strategies, Algeria can not only diversify its economy and improve its energy security, but also play a key role in the global energy transition to clean energy sources.

ملخص

تستكشف هذه الأطروحة إنتاج الهيدروجين الأخضر في الجزائر والاستراتيجيات اللازمة لانتقال الطاقة المستدامة. تتمتع الجزائر، الغنية بموارد الطاقة المتجددة بشكل خاص، بموقع مثالي لتطوير الهيدروجين الأخضر الذي يتم إنتاجه عن طريق التحليل الكهربائي للمياه باستخدام الكهرباء المتجددة. إن إمكانات الطاقات المتجددة، وخاصة الطاقة الشمسية، هائلة وتشكل أساس هذا التحول. يتم فحص تقنيات إنتاج الهيدروجين، وخاصة المحطات الكهربائية، بالتفصيل لتقييم فعاليتها. ويظهر تحليل الأثر البيئي أن الهيدروجين الأخضر يمكن أن يقلل بشكل كبير من انبعاثات الكربون على أساس التغيير في سلوك الاستخدام وليس الوقود، وبالتالي المساهمة في تحقيق الأهداف المناخية. يلي ذلك تحليل للسوق يسلط الضوء على قرب الجزائر من السوق الدولية بهدف توفير الهيدروجين الأخضر. توضح دراسة الجدوى التي تم إجراؤها باستخدام برنامج هومير أن دمج الهيدروجين الأخضر في مزيج الطاقة الجزائري ليس ممكناً فحسب، بل مفيد أيضاً من الناحية الاقتصادية. وأخيراً، تم اقتراح توصيات استراتيجية لتعزيز تطوير الهيدروجين الأخضر في الجزائر. وتشمل هذه الاستراتيجيات دعم البحث والتطوير، وإنشاء البنية التحتية للملائمة، والحوافز المالية وما إلى ذلك. ومن خلال اعتماد هذه الاستراتيجيات، لا تستطيع الجزائر تنويع اقتصادها وتحسين أمن الطاقة فحسب، بل يمكنها أيضاً لعب دور رئيسي في تحول الطاقة العالمية نحو الطاقة النظيفة. مصادر

Table des Matières

Introduction générale	1
Chapitre 1 : Potentiel des énergies renouvelables en Algérie.....	4
1.1 Généralité :.....	5
1.2 Contexte générale :.....	6
1.2.1 Dans le monde :	6
1.2.2 En Algérie :	11
1.3 Les ressources énergétiques en Algérie :.....	12
1.3.1 Le soleil :	15
Le vent :	17
1.3.2 La géothermie :.....	18
1.3.3 Les déchets :.....	21
1.4 Infrastructures d'énergies renouvelables :.....	26
1.5 Les défis et enjeux énergétique en Algérie :	27
1.6 Conclusion :.....	28
Chapitre 2 : Technologies de production de l'hydrogène vert	30
2.1 Généralité :.....	31
2.2 Propriétés de l'hydrogène :.....	32
2.3 Caractéristiques de l'hydrogène :	33
2.4 L'hydrogène comme vecteur d'énergie :.....	33
2.5 Production de l'hydrogène :	34
2.5.1 Les différents types d'hydrogène :.....	35
2.6 Production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles :.....	37
2.6.1 Le reformage du gaz naturel :.....	37
2.6.2 La gazéification :	38
2.7 Production d'hydrogène à partir de la biomasse :.....	39
2.8 Production d'hydrogène par énergie renouvelable :	41
2.9 Technologies de production de l'hydrogène vert :	47
2.9.1 Electrolyseur à pile alcaline :	47
2.9.2 Electrolyseur à membrane échangeuse de proton (PEM) :	48
2.9.3 Electrolyseur en Oxyde Solide :	50
2.9.4 Electrolyseur microbienne:.....	53
2.9.5 Cellules d'électrolyse capillaire :.....	55
2.9.6 Feuilles hybrides photo-thermiques – photo-catalyseurs :.....	57

2.10	Potentiel de production d'hydrogène vert en Algérie :	60
2.11	La Namibie :	62
2.12	Conclusion :	64
Chapitre 3 : Impact Environnemental, Dynamique du Marché et Recommandations Stratégiques pour le Développement de l'Hydrogène Vert en Algérie		66
3.1	Introduction :	67
3.2	Impacts environnementaux de l'hydrogène vert :	68
3.3	Analyse politique du marché de l'hydrogène :	72
3.3.1	Dynamique du marché mondial de l'hydrogène vert :	76
3.4	Politique énergétique de l'Algérie :	79
3.5	Stratégies de développement de l'hydrogène :	83
3.6	Recommandations stratégiques :	87
3.7	Conclusion :	88
Chapitre 4 : Présentation et utilisation du logiciel HOMER Pro		89
4.1	Logiciel HOMER PRO :	90
4.2	Présentation du logiciel :	91
4.3	Fonctionnement du logiciel :	92
4.4	Données géographiques :	95
4.4.1	Région de Tlemcen :	95
4.4.2	Région de Laghouat :	96
4.5	Données météorologiques :	96
4.5.1	Variation mensuelle de l'irradiation :	96
4.5.2	Variation de la température moyenne :	99
4.6	Configuration des composants et paramètres financiers du Projet :	100
4.6.1	Descriptions et interprétations des scénarios :	101
4.6.2	Résultat de simulation :	117
4.7	Conclusion :	118
Conclusion générale		120
<i>Bibliographie</i>		123

Listes des figures

Figure 1. 1: Consommation mondiale d'énergie primaire par combustibles en 1970 et 2019 [9]	7
Figure 1. 2: Evolution de consommation d'énergie primaire 1970-2019 [9]	8
Figure 1. 3: Réserve mondiale des énergies fossiles [63]	9
Figure 1. 4: Production mondiale d'énergie primaire en 2019 [9]	10
Figure 1. 5: Bassins de pétrole et de gaz naturel [9]	13
Figure 1. 6: Parc de production d'énergie électrique [9]	14
Figure 1. 7: Irradiation globale en Algérie [64]	15
Figure 1. 8: Concentration venteux sur la carte	18
Figure 1. 9: Vitesses et énergies des vents en Algérie [13]	18
Figure 1. 10: Carte du gradient géothermique de l'Algérie [66]	20
Figure 1. 11: Composition des déchets en Algérie [65]	22
Figure 1. 12: Valorisation énergétique des déchets par incinération [67]	24
Figure 1. 13: Processus de valorisation par méthanisation [68]	25
Figure 2. 1: Densité d'énergie massique pour différents vecteurs d'énergie [5]	34
Figure 2. 2: Les différents modes de production de l'hydrogène [6]	35
Figure 2. 3: Principe de la gazéification de la biomasse [69]	40
Figure 2. 4: Evolution de la demande annuelle de l'hydrogène	42
Figure 2. 5: Les diverses méthodes de production de l'hydrogène [36]	43
Figure 2. 6: Electrolyseur alcaline [36]	48
Figure 2. 7: Electrolyseur à membrane échangeuse de proton [36]	49
Figure 2. 8: Electrolyseur à Oxyde Solide [36]	51
Figure 2. 9: Spécifications typiques de l'alcaline, du PEM et du SOE	52
Figure 2. 10: Electrolyseur microbienne [36]	54
Figure 2. 11: Conceptualisation de la cellule d'électrolyse capillaire	56
Figure 2. 12: Schéma du dispositif de la feuille hybride	59
Figure 3. 1: Demande mondiale d'hydrogène par secteur [62]	74
Figure 3. 2: Moyen de transport de l'hydrogène, de la production au consommateur final	75
Figure 3. 3: Géopolitique de l'hydrogène, les échanges mondiaux d'hydrogène et de ses dérivés	78
Figure 3. 4: Répartition de la production d'hydrogène vert par technologie de production d'électricité	85
Figure 4. 1: Interface du logiciel HOMER Pro	93
Figure 4. 2: L'ajout des charges de consommation	94
Figure 4. 3: Source d'énergie pouvant être utilisée	94
Figure 4. 4: Définition des paramètres financiers	95

Figure 4. 5: Evolution mensuelle de l'ensoleillement à Tlemcen	97
Figure 4. 6: Evolution mensuelle de l'ensoleillement à Laghouat	98
Figure 4. 7: Evolution mensuelle de la température à Tlemcen	99
Figure 4. 8: Evolution de la température à Laghouat	100
Figure 4. 9: Configuration du système.....	101
Figure 4. 10: Production des PV dans le scénario 1	102
Figure 4. 11: Utilisation de la pile (Scénario 1)	103
Figure 4. 12: Consommation des électrolyseurs (Scénario 1)	103
Figure 4. 13: Niveau de stockage dans le réservoir (Scénario 1)	104
Figure 4. 14: Production d'énergie mensuelle (Scénario 1).....	105
Figure 4. 15: Production d'énergie mensuelle (Scénario2).....	106
Figure 4. 16: Variation mensuelle du vent à Tlemcen.....	108
Figure 4. 17: Production de l'éolienne (Scène 3)	109
Figure 4. 18: Production de la pile à combustible.....	109
Figure 4. 19: Consommation de l'électrolyseur.....	110
Figure 4. 20: Consommation mensuelle de l'électrolyseur.....	110
Figure 4. 21: Niveau du réservoir.....	111
Figure 4. 22: Production de l'énergie par mois	111
Figure 4. 23: Configuration du scénario 3 et 4.....	112
Figure 4. 24: Variation mensuelle du vent à Laghouat.....	113
Figure 4. 25: Production de l'éolienne (scène 4).....	114
Figure 4. 26: Production de la pile à combustible.....	114
Figure 4. 27: Consommation de l'électrolyseur.....	115
Figure 4. 28: Production d'énergie mensuelle	115
Figure 4. 29: Bilan économique du scénario 1.....	117
Figure 4. 30: Bilan économique du scénario 2.....	117
Figure 4. 31: Bilan économique du scénario 3.....	118
Figure 4. 32: Bilan économique du scénario 4.....	118

Listes des Tableaux

Tableau 1. 1: Production mondiale de l'énergie primaire en 2010	9
Tableau 1. 2: Quotidien d'énergie solaire et durée d'ensoleillement régionale en Algérie ...	16
Tableau 1. 3: Principales caractéristiques physico-chimiques de quelques sources thermales de l'Algérie [16]	20
Tableau 2. 1: Les variétés de méthodes de production de l'hydrogène, leurs avantages, inconvénients, rendements et coûts	44
Tableau 2. 2: Rendement, durée de vie et température de fonctionnement des différents électrolyseurs	53
Tableau 2. 3: Avantages et inconvénients des différentes technologies de l'électrolyse de l'eau	55
Tableau 3. 1: Objectifs détaillés du programme des énergies renouvelables en Algérie [55]	82
Tableau 4. 1: Coordonnées géographiques de Tlemcen.....	96
Tableau 4. 2: Coordonnées géographiques de la wilaya de Laghouat.....	96
Tableau 4. 3: Donnée du rayonnement solaire de la wilaya de Tlemcen	97
Tableau 4. 4: Donnée du rayonnement solaire de Laghouat.....	98
Tableau 4. 5: Température mensuelle de la wilaya de Tlemcen.....	99
Tableau 4. 6: Donnée mensuelle de la température à Laghouat	100
Tableau 4. 7: Bilan énergétique du scénario 1.....	105
Tableau 4. 8: Bilan énergétique du scénario 2.....	107
Tableau 4. 9: Donnée mensuelle de l'évolution du vent	108
Tableau 4. 10: Bilan énergétique du scénario 3.....	112

Nomenclature

EnR : Energies Renouvelables

GPL : Gaz de Pétrole Liquéfié

GNL : Gaz Naturel Liquéfié

Mtep : Million de tonne équivalent de pétrole

Mb/j : Million de baril par jour

Tep : Tonne équivalent de pétrole

GES : Gaz à effet de serre

CSC : Capture et stockage du carbone

DMA : Déchets ménagers et assimilés

PEM : Membrane échangeuse du proton

SOEC : Cellule à oxyde d'électrolyse solide

MEC : Cellule d'électrolyse microbienne

MFC : Cellule à combustible microbienne

CFE : Cellule d'électrolyse capillaire

OPEP : Organisation des pays exportateurs de pétrole

AIE : Agence internationale de l'énergie

IRENA : Agence internationale des énergies renouvelables

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie

NEAL : Nouvelle énergie Algérie

NFEM : Fonds national pour la gestion de l'énergie

APRUE : Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie

HOMER: Hybrid optimization of multiple energy resource

Introduction générale

L'hydrogène vert, produit à partir de sources d'énergie renouvelables, est de plus en plus reconnu comme un vecteur énergétique clé pour la transition vers une économie mondiale à faibles émissions de carbone. Ce type d'hydrogène, généré par électrolyse de l'eau utilisant de l'électricité verte, représente une solution prometteuse pour décarboniser divers secteurs industriels, énergétiques et des transports. En tant que carburant propre et polyvalent, l'hydrogène vert est crucial pour répondre aux défis environnementaux actuels tout en soutenant une croissance économique durable.

En Algérie, pays riche en ressources solaires et gazières, l'hydrogène vert offre une opportunité unique de diversifier son mix énergétique, renforcer sa sécurité énergétique et réduire ses émissions de gaz à effet de serre. L'exploitation de cette ressource peut positionner l'Algérie comme un acteur majeur dans le marché mondial de l'hydrogène vert, contribuant ainsi à la décarbonisation globale.

Objectifs et Méthodologie de l'Étude

L'objectif principal de cette étude est d'analyser les possibilités de production d'hydrogène vert en Algérie et d'élaborer des stratégies pour une transition énergétique durable. Pour ce faire, nous utiliserons une méthodologie combinant l'analyse des ressources énergétiques renouvelables disponibles, l'évaluation des technologies de production d'hydrogène vert, et l'étude des cadres politiques et économiques favorisant son développement.

Utilisation du Logiciel Homer

Une partie essentielle de cette analyse repose sur l'utilisation du logiciel Homer (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources). Ce logiciel sera employé pour effectuer des études de cas spécifiques dans les régions algériennes de Tlemcen et Laghouat, deux zones présentant des conditions idéales pour la production d'hydrogène vert en raison de leur potentiel solaire élevé. Homer nous permettra de modéliser les systèmes énergétiques hybrides, d'optimiser la production d'hydrogène et d'évaluer la viabilité économique et environnementale des projets.

Études de Cas : Tlemcen et Laghouat

- **Tlemcen** : Cette région, bénéficiant d'un ensoleillement abondant, est idéale pour l'installation de systèmes photovoltaïques couplés à des électrolyseurs pour produire de

l'hydrogène vert. L'étude analysera les coûts, les rendements et les impacts environnementaux d'un tel projet.

- **Laghouat** : Située dans une zone également favorable à l'énergie solaire, Laghouat sera étudiée pour son potentiel à produire de l'hydrogène vert à partir de l'énergie éolienne et solaire. L'analyse portera sur l'optimisation des ressources disponibles et la rentabilité du projet.

En résumé, cette étude vise à fournir une analyse détaillée et méthodique des opportunités de production d'hydrogène vert en Algérie. Grâce à l'utilisation du logiciel Homer et à l'évaluation des ressources renouvelables, nous espérons identifier des stratégies efficaces pour intégrer l'hydrogène vert dans le paysage énergétique algérien. Cette transition est essentielle pour promouvoir une économie plus propre, durable et résiliente, tant au niveau national qu'international.

Chapitre 1 : Potentiel des énergies renouvelables en Algérie

1.1 Généralité :

L'approvisionnement énergétique mondiale est aujourd'hui essentiellement basé sur l'utilisation des ressources fossiles et nucléaire. A terme, de telles sources d'énergie pourraient causer de sérieux préjudices à notre environnement. Les pollutions atmosphériques et l'effet de serre, mis en cause dans le réchauffement climatique, associés aux retombées radio actives liées au nucléaire sont des conséquences attendues. Ainsi, à la lumière de tous ces éléments, le système d'énergie actuel n'est pas viable sur le moyen et long terme. Le changement climatique est tenu pour l'une des menaces les plus sérieuses pesant sur la durabilité de l'environnement de la planète, sur la planète et le bien-être humain et sur l'économie mondiale.

L'épuisement des réserves mondiales de pétrole et de gaz naturel, leurs prix qui augmentent sans cesse et l'insécurité de l'approvisionnement à long terme qui met la situation énergétique mondiale en rupture avec l'objectifs du développement durable, provoque une demande grandissante pour de nouvelles sources d'énergie renouvelables et non polluantes.

L'énergie renouvelable représente un potentiel considérable pour répondre aux besoins énergétiques sociaux de manière durable et respectueuses de l'environnement, avec un impact direct et colossal sur la minimisation du changement climatique car elles émettent peu ou pas de gaz à effet de serre lors de leurs utilisations et contribuent à réduire la dépendance aux combustibles fossiles et atténuent les effets du réchauffement climatique.

L'Algérie possède un potentiel significatif en matière d'énergie renouvelable, notamment grâce à son climat ensoleillé et à ses vastes étendus de terres propices à l'utilisation de l'énergie solaire et éolienne. Le pays amorce un dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables (EnR) et d'efficacité. Cette vision de gouvernement Algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources épuisables comme le solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain. Grâce à la combinaison des initiatives et des intelligences, l'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable.

Le pays s'est engagée sur la voie des énergies renouvelables afin d'apporter des solutions globales et durables aux défis environnementaux et aux problématiques de préservation des ressources énergétiques d'origine fossile à travers le lancement d'un programme ambitieux pour le développement des énergies renouvelables qui a été adopté par le Gouvernement en février

2011, révisée en mai 2015 et placé au rang de priorité nationale en février 2016, par Monsieur le Président de la République Mr. Abdelaziz Bouteflika, lors du conseil restreint Gouvernementale [1].

L'exploitation de ce potentiel pourrait contribuer à diversifier le mix énergétique du pays, à renforcer sa sécurité énergétique et à réduire ses émissions de gaz à effet de serre.

1.2 Contexte générale :

Compte tenu du caractère limité des réserves d'énergie primaire fossile, des répercussions sur l'environnement qu'implique leur utilisation ou encore des risques et défis particuliers liés au nucléaire, une transition énergétique, reposant sur l'utilisation accrue de sources renouvelables d'énergie, est en œuvre partout dans le monde, selon des rythmes de progression différents [2].

Depuis quelques années, les énergies renouvelables, dont le contre-choc pétrolier de 1986 avait fortement ralenti le développement, connaissent un très fort regain d'intérêt. La récente flambée des cours du pétrole et du gaz et la préoccupation grandissante de la communauté internationale vis-à-vis du réchauffement climatique en sont les premières causes. S'y ajoutent les premiers et indéniables succès industriels remportés par des filières considérées jusqu'à récemment comme marginales, en particulier l'éolien, dont la croissance aussi bien dans certains pays industrialisés que dans des pays émergents au cours des cinq dernières années est tout à fait remarquable.

Après une longue période de pénitence, les énergies renouvelables retrouvent une légitimité qui conduit parfois les plus optimistes à compter sur un développement explosif de leurs diverses applications pour résoudre à moyen terme (une vingtaine d'années) les problèmes d'approvisionnement énergétique de l'humanité sans contribuer aux émissions de gaz à effet de serre [3].

1.2.1 Dans le monde :

La consommation mondiale d'énergie augmente en raison de la dépendance croissante de notre mode de vie à l'énergie et de l'augmentation de la population mondiale, entraînant une énorme quantité d'émissions de dioxyde de carbone. Il ressort de la que plus de 95% de la consommation mondiale d'énergie primaire en 1970 a été basée sur les combustibles fossiles, en 2019, 88% de la consommation d'énergie est fournie par des combustibles fossiles (33 % de pétrole, 24,2 % de gaz naturel et ~ 27 % de charbon), mais seulement 11,4 % est fournie par une source d'énergie

renouvelable (y compris l'énergie solaire, l'énergie éolienne, biomasse et biocarburants, bois, hydroélectrique, etc.). Une augmentation sensible de la consommation de gaz au détriment des autres sources non renouvelables est enregistrée. Jusqu'à la fin de 2019 on constate, par ailleurs, que 90 % de la consommation mondiale d'énergie primaire a été basée sur des ressources non renouvelables, sans changement par rapport à 1970 [4].

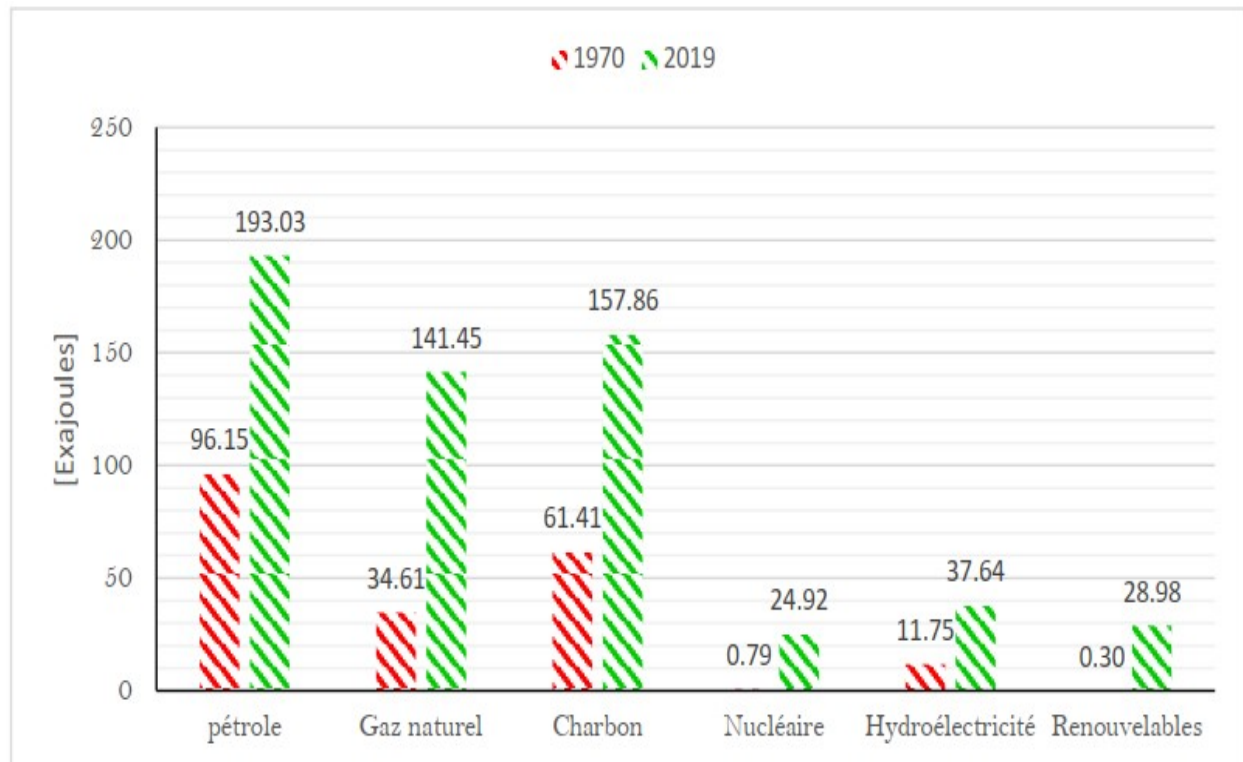


Figure 1. 1: Consommation mondiale d'énergie primaire par combustibles en 1970 et 2019 [9]

L'évolution de la consommation mondiale d'énergie primaire en exajoules de 1970 à 2019 a été présentée dans la Figure 1-3 , l'augmentation de la consommation d'énergie primaire au cours des 49 dernières années (1970-2019) a entraîné une augmentation significative de la consommation est égale à 2% par an, passant de 205 Exajoules en 1970 à 584 Exajoules en 2019, Cette augmentation de la consommation est due à la croissance de la population qui est l'un des principaux facteurs clés affectant la consommation d'énergie aujourd'hui, entre la période 1970-2019 la croissance démographique a été doublé ,passant de 3,7 milliards en 1970 à 7,7 milliards

en 2019 (United 2019), et dans cette période a été marquée par une remarquable croissance économique mondiale le Produit intérieur brut (PIB) a augmenté de 4,4 fois, soit 3,3% p.a. et la croissance rapide de la population active, à 1,7% par an, ont été complétées par un taux élevé de croissance de la productivité.

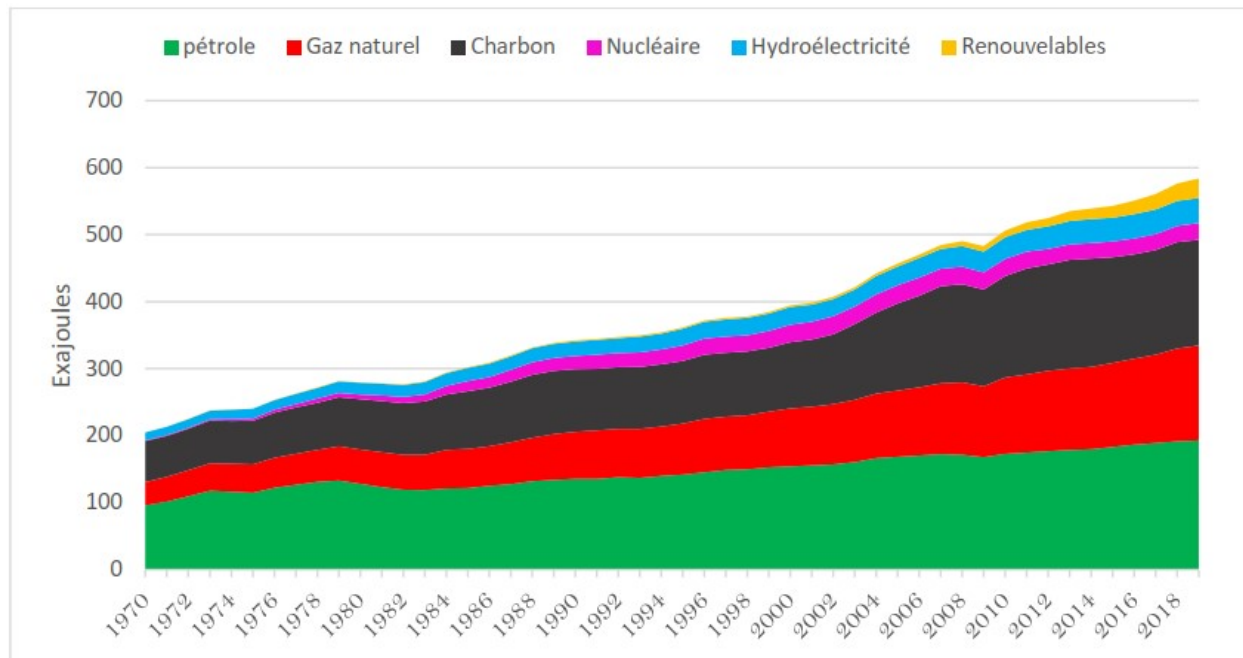


Figure 1. 2: Evolution de consommation d'énergie primaire 1970-2019 [9]

Les réserves mondiales d'hydrocarbures, pétrole et gaz naturel, qui assurent plus que la moitié de la fourniture d'énergie primaire, qui sont inégalement répartie et se trouve pour une large part dans des régions éloignées des principales zones de consommation. De ce fait, une part croissante de ces hydrocarbures doit être importée par les pays consommateurs. Les réserves de pétrolières étant localisées dans des régions du monde dont certains sont instables en résulte des risques géographiques [5].

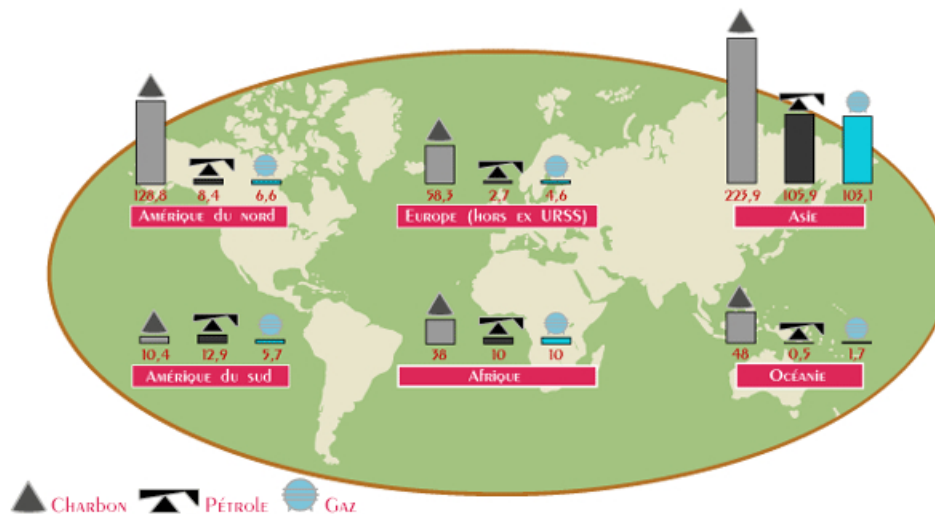


Figure 1. 3: Réserve mondiale des énergies fossiles [63]

Plus de 80% de la production mondiale d'énergie a été basée en 2010 sur les combustibles fossiles. Si l'on ajoute la source nucléaire, on constate que 87,1% de la production mondiale d'énergie primaire a été basée sur des ressources non renouvelables [6].

Tableau 1. 1: Production mondiale de l'énergie primaire en 2010

Source Primaire	Mtep	%
Pétrole	4 120	32,4
Charbon	3 470	27,3
Gaz naturel	2 720	21,4
Nucléaire	725	5,7
Hydraulique	292	2,3
Renouvelables + déchets	1 386	10,9
Total	12 717	100

La production mondiale d'énergie commercialisée était en 2019, selon BP, de 584,9 Exajoules, en progression de 12.1 % depuis 2009. Elle se répartissait en 33.1 % de pétrole, 27 % de charbon, 24,2 % de gaz naturel, 4.3 % de nucléaire et 11.5 % d'énergies renouvelables (hydroélectricité 6,5 %, éolien 2,2 %, biomasse et géothermie 1,0%, solaire 1.1%, agrocarburants 0,7 %). Cette statistique ne prend pas en compte les énergies auto-consommées (bois, pompes à

chaleur, solaire thermique, etc.), qui selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE) représentaient 9,3 % en 2018. Au total, la part des énergies renouvelables dans la production d'énergie mondiale est donc supérieure à 20 %.

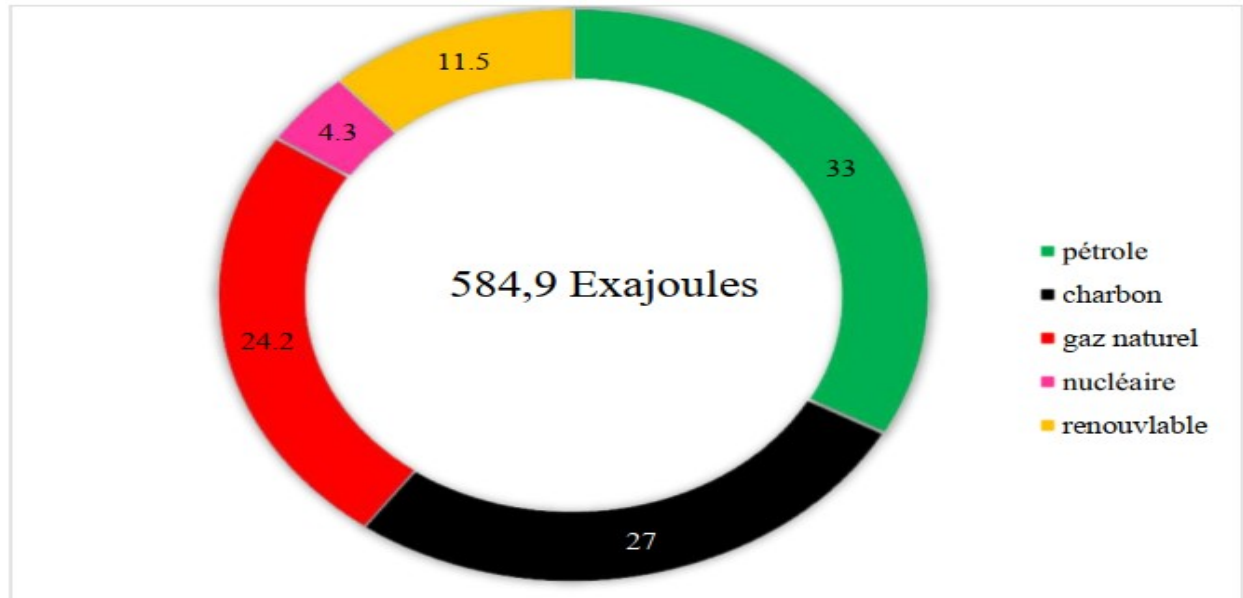


Figure 1. 4: Production mondiale d'énergie primaire en 2019 [9]

Les sources d'énergies renouvelables ont fortement augmenté pour représenter, selon les estimations 16,7% de la consommation énergétique finale mondiale en 2010. Sur ce total, la part des énergies renouvelables modernes, en nette augmentation ces dernières années est estimée à 8,2% contre seulement 8,5% pour la biomasse traditionnelle en léger déclin. Durant 2011, les énergies renouvelables modernes ont continué de progresser sensiblement dans l'ensemble des secteurs de la consommation comme l'électricité, le chauffage, le refroidissement, et le transport [6].

En 2017, la part des énergies renouvelables dans la consommation finale mondiale d'énergie était estimée à 18,1 % dont 7,5 % de biomasse traditionnelle (bois, déchets agricoles, etc.) et 10,6 % d'énergies renouvelables dont 4,2 % de chaleur produite par les énergies renouvelables thermiques (biomasse, géothermie, solaire thermique) 3,6 % d'hydroélectricité, 2 % pour les autres renouvelables électriques (éolien, solaire photovoltaïque, géothermie, biomasse, biogaz) et

1 % pour les biocarburants, dans le secteur de l'électricité, la part globale en 2018 était de 26,2 %, l'hydroélectricité ayant la plus grande part avec 15,8 % [7].

De nos jours, le secteur énergétique mondiale est responsable de 32,04 Gt d'émissions de CO₂, dont une part élevée est liée à la production d'électricité 43,6% [8]. L'électricité est le cœur du problème car une décarbonisation significative du système énergétique sera tirée à la fois par l'électrification de différents secteurs et par la décarbonisation du secteur électrique. La décarbonisation du secteur énergétique nécessite une action urgente à l'échelle mondiale, et alors qu'une transition énergétique mondiale est en cours, des actions supplémentaires sont nécessaires pour réduire les émissions de carbone et atténuer le changement climatique. Afin d'atténuer le changement climatique et de s'aligner sur les objectifs de la décarbonisation attendus dans le monde, la plupart des mix énergétiques doivent subir des transformations avec des parcours de transition énergétique spécifique aux pays [9].

La réduction de la dépendance aux combustibles fossiles et l'utilisation des sources d'énergies renouvelables ont été envisagées comme deux viables pour surmonter ce problème. La fiabilité politique, la rentabilité et l'acceptabilité du public peuvent être considérées comme les principales contraintes pour l'utilisation des sources d'énergies renouvelables.

Le défi reste d'identifier la manière optimale de réduire ces émissions tout en préservant la croissance, la compétitivité et la sécurité d'approvisionnement. Les mesures relatives aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique peuvent potentiellement atteindre 90% des réductions de carbone requises. La transition énergétique sera rendue possible grâce aux technologies de l'information, aux technologies intelligentes, aux cadres politiques et aux instruments de marché [9].

1.2.2 En Algérie :

L'épuisement des réserves mondiales de pétrole et de gaz naturel, leurs prix qui augmentent sans cesse et l'insécurité de l'approvisionnement à long terme qui met la situation énergétique mondiale en rupture avec les objectifs du développement durable, provoque une demande grandissante pour de nouvelles sources d'énergie renouvelables et non polluantes.

L'Algérie se classe au quinzième rang mondial et au troisième en Afrique derrière la Angola et le Nigeria avec 9,2 milliards de barils de pétrole et des réserves prouvées de 0,9 % du total

mondial. Neuvième producteur de gaz naturel et premier en Afrique avec plus de 4 500 milliards de m³ de gaz, sans parler du gaz de schiste et le deuxième plus grand fournisseur de gaz naturel de l'Europe, l'Algérie 51 ans après son indépendance reste prisonnière d'une économie de rente [10].

Aujourd'hui, les besoins énergétiques de l'Algérie sont satisfaits, presque exclusivement, par les hydrocarbures, notamment le gaz naturel, énergie la plus disponible. Le secteur des transports, qui représente à lui seul environ 41% de la consommation totale du pays, est considéré comme l'une des premières sources de pollution en Algérie avec des émissions atteignant 14 millions de tonnes équivalent CO₂, soit un taux de 46% des émissions de gaz à effet de serre, L'essentiel de l'énergie consommée dans ce secteur provient des dérivés du pétrole dont 65% gasoil et 26% essence, alors que le GPL, qui est un carburant propre, ne représente que 3% [11].

Pour remédier les problèmes causés par l'utilisation des ressources non renouvelables, la transition énergétique de l'économie traditionnelle basée sur les combustibles fossiles vers une économie durable basée sur l'hydrogène dans les prochaines années pourrait transformer la politique énergétique de l'Algérie, et permet de diversifier les carburants consommés, tout en réduisant les impacts environnementaux.

1.3 Les ressources énergétiques en Algérie :

L'Algérie est devenue membre de l'Organisation des pays exportateurs de pétrole (Opep) en 1969, peu de temps après le début de la production de pétrole en 1958. Le pays est aujourd'hui fortement tributaire de son secteur des hydrocarbures qui représente selon le Fonds monétaire international près de 70 % des recettes et subventions du budget et environ 97 % des recettes à l'exportation. La *Sonatrach* domine le secteur des hydrocarbures du pays dont elle assure plus de 70% de toute la production [10]. L'Algérie dispose d'environ 12,2 milliards de barils de réserves prouvées de pétrole. Répartie dans plusieurs zones, comme Hassi Messaoud (3,9 milliards de barils) le gisement de pétrole les plus anciens et les plus importants, près de la ville de Ouargla, Champ pétrolier Hassi Al-Raml (3,7 milliards de barils) et champ pétrolifère Ourhoud (1,9 milliard barils) selon l'Agence Internationale de l'Energie. Par ailleurs, l'Algérie a également développé plusieurs autres champs ces dernières années, comme les champs pétrolifères de Berkine (représentant 8% des réserves de pétrole) et d'illizi (représentant 15% des réserves de pétrole) (regane, ahnet/timimoune, etc.)

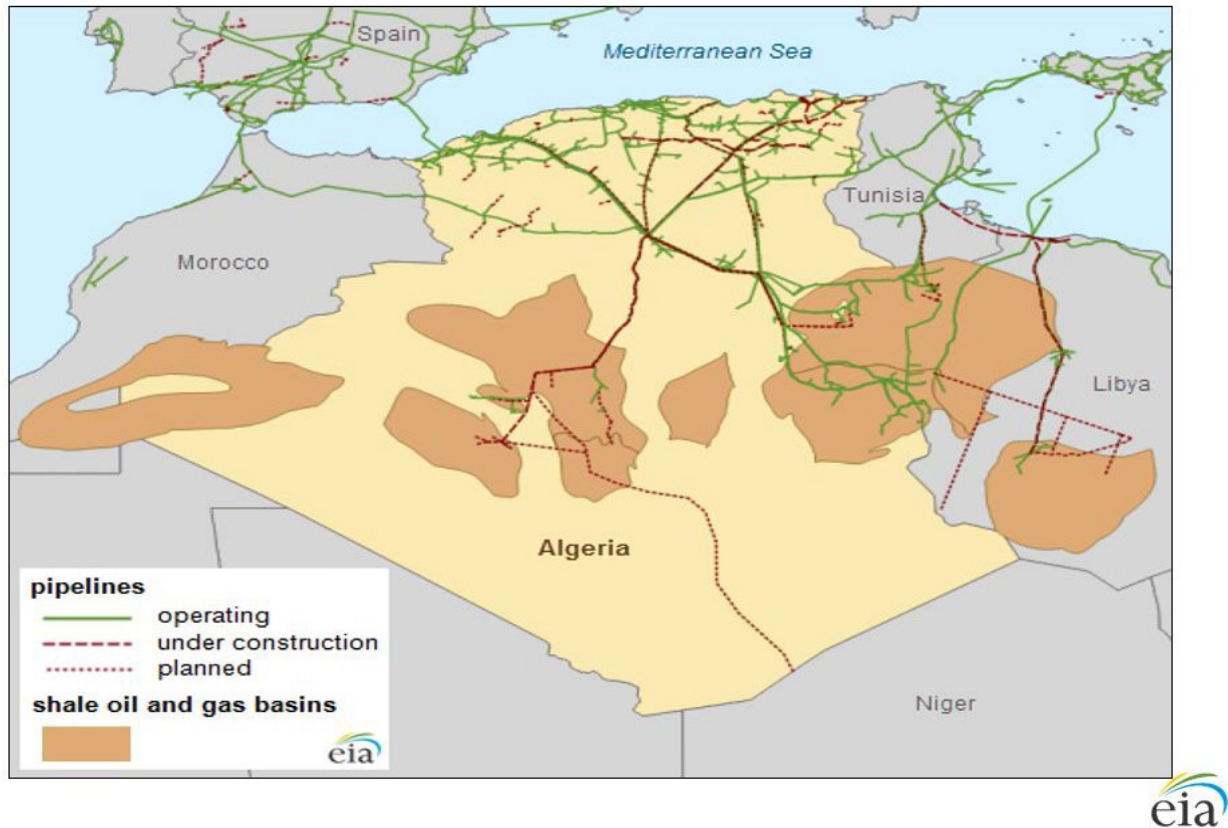


Figure 1. 5: Bassins de pétrole et de gaz naturel [9]

En 2014, l'Algérie a produit 66.0 Mt (millions de tonnes) de pétrole, soit 1.53 Mb/j (millions de barils par jour), en hausse de 1.8 % en 2014 mais en recul de 20.6 % depuis 2004. L'Algérie a produit 83.3 milliards de m³ de gaz naturel, soit 75.0 Mtep (millions de tonnes équivalent pétrole), en hausse de 2.2 % (+1.6 % depuis 2004).

En 2019, l'Algérie a produit environ 164.4 Mtep de pétrole brut, dont 79% ont été exportés. La production de gaz naturel est de 84.3 Mtep, dont 60% ont été exportés. Le gaz naturel a fourni la plus grande part de l'énergie primaire et sa consommation finale, qui atteint 34.1 Mtep, est désagrégé en trois catégories ; production d'électricité, usages industriels et des utilisations résidentielles (principalement pour le chauffage et la cuisson). La consommation des produits pétroliers avec 19.3 Mtep, présente la deuxième plus importante source d'énergie, il était principalement utilisé pour le transport et pour l'industrie. Pour les énergies renouvelables et la

biomasse, chaque un de lui répond à moins de 2 % de la demande énergétique finale et ils sont utilisés pour l'habitation, l'industrie et la production d'électricité.

En Algérie, malgré la nécessité de protéger l'environnement, 99% de l'électricité provient de combustibles fossiles et le reste (0,8%) provient d'énergies renouvelables qui ont en fait été réduites à l'hydroélectricité. Une utilisation minimale de combustibles fossiles polluants est nécessaire pour produire de l'électricité.

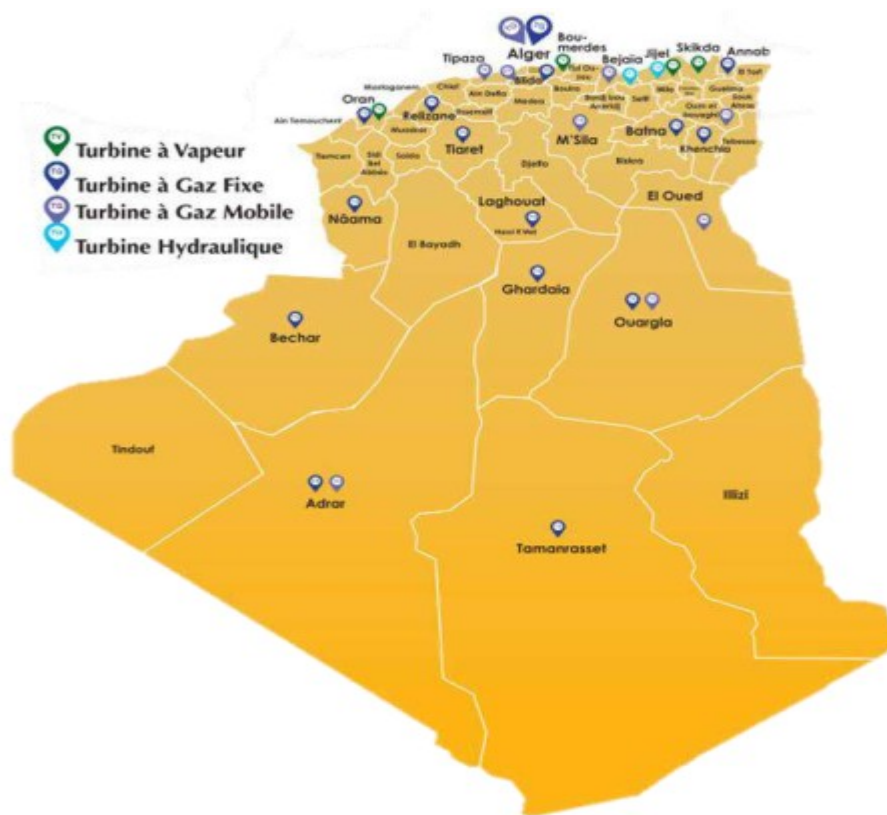


Figure 1. 6: Parc de production d'énergie électrique [9]

La superficie totale de l'Algérie est de près de 2 381 741 kilomètres carrés, ce qui en fait le plus grand pays d'Afrique. 78% du territoire algérien est occupé par le Sahara, ce qui offre des opportunités pour les énergies renouvelables distribuées. L'utilisation de l'énergie solaire s'est avérée particulièrement adaptée à l'Algérie, suivie de l'énergie éolienne et de l'électricité géothermique.

1.3.1 Le soleil :

L'Algérie bénéficie d'une énergie solaire abondante et a une excellente occasion de produire une énergie électrique à haute intensité rentable pour alimenter des électrolyseurs d'hydrogène vert tout au long de l'année.

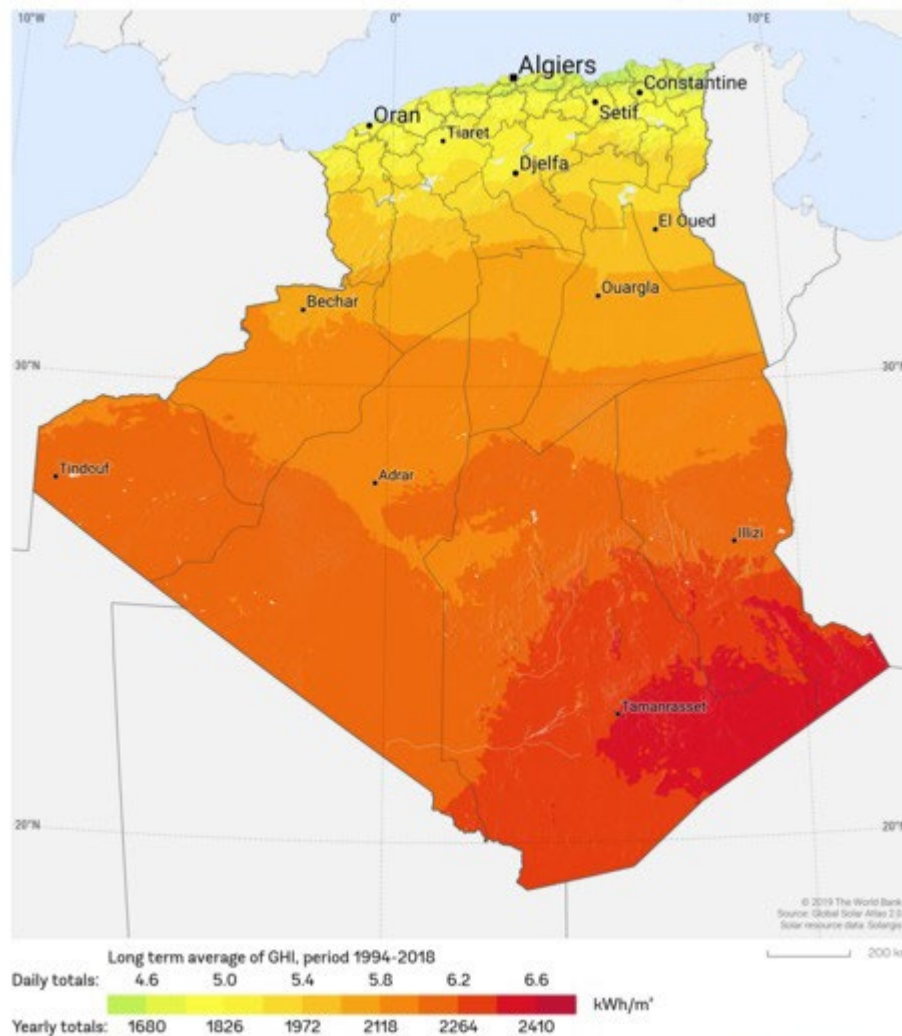


Figure 1. 7: Irradiation globale en Algérie [64]

L'Algérie est située dans la région de la Ceinture du Soleil et est ainsi dotée d'un potentiel solaire élevé. La durée moyenne annuelle du soleil varie d'un minimum de 2650 h sur la ligne côtière à 3500 h dans le Sud.

Le Sahara, qui englobe plus de 80% du territoire, offre une durée de soleil toujours supérieure à 8 h/jour, avec des valeurs supérieures à 12 heures/jour pendant l'été, tandis que la durée quotidienne du soleil au nord varie de 5 heures par jour en hiver à plus de 11 heures en été. De plus, du point de vue de sa position géographique, la durée du soleil ne présente pas de différences importantes entre les différents mois de l'année. Cela permet une disponibilité égale et longue du soleil tout au long de l'année

En outre, le potentiel de l'énergie solaire quotidienne est important. Elle varie d'une moyenne faible de 4,66 kWh/m² au nord à une moyenne de 7,26 kWh / m² au sud. Cela signifie que le potentiel énergétique annuel sur 80% du territoire est de l'ordre de 2650 kWh/m². L'énergie totale journalière disponible est de l'ordre de 16.56*10¹⁵Wh [12].

Sur la majeure partie de la superficie nationale, l'énergie solaire annuelle totale d'un mètre carré est d'environ 2000 KWh/m²/j, avec une irradiation quotidienne de 4,6-7 KWh /m². En outre, il semble que les endroits du sud sont plus prometteurs que d'autres en ce qui concerne l'utilisation de l'énergie solaire pour la production d'hydrogène vert. Tamanrasset et Illizi ont un potentiel d'énergie solaire annuel élevé de 2,4 et 2,2 MWh/m²/Y, respectivement. Toute la terre de l'Algérie peut produire une quantité totale d'énergie solaire allant de 4,2 à 5,8 kWh/kWp par jour et de 1534 à 2118 KWh/KWP par an. En termes de potentiel électrique le plus élevé, les régions d'Illizi, de Tamanrasset, Tindouf, Bechar et d'Adrar continuent de dominer. [13]

Tableau 1. 2: Quotidien d'énergie solaire et durée d'ensoleillement régionale en Algérie

Région	Ligne côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (km ²)	95,271	238,174	2,048,296
Durée moyenne d'ensoleillement journalier (h)	7.26	8.22	9.59
Densité d'énergie solaire journalière (kWh/m ²)	4.66	5.21	7.26
Potentiel d'énergie quotidienne (10 ¹² Wh)	443.96	1240.89	14,870.63

Le vent :

En raison de la rapide évolution de sa technologie, l'énergie éolienne a récemment suscité une grande attention à travers le monde et est sur le point de devenir un concurrent sérieux de la source d'énergie traditionnelle. En raison de la variété des caractéristiques géographiques et climatiques de l'Algérie, les vents présentent des variations. Au-dessus de la mer, le vent est plus rapide qu'à terre, le Sahara algérien est plus venté que les régions du nord du pays. Les vents orientaux (Est) soufflent sur le Sahara et les vents ouests sur le nord de l'Algérie. La vitesse du vent en Algérie dépasse 5 m/s dans le sud, avec la zone la plus ventée se limitant aux longitudes 1°W-5°E et latitudes 26°S-29°N.

La vitesse moyenne maximale du vent est de 5,3 m/s, avec un vent principalement d'est-nord situé sur le site d'In Salah. et vitesse minimale moyenne du vent d'une valeur de 2.3 m/s soufflant principalement du nord-ouest, est situé dans la région de Batna, dans la partie orientale des Hautes Terres algériennes [14].

Mars et août sont les mois les plus ventés dans le sud de l'Algérie, tandis qu'octobre et décembre sont légèrement moins ventés. La période la plus venteuse dans le nord est février et avril, la période la moins venteuse est de juin à octobre. Pendant la journée (12 UTC), la région algérienne est ventée, mais les vents sont généralement calmes la nuit [13].

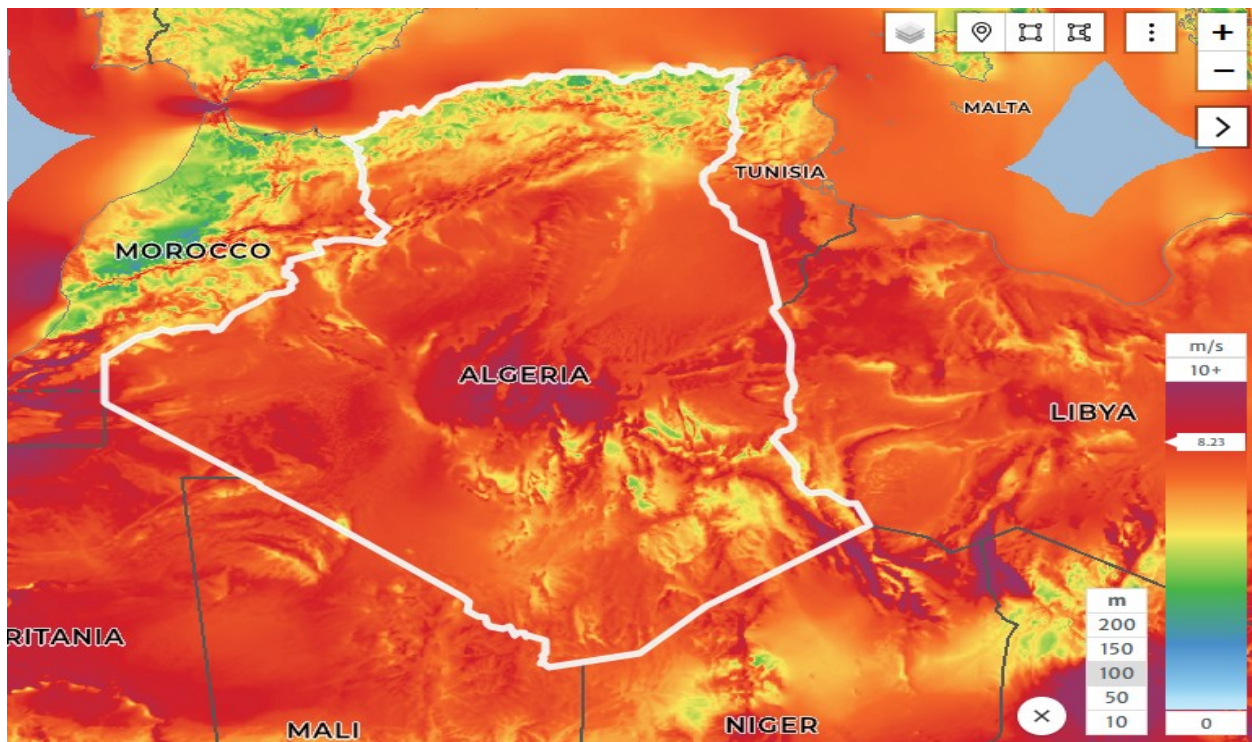
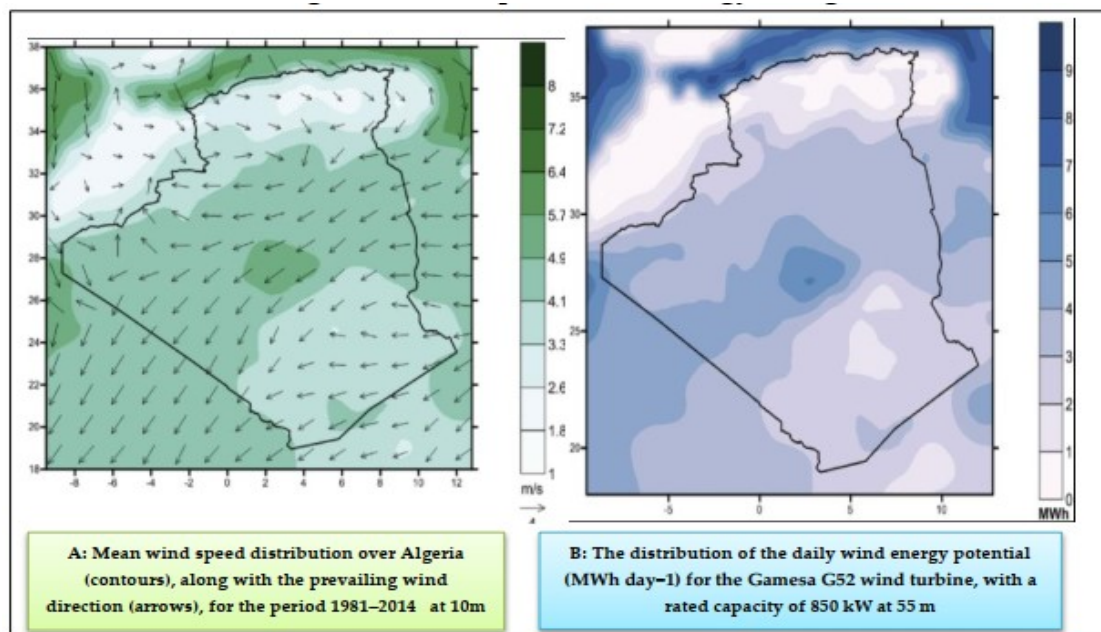


Figure 1. 8: Concentration venteux sur la carte

<https://globalwindatlas.info/area/Algeria>

Pour l'Algérie, le vent est une autre source renouvelable très prometteuse. En utilisant des données de mesures météorologiques, il a été démontré que le vent peut jouer un rôle important, avec des zones particulièrement attrayantes pour les sites éoliens situés dans les régions du sud-ouest.

La plupart des régions du Sahara algérien font preuve de résultats très satisfaisants en matière de production d'énergie éolienne, avec plus de 4 MWh/jour. Dans le sud de l'Algérie, le site d'In Salah est la région où la production quotidienne d'énergie éolienne est la plus élevée, atteignant 6 MWh/jour.

**Figure 1. 9:** Vitesses et énergies des vents en Algérie [13]

1.3.2 La géothermie :

En raison de l'épuisement des ressources d'énergies fossiles et des conséquences de leur utilisation sur l'environnement (comme le changement climatique, la destruction ou l'appauvrissement de la couche d'ozone), la recherche de nouvelles méthodes de production

d'électricité à partir de ces ressources est très incitations renouvelables tels que la géothermie, la biomasse et le solaire. La géothermie est une autre utilisation prometteuse pour la bonne production d'hydrogène, en particulier pour la fourniture de chaleur dans l'électrolyse à haute température. L'efficacité des systèmes d'électrolyse peut être améliorée en fonctionnant à des températures élevées. Cela réduit l'énergie nécessaire pour activer le processus d'électrolyse.

L'Algérie possède un potentiel considérable en géothermie basse énergie. Le Nord et le Sahara sont les principaux sites de ce genre de ressources, avec plus de 200 principales sources thermales et minéralisées situées plus précisément au Nord-Est, l'eau a une température qui oscille entre 22 et 98°C. La bal néologie constitue la principale utilisation, représentant environ 82% (44,37 MWt) de l'utilisation totale de l'énergie géothermique. D'autres applications telles que les pompes à chaleur et l'élevage de poissons représentent 18% (10,28 MWt). On peut classer les deux tiers des ressources géothermiques dans le groupe des champs à basse température avec des températures comprises entre 22 et 48 °C, et le reste dans le groupe des camps à températures modérées avec des températures comprises entre 45 et 60 °C. La température la plus élevée enregistrée au printemps est de 66 °C dans la région nord-ouest de la région "Hamam Bouhanifia", tandis que celle du nord-est de la région "Hamam Meskhoutine" atteint 98 °C [15].

L'important réservoir d'eau chaude (50°C-120°C) est recouvert par le bassin sédimentaire au sud. Et l'aquifère albien qui s'étend sur plus de 650 000 km² de superficie. Dans cette région, les réservoirs sont principalement constitués de sable et l'eau de surface qui varie de 40 à 62 °C. L'aquifère albien coule au sud-ouest d'Adrar et d'In Salah où l'eau est à environ 20 °C et s'enfonce au nord-est de la région de Biskra où la profondeur est de 2600 m et le niveau d'eau est de plus de 60 °C [14].

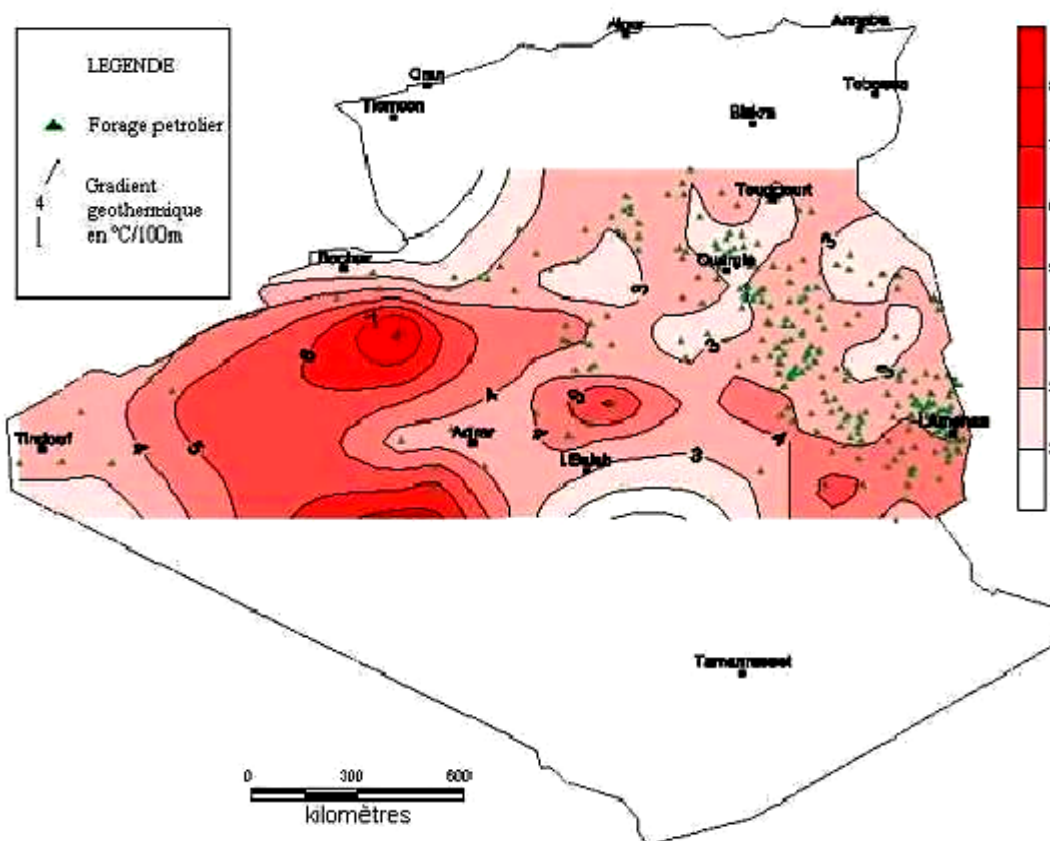


Figure 1. 10: Carte du gradient géothermique de l'Algérie [66]

Hammam Meskoutine (98°C) à Guelma, Hammam Boutaleb (52°C) à Sétif et Hammam Bouhanifa (66°C) à Mascara sont parmi les plus renommées sources thermales. La plupart de ces sources thermales sont formées principalement à partir des calcaires jurassiques du Nord de l'Algérie. On identifie trois régions à fort gradient géothermique : au Nord-Ouest, au Nord-Est et au Centre-Nord de l'Algérie, notamment dans les régions d'Oran, de la Kabylie et de Constantine.

Tableau 1. 3: Principales caractéristiques physico-chimiques de quelques sources thermales de l'Algérie [16]

Sources thermales	Région	Faciès chimiques	Résidus secs (mg/l)	Température (°C)
H. Chellala	Guelma	Sulfate de magnésium	1600	98
H. Bouhdjar	Ain-Temouchent	Chlorure de sodium	3210	66.5
H. Bouhanifa	Mascara	Bicarbonate de sodium	1400	66

H. Boutaleb	Sétif	Chlorure de sodium	3416	52
H. Essalihine	Khenchela	Chlorure de sodium	2082	70
H. Salhine	Skikda	Sulfate de magnésium	2046	55
H. Sidi Bou Abdellah	Reliziane	Chlorure de sodium	1194	51
H. Delaa	M'sila	Sulfate de sodium	1980	42
H. Rabi	Saïda	Chlorure de sodium	1524	47
H. Sillal	Bejaia	Chlorure de sodium	2221	46
H. Ben Haroun	Constantine	Chlorure de sodium	3762	42

L'Algérie dispose d'un potentiel important en matière de ressources énergétiques renouvelables. L'exploitation de l'énergie solaire, éolienne, biomasse et géothermique permettrait au pays de diversifier son mix énergétique, de réduire sa dépendance aux hydrocarbures et de lutter contre les changements climatiques. Des investissements supplémentaires dans ces secteurs, associés à un cadre réglementaire favorable, seraient nécessaires pour exploiter pleinement ce potentiel et accélérer la transition énergétique de l'Algérie vers un avenir plus durable.

1.3.3 Les déchets :

La croissance constante de la population et les modifications des modes de consommation entraînent inévitablement une augmentation des déchets solides provenant de différentes sources (ménages, industrielles, hospitaliers, agricoles, etc.). Dans les nations en voie de développement, la décharge est la solution finale pour plus de 90% des déchets collectés.

L'accroissement du revenu moyen de la population algérienne et le changement d'habitude alimentaire, se traduisent par un accroissement considérable des déchets ménagers. Si bien que la quantité moyenne journalière de déchets générés par habitant a presque doublé entre 1980 et 2010, passant d'une moyenne de 0,63 kg/j/ habitant en 1980 à 1 kg/j/habitant en 2010. Selon le ministère de l'Aménagement du Territoire de et l'Environnement (MATE), cette tendance devrait se poursuivre durant les prochaines années. En 2025, la moyenne journalière devra atteindre 1,25 Kg par habitant [17]. Chaque année, 11 millions de tonnes de déchets ménagers et assimilés (DMA) sont jetés par les Algériens. Seulement 10 % de cette quantité considérable est réutilisée.

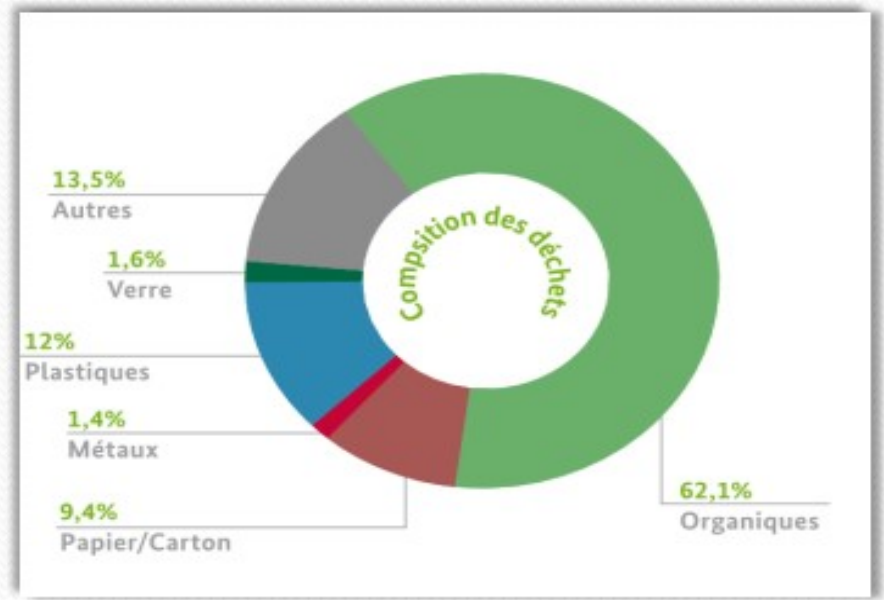


Figure 1. 11: Composition des déchets en Algérie [65]

Les stations d'épuration des eaux usées ont un rôle essentiel dans la préservation de l'environnement et de la santé publique en traitant les eaux usées avant de les rejeter dans le milieu naturel ou de les réutiliser. Elles emploient différentes techniques physiques, chimiques et biologiques afin de supprimer les substances polluantes et de purifier l'eau.

Les stations d'épuration ont la capacité de générer des quantités considérables d'énergie propre. En réalité, lors de la manipulation des eaux usées qui contiennent une grande quantité de matières organiques de grandes quantités de biogaz sont produites. Elles peuvent servir de combustible pour générer de l'électricité, de la chaleur ou encore servir de carburant dans les transports. De plus, les boues générées peuvent servir à diverses fins. En plus de leur utilisation en tant qu'engrais dans l'agriculture, elles peuvent également servir de combustibles dans des incinérateurs d'ordures ménagères ou des cimenteries [17].

Les installations de valorisation énergétique des déchets existent fort longtemps. Leurs utilisations sont en constante croissance et de nombreuses d'entre elles sont perçues comme une réponse rapide aux problèmes grandissants liés au traitement des déchets. Ils contribuent également à la diminution des émissions de gaz à effet de serre par rapport au brûlage à ciel ouvert et aux décharges déversées. Car la combustion à l'air libre ne se déroule pas à une température adéquate pour provoquer une combustion complète, ce qui entraîne des émissions sales sans contrepartie puisqu'ils ne sont pas couplés à des systèmes de production d'énergie préservatrice de l'environnement [18].

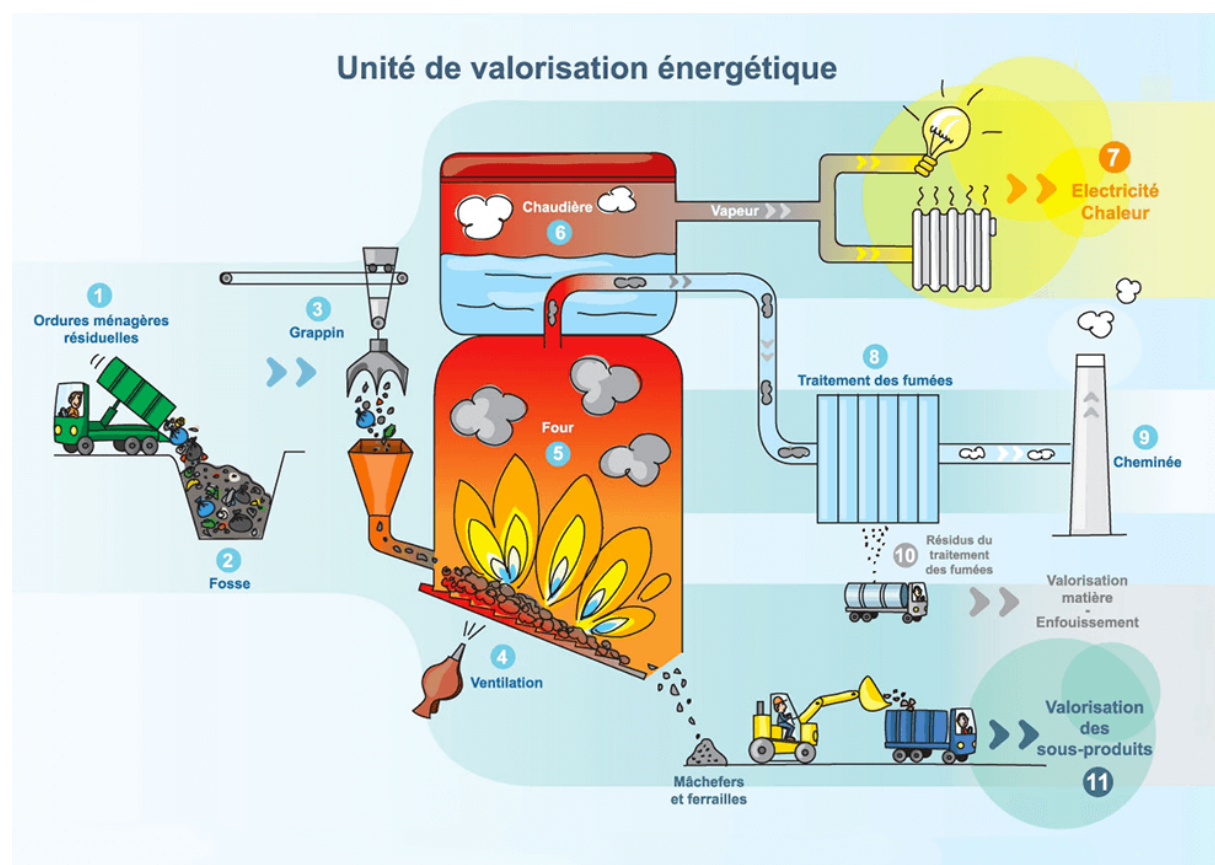


Figure 1. 12: Valorisation énergétique des déchets par incinération [67]

La valorisation énergétique des déchets ménagers et assimilés (DMA) peut être réalisée de deux façons :

- Par incinération dans des usines d'incinération d'ordures ménagères (UIOM) ;
- Par méthanisation, en récupérant le biogaz à partir des fractions putrescibles des déchets.

Ces deux chemins de production offrent la possibilité de générer de l'électricité ou de la chaleur, ou les deux simultanément grâce aux méthodes de cogénération. La deuxième catégorie (production de biogaz) offre également la possibilité d'utiliser le biogaz comme combustible.

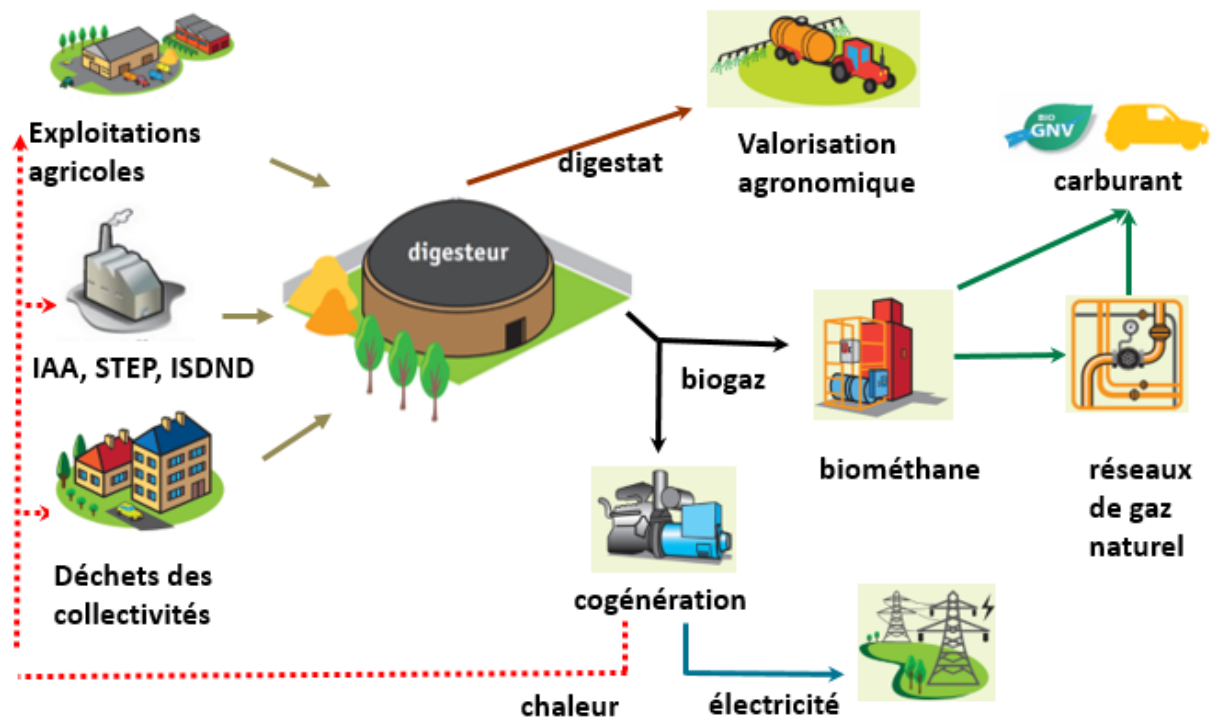


Figure 1. 13: *Processus de valorisation par méthanisation [68]*

En 2013, la production de déchets ménagers et assimilés s'élevait à 10,3 millions de tonnes au niveau national (3). Le potentiel de biogaz potentiel de cette quantité est estimé à environ 716,8 millions de m³ de biogaz [17].

En Algérie, l'exploitation des déchets comme sources d'énergie présente un potentiel important pour améliorer la gestion des déchets, générer de l'énergie renouvelable et diminuer les émissions de gaz à effet de serre. En dépit des difficultés, les projets en cours et les investissements dans les infrastructures et les technologies présentent des perspectives prometteuses pour un avenir plus durable et résilient, ce qui pourrait être bénéfique pour l'Algérie sur le plan économique et environnemental. Pour assurer le succès à long terme de cette approche, il est essentiel d'avoir une vision stratégique, des investissements appropriés et une collaboration entre les secteurs public et privé.

1.4 Infrastructures d'énergies renouvelables :

Au cours des 10 à 15 prochaines années, l'Algérie a des projets ambitieux pour développer les énergies renouvelables pour la production d'électricité. Le gouvernement prévoit une augmentation de 15 GW de la capacité renouvelable installée d'ici 2030, conformément à son tout nouveau plan d'action. Selon le Ministère de la transition énergétique et des énergies renouvelables, ces plans sont en accord avec la feuille de route pour la Transition Énergétique vers un Développement Humain Durable. Alors que le pays a commencé à soutenir les systèmes photovoltaïques (PV) dans les années 1980, l'énergie éolienne, encouragée beaucoup plus tard, est aujourd'hui utilisée à très faible échelle. La richesse énergétique de l'Algérie est souvent associée aux énergies fossiles, mais le pays possède également de bonnes sources d'énergies renouvelables, comme le souligne une présentation de la Sonatrach qui évalue les potentiels d'énergie solaire en termes de rayonnement (irradiation annuelle moyenne de 2 000 kWh / m²), de disponibilité de vastes espaces (sud et Hauts Plateaux) et d'ampleur du réseau électrique [19].

Au sein du pays, nous disposons de 23 centrales solaires photovoltaïques et d'une centrale éolienne à Karbatène dans la ville d'Adrar, avec une puissance installée de 10.2 MW. La puissance installée totale des 24 centrales est de 354,3 MW, dont 344.1 MWc de panneaux solaires photovoltaïques. Un total de 470.318 GWhs d'énergie produite, dont 418.739 GWhs provenant de panneaux solaires photovoltaïques et 51.579 GWh provenant des éoliennes. En fin décembre 2022, la puissance totale installée en énergies renouvelables (EnR) s'élevait à 589,7

MW (mégawatts) dont 460,8 MW hors hydroélectricité englobant 422,6 MW raccordées au réseau et 38,2 MW hors réseau. L'Algérie dispose de plus de 57 barrages hydroélectriques pour la production d'énergie.

L'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable. Le programme des énergies renouvelables dans sa version actualisée, consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent.

1.5 Les défis et enjeux énergétique en Algérie :

La demande nationale d'énergie croît régulièrement pour répondre aux besoins d'une population qui augmente et dont le niveau de vie progresse. En 2005, la population algérienne était de 33 millions d'habitants et la consommation d'énergie de 17 millions de tonnes équivalent pétrole (Tep), soit 0,51 tep par habitant et par an. En 2015, pour une population de 40 millions d'habitants, elle s'est élevée à 58 millions tep soit 1,45 tep par habitant et par an. En 2030, elle devrait avoisiner 2 tep par habitant et par an (avec un scénario laisser faire), pour une population de 50 millions d'habitants et une consommation d'environ 100 millions de tep [20].

Au niveau de la consommation énergétique nous avons une utilisation de 58 millions de tep des produits énergétiques consommés en 2015 répartis comme suit :

Par forme d'énergie nous avons une utilisation de 37% de gaz naturel ; 28,5% de produits pétroliers ; 28% d'électricité ; 4% de GPL et 35% d'autres forme d'énergies.

Par secteur d'activité, une utilisation de 44% de ménages et tertiaires ; 36% pour le transport ; 15% pour l'industrie et 5% dans d'autres secteurs.

Notons que près de 98% de l'électricité est produite à partir du gaz naturel, et que plus de 60% de l'énergie consommée par les ménages, c'est de l'énergie électrique. Il y a lieu de signaler, que la consommation nationale du gaz naturel représente plus de 35% de la consommation globale d'énergie, au moment où la moyenne mondiale ne dépasse pas 22%. A cet effet, face à la croissance permanente de la demande interne d'énergie, il ne paraît pas possible de maintenir indéfiniment une croissance de l'offre en énergie fossile (pétrole et gaz), dont les ressources sont

par définition finies. Le niveau de production d'énergie fossile ne dépend pas uniquement des réserves, mais aussi des investissements engagés.

La transition énergétique est sans aucun doute un des plus grands défis de notre temps et nous ne pourrons l'atteindre que collectivement. Que nous soyons un acteur du secteur public ou du secteur privé ou encore un acteur de la société civile, il s'agit sans plus attendre que chacun s'engage à modifier ses pratiques personnelles et professionnelles et à regarder l'énergie comme un bien précieux de l'humanité et non plus comme une simple ressource inépuisable. L'enjeu de la transition énergétique est donc à la fois de répondre aux besoins énergétiques en forte croissance et de ne pas aggraver les impacts sur l'environnement (gaz à effet de serre), tout en étant compétitif grâce à la maîtrise de la consommation d'énergie, la sobriété énergétique, l'efficacité énergétique et la diversification du mix énergétique vers les énergies renouvelables [20].

1.6 Conclusion :

Aujourd'hui, l'économie algérienne est totalement dépendante du secteur des hydrocarbures, et dans le contexte de conjoncture économique actuel, il devient impératif et urgent d'emprunter une nouvelle trajectoire, en développant des énergies alternatives surtout dans une optique de raréfaction des ressources, de réchauffement climatique, et de développement durable. Dans ce contexte, l'Algérie dispose d'un important potentiel en énergies renouvelables, notamment le solaire et l'éolien. Même si elles se placent au cœur des politiques énergétique et économique menées par le pays, la majeure partie de ce potentiel énergétique, reste non ou peu exploité. Aussi, l'intégration à long terme des énergies renouvelables dans d'offre énergétique du pays joue un rôle important dans l'économie d'énergie et l'efficacité énergétique. L'Algérie dispose d'atouts considérables, de son ensoleillement généreux à son réseau de transport de gaz naturel, en passant par son expertise en recherche scientifique. En saisissant ces opportunités et en travaillant main dans la main avec ses partenaires internationaux, l'Algérie peut jouer un rôle de premier plan dans le secteur des énergies renouvelables et contribuer à façonner un avenir énergétique plus prometteur pour le pays et le monde entier. La transition énergétique est un défi, mais c'est aussi une opportunité, et l'Algérie est prête à la saisir pour un avenir lumineux [21].

De nos jours, l'augmentation significative de la consommation d'énergie dans les domaines du bâtiment et du transport entraîne des conséquences importantes, ce qui nécessiterait des mesures de modélisation et d'optimisation du modèle de consommation d'énergie. La dépendance historique de l'économie algérienne aux hydrocarbures conventionnels nécessitera une transition rapide vers d'autres sources d'énergie, notamment les énergies renouvelables, afin de diversifier ces sources de financement et de sortir de l'économie rentière du pays.

De plus, il est essentiel pour l'Algérie de bien préparer sa transition énergétique. Elle doit commencer par adopter un modèle de consommation axé sur les économies d'énergie et l'efficacité énergétique, puis adopter un modèle de transition énergétique axé sur la diversification des sources d'énergie, qui joueront un rôle essentiel dans le mix énergétique, afin de garantir la sécurité et l'indépendance énergétique.

Chapitre 2 : Technologies de production de l'hydrogène vert

2.1 **Généralité :**

La consommation d'énergie augmente régulièrement à mesure que l'économie et la société progressent. En 2016, les énergies fossiles représentaient plus de 80 % de la consommation mondiale d'énergie primaire. Bien qu'ils aient diminué par rapport à 81 % en 2015, les combustibles fossiles tels que le charbon, le pétrole et le gaz naturel restent la principale consommation d'énergie. Cependant, les combustibles fossiles ne sont pas durables et leur combustion produit des gaz à effet de serre et d'autres polluants. Le développement d'énergies renouvelables vertes et propres est une condition inévitable du développement durable. L'énergie hydrogène est connue comme l'énergie propre la plus prometteuse du XXI^e siècle en raison de son pouvoir calorifique élevé, de l'absence d'émissions de gaz à effet de serre et de l'absence de pollution due à la combustion. Cela aide à atténuer et à éviter des problèmes tels que les pénuries d'énergie, le réchauffement climatique et la pollution de l'environnement.

Premier élément du tableau périodique, son atome pourtant le plus simple de tous, est le constituant essentiel de l'univers. Son intérêt théorique se double, pour le dihydrogène, d'un intérêt pratique notable. On voit en lui un combustible d'avenir ; énergétique et non polluant, à cela s'ajoute l'espoir encore lointain de maîtriser la « fusion » des noyaux d'hydrogène, source de l'énergie solaire [22].

C'est l'élément chimique le plus simple, le plus léger et le plus abondant de l'univers. Très rare à l'état naturel, la molécule H_2 se trouve le plus souvent associé à d'autres éléments. Ainsi, l'hydrogène n'est pas une source d'énergie directement disponible comme le charbon ou le pétrole, mais un vecteur d'énergie tel que l'électricité ou la chaleur. Pour récupérer l'hydrogène pur, il faut l'isoler à travers un processus chimique.

Il existe 89% de dihydrogène dans l'univers, c'est le principal constituant du soleil qui n'est autre qu'une énorme boule de gaz chaud composé de 92% d'hydrogène, 7% d'hélium et 1% d'éléments lourds. Pourtant, peu de dihydrogène libre existe sur terre car il est très léger et échappe à la gravitation terrestre, c'est le troisième élément le plus abondant sur la croûte terrestre, après l'oxygène et le silicium, il ne constitue, à l'état libre qu'1 % de l'atmosphère terrestre. À l'état de composés, beaucoup plus abondant on le trouve principalement combiné avec l'oxygène (H_2O : lacs, rivières, glaciers, mers et océans...) ou avec le carbone, le soufre et

l'azote (hydrocarbures, matières végétales et animales, etc.). L'hydrogène est un élément essentiel à la vie. Il représente 10 % de la masse d'un corps humain [22].

L'hydrogène ne figure pas au rang des énergies vertes, puisque les procédés actuels de production utilisent majoritairement des hydrocarbures (gaz naturel, pétrole, charbon). Dans une perspective de remplacement des énergies fossiles par l'hydrogène, cette dépendance doit être reconsidérée en vue d'une refonte complète de l'industrie de production d'hydrogène [23]. 80 % de l'hydrogène total produit provient du reformage du méthane à la vapeur avec une efficacité énergétique de 74 à 85 %. Cependant, le reformage du méthane à la vapeur et les autres technologies basées sur les combustibles fossiles ne sont ni écologiques ni durables. L'hydrogène ne peut être considéré comme un carburant renouvelable et propre que si l'énergie nécessaire à la production d'hydrogène provient d'une source renouvelable telle que l'énergie éolienne ou solaire. En utilisant une source renouvelable, l'hydrogène pourrait être produit par électrolyse, bio-hydrogène, cycles thermochimiques, photocatalyse et plasmolyse. Parmi les technologies de production d'hydrogène, l'électrolyse représente la plus grande part de 4 % de la demande énergétique mondiale totale.

2.2 Propriétés de l'hydrogène :

Premier élément dans la table périodique. Dans la condition normale c'est un gaz sans couleur, inodore et insipide, constitué par les molécules diatomiques, H_2 . L'atome d'hydrogène, le symbole H, est constitué par un noyau avec une unité de charge positive et d'un électron. Il est largement répandu non seulement sur la Terre mais aussi dans tout l'Univers. L'utilisation la plus importante de l'hydrogène est la synthèse de l'ammoniac. L'utilisation de l'hydrogène se développe rapidement dans le raffinage des carburants, comme la décomposition par l'hydrogène (hydrocraquage), et dans l'élimination du soufre. L'hydrogène peut être brûlé dans les moteurs à combustion interne. Les piles à combustible à hydrogène sont étudiées comme moyen de fournir de l'énergie et des recherches sont menées sur l'hydrogène comme futur carburant majeur possible. Par exemple, il peut être converti en électricité à partir de biocarburants, en gaz naturel et en carburant diesel, théoriquement sans émissions de CO_2 ou de produits chimiques toxiques [24].

2.3 Caractéristiques de l'hydrogène :

L'hydrogène est l'élément chimique le plus simple et le plus abondant dans l'univers. Son isotope le plus commun est constitué d'un seulement d'un proton et d'un électron, de ce fait c'est un atome univalent. Son numéro atomique est 1 et son poids atomique 1,00797 g/mol. C'est l'un des principaux composés de l'eau et de toute la matière organique. L'hydrogène commun a un poids moléculaire de 2,01594 g. En tant que gaz, il a une densité de 0,071 g/l à 0°C et 1 atm. Sa densité relative, comparée à celle de l'air, est de 0,0695 [25]. La masse de l'électron étant négligeable devant celle des protons et des neutrons, ce sont ces derniers qui déterminent la masse des atomes (donc leur poids). L'hydrogène est ainsi le plus léger atome existant.

L'hydrogène est la plus inflammable de toutes les substances connues. Il est légèrement plus soluble dans les solvants organiques que dans l'eau. Se trouvant en grande quantité dans les étoiles et les planètes gazeuses, l'hydrogène peut être brûlé dans les moteurs à combustion interne. Les piles à combustible à hydrogène sont étudiées comme moyen de fournir de l'énergie et des recherches sont menées sur l'hydrogène comme futur carburant majeur possible. Par exemple, il peut être converti en électricité à partir de biocarburants, en gaz naturel et en carburant diesel, théoriquement sans émissions de CO₂ ou de produits chimiques toxiques [24].

2.4 L'hydrogène comme vecteur d'énergie :

L'hydrogène est **un vecteur d'énergie** qui requiert une chaîne de valeur complexe. Généralement, il est produit à partir d'eau ou d'hydrocarbures, soit **par procédés thermochimiques avec captage du CO₂** émis lors de la fabrication, soit par électrolyse de l'eau. Hydrogène un combustible à pouvoir énergétique élevé, non polluant, non toxique et sa combustion ne produit que de l'eau. Son énergie massique, délivrée lors de sa combustion avec le dioxygène, est élevée (120 MJ/kg), comparée à celle de l'essence (45 MJ/kg) ou du méthane (50 MJ/kg) comme indiqué sur la figure suivante :

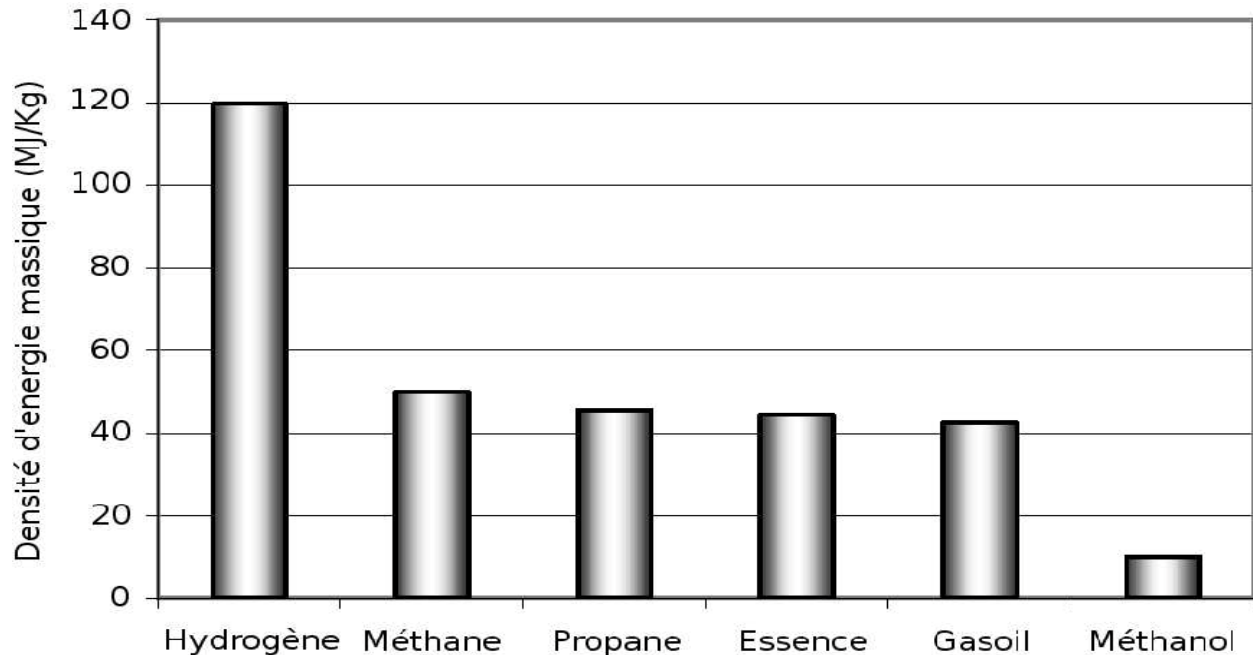


Figure 2. 1: Densité d'énergie massique pour différents vecteurs d'énergie [5]

2.5 Production de l'hydrogène :

L'hydrogène représente un gros potentiel de diminution de gaz à effet de serre (GES) ainsi qu'une manne économique significative. Comme l'électricité, le dihydrogène H_2 (hydrogène) est principalement un vecteur énergétique et non une énergie en tant que telle, car il est produit au moyen d'une réaction chimique à partir d'une ressource primaire. Actuellement, pour des raisons économiques, l'hydrogène est issu de ce fait 95 % de la transformation d'énergies fossiles, dont pour près de la moitié à partir du gaz naturel, solution la moins coûteuse. Le dihydrogène possède une très grande densité massique d'énergie (1 kg d'hydrogène contient autant d'énergie qu'environ 3 kg de pétrole) mais une très faible densité volumique.

Les ressources principales permettant de produire le dihydrogène H_2 (que l'on appelle hydrogène par abus de langage) sont l'eau et les hydrocarbures (le charbon, le pétrole ou le gaz). En effet, chaque molécule d'eau est le fruit de la combinaison entre un atome d'oxygène et deux atomes d'hydrogène, suivant la formule H_2O . Les hydrocarbures sont issus de la combinaison d'atomes de carbone et d'hydrogène. C'est par exemple le cas du méthane, constituant principal du gaz naturel dont la formule est CH_4 , l'une des combinaisons les plus simples pour les hydrocarbures [26].

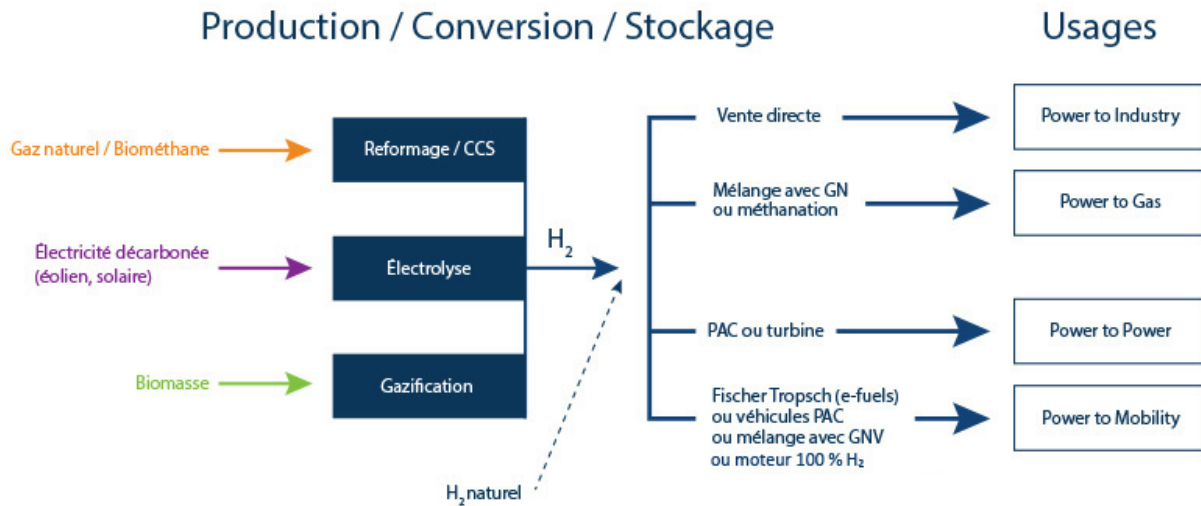


Figure 2. 2: Les différents modes de production de l'hydrogène [6]

2.5.1 Les différents types d'hydrogène :

Il existe différents types d'hydrogène qui se différencient selon leurs méthodes de production et de purification :

L'hydrogène gris ou fossile C'est l'hydrogène produit à partir de sources fossiles, principalement du gaz naturel, par des méthodes telles que le reformage du gaz naturel ou la gazéification du charbon. Ce processus émet généralement des quantités importantes de dioxyde de carbone (CO₂) dans l'atmosphère, ce qui en fait la forme d'hydrogène la moins respectueuse de l'environnement.

L'hydrogène bas-carbone c'est le type d'hydrogène dont la production émette moins de dioxyde de carbone comme l'hydrogène bleu ou jaune. L'hydrogène bleu produit à partir de sources fossiles mais dans ce cas, les émissions de CO₂ sont capturées et stockées, généralement sous terre (technologie de capture et de stockage du carbone, CSC). Cela réduit considérablement l'empreinte carbone de la production d'hydrogène, le rendant plus respectueux de l'environnement que l'hydrogène gris. L'hydrogène rose produit à partir d'énergie nucléaire libère peu de dioxyde de carbone ce qui représente un réel avantage pour l'environnement d'où le terme bas-carbone.

L'hydrogène verte ou renouvelable L'hydrogène peut-être considéré comme vert ou renouvelable lorsqu'il est produit par électrolyse à partir d'électricité provenant d'énergie

renouvelables telles que l'énergie solaire, éolienne ou hydraulique, grâce à un processus appelé électrolyse de l'eau. Cette forme d'hydrogène produit grâce à l'électrolyse de l'eau, est également appelée « hydrogène propre » car celle-ci ne libère pas de CO₂. L'électrolyse de l'eau utilise de l'électricité pour séparer l'eau (H₂O) en hydrogène (H₂) et en oxygène (O₂), sans émissions de CO₂. Cependant, bien que cette méthode soit la plus respectueuse de l'environnement et considérée comme une solution clé pour décarboniser les secteurs qui dépendent actuellement de combustibles fossiles, elle ne représente qu'environ 1% de la production totale d'hydrogène à ce jour.

L'hydrogène existe aussi à l'état naturel. Les premières sources naturelles d'hydrogène ont été découvertes au fond des mers dans les années 70 et plus récemment à terre. Si les connaissances concernant l'hydrogène ont fortement progressé ces dernières années, il reste encore à évaluer le potentiel que représente cette ressource pour la transition énergétique.

Pour la mise en valeur de l'importance de l'hydrogène notamment dans les milieux isolés, les énergies renouvelables (solaire et éolienne) souffrent du problème d'intermittence de leur production (phases jour/nuit, absence de vent...). Pour pallier ce problème, l'hydrogène se présente comme une solution. En effet, lorsque la consommation est inférieure à la production, l'énergie supplémentaire créée sert à produire l'hydrogène. Dans le cas contraire, l'hydrogène est consommé. Les courbes production/demande d'énergie sont alors lissées [27].

L'hydraulique souffre moins du problème précédent de fluctuation de la production car le surplus d'énergie de production sert à remonter l'eau en amont du barrage. L'hydraulique peut également être envisagé pour la production d'hydrogène dans des zones difficiles d'accès (chalet de haute-montagne au bord d'un ruisseau...)

Le réseau électrique (à 80%) d'énergie nucléaire permet de fournir de l'hydrogène par électrolyse de l'eau basse température. A 850°C, le nucléaire de 4ème génération permettra d'obtenir de l'hydrogène par thermochimie ou électrolyse à haute température [27].

Ces différentes formes d'hydrogène ont des implications importantes en termes d'impact environnemental, de disponibilité, de coût et d'applications potentielles. L'hydrogène vert est généralement considéré comme la voie à suivre pour parvenir à une économie de l'hydrogène durable et décarbonée.

Parmi les techniques pour la production de l'hydrogène nous avons la production à partir des combustibles fossiles comme le reformage du gaz naturel à la vapeur d'eau ou à partir du charbon, la production par énergie renouvelable (électrolyse de l'eau), la production par biomasse tel que la gazéification etc...

2.6 Production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles :

L'hydrogène peut être produit à partir de la plupart des combustibles fossiles, en particulier le gaz naturel et le charbon. Étant donné que le CO₂ est produit en tant que sous-produit, il doit être capturé à assurer un processus zéro émission durable. La faisabilité des processus varie par rapport à une installation de production centralisée ou distribuée.

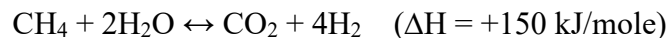
2.6.1 Le reformage du gaz naturel :

C'est la technique la plus répandue. Il s'agit de faire réagir du méthane avec de l'eau pour obtenir un mélange contenant de l'hydrogène et du CO₂. Le CO₂ émis par ce procédé pourrait éventuellement être capté et stocké pour produire un hydrogène décarboné. C'est un moyen de production d'hydrogène à partir de méthane grâce à de la vapeur d'eau à haute température (700-1000°C) à des pressions modérées (15-30 bars) [26].

The general reaction of steam reforming is written as: $C_nH_{2n+2} + nH_2O \rightarrow nCO + (2n+1) H_2$

With n = 1: $CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$ (highly endothermic: + 190 kJ/mole)

Water gas shift: $CO + H_2O \rightarrow CO_2 + H_2$ (low exothermic: - 40 kJ/mole)



Les hydrocarbures sont les réactifs de cette réaction. Des ressources fossiles (telles que le pétrole, le méthane) sont ainsi mises à contribution, ce qui pose le même problème que pour les carburants classiques (les ressources fossiles ne sont pas inépuisables). Toutefois, il est également possible de faire appel à des capteurs de dioxyde de carbone (CO₂) et ainsi éliminé d'autres impuretés pour pouvoir produire de l'hydrogène pur, car l'inconvénient majeur de cette réaction est la libération de gaz à effet de serre. Et oui la combustion du dihydrogène n'en produit pas de CO₂, mais en revanche sa fabrication industrielle en produit. En lieu et place du gaz naturel, l'utilisation du biométhane (méthane issu de la fermentation de la biomasse) constitue aussi une solution pour produire un hydrogène décarboné.

Le reformage du gaz naturel par vapeur d'eau est un processus efficace et largement utilisé pour la production d'hydrogène à grande échelle. L'hydrogène ainsi produit est utilisé dans de nombreux secteurs industriels, tels que la pétrochimie, la production d'ammoniac, la fabrication d'acier et l'industrie chimique, ainsi que dans les applications de pile à combustible pour les véhicules et la production d'électricité

2.6.2 La gazéification :

La gazéification est un processus d'oxydation partielle thermochimique qui convertit les matériaux carbonés en gaz combustible et en biochar (bio-charbon) de haute qualité à des températures élevées (700 à 1 000 °C). Elle est la transformation thermique et chimique d'un matériau solide tel que le charbon ou la biomasse essentiellement formés de carbone (C), d'hydrogène (H) et d'oxygène (O) en présence d'un réactif gazeux (oxygène, vapeur d'eau, hydrogène, entre autres). Elle est donc différente de la pyrolyse (ou thermolyse) qui est un processus thermique réalisé en l'absence de gaz de réaction. La gazéification consiste donc à convertir du solide en un mélange gazeux, appelé gaz de synthèse, contenant principalement du dihydrogène (H₂), du méthane (CH₄), du monoxyde de carbone (CO), du dioxyde de carbone (CO₂) et de la vapeur d'eau (H₂O) dans des proportions dépendant du procédé, dont les performances sont fonction à la fois des caractéristiques du solide à transformer et de l'utilisation finale du gaz de synthèse [28].

La gazéification a attiré l'attention du monde entier en raison de ses utilisations et avantages variés. La production d'énergie par gazéification peut sembler une technologie récente ; cependant, il a plus de 100 ans d'existence. Ce gaz précieux appelé gaz de synthèse a de nombreuses applications pratiques, telles que la production de chaleur, d'électricité, d'hydrogène et d'éthanol. Les technologies de gazéification ont été largement étudiées pour l'utilisation de différents combustibles et conditions de fonctionnement afin d'augmenter l'efficacité et la viabilité du procédé pour obtenir les produits souhaités [29].

2.6.2.1 Du charbon :

La gazéification du charbon a été largement utilisée au XIX^{ème} siècle pour produire du gaz de ville et des carburants liquides à usage militaire. Porté à très haute température, le charbon se vaporise et le carbone qu'il contient réagit avec de la vapeur d'eau en produisant du « syngas » dont on peut séparer l'hydrogène après avoir éliminé les impuretés et le CO₂. Cette méthode, elle

aussi très émettrice de CO₂ est aujourd'hui encore utilisée dans les pays marqués par la culture charbonnière (Chine, États-Unis, Allemagne, etc.) pour produire industriellement de l'hydrogène dit "gris".

Bien qu'il soit considéré comme un combustible sale en raison de ses fortes émissions à effet de serre, le charbon peut être utilisé pour produire de l'hydrogène. Dans la configuration actuelle, les installations de gazéification du charbon à grande échelle sont principalement destinées à la production d'électricité ou à la production de matières premières chimiques. L'hydrogène obtenu à partir de la gazéification du charbon peut être utilisé dans diverses applications telles que la production d'ammoniac, l'alimentation d'une économie d'hydrogène ou la valorisation des combustibles fossiles. D'autre part, le gaz de synthèse dérivé du charbon peut être converti en carburants de transport tels que l'essence et le gazole grâce à un traitement supplémentaire, ou en méthanol, qui lui-même peut être utilisé comme carburant de transport ou additif pour carburant, ou converti en essence. Le gaz naturel issu de la gazéification du charbon peut être refroidi jusqu'à ce qu'il se liquéfie pour être utilisé comme combustible dans le secteur des transports.

2.7 Production d'hydrogène à partir de la biomasse :

Avec l'augmentation du souci concernant la baisse de la production d'énergie et la protection de l'environnement, la recherche sur les combustibles de substitution propres a attiré ces dernières années l'attention des scientifiques et des ingénieurs. De plus, la réglementation de plus en plus rigoureuse concernant les émissions de CO₂ d'une part et l'épuisement des réserves de combustible fossile d'autre part, a poussé la communauté scientifique à trouver des alternatives à ces combustibles. L'hydrogène produit à partir de non-intermittent tel que la biomasse offre la possibilité d'hydrogène renouvelable. Il permet une route durable pour la production. L'utilisation de la biomasse à la place des combustibles fossiles réduit la quantité nette de CO₂ rejeté dans l'atmosphère. Gazéification de la biomasse peut offrir un grand potentiel grâce à l'utilisation de matières premières renouvelables provenant de déchets agricoles, les cultures énergétiques et / ou de résidus forestiers

L'utilisation de la biomasse, ressource renouvelable et de bilan pratiquement neutre du point de vue des GES (gaz à effet de serre), en est une des voies les plus prometteuses pour le remplacement dans l'avenir des énergies fossiles (pétrole, charbon, gaz, uranium...). La conversion par voie thermochimique (gazéification) des matières premières végétales (bois, paille, plantes, herbacées ; déchets ménagers et industrielles, déchets agricoles...) en un gaz de synthèse est possible grâce à l'utilisation de gazéificateur. Le gaz de synthèse produit contient une proportion importante d'hydrogène et de monoxyde de carbone. La valorisation de ce gaz se fait principalement aujourd'hui dans les unités de cogénération, mais les possibilités de couplage avec les piles à combustibles ou les réacteurs de synthèse de biocarburants liquides par le procédé Fischer Tropches laissent envisager un bel avenir pour cette filière [30].

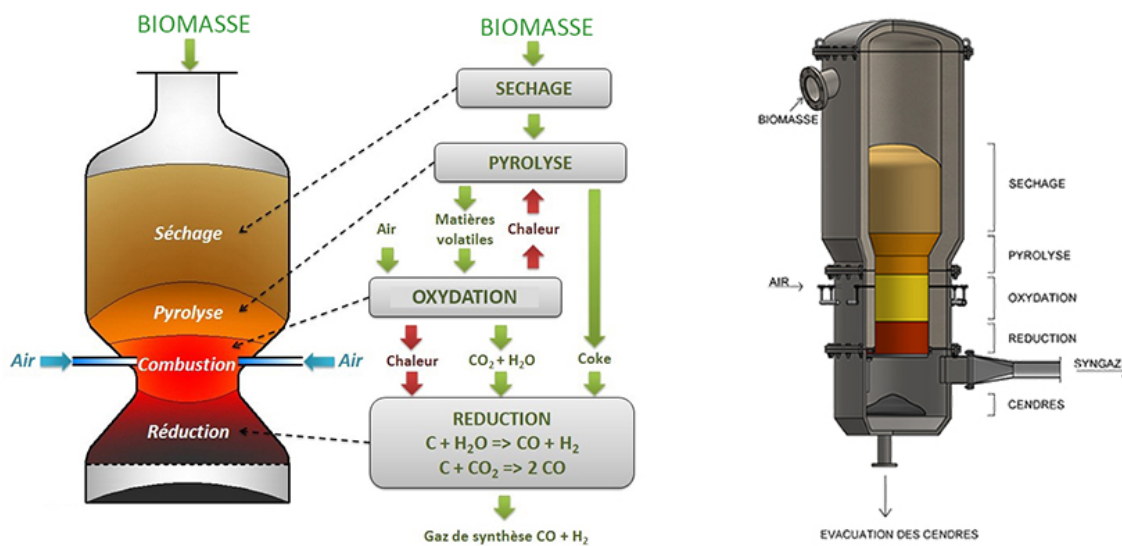


Figure 2. 3: Principe de la gazéification de la biomasse [69]

D'autres technologies utilisant la biomasse humide sont également à l'étude en raison des besoins énergétiques grands pour le processus de séchage. Les techniques de production varient en fonction des ressources disponibles, le lieu et les conditions climatiques, mais les principaux problèmes sont la qualité inégale et un mauvais contrôle de la qualité des matières premières de biomasse. Il est donc nécessaire de rationaliser la préparation de combustible pour produire plus cohérentes, les carburants de meilleure qualité. Les grands systèmes ont tendance à être adapté pour moins cher et inférieur carburants de qualité, tandis que les petites plantes ont besoin d'une meilleure qualité de carburant et une meilleure homogénéité de carburant [25].

2.8 Production d'hydrogène par énergie renouvelable :

L'hydrogène produit par énergie renouvelable connu sous le nom d'hydrogène vert, est produit à partir de sources d'énergie renouvelable telles que l'énergie solaire, éolienne ou hydraulique. Il est généré par électrolyse de l'eau à l'aide d'électricité provenant de ces sources renouvelables. Contrairement à l'hydrogène produit à partir de combustibles fossiles, comme le gaz naturel, l'hydrogène vert ne génère pas de gaz à effet de serre lors de sa production et de son utilisation, car le seul sous-produit est de l'eau. Il contribue à l'intégration de sources d'énergie renouvelables plus variables dans le réseau électrique, réduisant ainsi les incohérences temporelles et géographiques entre l'offre et la demande. Il s'agit en particulier d'une solution potentielle de stockage d'électricité à long terme, et il peut être utilisé pour fournir une puissance de sauvegarde pendant des périodes de demande élevée et de faible disponibilité d'énergie renouvelable.

L'hydrogène peut être utilisé comme combustible à faible teneur en carbone dans les secteurs où la réalisation de réductions importantes des émissions de gaz à effet de serre s'avère difficile, tels que les transports de longue distance, les industries lourdes, le raffinage du pétrole, la production d'ammoniac, la production de méthanol où l'électrification directe est limitée.

Une des principales tendances mondiales en matière d'énergie est la décarbonation des systèmes énergétiques. Les pays du monde entier sont confrontés à la nécessité de réduire leurs émissions de gaz à effet de serre et de limiter leur dépendance aux combustibles fossiles. L'hydrogène vert peut jouer un rôle clé dans cette transition énergétique, car il peut être utilisé comme source d'énergie propre, flexible et polyvalente dans différents secteurs tels que le transport, l'industrie et les systèmes énergétiques intégrés. Dans le secteur des transports, l'hydrogène vert peut contribuer à la décarbonation des véhicules, en alimentant des piles à combustible qui produisent de l'électricité sans émissions nocives. Les véhicules à hydrogène offrent de nombreux avantages, tels que des temps de recharge rapides et une autonomie élevée, ce qui en fait une option attrayante pour les véhicules lourds et à longue distance. Au niveau industriel, l'hydrogène vert peut être utilisé comme combustible ou comme matière première dans la production de produits chimiques, tels que l'ammoniac ou le méthanol. En substituant les combustibles fossiles par de l'hydrogène vert, les industries peuvent réduire leurs émissions de CO₂ et contribuer à une production plus propre et plus durable. En ce qui concerne les systèmes énergétiques intégrés, l'hydrogène vert peut jouer un rôle de stockage de l'énergie renouvelable. Par exemple, lorsque la

production d'énergie renouvelable dépasse la demande, l'excès d'électricité peut être utilisé pour produire de l'hydrogène vert par électrolyse de l'eau. Cet hydrogène peut ensuite être stocké et utilisé ultérieurement pour répondre à la demande lors des périodes de faible production d'énergie renouvelable, agissant ainsi comme un moyen de stockage d'énergie à grande échelle. L'hydrogène vert présente également une opportunité économique en créant de nouveaux emplois et en stimulant l'innovation technologique. De nombreux pays investissent massivement dans la recherche et le développement de l'hydrogène vert, ainsi que dans la mise en place d'infrastructures de production, de stockage et de distribution. Ces initiatives visent à garantir la compétitivité et la durabilité à long terme de leur secteur de l'énergie.

La distribution d'hydrogène à des clients industriels est actuellement une grande industrie dans le monde entier. La demande d'hydrogène, qui a augmenté de plus de trois fois depuis 1975, est presque entièrement alimentée par des combustibles fossiles, avec 6% du gaz naturel mondial et 2% du charbon mondial allant au processus. En conséquence, la production d'hydrogène entraîne des émissions de CO₂ d'environ 830 millions de tonnes par an. En 2019, la production mondiale d'hydrogène est d'environ 75 Mt par an de H₂ pur et de 45 Mt H₂ mélangés avec d'autres gaz. Environ 55 % de l'hydrogène produit dans le monde est utilisé pour la synthèse d'ammoniac, 25 % dans les raffineries et environ 10 % pour la production de méthanol [31].

Source: IEA (August 2020). Cross-cutting:Hydrogen. P18. Retrieved 08 25, 2021, from International Energy Agency <https://www.iea.org/reports/hydrogen>

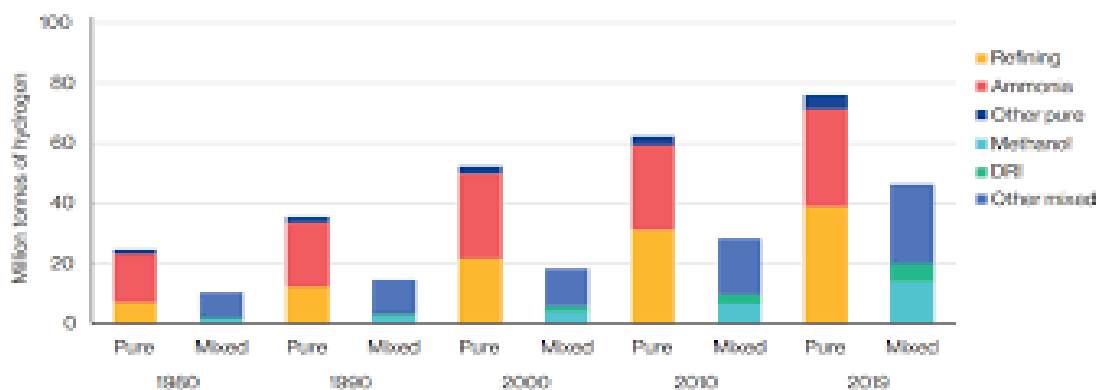


Figure 2. 4: Evolution de la demande annuelle de l'hydrogène

L'hydrogène est le seul vecteur énergétique zéro-carbone en dehors de l'électricité et de l'ammoniac, qui sont sérieusement envisagés pour le transport à faibles émissions de carbone, décarbonisation industrielle et la fourniture de chaleur dans de nombreux pays. Il peut être obtenu à partir d'une variété de matières premières et des voies techniques renouvelables et non-renouvelables, qui émettent toutes des quantités variables de gaz à effet de serre. Afin d'avoir un impact significatif sur les systèmes énergétiques à faible émission de carbone futur, il est essentiel que sa production soit à la fois respectueuse de l'environnement et économiquement rentable.

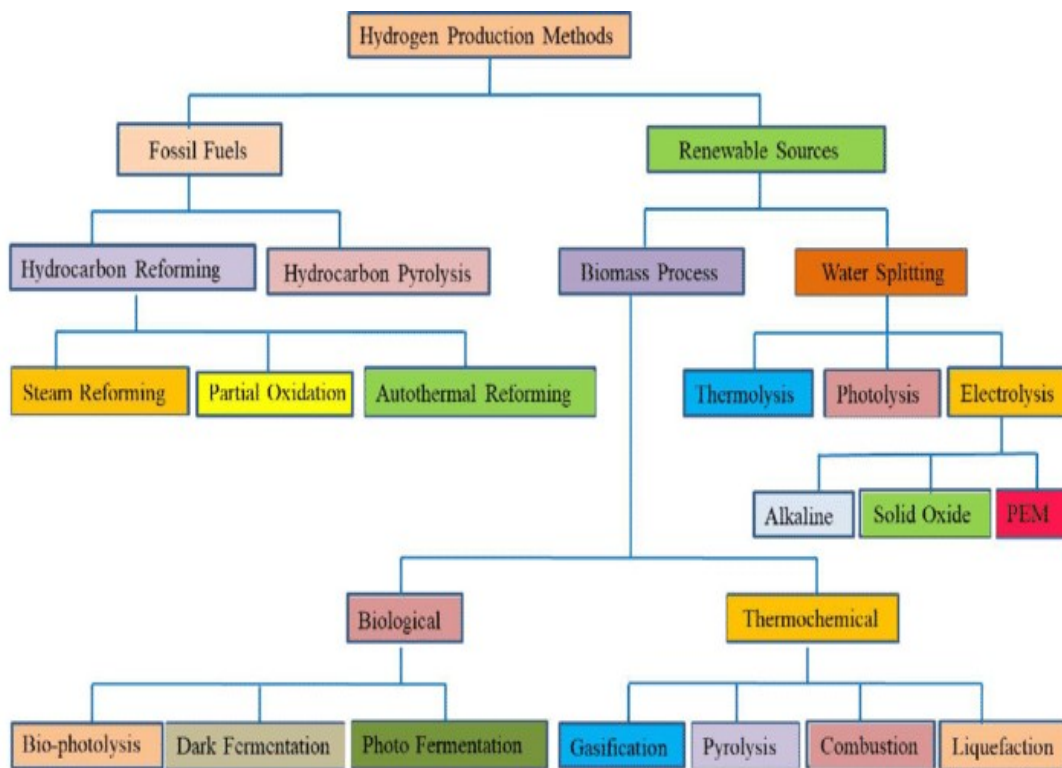


Figure 2. 5: Les diverses méthodes de production de l'hydrogène [36]

Les chercheurs ont donc étudié de nouvelles façons plus écologiques pour produire de l'hydrogène vert, dans le but d'éliminer les émissions de CO₂ du processus. La méthode la plus respectueuse de l'environnement pour produire de l'hydrogène consiste à diviser l'eau en hydrogène et en oxygène en utilisant la lumière solaire.

Tableau 2. 1: Les variétés de méthodes de production de l'hydrogène, leurs avantages, inconvénients, rendements et coûts

Méthode de production de H	Avantages	Inconvénients	Rendement [%]	Prix
Vaporeformage	Technologie développé et infrastructure existant	Produit du CO, CO ₂ , approvisionnement instable	74 - 85	2.27
Oxydation partielle	Technologie établi	Parallèlement à la production de H ₂ , produit des huiles lourdes et de la coke pétrolière	60 - 75	1.48
Reformage thermique automatique	Technologie bien établie et infrastructure existante	Production de CO ₂ en tant que sous-produits, utilisation de combustibles	60 - 75	1.48
Bio-photolyse	Consommation du CO ₂ , produit de O ₂ comme sous-produit, travaillant dans des conditions	Faibles rendements en H ₂ , besoin de lumière du soleil, demande de grand réacteur, sensibilité à l'O ₂ ,	10 - 11	2.13

	douces.	coût élevé du matériau		
Fermentation sombre	Méthode simple, H ₂ produit sans lumière, sans limitation de O ₂ , neutre en CO ₂ , implique le recyclage des déchets	Elimination des acides gras, faibles rendements d'H ₂ , faible efficacité, nécessité d'un énorme volume de réacteur	60 - 80	2.57
Photo-fermentation	Prends part dans le recyclage des eaux usées, utilise différentes eaux usées organiques, neutre en CO ₂	Faible efficacité, faible taux de production d'H ₂ , lumière solaire requis, nécessite un volume énorme de réacteur, sensibilité à l'O ₂	0.1	2.83
Gazéification	Matière première abondante, bon marché et neutre en CO ₂	Fluctuation des rendements de d'H ₂ en raison des impuretés des matières premières, de la disponibilité saisonnière et de la formation de goudron	30 - 40	1.77 - 2.05
Pyrolyse	Matière première	Formation de goudron,	35 - 50	1.59 - 1.70

	abondante, bon marché et neutre en CO ₂	fluctuation de la quantité de H ₂ en raison des impuretés de la matière première et de la disponibilité saisonnière		
Thermolyse	Pure et durable, sous-produit O ₂ , matière première abondante	Coûts d'investissement élevés, toxicité des éléments, problèmes de corrosion	20 - 45	7.98 - 8.40
Photolyse	O ₂ comme sous-produit, matières premières abondantes, pas d'émissions	Faible efficacité, matériau photo-catalytique inefficace, nécessite de la lumière solaire	0.06	8 - 10
Electrolyse	Technologie établie zéro émission, infrastructure existante, O ₂ comme sous-produit	Problème de stockage et de transport	60 - 80	10.30

A l'heure actuelle, 96% de l'hydrogène est encore fabriqué par conversion des combustibles fossiles, basé sur des techniques de production comme le vaporeformage, l'oxydation partielle et le reformage thermique automatique, qui émettent une quantité significative de dioxyde de

carbone (CO₂), c'est pourquoi l'utilisation de l'hydrogène est restreint. Mais les technologies de production de l'hydrogène vert telles que l'électrolyse ont fourni une option plus écologique pour la production de l'hydrogène. En conséquence, le processus n'est pas sans émission à moins que des sources d'énergie renouvelables alternatives ne soient explorées pour atténuer la pénalité énergétique. Un autre problème est que les méthodes écologiques, telles que l'électrolyse, entraînent des coûts de production plus élevés que les systèmes traditionnels de production d'hydrogène.

2.9 Technologies de production de l'hydrogène vert :

L'électrolyse de l'eau est l'une des méthodes les plus efficaces pour la production d'hydrogène vert, car elle utilise de l'eau (H₂O) renouvelable et ne produit que de l'oxygène pur comme sous-produit. De plus, le processus d'électrolyse utilise le courant continu provenant de sources d'énergie durables telles que le solaire, l'éolien et la biomasse. Mais à l'heure actuelle, seulement 4% de l'hydrogène peut être obtenu par électrolyse de l'eau principalement en raison des problèmes économiques. On s'attend à ce que cette valeur augmente dans un proche avenir, bien que l'utilisation des énergies renouvelables (solaire, éolienne, nucléaire) augmente au fur et à mesure de l'évolution des technologies. Dans le processus d'électrolyse, la molécule d'eau est le réactif qui est dissocié en hydrogène et en oxygène sous l'influence de l'électricité. L'électrolyse de l'eau peut être classée en quatre types en fonction de leur électrolyte, de leurs conditions de fonctionnement et de leurs agents ioniques (OH⁻, H⁺, O₂), cependant leurs principes de fonctionnement sont les mêmes. Les quatre (4) types de méthodes d'électrolyse sont : à membrane échangeuse de proton, alcaline, microbienne et à oxyde solide.

2.9.1 Electrolyseur à pile alcaline :

Bien qu'il s'agisse d'une technique assez coûteuse, l'électrolyse de l'eau dans une pile alcaline est l'une des méthodes les plus faciles pour produire de l'hydrogène. L'électrolyse de l'eau sur place pourrait être plus rentable que d'autres approches. Cette méthode est extrêmement propre, rendant le gaz d'hydrogène pur. En règle générale, un milieu alcalin utilise 25-30% de KOH. L'électrolyseurs alcalines contiennent de l'eau et une solution électrolytique liquide telle que l'hydroxyde de potassium (KOH) ou l'hydroxyde de sodium (NaOH). Lorsqu'un courant est appliqué à une pile alcaline, les ions hydroxyde (OH⁻) se déplacent à travers les solutions d'électrolyte de la cathode à l'anode de chaque pile. Les bulles d'hydrogène gazeux sont générées à la cathode et l'oxygène gazeux est généré à l'anode [32].

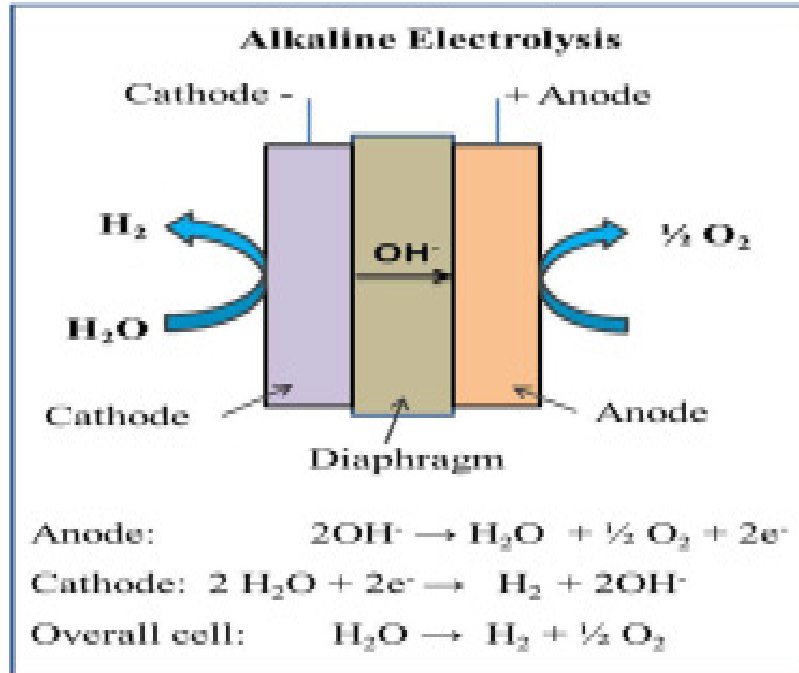


Figure 2. 6: Electrolyseur alcaline [36]

Elle fonctionne sur un concept très fondamental. C'est-à-dire que lorsqu'un courant direct est appliqué à l'eau, l'oxygène et l'hydrogène sont séparés. Deux molécules d'eau se dissocient et l'hydrogène se forme à la cathode par cette réaction.

Environ 285 kJ/mol d'énergie renouvelable est nécessaire pour amorcer cette réaction (environ 50 KJ/mol de chaleur et 235 kJ/mol d'électricité renouvelable par mole d'eau). La température à laquelle l'électrolyse se produit se situe entre 40 et 90 °C.

Les électrolyseurs utilisant une solution alcaline liquide d'hydroxyde de sodium ou de potassium comme électrolyte sont disponibles depuis longtemps et ont fait leurs preuves pour la production d'hydrogène. Toutefois, cette méthode présente certains inconvénients, notamment la densité de courant relativement faible des cellules et le fait que les cellules ne peuvent pas fonctionner sous haute pression et sont donc plutôt volumineuses [33].

2.9.2 **Electrolyseur à membrane échangeuse de proton (PEM) :**

L'électrolyseur PEM (Proton Exchange Membrane) a un fonctionnement inverse à celui de la pile à combustible de type PEMFC qui produit, en présence d'oxygène à sa cathode et d'hydrogène à son anode, de l'électricité et de l'eau. L'électrolyseur PEM nécessite une alimentation en eau à son anode et grâce à une différence de potentiel suffisante appliquée à ses

bornes, l'eau est dissociée pour générer de l'oxygène à l'anode et de l'hydrogène à la cathode [34].

La principale caractéristique de l'électrolyseur PEM est son électrolyte solide, constitué d'une membrane polymère. Il assure ainsi la conduction des ions hydrogène (H^+) produits à l'anode et permet la séparation des gaz produits (H_2 et O_2). Les températures pratiques de fonctionnement varient entre 80 et 120°C pour des pressions comprises entre 0,1 et 0,7 MPa.

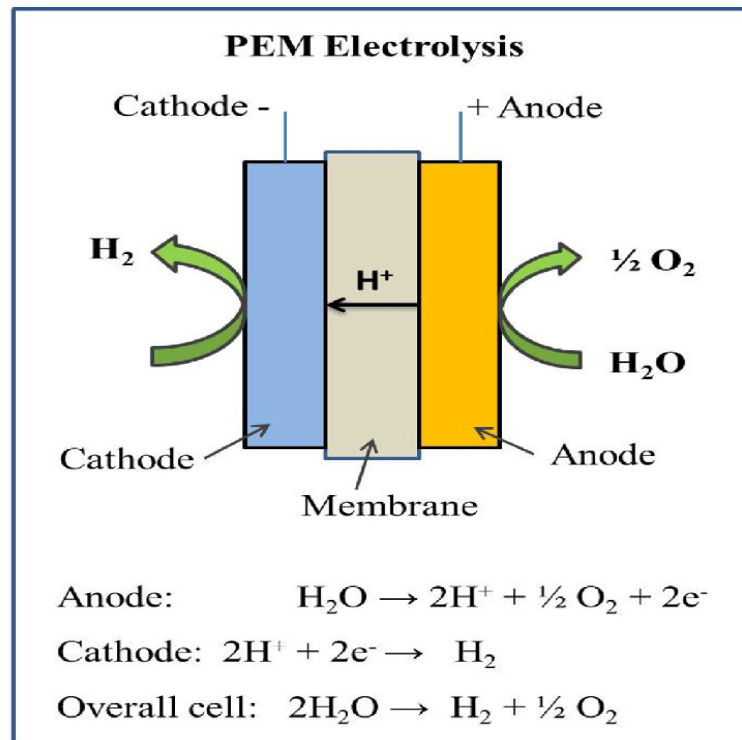


Figure 2. 7: *Electrolyseur à membrane échangeuse de proton [36]*

Les électrolyseurs à membrane polymère échangeuse de protons (PEM) sont très prometteurs pour la production d'hydrogène, ils sont plus compacts (l'électrolyte prend moins de place), performants électriquement car ils peuvent fonctionner à des densités de courant supérieures de l'ordre de 2.0 A/cm², produisent de l'hydrogène très pur (pas ou peu de pollution par l'électrolyte), nécessitent peu de maintenance et peuvent être alimentés par de l'électricité provenant des énergies renouvelables.

Et comme inconvénients nous avons une durée de vie plus courte que les électrolyseurs alcalins, les coûts élevés de la membrane, les besoins en métaux nobles (platine, irridium, rhuténium) pour les électrodes et en titane pour les plaques de séparation.

2.9.3 *Electrolyseur en Oxyde Solide :*

L'électrolyseur à oxyde solide (SOE) introduite pour la première fois par Donitz et Erdle dans les années 1980, L'électrolyse d'oxyde solide a attiré beaucoup d'attention en raison de la conversion de l'énergie électrique en énergie chimique ainsi que la production d'hydrogène ultra-pur avec une plus grande efficacité.

C'est un procédé d'électrolyse de l'eau (H_2O) ou du dioxyde de carbone (CO_2) à l'aide d'électrolytes constitués d'oxydes solides, notamment de céramiques, afin de produire de l'oxygène O_2 et de l'hydrogène H_2 ou du monoxyde de carbone CO . La production d'hydrogène par cette voie est intéressante car d'empreinte écologique réduite et offrant un moyen de stockage de l'énergie alternatif aux accumulateurs. En ce premier tiers du 21^e siècle, l'électrolyse reste la méthode la plus prometteuse pour la production d'hydrogène à partir de l'eau en raison de son efficacité élevée et de ses besoins énergétiques modérés en comparaison des procédés thermochimiques [35].

L'électrolyse à oxyde solide requiert des températures compatibles avec l'électrolyse à haute température, généralement comprises entre 500 et 850 °C. Ce sont des températures semblables à celles nécessaires au fonctionnement des piles à combustible à oxyde solide. L'électrolyse de l'eau à 25 °C consomme au moins 285,83 kJ/mol et devient de plus en plus endothermique lorsque la température augmente. Une partie de la chaleur peut être apportée par effet Joule au cours de l'électrolyse à haute température. Des études examinent la possibilité de faire intervenir des capteurs solaires thermiques ou des sources géothermiques.

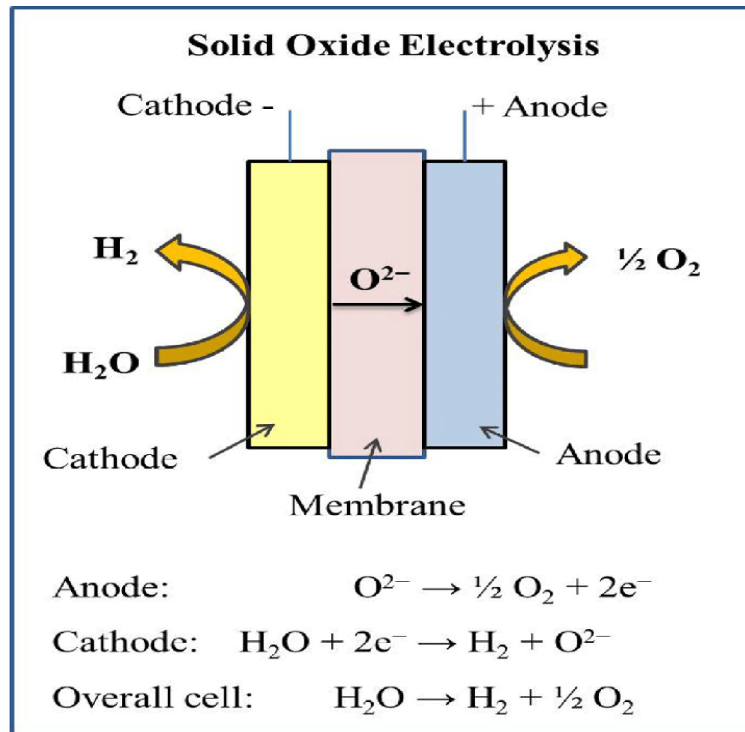


Figure 2. 8: Electrolyseur à Oxyde Solide [36]

Les cellules d'électrolyse à oxyde solide ont pour avantage d'être efficaces, durables, polyvalentes, peu polluantes et engendrent des coûts d'exploitation modérés. Leur gros inconvénient cependant est leur température de fonctionnement élevée, qui demande des temps de démarrage et de mise au repos élevés, et qui engendrent des problèmes d'incompatibilité entre matériaux aux coefficients de dilatation thermique différents ainsi que de diffusion des matériaux les uns dans les autres, d'où une certaine instabilité chimique.

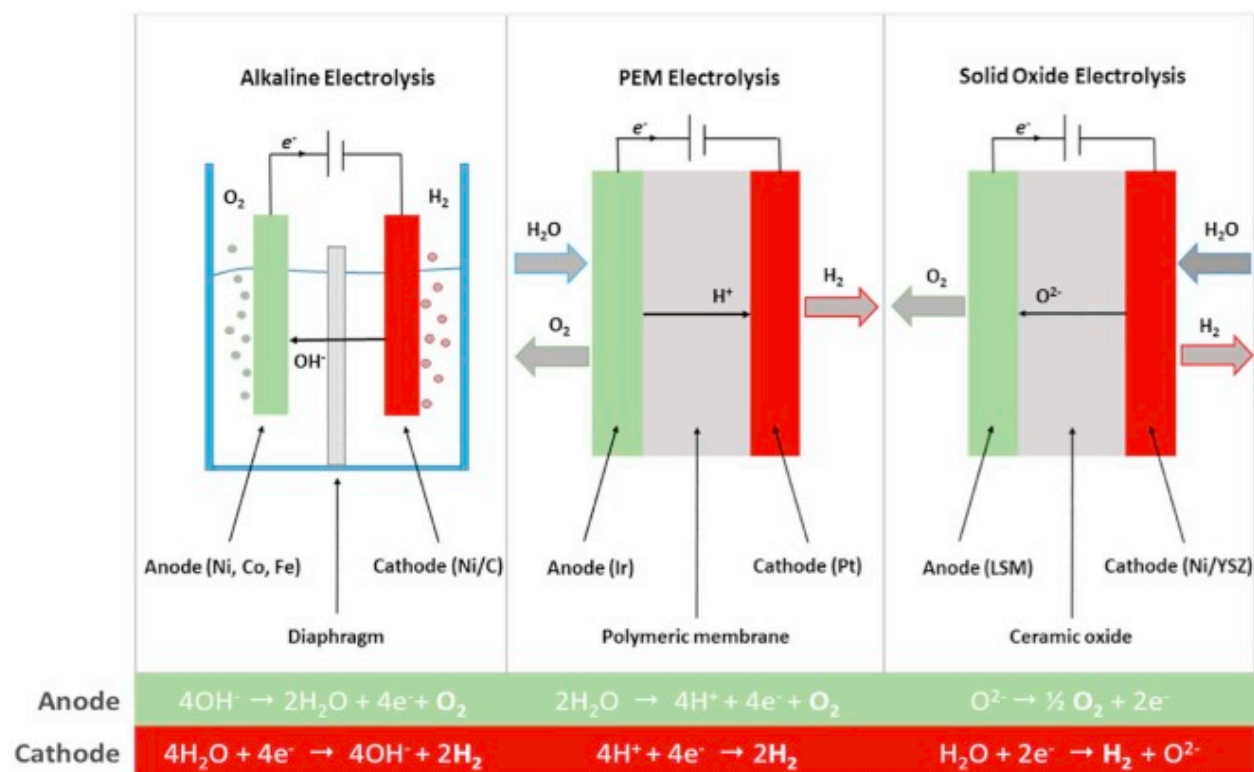


Figure 2. 9: Spécifications typiques de l'alcaline, du PEM et du SOE

Étant donné que les électrolyseurs alcalins sont la technologie d'électrolyse la plus établie, ils ont une part de marché importante, en particulier dans les projets à grande échelle déjà opérationnels et annoncés. Cependant, les conceptions de membranes électrolytiques polymères (PEM) sont déjà utilisées dans un nombre croissant de nouvelles applications. Les électrolyseurs PEM sont dans les premiers stades de développement par rapport aux électrolyseurs alcalins, mais ils fonctionnent plus flexiblement et sont donc plus adaptés aux fluctuations de l'alimentation électrique renouvelable. Des projets utilisant des cellules électrolyseurs à oxydes solides à haute efficacité (SOEC) pour produire des hydrocarbures synthétiques commencent également à être dévoilés. Les clients des électrolyseurs, en revanche, sont divisés sur la question de savoir si les avantages opérationnels des PEM (flexibilité) et des SOEC (efficacité) pèsent sur les coûts plus élevés par rapport aux électrolyseurs alcalins.

Tableau 2. 2: Rendement, durée de vie et température de fonctionnement des différents électrolyseurs

	Electrolyseur Alcalin	Electrolyseur PEM	Electrolyseur à Oxyde solide
Rendement	65 – 68%	80 – 90%	< 90%
Durée de vie	60 000 à 90 000 heures	40 000 à 80 000 heures	40 000 à 60 000 heures
Température	40 - 100°C	80 – 120°C	500 – 1000°C

2.9.4 Electrolyseur microbienne:

La production d'hydrogène par la technologie de la cellule d'électrolyse microbienne (MEC) peut être obtenue par la matière organique, y compris la biomasse renouvelable et les eaux usées, et cette technologie MEC est étroitement liée aux cellules à combustible microbiennes (MFC), mais le principe de fonctionnement est l'inverse des MFC qui produisent un courant électrique à partir de la décomposition microbienne de composés organiques.

Dans les cellules d'électrolyse microbiennes (MECs), l'énergie électrique est convertie en énergie chimique. Les MEC produisent de l'hydrogène à partir de matières organiques sous l'influence du courant électrique. Dans le processus d'électrolyse microbienne, initialement sur le côté de l'anode, le substrat est oxydé par les microbes et produit ensuite du CO₂, des protons et des électrons. Les électrons se déplacent à travers le circuit extérieur vers le côté cathode et les protons sont transportés vers la cathode via la membrane de conduite des protons (électrolyte) alors que les protons et les électrons combinés produisent l'hydrogène [36]. L'électrolyseur est alimenté par une source d'énergie telle que l'acide acétique libérés des électrons et des protons, créant un potentiel électrique pouvant atteindre 0,3 volt. Dans une pile à bactéries conventionnelle, cette tension sert à générer de l'énergie électrique. Dans un MEC, une source électrique extérieure bien dosée fournit une tension supplémentaire à la cellule. Additionnée à la tension d'origine microbienne, elle crée une réaction d'oxydoréduction de protons, produisant de l'hydrogène gazeux. L'énergie électrique totale à la production de dihydrogène (H₂) est plus réduite que dans le cas d'une simple électrolyse de l'eau car une partie de l'énergie est fournie par les micro-organismes. La production d'hydrogène atteint jusqu'à 3,12 m³ de H₂ par jour avec une tension d'entrée de 0,8 volt. L'efficacité de la production

d'hydrogène dépend des substances organiques utilisées. Les acides lactique et acétique atteignent une efficacité de 82 %, tandis que les valeurs pour la cellulose ou le glucose non prétraités sont proches de 63 %.

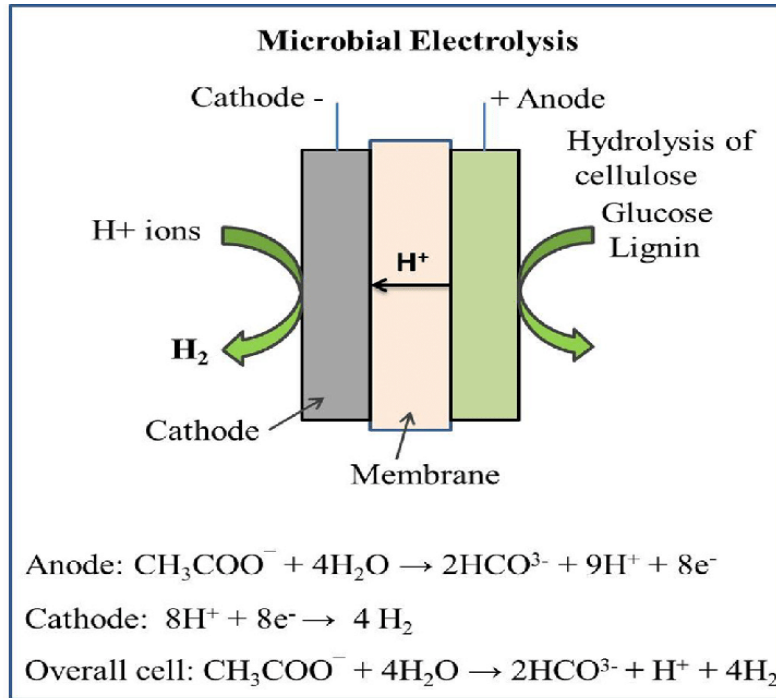


Figure 2. 10: Electrolyseur microbienne [36]

L'efficacité de l'électrolyse de l'eau normale est de 60 à 70 %. Lorsque les MEC convertissent la biomasse inutilisable en hydrogène utilisable, ils peuvent produire 144 % d'énergie utilisable en plus qu'ils n'en consomment sous forme d'énergie électrique. Selon les organismes présents à la cathode, les cellules d'électrolyse microbienne peuvent également produire du méthane par un mécanisme connexe [37]. Cependant, cette technologie MEC est toujours en développement et a plusieurs défis en matière de taux de production d'hydrogène, de résistance interne élevée, de matériaux d'électrodes et de conception compliquée doivent être abordés avant et la commercialisation de cette technologie [38].

Tableau 2. 3: Avantages et inconvénients des différents technologies de l'électrolyse de l'eau

Technologies d'électrolyseurs	Avantages	Inconvénients
Electrolyseur Alcalin	Technologie bien établie, électro-catalyse non noble, technologie à faible coût, l'efficacité énergétique est de 70 à 80%, commercialisé	Densité de courant faible, la formation de carbonates sur l'électrode diminue les performances de l'électrolyseur, basse pureté des gaz, faible pression de fonctionnement (3 – 30 bars), opération dynamique faible
Electrolyseur PEM	Densités de courant élevées, conception compacte du système et réponse rapide, un taux de production d'hydrogène plus élevée avec une grande pureté des gaz (99,99%), efficacité énergétique plus élevée, fonctionnement dynamique élevé	Nouveau et partiellement établi, coût élevé des composants, environnement acide, faible durabilité, la commercialisation est à court terme
Electrolyseur à Oxyde Solide	Efficacité plus élevée (90 – 100%), une électro-catalyse non noble, une pression de travail élevée	Stade de laboratoire, grande conception du système, faible durabilité, la commercialisation
Electrolyseur Microbienne	Différentes eaux usées organiques utilisées	En cours de développement, faible taux de production d'hydrogène, faible pureté de l'hydrogène

2.9.5 ***Cellules d'électrolyse capillaire :***

Inspiré par l'évolution historique des cellules d'électrolyse de l'eau, qui a récemment abouti à des cellules à membrane échangeuse de proton (PEM) dont les membranes permettent d'isoler électriquement les deux électrodes afin de séparer dans les meilleures conditions l'hydrogène et l'oxygène dans la molécule d'eau, les scientifiques du laboratoire Hysata ont développé un concept de cellule d'électrolyse par capillarité (CFE) qui est une avancée technologique dans la production de l'hydrogène utilisant un électrolyte liquide aqueuse. Les électrodes reçoivent régulièrement l'électrolyte aqueux grâce à une action capillaire spontanée dans le séparateur inter-électrodes poreux et hydrophile. Les électrodes recouvertes d'une fine couche d'électrolyte aspirent le liquide latéralement du séparateur et avec l'application d'une tension suffisante entre les électrodes entraîne l'électrolyse de l'eau, le séparateur est continuellement réapprovisionné

en eau à partir du réservoir. L'hydrogène et l'oxygène générés migrent facilement à travers la fine couche d'électrolyte liquide recouvrant leurs électrodes respectives. Le concept de cellule à électrolyse capillaire prévoit une électrolyse sans formation de bulle de gaz avec une efficacité énergétique de 95 à 98% [39].

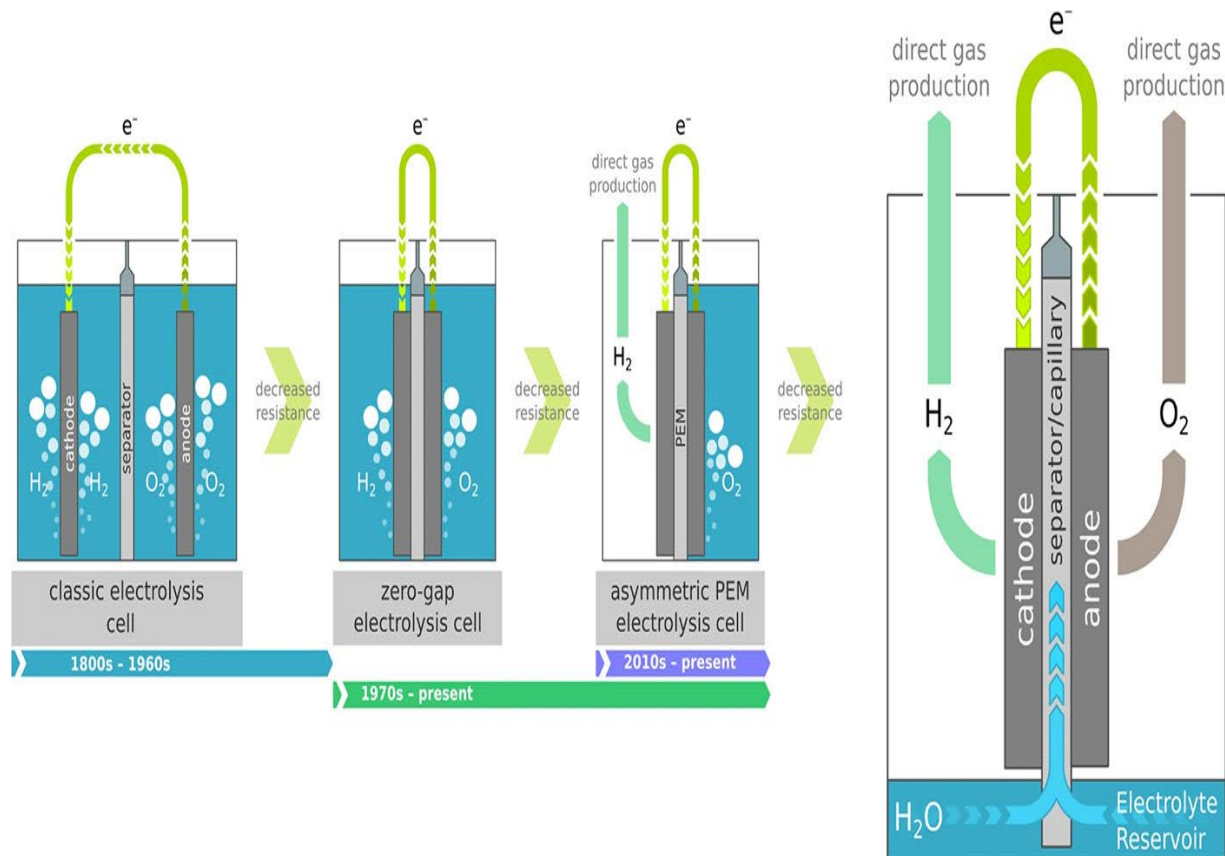


Figure 2. 11: Conceptualisation de la cellule d'électrolyse capillaire

La cellule d'électrolyse capillaire possède une efficacité accrue car grâce à sa grande surface de contact entre l'électrolyte et les électrodes, elle permet une meilleure conductivité ionique et une réduction de la résistance interne, améliorant ainsi l'efficacité énergétique de la cellule. Avec l'utilisation des structures capillaires, la quantité d'électrolyte nécessaire est réduite impactant ainsi sur les coûts et les conséquences environnementaux liés à l'utilisation d'électrolytes souvent corrosifs ou coûteux.

La miniaturisation et l'intégration des cellules d'électrolyse capillaires dans des dispositifs plus petits et plus compacts permettent d'explorer des applications dans des domaines tels que les microsystèmes électromécaniques et les dispositifs portables. En termes de défi la fabrication de structures capillaire à l'échelle micro ou nanométrique nécessite des techniques de pointes et peut-être coûteuse. Il est impératif de mener des recherches continues pour optimiser les matériaux et les processus de fabrication car les électrodes et les structures capillaires doivent être durables et résistantes à la corrosion afin de garantir une durée de vie prolongée et une performance constante. La cellule d'électrolyse capillaire représente une avancée prometteuse dans le domaine de l'électrolyse offrant des améliorations significatives en termes d'efficacité énergétique et de miniaturisation. Bien que des défis restent à relever pour son développement et mise sur le marché à grande échelle, elle pourrait jouer un rôle crucial dans les systèmes de production d'hydrogène renouvelable.

2.9.6 ***Feuilles hybrides photo-thermiques – photo-catalyseurs :***

La photocatalyse offre la possibilité de stocker directement l'énergie solaire en utilisant des combustibles chimiques tels que l'hydrogène vert produit à partir de la séparation de l'eau. Cependant, son besoin en eau pure restreint sa rentabilité commerciale, notamment dans les régions où l'eau est rare. Même de faibles concentrations de substances polluantes présentes dans la matière première peuvent entraîner une diminution significative de la durée de vie et des performances des systèmes photo-catalytiques. De plus, les analyses de faisabilité négligent souvent le coût de l'eau purifiée et de son transport, qui peut atteindre 45 \$ par tonne dans certaines régions. En outre, l'emploi d'eau pure pour la génération d'hydrogène peut entraîner des difficultés pour la chaîne d'approvisionnement en eau. Les sécheresses mondiales sont de plus en plus fréquentes et graves en raison du changement climatique anthropique. La disponibilité des terres pour le développement industriel est également de plus en plus restreinte en raison d'utilisations concurrentes à des fins agricoles, commerciales et résidentielles. Avec l'accroissement de la population mondiale, l'utilisation compétitive des terres et les inquiétudes grandissantes concernant la pénurie d'eau et de terres, il est essentiel de considérer une transition vers des sources d'eau alternatives pour la production de carburant [40].

L'hydrogène, en particulier dans sa version « verte », attire de plus en plus l'attention et se positionne comme un moteur essentiel de la transition énergétique. De plus en plus, les

recherches et les innovations se concentrent sur cet aspect. C'est dans ce contexte que des chercheurs de l'Université de Cambridge ont mis au point une technologie novatrice qui permet de générer de l'hydrogène à partir d'eau polluée ou d'eau de mer. Le combustible de demain est considéré comme l'hydrogène vert, car il a le potentiel d'émissions nulles en carbone. Toutefois, son utilisation rencontre plusieurs obstacles importants, en particulier en ce qui concerne sa fabrication. Afin de garantir une véritable écologie, il est nécessaire de produire ce gaz en utilisant une méthode à faible empreinte carbone, un processus souvent coûteux. Afin de remédier à cette situation, une équipe de l'université de Cambridge a récemment accompli une avancée en utilisant la photocatalyse pour générer de l'hydrogène. La lumière solaire est utilisée dans cette méthode pour accélérer la décomposition des molécules d'eau, en libérant ainsi de l'hydrogène. Malgré son efficacité technique, la photocatalyse n'est pas rentable sur le plan commercial, car elle requiert de l'eau pure, ce qui rend l'approvisionnement en eau plus complexe. Afin de relever cette difficulté, les scientifiques de Cambridge ont développé un système flottant qui purifie l'eau et génère ensuite de l'hydrogène. Un système de type « feuille hybride » a été créé par les chercheurs, qui combine un générateur de vapeur solaire et un photocatalyseur. Ces composants génèrent respectivement de la vapeur d'eau et de l'hydrogène. La couche supérieure, constituée du photo-catalyseur, est constituée de titanate de strontium dopé à l'aluminium, deux matériaux choisis pour leur prix abordable et leur capacité à séparer l'eau. Au niveau inférieur, le générateur de vapeur est constitué d'une maille de carbone nanostructuré, traitée pour être hydrophobe, flottante et protéger le processus catalytique des contaminants. Le carbone a été sélectionné en raison de son prix abordable et de sa facilité d'obtention [41].

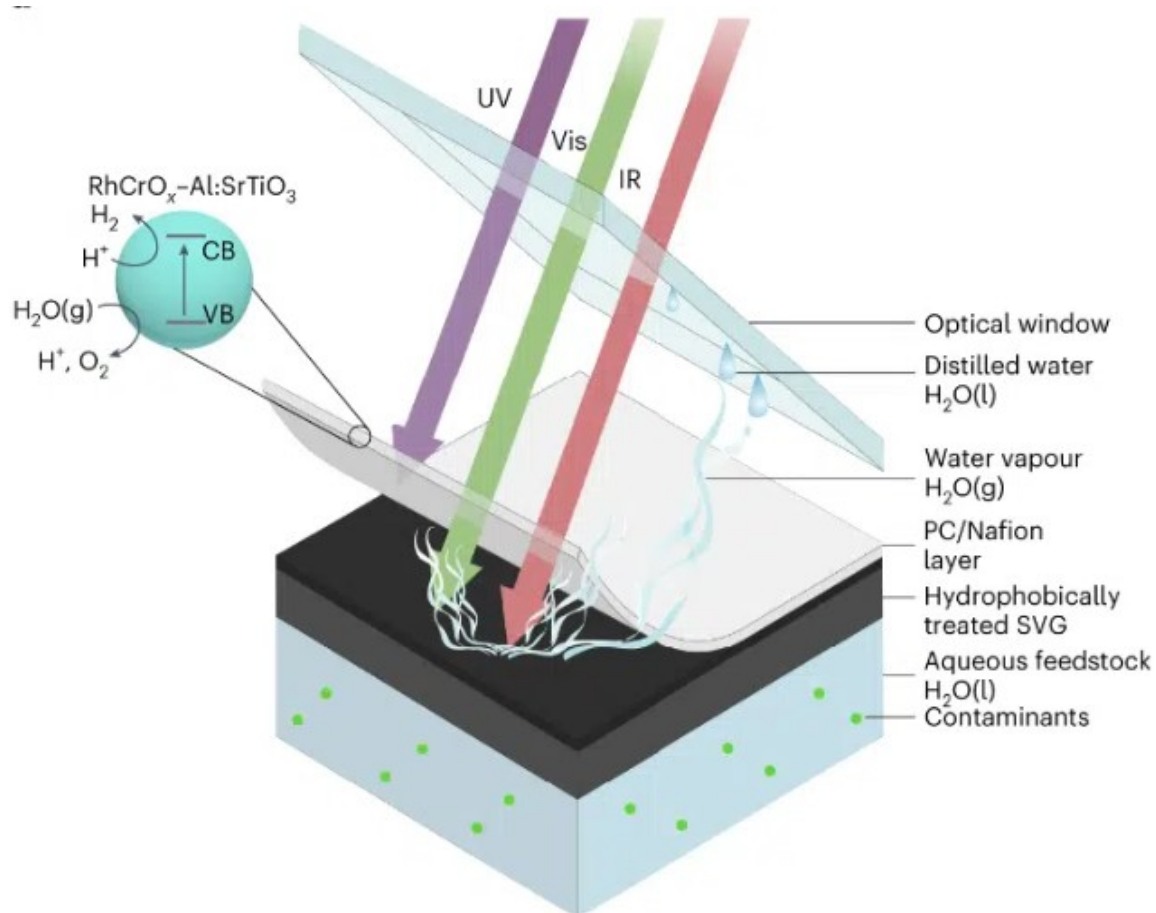


Figure 2. 12: Schéma du dispositif de la feuille hybride

Ce dispositif présente une innovation majeure en exploitant l'ensemble du spectre solaire, contrairement aux procédés catalytiques traditionnels. Lorsque la lumière pénètre dans l'appareil, les rayons UV sont captés par la première couche, le photo-catalyseur, qui est peint en blanc afin de maximiser l'absorption. En utilisant cette énergie, les molécules d'eau se séparent. Dans le même temps, la lumière visible et les rayons infrarouges pénètrent dans la couche carbonée inférieure, ce qui transforme l'énergie solaire en chaleur pour vaporiser l'eau. Ensuite, cette vapeur est soumise au traitement du photo-catalyseur. Le système comprend également un récipient destiné à collecter l'eau potable condensée [41]. Le système peut générer jusqu'à 0,95 kilogramme de vapeur d'eau par heure et par mètre carré en termes de performance. En ce qui concerne la productivité d'hydrogène par énergie solaire, elle s'élève à 0,13%. Malgré cette faible proportion, les chercheurs restent optimistes et mettent en évidence l'importance de développer ces solutions pour favoriser une économie circulaire et un avenir durable [40].

2.10 Potentiel de production d'hydrogène vert en Algérie :

L'Algérie est le plus grand pays d'Afrique, avec une superficie de près de 2 381 741 kilomètres carrés. Le Sahara représente 75% du territoire de l'Algérie qui présente des possibilités pour distribuer l'énergies renouvelables. L'énergie solaire s'est révélée particulièrement appropriée pour l'Algérie, l'énergie éolienne est en deuxième place, suivie par l'électricité géothermique. C'est le troisième plus grand émetteur de CO₂ en Afrique, avec 180,6 millions de tonnes en 2019 et un taux de croissance annuel moyen de 5,20%. Malgré son important potentiel énergétique renouvelable, les émissions de CO₂ du pays demeurent élevées. Les émissions de CO₂ par habitant de l'Algérie sont passées de 1,3 tonnes en 1970 à 4,23 tonnes en 2019, augmentant à un taux annuel de 2,91 %. Le programme d'action du gouvernement accorde la priorité aux énergies renouvelables et investit fortement dans l'hydrogène vert [31].

Le secteur énergétique algérien représente 60 % des recettes budgétaires de l'État et 95 % des exportations se fondent sur la commercialisation des hydrocarbures, signifiant une dépendance économique considérable aux énergies fossiles. Dans ce contexte, le gouvernement algérien s'est engagé avec détermination pour le développement des énergies renouvelables (EnR) afin de diversifier le mix énergétique générée à 98% de sources fossiles, et d'apporter des solutions globales et durables aux problématiques d'approvisionnement en énergie ainsi qu'aux défis environnementaux. Le pays dispose d'un vaste réseau d'universités et de centres de recherche,

d'un large réseau électrique, des infrastructures de stockage, distribution et transport, des infrastructures nationales et internationales pour le transport (à travers des pipelines), d'une situation géographique favorable grâce à sa proximité des marchés potentiels, outre l'existence d'un tissu industriel pour la production de l'hydrogène et de l'ammoniac [42].

L'Algérie peut devenir un producteur d'hydrogène vert en convertissant ou en augmentant sa distribution de gaz existante et son infrastructure de stockage afin d'expédier efficacement de l'hydrogène vert produit localement vers les marchés cibles. Bien que Le réseau de gazoducs de l'Algérie s'étende sur 19,623 kilomètres et transporte du gaz, du pétrole et du condensat. À mesure que les importations de gaz diminuent, la demande croissante en Europe d'hydrogène vert et le potentiel solaire limité en font un marché prometteur pour le producteur nord-africain. Où les demandes futures européens d'hydrogène vert pour le secteur de l'industrie devraient atteindre 294 TWh en 2030, 857 TWh dans 2040, et 1200 TWh à 2050. Chaque année, 300 TWh d'hydrogène est utilisé comme carburant dans les transports. En 2050, la demande directe d'hydrogène dans le secteur des transports devrait atteindre 285 TWh, avec 68 TWh dans l'aviation et 217 TWh pour le transport routier lourd. Dans le secteur de l'électricité, il est estimé à 12Twh en 2030, 301TWh en 2040 et 626 Twh dans 2050, ce qui représente respectivement 1%, 3% et 7% de la demande totale en électricité dans l'UE et le Royaume-Uni [43].

Aujourd'hui, l'hydrogène vert ne représente qu'une partie limitée de l'offre mondiale. Dans la transformation future de l'hydrogène vert en hydrogène d'origines fossiles, et en tant que carburant et vecteur énergétique au-delà de l'industrie l'énergie, il existe de multiples défis qui pourraient être surmontés pour produire l'hydrogène vert en Algérie :

- Accélérer l'achèvement des projets relatifs aux énergies renouvelables, en particulier de l'énergie solaire et éolienne ;
- Fourniture d'une quantité importante d'eau douce soit par la mise en place de projets de purification de l'eau de mer, soit par l'exploitation des eaux souterraines ;
- Malgré les ressources financières considérables de l'Algérie, il était extrêmement difficile voire impossible pour certains investisseurs privés d'obtenir des liquidités et des crédits. Il est nécessaire de mettre en place des facilités de crédit et d'ouvrir la voie à des concepts de chaîne de financement externe adossés à des crypto-monnaies comme solution au problème de financement ;

- Soutenir les entreprises d'hydrogène vert en renforçant les cadres juridiques et réglementaires ;
- Développer une vision stratégique pour le développement économique national en matière de développement durable et d'économie verte ;
- Exiger un nouvel ensemble de ressources humaines, adapté à la nouvelle vision du développement économique durable ;
- Mettre en place des centres de formation en gestion et se préparer à l'intelligence artificielle grâce à la création de mégadonnées et au passage au 5G ;
- Assurer un soutien solide pour réduire les coûts et accroître la compétitivité ;
- Les incitatifs fiscaux peuvent réduire l'impact du coût élevé du capital sur la rentabilité du projet. Les solutions de rechange sont la réduction de la taxe sur le revenu ou de la taxe de vente, ou la réduction de l'impôt sur les investissements ;

Afin de réussir sa transition énergétique, le gouvernement algérien amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme adapté de développement des énergies renouvelables de 15.000 mégawatts d'ici 2035 ainsi que la mise en place d'une production d'hydrogène vert orienté vers l'export. Grâce à son grand potentiel en énergies renouvelables (solaire et éolien notamment), associé à une étendue territoriale et son expertise dans les technologies de dessalement de l'eau de mer, le gouvernement algérien a affiché son engagement pour le développement de la filière de l'hydrogène à grande échelle. La transition vers l'économie de l'hydrogène est en bonne voie. En 2005, l'initiative de collaboration Maghreb-Europe (MedHySol) a annoncé un projet visant à réaliser la production et l'exportation d'hydrogène solaire à grande échelle [44].

Le succès de ce projet sera assuré en deux étapes. La première étape consiste à élaborer une plate-forme technique permettant d'évaluer les technologies potentielles pour la production d'hydrogène à grande échelle en utilisant l'énergie solaire (10-100 kW) et les technologies de perturbation énergétique. La deuxième phase du projet vise à utiliser les technologies les plus efficaces et les plus rentables pour prototyper de grandes installations (1-1000 MW).

2.11 **La Namibie :**

Un pays situé en Afrique australe, est bordée géographiquement à l'ouest par l'océan Atlantique, au nord par l'Angola, au sud par l'Afrique du Sud, à l'est par le Botswana et au nord-est par

la Zambie. Sa limite la plus orientale est distante de moins de deux cents mètres du tripoint où se rejoignent les frontières du Zimbabwe, du Botswana et de la Zambie, sur le fleuve Zambèze, à la confluence de la rivière Kwando. Largement désertique, le pays doit son nom au désert du Namib, qui recouvre sa côte atlantique. Ses frontières orientales sont largement recouvertes par le désert du Kalahari. La capitale, qui est la ville la plus peuplée du pays, est Windhoek. Avec une population d'environ 2,6 millions d'habitants, sa densité de population est la plus faible d'Afrique et l'avant-dernière au niveau mondial après la Mongolie.

L'été austral (d'octobre à avril) est la saison des pluies, caractérisée par des chaleurs torrides à l'intérieur des terres (journées pouvant dépasser 45 °C et nuits fraîches) et des températures plus atténuées sur la côte (25 à 30 °C) et les reliefs montagneux. Durant l'hiver austral (de mai à septembre), l'air est souvent frais, avec des températures comprises entre 15 et 20 °C. Il peut faire jusqu'à 25 °C maximum. Sur la côte, il n'est pas rare de voir des températures autour de 10 °C. Les températures à l'intérieur des terres sont variables avec de brusques changements de température en une seule journée. Les nuits d'hiver namibiennes sont réputées être très froides (parfois légèrement négatives).

Windhoek veut se rendre indispensable dans la transition énergétique, la Namibie occupe une position unique, celle d'être l'un des plus grands producteurs d'hydrogène vert au monde, souligne Hyphen sur son site. Elle dispose notamment de terrains importants, en étant parallèlement le 2e pays le moins peuplé au monde. En outre, elle compte parmi les États les plus riches en ressources mondialement quant à l'énergie éolienne et solaire. Elle est aussi "l'un des gouvernements démocratiques les plus stables d'Afrique" et ses ressources renouvelables se trouvent à proximité géographique de la côte, ce qui assure la liaison portuaire avec les marchés mondiaux. Pays parmi les plus ensoleillés, la Namibie veut ainsi exploiter son potentiel pour se positionner comme un pôle d'énergie renouvelable en Afrique et devenir le premier pays africain neutre en carbone. Pour l'instant, son économie est basée essentiellement sur l'exploitation des minerais comme les diamants, l'uranium, le cuivre ou l'or, ainsi que le tourisme [45].

En novembre 2021, le gouvernement namibien a choisi le consortium franco-allemand Hyphen Hydrogen Energy comme soumissionnaire privilégié pour son projet d'hydrogène vert. Si l'étude de faisabilité en cours est concluante, l'exploitation devrait débuter en 2026. Le projet vise à

produire 300 000 tonnes d'hydrogène vert pur d'ici 2030. La production à grande échelle d'hydrogène vert par électrolyse de l'eau nécessite un accès facile à de vastes étendues de terre, à une abondance d'électricité bon marché et à des sources d'eau propre à faible coût. Heureusement, la Namibie est un vaste pays avec une très faible densité de population et une abondance de ressources énergétiques renouvelables. Les zones côtières et quasi-côtières du sud de la Namibie sont des zones désertiques et semi-désertiques, avec de bonnes ressources éoliennes et parmi les meilleures ressources solaires au monde. Cependant, l'attractivité du pays pour devenir un futur exportateur d'hydrogène vert dépend aussi d'autres aspects pour créer des capacités de production industrielle [46].

Le projet, d'un coût de 9,4 milliards de dollars, serait implanté dans le parc national de Tsau Khaeb, dans le sud-ouest du pays. Or il s'agit d'une zone de conservation nationale. Selon un rapport publié en octobre 2021 par la Fondation Konrad Adenauer, la création d'installations de production et de traitement de l'hydrogène à grande échelle dans cet environnement fragile sera associée à de multiples impacts négatifs sur l'environnement. Par exemple, le processus de dessalement de l'eau de mer, qui est une étape nécessaire à la production d'hydrogène par électrolyse, risque de générer des polluants à une échelle significative. Cela nécessitera donc des efforts de gestion environnementale rigoureux et continus. Selon le rapport, la Namibie importe actuellement des pays d'Afrique australe la moitié de ses besoins annuels en électricité. Le pays ne dispose pas de centrales électriques utilisant des énergies renouvelables, qui pourraient être utilisées pour produire de l'hydrogène par électrolyse. En outre, les besoins locaux en hydrogène à usage commercial et industriel sont inexistant.

2.12 **Conclusion :**

L'attention accrue portée à l'hydrogène provient de ses diverses applications, de la variété de procédés et de sources de sa production ainsi que de son importance dans le système énergétique du futur. Actuellement, la majorité de l'hydrogène vient des hydrocarbures épuisables. Pour produire de l'hydrogène faiblement carboné, trois options s'offrent donc aux industriels : capter le CO₂ émis lors de la production par transformation des énergies fossiles, puis le transporter pour le stocker géologiquement, pyrolyser du méthane et séparer le carbone sous forme solide, et enfin le produire via l'électrolyse de l'eau, l'électrolyse étant opérée à partir d'une électricité peu carbonée fournie par de l'énergie hydraulique, éolienne ou solaire.

Actuellement, la majorité de l'hydrogène vient des hydrocarbures épuisables. Alors que la combinaison de deux sources abondantes, l'eau et le soleil, permet la production d'un hydrogène durable. En effet, l'électrolyse (alcaline ou PEM) d'une eau pure alimentée par un courant électrique continu provenant des modules photovoltaïques produit un hydrogène vert et de haute pureté. Ainsi, l'étude théorique d'un tel système a montré l'avantage et l'inconvénient de l'électrolyse PEM, coûteuse, sur l'électrolyse alcaline, mature et disponible à grande échelle. L'enjeu reste toutefois pour cette dernière option, le coût de ce mode de production, plus onéreux à ce jour que celui du reformage du gaz naturel, même en considérant le surcoût lié au captage du CO₂.

En conclusion, l'Algérie dispose d'un potentiel considérable pour l'utilisation de l'hydrogène vert en raison de ses ressources énergétiques renouvelables abondantes. L'adoption de cette technologie pourrait permettre une transition énergétique et une réduction des émissions de gaz à effet de serre. Cependant, il est important de prendre en compte les défis économiques et réglementaires associés à son adoption. Avec une planification et une volonté politique adéquates, le pays pourrait saisir cette opportunité pour transformer son secteur énergétique et contribuer à un avenir plus durable.

Chapitre 3 : Impact Environnemental, Dynamique du Marché et Recommandations Stratégiques pour le Développement de l'Hydrogène Vert en Algérie

3.1 Introduction :

On présente l'hydrogène comme une alternative pour la mobilité à la fois aérien, maritime et routière, pour l'énergie, l'industrie, ainsi que le chauffage domestique. En somme, il semble que l'hydrogène soit essentiel dans la stratégie de transition écologique des décennies à venir. En émettant ni polluant ou de gaz à effet de serre lors de son utilisation, seulement de l'eau l'hydrogène a de quoi séduire la beauté de nos systèmes écologiques. Lorsqu'on évoque l'hydrogène en lien avec la transition écologique et énergétique, on évoque en réalité le dihydrogène, qui peut être utilisé comme carburant ou stocké dans une pile à combustible en cas de besoin pour la production de l'électricité. D'après le procédé utilisé, la production d'hydrogène n'est pas forcément verte. Lorsque l'hydrogène est généré à partir d'hydrocarbures comme pour la production des 90% de l'hydrogène produit qu'ils soient bleus ou gris par le biais du reformage, cela engendre de nombreux enjeux environnementaux. Où qu'il soit généré à partir de la séparation de molécule d'eau à travers des électrolyseurs qui utilisent de l'énergie électrique pour son fonctionnement. Lorsqu'on évoque l'hydrogène dans le contexte de la transition écologique, il est généralement fait référence à l'hydrogène généré par électrolyse de l'eau, qu'on désigne sous le nom d'hydrogène vert. Cependant, le processus n'est écologique que si l'électricité utilisée pour alimenter les électrolyseurs provient d'énergies renouvelables telles que le soleil, le vent, l'eau ou la terre.

En raison de sa position géographique favorable (à proximité du marché européen), de son énorme gisement solaire, de ses vastes réserves d'eau, de ses infrastructures gazières et électriques solides et étendues, de ses centres de recherche et universités actifs et performants, de son tissu industriel en plein essor, de sa maîtrise et de son savoir-faire reconnus dans le domaine de la production d'hydrogène gris, du raffinage et de la pétrochimie, l'Algérie présente des opportunités certaines pour développer durablement une filière hydrogène performante. Cette industrie très prometteuse de l'hydrogène pourrait jouer un rôle essentiel dans la réussite de la transition énergétique du pays. Créer des bénéfices, en ce qui concerne la création de richesses et d'emplois durables à moyen et long terme. À moyen et long terme, elle jouera également un rôle essentiel dans l'effort mondial de lutte contre les changements climatiques et dans le renforcement de la sécurité énergétique nationale [47].

Le développement de cette industrie est accentué par l'Algérie pour des raisons à la fois bénéfiques et profitables pour son épanouissement. Et parmi les raisons qui poussent le pays à accorder une attention particulière pour le développement de cette industrie prometteuse et capiteux, nous avons en premier lieu une fourniture en énergie de plus en plus écologique, car l'objectif du pays est de se positionner sur le marché énergétique mondiale comme étant l'exportateur incontournable et fiable d'un hydrogène de qualité et transformer ce vecteur énergétique en un moteur de croissance économique et d'augmentation de ses revenus en dehors des hydrocarbures. Secundo, les possibilités économiques nationales à exploiter vu que c'est un vecteur énergétique polyvalent qui pourrait être employé dans le transport, le chauffage, la production d'électricité ainsi que dans de nombreux domaines industriels. Grâce au développement de ces usages, de nouvelles filières industrielles et technologiques pourront être ouvertes, des opportunités d'innovation et d'emplois durables créés et tout cela contribuera à la réduction de la consommation de carbone dans divers secteurs d'activité. Enfin l'essor considérable des énergies renouvelables, développement qui permettra d'accroître la part des énergies renouvelables dans le mix énergétique du pays, tout en garantissant la stabilité du réseau électrique national. Ainsi, la mise en place de l'hydrogène renouvelable et propre en Algérie contribuera non seulement à respecter les engagements climatiques du pays en diminuant l'empreinte carbone de divers secteurs d'activités, mais aussi à respecter les engagements climatiques du pays [47].

3.2 Impacts environnementaux de l'hydrogène vert :

Le progrès de la production d'hydrogène vert doit faire face à divers défis environnementaux et économiques telles que sa décarbonation, la diminution des émissions de gaz à effet de serre, le progrès dans la transition écologique, la réduction de la dépendance aux énergies importées. L'hydrogène vert soutient la décarbonation, qui est essentielle compte tenu des 9 millions de tonnes de CO₂ générées chaque année par l'hydrogène carboné. En particulier, la décarbonation de l'hydrogène implique l'emploi d'énergies renouvelables. On produit alors de l'hydrogène vert en électrolysant l'eau, un processus réalisé par des électrolyseurs qui utilisent de l'électricité propre (panneaux solaires, éoliennes).

La décarbonation qui sous-entend le carbone en d'autres termes du dioxyde de carbone CO₂ et le méthane CH₄ qui est dans la famille des alcanes occupent tous deux une place assez privilégiée au

sein des gaz à effet de serre (GES). À l'origine, les gaz à effet de serre (GES) sont des gaz présents dans l'atmosphère qui captent une partie de la chaleur solaire : ils influencent le climat. Cependant, les activités humaines (y compris la génération d'hydrogène carboné) contribuent à accroître les émissions de gaz à effet de serre. La variation de la concentration en gaz atmosphérique entraîne par la suite une augmentation de l'énergie solaire absorbée par la planète, ce qui entraîne une augmentation de sa température. Les centrales de charbon produisent de l'hydrogène, ce qui entraîne une émission importante de CO₂ et de polluants. D'après l'ADEME, la production d'un kilogramme avec le mix électrique européen à faible émission de carbone résultant du nucléaire et des énergies renouvelables émet 2,7 kilogrammes de CO₂, tandis que 1 kilogramme par reformage émet environ 12 kilogrammes de CO₂, soit 4,5 fois plus que les sources à faible émission de carbone.

Le rendement fait également parti des facteurs les plus importants pour évaluer l'impact environnementale de l'hydrogène, que ça soit au niveau de la production, du stockage ou de l'utilisation, le rendement de l'hydrogène est assez faible. Mais avec l'évolution des procédés techniques, il pourrait s'améliorer, néanmoins il sera toujours plus faible que dans le cas d'une utilisation direct de l'électricité. Cependant même si l'hydrogène provient de production relativement durables (à partir d'énergie à faible carbone et de ressources utilisées de manière durable), il a probablement un impact écologique plus favorable que les énergies fossiles, en tout cas pour ce qui concerne les émissions de CO₂ l'hydrogène produit 110 g de CO₂/kWh, tandis que l'essence produit un peu plus de 300 g de CO₂/kWh [48]. Et parmi les conséquences désastreuses du dérèglement climatique sur l'environnement nous avons l'élévation du niveau moyen des mers ; la perturbation des écosystèmes météorologiques ; les crises alimentaires ; l'acidification des eaux etc... En théorie, il est donc préférable si cela est envisageable de substituer les énergies fossiles par de l'hydrogène, néanmoins en pratique cela s'avère plutôt énigmatique car la substitution des énergies fossiles par de l'hydrogène dans la mobilité quotidienne n'est pas le même défi que l'utilisation de l'hydrogène dans le transport aérien ou maritime. De même la mise en œuvre de l'hydrogène comme substitut aux énergies fossiles dans l'industrie lourde ne pose pas les mêmes défis que de l'utiliser pour l'alimentation des chaudières domestiques.

Avec l'évolution de la technologie, certaines applications dont les coûts sont aujourd'hui très élevés pourraient baisser ou pas car il est très difficile de prévoir ou d'anticiper ces évolutions. Finalement, il est parfois difficile de quantifier l'impact écologique d'une technologie à base d'hydrogène. Pour les transports quotidiens, l'électricité affiche un rendement plus intéressant que celui de l'hydrogène. Il y a des études qui indiquent que la voiture électrique est plus écologique, que la voiture à hydrogène à distance parcourue égale. De même pour le chauffage, les études de performances montrent qu'il est plus rentable d'utiliser directement de l'électricité bas-carbone ou renouvelable pour alimenter une pompe à chaleur que d'utiliser de façon indirecte l'électricité pour produire l'hydrogène afin d'alimenter des chaudières, car cela engendrera trop de perte d'énergie qui aura un impact direct sur notre écosystème [48].

Dans les cas où l'utilisation de l'électricité devient pratiquement impossible ou plus complexe et qu'on a besoin de quantités importantes d'énergie à des densités supérieures, ils seraient plus judicieux techniquement d'utiliser l'hydrogène car c'est un vecteur énergétique assez dense. Raison pour laquelle l'hydrogène liquide est utilisé comme carburant et présenté comme solution d'avenir dans l'industrie spatiale. De la même manière les industries lourdes utilisant du fossile pourraient théoriquement utiliser de l'hydrogène à la place, à titre d'exemple nous avons le procédé de réduction nécessaires à la production d'acier pour lesquelles une énergie dense est nécessaire, mais là encore les barrières techniques sont innombrables. Une fois de plus, l'empreinte écologique de tous ces procédés est conditionnée à la fois par les techniques de production, de stockage et d'utilisation de l'hydrogène, et également par le rendement final de ces techniques.

Que l'on évoque l'avion à hydrogène c'est-à-dire écologique ou la voiture à hydrogène 'durable' et même les procédés industriels à base d'hydrogène sans émission de carbone, cela constitue en réalité un abus de langage, puisqu'aucune de ces technologies n'est pas écologique ou 'zéro émission', chacune a des conséquences environnementales plus ou moins marquées selon leurs efficacités énergétiques, leurs rendements, et leurs sources d'énergies utilisées. En utilisant l'hydrogène pour remplacer les énergies fossiles il ne s'agit donc pas de réduire l'impact sur l'environnement, cela déplace les conséquences parfois les réduit mais ne les annule pas. Donc afin d'entendre l'utilisation de l'hydrogène à grande échelle, il serait nécessaire d'avoir une grande quantité d'énergie à faible émission de carbone. Il s'agit donc de bâtir une quantité

considérable d'infrastructures de production comme des éoliennes, des panneaux solaires et même des installations utilisant de la biomasse.

Etant donné les faibles performances de l'hydrogène, la rhétorique qui affirme que l'on pourra exploiter les surplus de la production électrique renouvelable pour générer de l'hydrogène vert est éphémère. Les excès requis pour produire de l'hydrogène seraient extrêmement importants, il serait nécessaire de surdimensionner ces infrastructures afin de produire un surplus adéquat assez pour répondre à la fois à nos besoins électriques actuels qui grimpe en flèche et génère tout cet hydrogène. A titre d'illustration, après les calculs des chercheurs indépendants de l'Atecepol de Toulouse, il serait nécessaire de produire l'équivalent de la production de 16 réacteurs soit 16.500 MW pour fournir de l'hydrogène aux avions. En parallèle à ces sources de production, il serait nécessaire de développer de manière massive les électrolyseurs, les installations de stockage de l'hydrogène et bien évidemment des piles à combustibles. Autant de constructions qui elles aussi sont polluantes. Afin de bâtir tout cela, il serait nécessaire de disposer des matériaux et des ressources pour l'extraction qui évident que cela puisse le paraître aura des répercussions sur l'environnement, notamment en ce qui concerne la destruction des paysages, l'impact sur la biodiversité et la pollution des eaux et des sols.

Selon certaines études, la transition vers les énergies renouvelables bien que bénéfique pour le climat pourrait entraîner une aggravation de la crise biodiversitaire. Ainsi le problème climatique est réduit, mais cela entraîne une atteinte plus importante à la biodiversité. Etant donné qu'avec l'hydrogène les besoins en énergie bas-carbone sont décuplés alors le problème est également multiplié par deux. L'hydrogène vert est donc plutôt d'un vert grisâtre parfois même d'un gris pur, il est donc inutile de s'attendre à ce que demain grâce à l'hydrogène nous puissions réaliser tout ce que nous faisons actuellement grâce aux énergies fossiles, mais sans avoir d'impact environnemental en version 100% respectueuse de l'environnement. Il est essentiel de briser rapidement ce mythe afin de ne pas se laisser entraîner tête baissée dans une technologie qui bien qu'elle présente des bénéfices est loin d'être une solution miracle. Avec une utilisation irréfléchie de l'hydrogène notre économie continuera de produire de grandes quantités de pollutions, incompatibles avec les objectifs de préservation de l'environnement.

En bref, l'hydrogène présente des avantages majeurs comme son abondance, sa capacité à être utilisé comme substitut à certains usages des énergies fossiles, peut-être une complémentarité à

la transition vers des sources d'électricité renouvelable. Cependant, il n'est pas un remède miracle sur le plan écologique car il génère des pollutions mais pas aux mêmes titres que les énergies fossiles, et son faible rendement le rend peu bénéfique pour les utilisations où l'électricité peut déjà remplacer les énergies conventionnelles. En cas d'utilisation et de perception de l'hydrogène comme un moyen de maintenir un modèle de société non-soutenable, basé sur une croissance infinie des consommations et des productions, cela entraînera des conséquences néfastes sur l'environnement. Ça ne sera donc pas un moyen de transition écologique, mais un remède limité ne faisant que déplacer nos conséquences sur l'environnement. A l'inverse si l'hydrogène est pensé comme un outil supplémentaire dans la transition vers un nouveau modèle basé sur la sobriété, il peut jouer un rôle essentiel pour remplacer les énergies fossiles là où les solutions n'existent pas. Il doit ainsi être encadré et régulé [49].

3.3 Analyse politique du marché de l'hydrogène :

L'intérêt grandissant pour l'hydrogène en tant que source alternative vise à vis des énergies fossiles, est largement reconnu et suscite un vif intérêt dans de nombreuses industries, telles que l'électricité, le chauffage et les transports. Le marché de l'hydrogène vert et bas carbone englobe toutes les méthodes de production d'hydrogène décarboné, notamment l'électrolyse de l'eau et le reformage de méthane avec capture du CO₂, ainsi que différentes autres méthodes (gazéification de la biomasse, pyrolyse du méthane, thermolyse de l'eau, etc.). Le secteur de l'hydrogène décarboné est encore en phase embryonnaire. À la fin de 2022, il y avait moins de 700 MW d'électrolyse dédiée en service à travers le monde, et moins de 20 000 voitures à pile à combustible ont été commercialisées cette même année. Cependant, le départ du marché est déjà entamé et se fera très rapidement. L'Europe est à la pointe de la demande d'hydrogène vert, avec pour objectif principal de décarboner son industrie. Grâce à l'appui massif des autorités publiques, les start-ups et les grands industriels font des investissements considérables. On construit des usines de grande envergure en Europe, aux États-Unis et en Chine. La France ne fait pas exception, avec des initiatives telles que McPhy et Elogen dans le domaine des électrolyseurs, Symbio et Inocel dans le domaine des piles à combustibles, et bien d'autres encore [50].

Afin de prendre en compte les aspects stratégiques, économiques et environnementaux liés à leur sécurité et à leur indépendance énergétique, de nombreux pays à travers le monde ont émis des plans détaillés pour décarboner leurs économies respectives afin d'atteindre la neutralité carbone d'ici 2050 et au-delà. Dans cette situation, plus de 350 initiatives ont déjà été annoncées, englobant l'ensemble de la chaîne de valeur de l'hydrogène vert, avec des projets d'investissements élaborés (financement public et privé) qui représenteront plus de 80 milliards de dollars. L'Algérie possède de nombreux atouts qui la positionnent en tête pour devenir un acteur majeur à l'échelle régionale et internationale dans le domaine du développement de l'hydrogène, en particulier l'hydrogène vert en raison de son potentiel élevé en énergie solaire, de ses ressources en gaz naturel considérables et des infrastructures de distribution qui y sont liées [47].

En outre, l'Algérie possède des centres de recherche et des universités actifs et performants, un réseau électrique étendu et robuste, des infrastructures de stockage, de distribution et de transport, des infrastructures nationales et internationales pour le transport du gaz naturel reliant l'Algérie à l'Europe, une situation géographique favorable en raison de sa proximité avec les marchés potentiels, un tissu industriel en plein croissance, ainsi que d'importantes réserves en eau [51]. De plus, sa proximité du marché européen, ses installations portuaires et sa côte maritime de plus de 1200 km offrent un autre avantage concurrentiel qui lui permet d'explorer d'autres routes d'exportation de l'hydrogène et de ses dérivés, ce qui place l'Algérie en tête pour devenir un centre de production d'hydrogène renouvelable et propre dans le bassin méditerranéen. Cependant, il faudra déployer de nombreux efforts pour améliorer et moderniser les infrastructures existantes, voire en créer de nouvelles, si besoin, afin de garantir une gestion opérationnelle améliorée et une optimisation des coûts. Grâce à ces variétés d'avantages et sa proximité avec le marché européen, l'Algérie pourrait fabriquer et fournir de l'hydrogène vert à des prix très concurrentiels.

Selon l'AIE, la consommation mondiale d'hydrogène devrait atteindre 90 millions de tonnes par an en 2020. Les besoins actuels sont principalement liés au raffinage et à l'industrie lourde, en particulier à la fabrication d'engrais et de drogues. La majorité de l'hydrogène produit déjà est captive, c'est-à-dire produit et consommé sur place. Ainsi, le coût de l'hydrogène est très localisé et déterminé en se basant sur des accords d'approvisionnement à long terme confidentiels entre

deux parties respectives. Selon les prévisions concernant l'hydrogène, il semble que ce modèle localisé ne soit pas adapté à l'essentiel de la demande d'hydrogène d'ici 2050 ou au-delà.



Figure 3. 1: Demande mondiale d'hydrogène par secteur [62]

Selon l'AIE, la demande mondiale d'hydrogène atteindra 530 MTPA d'ici 2050, en raison d'une utilisation croissante de l'hydrogène dans divers secteurs, tels que les transports lourds et le chauffage industriel. Puisque les pays très industrialisés et très pauvres en ressources ne peuvent pas produire toute leur demande d'hydrogène à faible teneur en carbone, l'hydrogène ne sera plus forcément limité à un modèle de consommation localisé, mais devra être transporté au-delà des frontières internationales, comme le gaz naturel aujourd'hui. D'après les estimations de l'Agence internationale pour les énergies renouvelables, d'ici 2050, un quart de la demande mondiale d'hydrogène sera échangeable à l'échelle internationale, ce qui rappelle le marché actuel du gaz où 33 % de la demande de gaz passe par les frontières. À la différence du gaz naturel, le transport de l'hydrogène sur de grandes distances est beaucoup plus ardu, que ce soit par pipeline ou par transport maritime. En raison des caractéristiques physiques et chimiques de l'hydrogène, il est beaucoup plus difficile de le transporter par bateau à -253 degrés Celsius que le gaz naturel liquéfié (GNL), qui est stocké et transporté à -162 degrés Celsius. C'est la raison pour laquelle

les « transporteurs d'hydrogène » comme l'ammoniac et les transporteurs d'hydrogène organique liquide (LOHC) sont perçus comme des agents potentiels de catalyseur du commerce maritime de l'hydrogène. Cependant, ces moyens de transport requièrent un réseau sophistiqué d'infrastructures, de procédés chimiques et de solutions technologiques afin de transporter les molécules d'hydrogène.

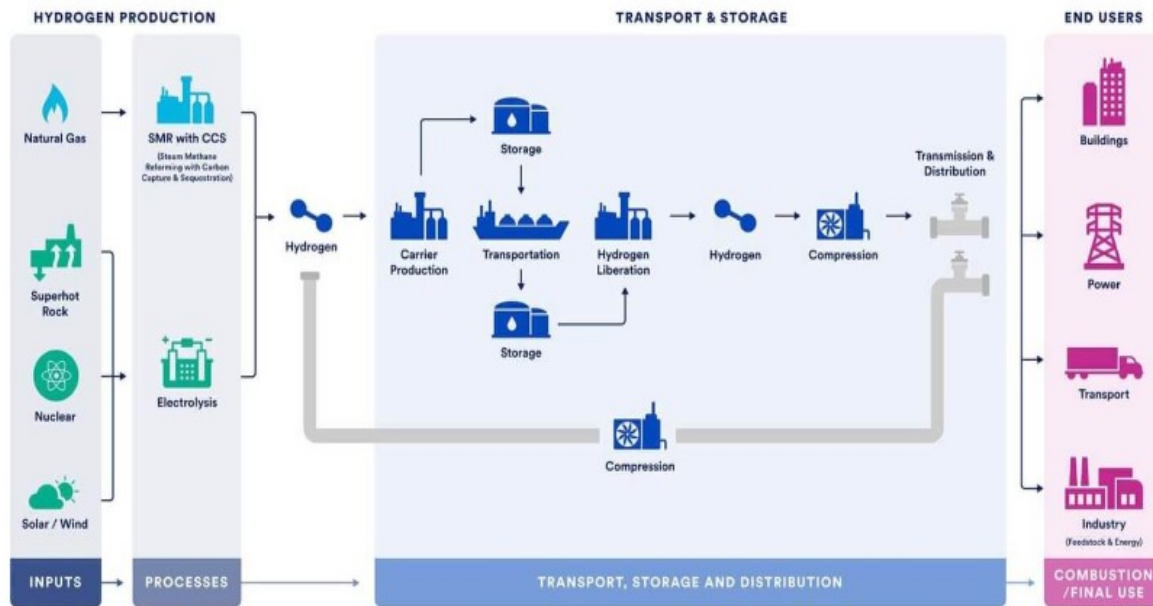


Figure 3. 2: *Moyen de transport de l'hydrogène, de la production au consommateur final*

Les canalisations facilitent le transport de l'hydrogène car elles ne requièrent pas de transporteurs ou d'opérations cryogéniques. Toutefois, le transport de l'hydrogène par canalisations demande environ trois fois plus d'énergie que le transport d'une quantité équivalente d'énergie sous forme de gaz naturel et peut entraîner des coûts d'investissement plus élevés. La complexité de la logistique du transport de l'hydrogène soulignée est une caractéristique essentielle pour tout commerce international de l'hydrogène et a des répercussions directes sur les structures tarifaires. En particulier, il est essentiel que les différences de prix entre les régions exportatrices et importatrices soient significatives afin de prendre en considération les étapes intermédiaires nécessaires pour le stockage, l'exportation, le transport et l'importation de l'hydrogène.

Rappelons que la croissance des marchés traditionnels de produits de base tels que le pétrole ou le gaz a pris des décennies. Au fur et à mesure de l'expansion du commerce de l'hydrogène, de la

maturité de la technologie et de la baisse des coûts de transport, les contours d'un marché de l'hydrogène et d'un mécanisme de tarification associé se dessineront afin de faciliter le commerce émergent.

3.3.1 Dynamique du marché mondial de l'hydrogène vert :

Sous l'effet de l'urgence climatique et des engagements des pays à réduire leurs émissions nettes à zéro, l'IRENA estime que l'hydrogène couvrira jusqu'à 12 % de la consommation mondiale d'énergie d'ici 2050. La croissance du commerce et des investissements ciblés sur un marché dominé par les combustibles fossiles et actuellement évalué à 174 milliards d'USD va probablement stimuler la compétitivité économique et modifier le panorama de la politique étrangère avec la conclusion d'accords bilatéraux très éloignés du type de relations qui caractérisaient le marché des hydrocarbures au XXe siècle.

Il est prévu que le commerce transfrontalier d'hydrogène connaisse une croissance significative. Effectivement, plus de 30 pays et régions anticipent déjà actuellement une intense activité commerciale. Certains pays qui se préparent à devenir importateurs, tels que le Japon et l'Allemagne, comptent déjà sur la diplomatie dans le domaine de l'hydrogène. De plus en plus d'exportateurs de combustibles fossiles voient dans l'hydrogène propre un moyen intéressant de diversifier leur économie. C'est le cas, par exemple, de l'Australie, d'Oman, de l'Arabie saoudite ou mêmes de l'Algérie. Cependant, il est nécessaire de mettre en place des stratégies de transition économique plus étendues, car l'hydrogène ne permettra pas de compenser les pertes de revenus du pétrole et du gaz. Le potentiel technique pour produire de l'hydrogène est bien supérieur à la demande mondiale prévue. Les pays les plus compétents pour produire de l'électricité renouvelable à prix abordable seront les plus favorables à la production d'hydrogène vert compétitif. Tandis que des nations telles que le Chili, le Maroc ou la Namibie sont actuellement des importateurs nets d'énergie, elles sont sur le point de devenir des exportateurs d'hydrogène vert. Il serait possible de réduire le risque de concentration des exportations en exploitant les régions telles que l'Afrique, les Amériques, le Moyen-Orient et l'Océanie. Cependant, de nombreux pays devront faire face à des transferts de technologie, d'infrastructures et d'investissements à grande échelle [52].

La probabilité que la géopolitique de l'hydrogène propre se déroulera en plusieurs phases est assez imminent. Selon le rapport, une grande compétition pour le leadership technologique aura lieu dans les années 2020. Cependant, la demande ne devrait augmenter qu'au milieu des années 2030. À cette époque, l'hydrogène vert va rivaliser avec les prix de l'hydrogène fossile à l'échelle mondiale, un phénomène qui a été annoncé encore plus tôt dans des pays tels que la Chine, le Brésil et l'Inde. L'hydrogène vert était déjà accessible en Europe pendant la hausse des prix du gaz naturel en 2021. La reconstruction des gazoducs devrait encore stimuler la demande et faciliter le commerce de l'hydrogène. Les pays ayant un grand potentiel d'énergie renouvelable pourraient se transformer en zones d'industrialisation verte et exploiter leur potentiel pour attirer des industries extrêmement énergivores. En outre, s'impliquer dans la chaîne de valeur de l'hydrogène peut favoriser la compétitivité économique. L'industrie de la fabrication d'équipements tels que les électrolyseurs et les piles à combustible pourrait être stimulée. À l'heure actuelle, la Chine, le Japon et l'Europe ont déjà une avance dans la production, mais l'innovation continuera de changer le paysage manufacturier. L'utilisation de l'hydrogène vert peut accroître l'autonomie, la sécurité et la résistance énergétiques en diminuant la dépendance aux importations et la fluctuation des prix, tout en renforçant la souplesse du système énergétique [52].

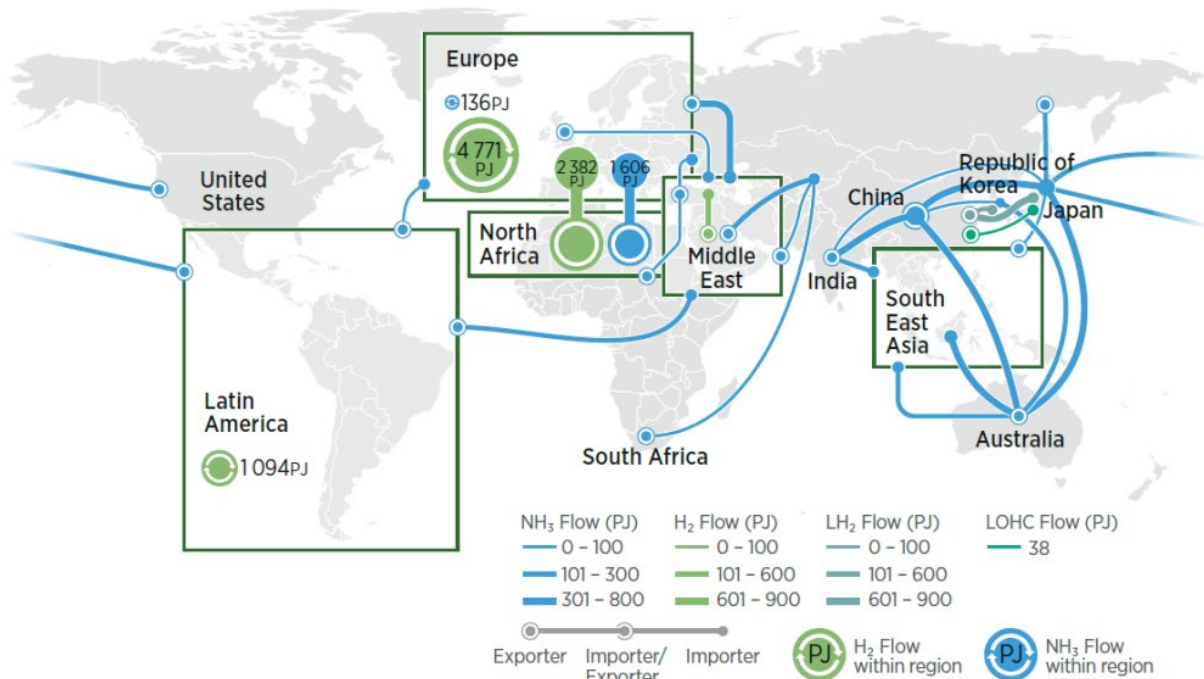


Figure 3. 3: *Géopolitique de l'hydrogène, les échanges mondiaux d'hydrogène et de ses dérivés*

L'objectif de l'Algérie est de se positionner en tant que leader régional et international dans la production et la vente d'hydrogène renouvelable et propre, ainsi que de ses dérivés. Dans cette optique, elle vise à exploiter son potentiel technique de production d'hydrogène et ses bénéfices comparatifs afin de générer et d'exporter entre 30 et 40 TWh d'hydrogène gazeux, liquide et/ou ses dérivés. Ces quantités ont pour objectif de fournir au marché européen environ 10% de ses besoins d'ici 2040. Dans cette optique, et grâce à un prix de vente très concurrentiel de cette molécule d'hydrogène, l'Algérie pourrait attirer environ 10 milliards de dollars par an. En plus de cela, il prévoit de produire environ 10 TWh d'hydrogène propre (bleu) afin de répondre aux besoins du marché national. Pour parvenir à cet objectif, l'Algérie s'attèlera à mettre en place des projets pilotes de 2 MW à 50 MW de capacité d'électrolyse, afin de tester diverses technologies de production et d'utilisation de l'hydrogène et de ses dérivés, ainsi que d'évaluer différents modèles des affaires. Par la suite, elle se concentrera sur les applications les plus bénéfiques et les plus adaptées au contexte énergétique national, ainsi que sur les mécanismes de financement les plus adaptés. Cela favorisera l'obtention, à moyen et long terme, de coûts de production très compétitifs et l'exportation de l'hydrogène et/ou de ses dérivés vers l'Europe en particulier [47].

Les pays ayant des coûts de production d'hydrogène comparativement plus bas ne vendent pas forcément moins cher aux consommateurs, mais réalisent des marges bénéficiaires plus élevées, comme c'est le cas dans le commerce mondial des produits de base, où les prix des produits de base sont déterminés par l'offre et la demande. Les mécanismes de régulation des prix expriment les principes essentiels du marché à travers les niveaux de prix. Les débuts du paysage de l'offre et de la demande d'hydrogène renouvelable sont encore loin, et la tarification de l'hydrogène ne sera probablement pas basée sur un prix de référence ou un prix au comptant dans un premier temps. Cependant, il existe des efforts pour établir des bourses de l'hydrogène, telles que "HyXchange" aux Pays-Bas, qui ont pour objectif de simplifier la détermination des prix [53].

La mise en place de règles, de normes et de gouvernance de l'hydrogène pourrait entraîner une compétition géopolitique ou inaugurer une nouvelle ère de coopération internationale soutenue. Plus précisément, l'assistance aux pays en développement dans l'implémentation de technologies de l'hydrogène vert et dans le développement des industries de l'hydrogène permettrait d'éviter

une accentuation encore plus marquée des disparités en matière de décarbonisation à l'échelle mondiale, tout en favorisant l'équité et l'inclusion en créant des chaînes de valeur locales, des industries vertes et des emplois dans les pays riches en matériaux renouvelables.

3.4 Politique énergétique de l'Algérie :

L'analyse de la politique énergétique de l'Algérie révèle un équilibre délicat entre l'exploitation de ses ressources fossiles abondantes et l'aspiration à une transition vers les énergies renouvelables pour assurer une indépendance énergétique durable et une réduction de son empreinte carbone. L'Algérie étant le principal producteur de gaz naturel en Afrique et un important exportateur de pétrole axe son économie sur ces ressources qui au fil du temps en ai devenu sa pierre angulaire. Les revenus tirés des hydrocarbures financent une grande partie du budget national et des investissements dans les infrastructures mais en contrepartie la dépendance excessive aux ressources fossiles rend l'économie vulnérable aux fluctuations des prix du marché mondial. De plus, la demande mondiale pour des sources d'énergie plus propres met la pression sur le pays pour diversifier ses sources de revenus.

La politique énergétique met un accent particulier sur l'amélioration de l'efficacité énergétique qui est un axe stratégique pour la réduction de la consommation domestique en énergie et libérer d'avantages d'hydrocarbures pour l'exportation. Des initiatives et réglementation gouvernementales furent prises comme des programmes de rénovation des bâtiments, l'optimisation des procédés industriels et la promotion des pratiques économes en énergie mis en œuvre. Le pays introduit des normes et des régulations pour encourager l'efficacité énergétique dans tous les secteurs. Le développement et la modernisation des infrastructures énergétiques sont essentiels pour soutenir la transition énergétique, à travers des investissements dans les réseaux de transport et de distribution pour améliorer la fiabilité et la capacité du système énergétique, développer des capacités de stockage d'énergie pour gérer l'intermittence des énergies renouvelables.

La sécurité énergétique reste une priorité pour le pays afin de garantir un approvisionnement stable et fiable en énergie pour ses citoyens et industries. En plus des énergies renouvelables l'Algérie explore le développement de nouvelles technologies comme l'hydrogène vert, la

réduction de la dépendance aux importations de produits énergétiques et le renfort des capacités de production et de stockage.

Au titre du développement durable et de la protection de l'environnement, le pays s'engage à la réduction de ses émissions de gaz à effet de serre en augmentant la part des énergies renouvelables et en améliorant l'efficacité énergétique. Le pays participe à des accords internationaux sur le changement climatique et s'efforce de respecter ses engagements en matière de réduction de ses émissions.

La gestion énergétique englobe toutes les actions et mesures prises pour optimiser l'utilisation de l'énergie, favoriser le développement des énergies renouvelables, réduire les impacts sur l'environnement et établir des objectifs en matière d'énergie. Développer et promouvoir des secteurs de transformation des énergies renouvelables exploitables, tels que l'énergie solaire, la géothermie, la biomasse, l'hydroélectricité et l'éolien. C'est dans ce cadre que l'Agence nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE) a été créée. Sa mission principale est l'élaboration du programme national de gestion de l'énergie et assuré sa suivi et son évaluation.

En vertu de la loi 99-09 du 28 juillet 1999 sur la gestion de l'énergie, un Fonds national de gestion énergétique a été créé. Il finance des projets de gestion de l'énergie. Le Fonds national de gestion de l'énergie contribue au financement de projets relatifs aux énergies renouvelables. L'article 33 prévoit diverses avantages fiscaux et douaniers accordés aux projets qui contribuent à la promotion des énergies renouvelables. Les mesures relatives aux énergies renouvelables devraient être financées dans ce contexte dans le cadre du plan national de gestion de l'énergie 2006-2010. Ces opérations concernent les secteurs résidentiel et tertiaire. L'objectif est d'installer 400 chauffe-eaux solaires dans le secteur tertiaire afin de générer de l'eau chaude. Dans le domaine de l'habitat, les initiatives portent sur l'implantation de 20 équipements solaires pour la production d'eau chaude et de chauffage [54].

Au chapitre de loi sur l'électricité et la distribution de gaz pipeline, la loi N° 02-01 du 5 février 2002 sur l'électricité et la distribution publique de gaz libéralisant ce secteur prévoit la promotion de la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables et son intégration dans le réseau. Pour mettre en œuvre cette loi, un décret a été promulgué le 25 mars 2004 concernant les frais de

diversification de la production d'électricité. Il instaure un système d'encouragement à la production d'électricité à partir de sources durables. Les primes offrent des bénéfices considérables aux fabricants d'électricité provenant de sources renouvelables. La prime peut s'élever à 300% du tarif en vigueur [54].

Selon la CREG, Plusieurs textes réglementaires régissent la production de l'électricité à partir des énergies renouvelables et/ou des systèmes de cogénération tels que :

- La loi n°02-01 du 05 février 2002 relative à l'électricité et à la distribution du gaz par canalisations et ses textes d'application ;
- Loi n°04-09 du 14 août 2004 relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable ;
- L'ordonnance n°01-03 du 20 août 2001 relative au développement de l'investissement ;
- La loi n°09-09 du 30 décembre 2009 portant loi de finances pour 2010 (création du FNER).

Ces lois et leurs textes d'application ont pour objectif de définir les modalités d'octroi des primes pour les coûts de diversification de la production d'électricité, ainsi que la certification de garantie d'origine de l'électricité produite à partir de sources d'énergie renouvelables et de systèmes de cogénération [55].

L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables (EnR) et d'efficacité énergétique. Cette vision du gouvernement algérien s'appuie sur une stratégie axée sur la mise en valeur des ressources inépuisables comme le solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer l'Algérie de demain. Grâce à la combinaison des initiatives et des intelligences, l'Algérie s'engage dans une nouvelle ère énergétique durable. Le programme des énergies renouvelables actualisé consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent.

Le gouvernement algérien s'est engagé à abandonner les combustibles fossiles au profit des sources d'énergie renouvelables, à la fois pour préserver les ressources fossiles en déclin et parce

que c'est la meilleure solution à long terme pour atteindre les objectifs environnementaux. Cela vise également à s'affranchir de la forte dépendance au gaz naturel en augmentant la part de l'électricité produite par les énergies renouvelables et la cogénération [56].

Tableau 3. 1: Objectifs détaillés du programme des énergies renouvelables en Algérie [56]

Source	1 ^{ère} Phase (2015-2020)	2 ^{ème} Phase (2021-2030)	Total (MW)
Solaire Photovoltaïque	3000	10 575	13 575
Eolienne	1010	4000	5010
CSP		2000	2000
Cogénération	150	250	400
Biomasse	360	640	1000
Géothermie	5	10	15
Total	4525	17 475	22 000

Dans le cadre du développement durable, la promotion des énergies renouvelables est assurée par un programme national de promotion de l'énergie renouvelable dans le cadre du développement soutenu, une balance annuelle de l'utilisation des sources d'énergie renouvelable et des instruments de promotion de ces sources. Ce programme national comprend toutes les campagnes d'information, de formation ou d'extension, ainsi que des incitations à la recherche, à la production, au développement et à l'utilisation des sources d'énergie [57]. Il est également prévu dans cette loi des avantages pour encourager le développement des énergies renouvelables et la mise en place d'un Observatoire national de l'énergie renouvelée qui a pour mission de promouvoir et de développer ces sources d'énergie.

L'Algérie s'est impliquée dans des projets majeurs qui offrent une opportunité pour l'énergie solaire et éolienne comme la centrale hybride gaz-solaire de 150 MW à Hassi R'mel, dont le coût est de 350 millions d'euros, un parc solaire qui génère de l'électricité solaire avec une capacité de 6000 MW et un parc éolien de 10 MW à Tindouf, sont tous deux mis en place par le groupe Nouvelle énergie Algérie (NEAL). En parallèle plusieurs mesures ont été prises par l'Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie (APRUE). Plus spécifiquement, pour le Programme national de gestion de l'énergie, le programme est désigné sous le nom d'ALSOL. Le but de ce programme est de faire la promotion du chauffe-eau solaire. Le Fonds national pour la gestion de l'énergie (NFEM) apporte un soutien financier direct à

hauteur de 45 % du coût du chauffe-eau solaire installé individuellement et à hauteur de 35 % pour une installation de chauffage solaire collectif. Dans le but de promouvoir et de diffuser dans tout le pays quatre cents chauffe-eau solaire individuels pour la production d'eau chaude domestique, le programme "ALSOL" a été lancé en 2010 [58].

*L'Algérie se distingue par sa politique énergétique qui vise à optimiser l'utilisation de ses ressources fossiles tout en se dirigeant vers un avenir énergétique plus durable et varié. Les défis sont multiples tels que la dépendance économique aux hydrocarbures, les difficultés pour le développement des énergies renouvelables, ainsi que l'importance d'améliorer l'efficacité énergétique et les infrastructures. Cependant les actions entreprises témoignent d'une volonté de changement et d'adaptation aux exigences actuelles de durabilité et de sécurité énergétique. Il en déduit que la transition vers une économie plus verte nécessite de surmonter des obstacles financiers et technologiques importants. En Algérie, même si les énergies renouvelables présentent un potentiel important, leur contribution à l'équilibre énergétique demeure faible, notamment dans la production d'électricité. L'introduction de possibilités hybrides et le soutien à d'autres formes, telles que la production d'hydrogène vert (renouvelable) devrait également être favorisés par la politique énergétique pour une transition énergétique durable. Cela pourra se révéler comme étant l'atout stratégiques pour que le mix énergétique de l'Algérie augmente son potentiel d'énergie renouvelable. *Afin de réussir, il sera nécessaire que l'Algérie poursuive son effort d'attraction des investissements améliore son cadre réglementaire et favorise l'innovation technologique.

3.5 Stratégies de développement de l'hydrogène :

De nombreux pays ont commencé à privilégier le développement de l'hydrogène comme source d'énergie afin de diminuer leurs émissions de dioxyde de carbone CO₂ et de diversifier leurs sources d'énergie. L'objectif vise par les stratégies tourne autour de quelques points essentiels qui sont la réduction des émissions de gaz à effet de serre, la sécurité énergétique, l'innovation et la compétitivité industrielle. Ces stratégies de développement sont intimement liées à des défis et perspectives majeurs qui se base sur la réduction des coûts de production de l'hydrogène vert, le développement des infrastructures de distribution et de stockage adaptée aux besoins de l'hydrogène, l'établissement des normes internationales pour la production, le transport et

l'utilisation de l'hydrogène, enfin la sensibilisation et l'éducation du public et en particulier les industries aux avantages de l'hydrogène.

Dans le cadre de développement de l'hydrogène vert en Algérie, la technologie choisie pour la production sont les électrolyseurs de types PEM. En raison de leur compatibilité et de leur adaptabilité à l'intermittence des énergies renouvelables, ils sont les plus adaptés parmi les technologies existantes sur le marché et ayant une maturité technologique confirmée. Ils proposent une plus grande souplesse et un rendement accru, ce qui permet d'atteindre le coût moyen pondéré de production d'hydrogène (LCOH) le plus bas, malgré leur coût d'acquisition actuel considéré comme élevé. Pour la génération de l'électricité verte nécessaire, seules les centrales solaires photovoltaïques et éoliennes ont été prises en compte pour la production d'hydrogène vert, ce qui permettra de générer plus d'un million de tonnes d'hydrogène vert d'ici 2040.

De plus, en accord avec la stratégie de développement des énergies renouvelables, prise par les autorités publiques et compte tenu de la complémentarité des profils de charge du solaire photovoltaïque et de l'éolien, il a été choisi de considérer la production d'électricité verte comme une hypothèse de calcul, avec un taux de 70% pour le solaire photovoltaïque et 30% pour l'éolien [47].

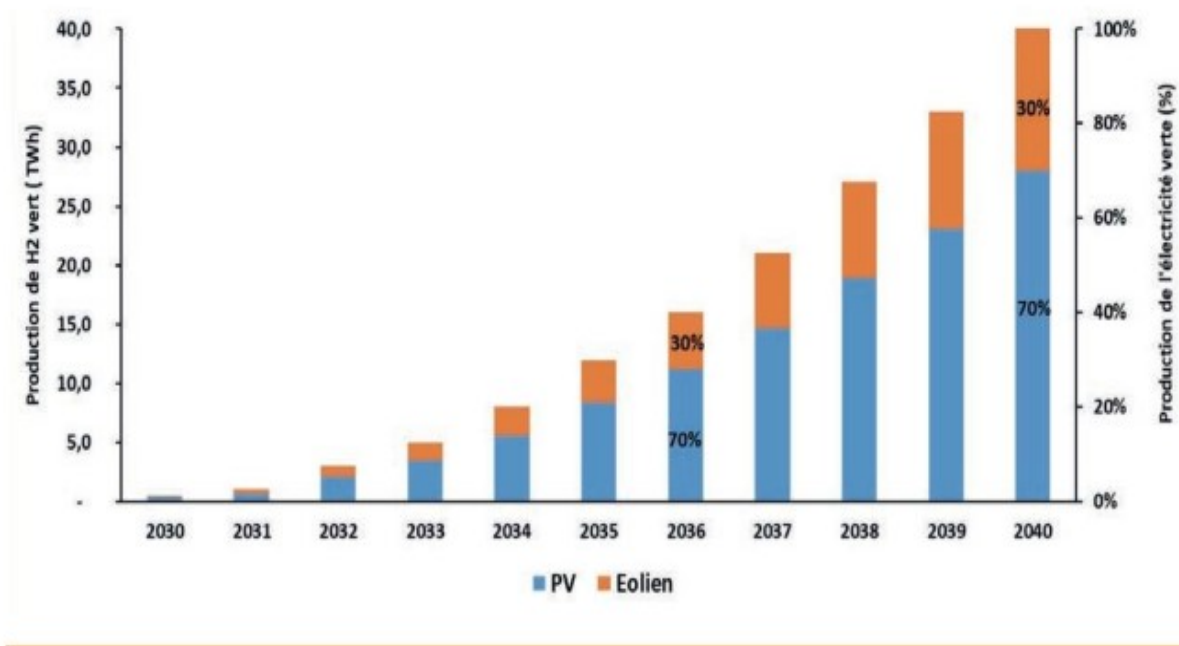


Figure 3. 4: Répartition de la production d'hydrogène vert par technologie de production d'électricité

Les niveaux d'investissement varient en fonction de l'évolution du marché et des avancées technologiques dans le domaine de l'électrolyse. On prévoit un investissement de 24,8 milliards de dollars pour la production totale d'hydrogène à l'horizon 2040 (40 TWh), sans prendre en compte les frais de stockage (électricité et H2).

La croissance de la filière hydrogène en Algérie repose sur une approche progressive, en commençant par une période de test et de maîtrise de toute la chaîne de valeur. Cela se traduit par la mise en place de projets pilotes et de démonstration, qui visent également à former les compétences dans le domaine et à renforcer l'activité de recherche et de développement sur tous les aspects.

Dans cette optique, des projets pilotes seront mis en place afin de développer la production d'hydrogène vert, son transport, son stockage, sa transformation et ses diverses applications, en bénéficiant de l'assistance financière et de l'expertise de partenaires étrangers renommés dans ce domaine. Dans une deuxième période, des projets de production d'hydrogène vert et/ou bleu d'envergure industrielle seront progressivement mis en place afin de permettre à l'Algérie de se positionner sur le marché international tout en réduisant la consommation

d'hydrogène gris dans des applications et des filières industrielles qui utilisent déjà de l'hydrogène gris. Il est donc prévu de doter une partie de celles-ci de systèmes de captage de CO₂ afin de faciliter l'utilisation de l'hydrogène propre dans de nouvelles applications. Les premiers secteurs à être touchés sont l'industrie pétrochimique et le transport. De plus, l'accent sera mis, à court et moyen terme, sur l'élaboration d'une intégration industrielle approfondie liée à la fabrication des équipements et des composants qui font partie de toute la chaîne de valeur de l'hydrogène vert et propre. L'objectif de cette initiative est de mettre en place une filière d'hydrogène vert et propre qui permettra à l'Algérie de devenir un acteur régional majeur d'ici 2050. Grâce à des usines de production à grande échelle, l'Algérie pourra répondre à la fois aux exigences du marché international et répondre à la demande interne en matière de décarbonation des secteurs d'activité [47].

Ainsi, en gros les objectives stratégiques auxquelles la feuille de route pour le développement de l'hydrogène sur le plan national vise se déploient comme suit :

- Diversifier l'approvisionnement énergétique, accélérer la transition énergétique et renforcer la sécurité énergétique du pays à moyen et long terme, tout en réduisant l'empreinte carbone des divers secteurs d'activités ;
- Réduire la consommation locale des énergies fossiles en particulier naturel et préserver les ressources énergétiques du pays ;
- La mise en place d'un écosystème favorable et adapté pour le développement de l'hydrogène renouvelable et propre, y compris l'intégration industrielle ;
- La maîtrise technologique et technique de l'ensemble de la chaîne de valeur de l'hydrogène notamment le développement du capital humain (recherche, développement et formation dans un souci de constitution de talents et de pôle d'excellence autour de tous les aspects liés à l'hydrogène) ;
- Création d'un Hub pour la production et l'exportation de l'hydrogène ;

La diversité et l'ambition des stratégies de développement de l'hydrogène reflètent l'importance grandissante de cet élément dans la transition énergétique mondiale. Les importants investissements dans la recherche et l'infrastructure, ainsi que les initiatives politiques robustes, témoigneront la volonté évidente de placer l'hydrogène au cœur des systèmes énergétiques à venir. Il existe encore de nombreux défis, mais il existe de nombreuses opportunités pour une économie plus écologique et plus résiliente.

3.6 Recommandations stratégiques :

En transformant ou en élargissant son infrastructure de distribution et de stockage de gaz existante, l'Algérie pourrait devenir un nouveau producteur d'hydrogène vert. Cela permettrait d'expédier de manière efficace l'hydrogène vert produit localement vers ses marchés cibles. Malgré la construction d'un réseau transcontinental de gazoducs, l'Algérie dispose d'un réseau de 37 pipelines d'une longueur totale de 19,623 km pour le transport du gaz et du pétrole.

De nos jours, l'hydrogène vert ne constitue qu'une partie restreinte de l'approvisionnement mondial. En vue d'une conversion future de l'hydrogène fossile en hydrogène propre dans un souci de préservation de l'environnement, et en tant que carburant et transporteur d'énergie au-delà de l'industrie énergétique, plusieurs recommandations stratégiques peuvent être mises en œuvre afin de garantir une transition énergétique durable et optimiser les bénéfices économiques, environnementaux et sociaux.

- Accélérer l'achèvement des projets d'énergie renouvelable en particulier de l'électricité solaire et éolienne ;
- Fourniture d'une quantité importante d'eau soit par l'agrandissement des projets de dessalement de l'eau ou en exploitant des eaux souterraines ;
- La facilitation de l'obtention d'argent liquide et de crédit par les investisseurs privés et l'ouverture des voies à des concepts de chaîne de financement externe soutenus par les cryptomonnaies en guise de solution au problème de financement ;
- Soutenir les sociétés de production de l'hydrogène vert grâce à des cadres juridiques et réglementaire renforcés ;

- Le développement d'une vision stratégique pour une économie nationale dans le domaine du développement durable et de l'économie verte ;
- Assurer un soutien solide à la recherche et le développement dans un but de réductions des coûts et l'accroissement de la compétitivité ;
- La mise en place des incitations fiscales pouvant réduire l'impact du coût élevé du capital sur la rentabilité du projet avec comme alternative de réduire l'impôt sur le revenu ou sur les ventes à travers la diminution des taxes sur l'investissement ;

3.7 Conclusion :

En contribuant à la réalisation des objectifs climatiques mondial, l'hydrogène jouera un rôle essentiel en contribuant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre dans les secteurs les plus essentiels. La transformation énergétique de l'Algérie pourra le conduire à devenir le premier fournisseur d'hydrogène renouvelable en Europe d'ici 2050. La production et la distribution d'hydrogène vert en Algérie présentent plusieurs atouts, tels que des énergies renouvelables, le gazoduc et l'infrastructure d'exportation de GNL, ainsi qu'une longue histoire en tant que fournisseur d'énergie fiable. Cependant, étant nouvelle participante de la course, elle va être confrontée à des difficultés importantes liées aux projets d'énergie renouvelable en particulier l'énergie solaire, l'approvisionnement en eau à grande échelle, la gestion de la technologie de transport de l'hydrogène via les pipelines de gaz naturel et la détermination des coûts.

Chapitre 4 : Simulation et analyse de cas avec le logiciel Homer

4.1 Logiciel HOMER PRO :

L'exploitation des systèmes hybrides en utilisant de ressources énergétiques diversifié comme l'énergie éolienne, solaire ou même des générateurs diesel peut constituer une réponse pour les zones éloignées d'un réseau interconnecté important. Toutefois, il est essentiel de prendre en compte les dimensions et l'architecture du système de génération d'énergie lors de la conception et de la mise en place de ce système.

Différentes recherches utilisent la variable de la plupart des énergies renouvelables pour élaborer un système de contrôle complexe. Un contrôle de la tension et de la fréquence pour un système solaire-éolien est nécessaire dans la même tâche. La modélisation joue également un rôle essentiel dans des études approfondies visant à simuler un bon fonctionnement du système. Il existe de nombreux logiciels qui nous offrent la possibilité de le faire. Le logiciel HOMER présente une modélisation d'un système hybride de production d'énergie.

En raison de son potentiel solaire élevé, l'Algérie présente une occasion exceptionnelle pour développer la production d'hydrogène vert grâce à l'énergie photovoltaïque. La création d'hydrogène vert, une alternative énergétique durable et respectueuse de l'environnement, revêt une importance capitale afin de satisfaire les besoins énergétiques à venir tout en diminuant les émissions de gaz à effet de serre. L'objectif de cette étude est d'analyser et de comparer diverses configurations de systèmes de production d'hydrogène vert dans deux régions différentes : Tlemcen, au nord-ouest de l'Algérie, et Laghouat, au centre-sud du pays. La région de Tlemcen bénéficie d'un climat méditerranéen avec un ensoleillement modéré, tandis que Laghouat, située dans une zone désertique, bénéficie d'un ensoleillement intense et constant tout au long de l'année. Ces différences climatiques et géographiques permettent de comparer l'efficacité et la rentabilité des systèmes photovoltaïques et des électrolyseurs dans des conditions variées. Pour mener à bien cette analyse, nous utilisons le logiciel HOMER Pro, un outil de simulation et d'optimisation reconnu pour les systèmes énergétiques hybrides. HOMER Pro permet de modéliser et de simuler différents scénarios de production d'énergie, en intégrant des données techniques et économiques pour optimiser la conception des systèmes énergétiques.

Ce chapitre présentera les caractéristiques géographiques et météorologiques des deux régions et décrira les caractéristiques techniques et économiques de chaque composant dans les différents scénarios. Et enfin ce conclura par une présentation des résultats de dimensionnement et une interprétation selon les scénarios.

4.2Présentation du logiciel :

HOMER (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) est un logiciel de modélisation et d'optimisation conçu pour analyser les options de conception des systèmes d'énergie hybride. Développé initialement par le Laboratoire national des énergies renouvelables (NREL) aux États-Unis, HOMER est maintenant commercialisé par HOMER Energy, une division de UL (Underwriters Laboratories) [59].

Le logiciel HOMER est un outil de modélisation et de simulation utilisé pour la conception et l'optimisation des systèmes énergétiques hybrides, combinant diverses sources d'énergie notamment le renouvelable. Il permet de modéliser les composants d'un système énergétique, incluant les sources de production (solaire, éolienne, biomasse, diesel, hydroélectrique), les dispositifs de stockage (batteries, réservoirs d'hydrogène) et les charges (résidentielles, commerciales, industrielles), sans oublier la capacité de simulation des systèmes de production de chauffage et de refroidissement. HOMER simule le fonctionnement du système sur une période spécifiée, prenant en compte les variations horaires de la demande et de la production d'énergie à partir des ressources renouvelables ou traditionnelle et les performances des composants du système. Le logiciel utilise les algorithmes d'optimisation pour identifier la configuration la plus économique, évaluant différentes combinaisons de composants et de stratégies de gestion afin de minimiser les coûts, réduire les émissions de carbone, ou maximiser l'efficacité.

Il aide à l'évaluation coûts totaux des projets énergétiques en prenant en compte les coûts d'investissement initiaux, les coûts d'exploitation et de maintenance, ainsi que les coûts de remplacement en tenant compte des coûts actualisés de l'énergie pour différents scénarios. Les utilisateurs peuvent réaliser des analyses de sensibilité pour comprendre l'impact des variations des paramètres clés sur les performances et les coûts du système, cela permet de prendre en

compte les incertitudes et d'évaluer les risques associés aux projets. Il génère des rapports détaillés et des graphiques qui illustrent les performances du système, les coûts, les émissions et d'autres indicateurs clés. Ces rapports peuvent être utilisés pour la prise de décision, la planification et la communication avec les parties prenantes. Enfin une analyse de contrainte peut être effectuée en utilisant un facteur capacité annuelle limité à une valeur maximale : si ce paramètre est défini à 0%, le système doit toujours répondre aux charges, tandis que s'il est défini à des valeurs de 1% à 5%, on obtient des économies significatives en puissance de crête et des différences entre les scénarios optimisés.

En gros, HOMER est un outil puissant pour la conception, l'analyse et l'optimisation des systèmes énergétiques hybrides. Il permet aux utilisateurs de prendre des décisions éclairées en fournissant des analyses détaillées et des comparaisons de scénarios. En combinant des sources d'énergie renouvelables et traditionnelles, il aide à créer des systèmes énergétiques plus efficaces, économiques et durables.

4.3 Fonctionnement du logiciel :

Le logiciel HOMER Pro est facile à utiliser et son interface propose une compréhension visuelle assez simple (Figure ...). L'interface nous présente en premier l'entrée du nom, de l'auteur et la description, puis à côté une carte qui nous permet de géolocaliser le site du projet à partir duquel nous pouvons obtenir les différentes données sur les ressources énergétiques disponibles comme le soleil et le vent. Ensuite nous avons la partie pour l'ajout des charges de consommation, le choix des composants de production, et l'affichage d'une liste des étapes nécessaires ou remarques pour commencer à construire un modèle. Enfin nous avons la partie concernant le design, la génération des résultats de la simulation et une librairie qui donne les différents renseignements à propos des matériaux choisis par l'utilisateur.

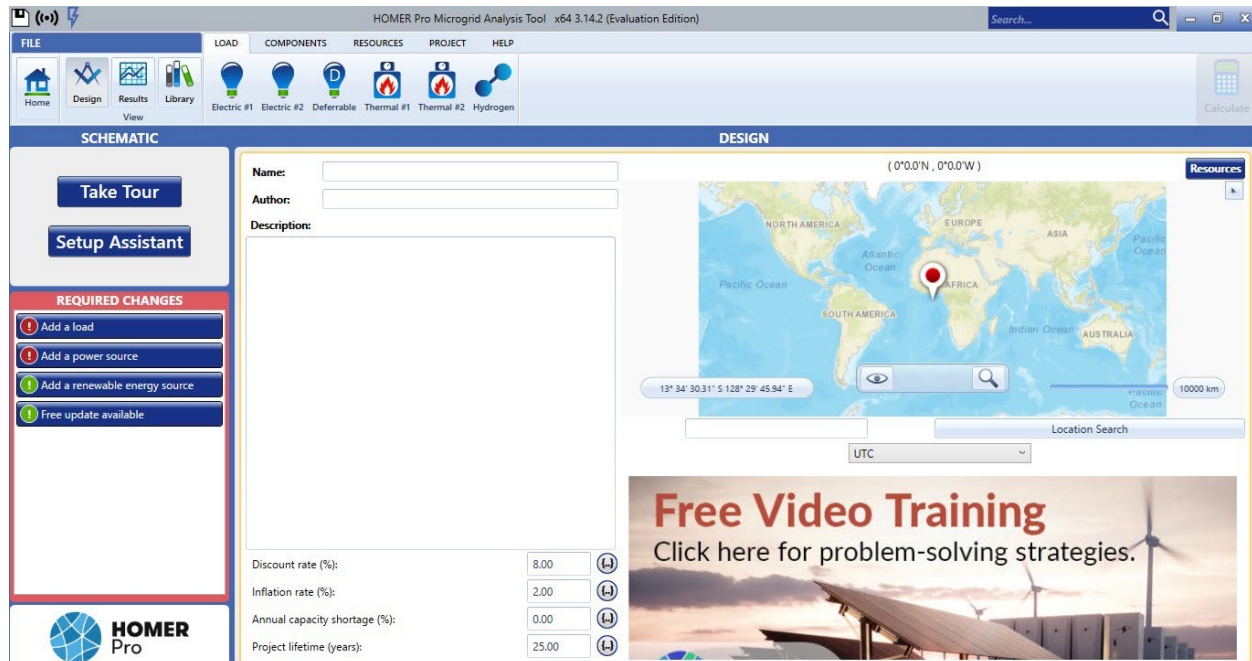


Figure 4. 1: Interface du logiciel HOMER Pro

Après la compréhension de l'interface du logiciel, l'utilisateur commencera son projet avec l'entrée des informations de base comme la saisie du nom de projet, de l'auteur et une description de la configuration de son projet. Ensuite sélectionnera l'emplacement géographique du projet en utilisant la carte interactive pour pouvoir accéder aux données météorologiques locales nécessaires pour simuler les ressources énergétiques comme le solaire et l'éolien. S'en suivra par l'ajout des charges incluant le résidentielles, le commerciale, l'industrielle ou le communautaire avec leurs variations horaires et saisonnières.

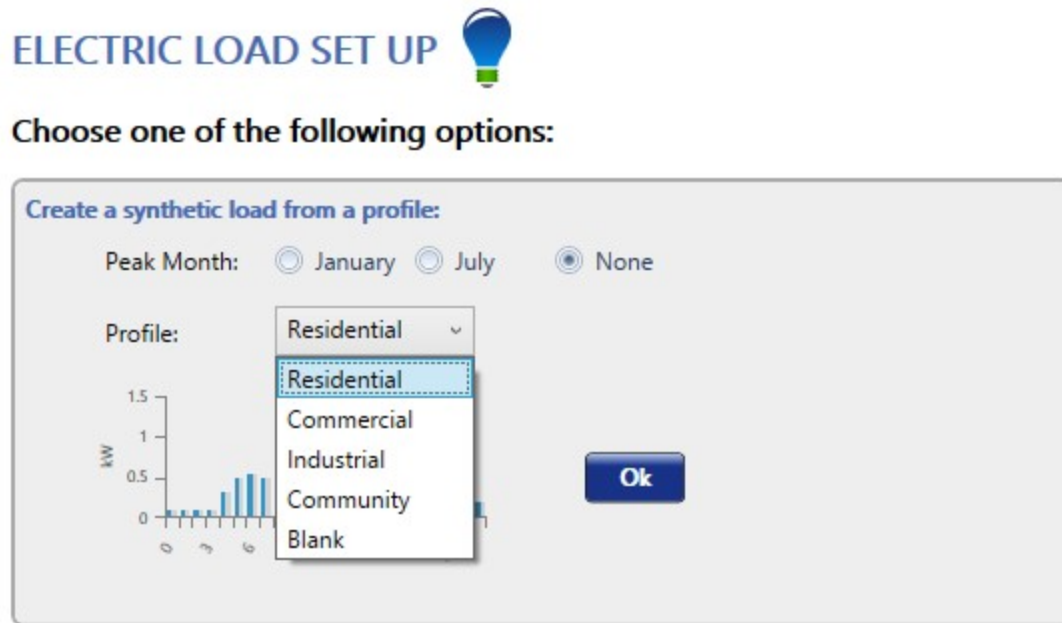


Figure 4. 2: L'ajout des charges de consommation

L'ajout des sources d'énergie que l'utilisateur envisage d'utiliser telles que les panneaux solaires, les éoliennes, les générateurs diesel. Également les dispositifs de stockage d'énergie comme des batteries ou des réservoirs d'hydrogène pour gérer la variabilité des sources d'énergie. En parallèle de l'ajout des composants nous avons la définition des paramètres financiers et techniques comme la saisie des coûts d'investissements, d'exploitation et de maintenance pour chaque composant du système. L'entrée des paramètres financiers définissant le taux d'actualisation, d'inflation et la durée de vie du projet, la configuration des contraintes du système en définissant les contraintes de capacité, les niveaux de fiabilité et les objectifs de réduction des émissions.

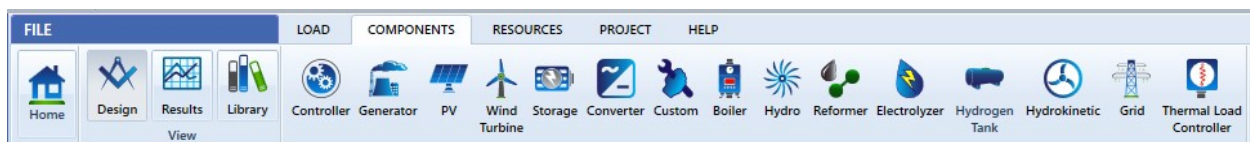


Figure 4. 3: Source d'énergie pouvant être utilisée

HYDROGEN TANK

Name: Hydrogen Tank Abbreviation: HTank Remove Copy To Library

Properties

Name: **Hydrogen Tank**
 Abbreviation: **HTank**
 Manufacturer: **Generic**
www.homerenergy.com
 Notes:
 This is a generic hydrogen tank.

Costs

Size (kg)	Capital (\$)	Replacement (\$)	O&M (\$/year)
1	\$0.0	\$0.0	\$0.0

Click here to add new item

Multiplier: (-) (-) (-)

Capacity Optimization

Size (kg)
100
0

Figure 4. 4: Définition des paramètres financiers

Une fois l'ajout et la définition des paramètres, l'utilisateur pourra lancer la simulation en cliquant sur calculate pour que HOMER puis simuler le comportement du système pour chaque heure de l'année en tenant compte des variations des ressources et des profils de charge. Examiner les résultats sous forme de tableaux, de graphique et de rapports détaillés. Les résultats incluent les performances énergétiques, les coûts totaux, les émissions de carbone et d'autres indicateurs clés. Le logiciel peut effectuer les analyses de sensibilité pour voir comment les variations des paramètres (comme les coûts de technologies ou les prix des combustibles) affectant les performances du système.

L'optimisation avancée permet de tester les différentes configurations de systèmes pour trouver la solution la plus optimale en termes de coûts, de fiabilité et de durabilité. En d'autre part compare plusieurs scénarios pour évaluer les différentes options de conception et leurs impacts économiques et environnementaux. Enfin le logiciel génère des rapports détaillés qui résument les résultats de la simulation et de l'optimisation.

4.4Données géographiques :

4.4.1 Région de Tlemcen :

La wilaya de Tlemcen situé sur le littoral Nord-Ouest du pays, dispose d'une façade maritime de 120 km. Distant de 40 km de la mer Méditerranée avec une superficie de 9.017,69 km² pour une population de 949.135 habitants, le chef-lieu de la wilaya se trouve à 520 km à l'Ouest de la capitale Alger, 140 km au Sud-Ouest d'Oran et proche de la frontière Marocaine en se situant à 76 km à l'Est de la ville d'Oujda. Tlemcen est limité au Nord par la méditerranée, à l'Ouest par

le Maroc, au Sud par la wilaya de Naâma et à l'Est par les wilayas de Sidi-Bel-Abbès et Ain Témouchent [60].

Tableau 4. 1: Coordonnées géographiques de Tlemcen

Latitude	Longitude	Altitude
34.53° N	1.19° W	800 m

4.4.2 Région de Laghouat :

La wilaya de Laghouat située au centre du pays à 400 km au Sud de la capitale, s'étend sur 25.000 km² pour une population de 477.328 habitants. Région pastorale de l'Algérie, elle possède également le plus grand gisement de gaz naturel d'Afrique avec une réserve estimée à plusieurs milliards de mètres cubes. Située à plus de 750 m d'altitude sur les hauts plateaux, Laghouat est traversée par la chaîne de l'Atlas Saharien avec des sommets qui dépassent les 2.000 m. elle est limitée au Nord par la wilaya de Tiaret, à l'Ouest par El-Bayadh, au Sud par la wilaya de Ghardaïa et à l'Est par la wilaya de Djelfa [61].

Tableau 4. 2: Coordonnées géographiques de la wilaya de Laghouat

Latitude	Longitude	Altitude
33.485° N	2.518° E	750 m

4.5 Données météorologiques :

4.5.1 Variation mensuelle de l'irradiation :

A l'aide du logiciel HOMER et des valeurs du facteur d'éclairement et des caractéristiques des sites mesurés selon le Tableau 4.1 et 4.2, l'irradiation journalière moyenne pour chaque mois de l'année est déterminée.



Figure 4. 5: Evolution mensuelle de l'ensoleillement à Tlemcen

Tableau 4. 3: Donnée du rayonnement solaire de la wilaya de Tlemcen

Mois	Facteur d'éclairement	Irradiation (kWh/m²/j)
Janvier	0.552	2.820
Février	0.577	3.730
Mars	0.563	4.670
Avril	0.586	5.870
Mai	0.597	6.640
Juin	0.627	7.230
Juillet	0.648	7.300
Aout	0.613	6.320
Septembre	0.587	5.130
Octobre	0.569	3.920
Novembre	0.542	2.900
Décembre	0.533	2.500



Figure 4. 6: Evolution mensuelle de l'ensoleillement à Laghouat

Tableau 4. 4: Donnée du rayonnement solaire de Laghouat

Mois	Facteur d'éclairement	Irradiation (kWh/m²/j)
Janvier	0.549	2.900
Février	0.589	3.900
Mars	0.588	4.950
Avril	0.600	6.040
Mai	0.596	6.630
Juin	0.603	6.940
Juillet	0.623	7.020
Aout	0.591	6.120
Septembre	0.597	5.280
Octobre	0.568	4.000
Novembre	0.548	3.030
Décembre	0.538	2.620

4.5.2 Variation de la température moyenne :



Figure 4. 7: Evolution mensuelle de la température à Tlemcen

Les températures dans la wilaya de Tlemcen varient en tout mois de l'année avec maximum en été 26.27°C en Juillet, 26.39°C en Aout et comme minimale en hiver 8.63°C en Décembre, 7.49°C en Janvier et 8.71°C en Février.

Tableau 4. 5: Température mensuelle de la wilaya de Tlemcen

Mois	Température (°C)
Janvier	7.490
Février	8.710
Mars	11.330
Avril	13.620
Mai	17.450
Juin	22.320
Juillet	26.270
Aout	26.390
Septembre	21.850
Octobre	17.220
Novembre	11.770
Décembre	8.630

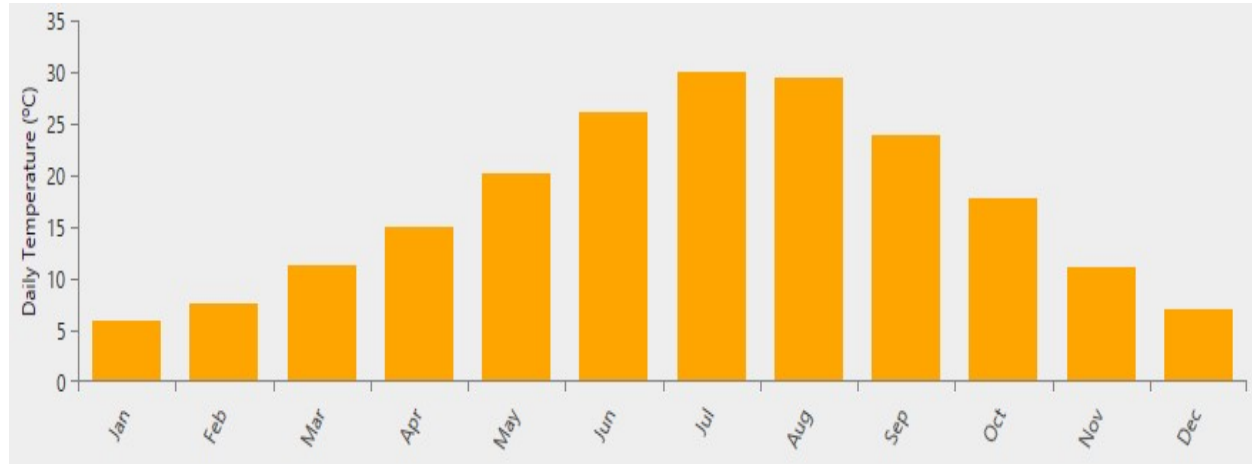


Figure 4. 8: Evolution de la température à Laghouat

Les variations de la température dans la wilaya de Laghouat se présente avec un maximum en été de 26.12°C en Juin, 30°C en Juillet et 29.37 en Aout. Le minimale en hiver se présente à 7.01°C en Décembre, 5.88°C en Janvier et 7.65 en Février.

Tableau 4. 6: Donnée mensuelle de la température à Laghouat

Mois	Température (°C)
Janvier	5.880
Février	7.650
Mars	11.270
Avril	15.070
Mai	20.230
Juin	26.120
Juillet	30.000
Aout	29.370
Septembre	23.950
Octobre	17.850
Novembre	11.110
Décembre	7.010

4.6 Configuration des composants et paramètres financiers du Projet :

Dans les différents scénarios nous avons configurer les composants de notre projet en ajoutant en premier lieu une charge de 200 kWh/jour soit une puissance crête de 14.50 kW, suivi d'une production en panneau photovoltaïque de 140 kW avec une durée de vie de 20 ans et comme paramètres financiers nous avons 3.000 \$ pour le coût d'achat, 10\$/ans comme frais d'entretien

et 3.000\$ prévue pour le frais remplacement du panneau. Ensuite nous avons l'ajout d'une pile à combustible de 20 kW comme seconde source de production d'énergie dont le coût financier et de remplacement s'élève tous deux à 3.000\$ et 0.10\$/h pour le frais d'entretien, la pile a une durée de vie de 40.000h. Nous avons les électrolyseurs de 80 kW qui nous permet de convertir directement le surplus d'énergie en hydrogène stocké dans une réservoir de 180 kg pour pouvoir gérer l'intermittence ou en cas de non-production ou de maintenance des panneaux photovoltaïque.

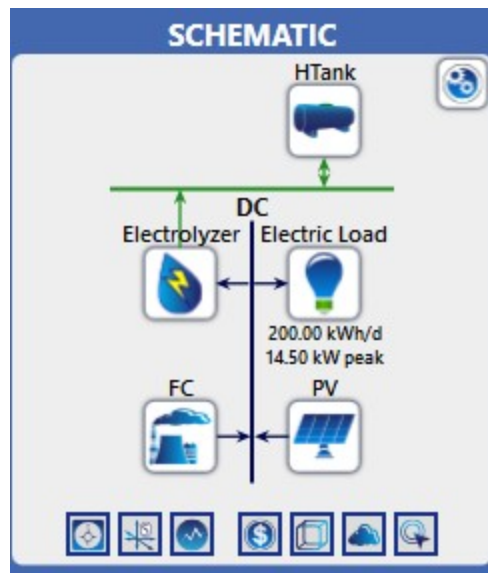


Figure 4. 9: Configuration du système

Le logiciel nous a permis de simuler divers scénarios en modifiant les paramètres techniques et économiques des composants du système, tels que les panneaux photovoltaïques, les électrolyseurs, les réservoirs d'hydrogène, et les piles à combustible. Il évalue le coût total de possession (LCOE) des différentes configurations pour déterminer la solution la plus économique et viable. Il est à noter que le logiciel dispose d'une bibliothèque étendue de composants énergétiques avec leurs caractéristiques techniques et coûts associés, facilitant ainsi la modélisation précise des systèmes.

4.6.1 Descriptions et interprétations des scénarios :

Dans les scénarios 1 et 2 nous avons un système de production d'électricité utilisant une pile à combustible combinée à un système photovoltaïque respectivement dans la région de Laghouat

et de Tlemcen. Le changement des coordonnées géographiques c'est-à-dire de Laghouat à Tlemcen impact considérablement sur l'utilisation des composants du système de même que sur le rendement de production de l'hydrogène.

Au niveau du premier scénario le logiciel à optimiser la capacité des panneaux photovoltaïque à 120 kW, 60 kW pour les électrolyseurs, 20 kW pour la pile à combustible et un réservoir de 20 kg pour le stockage de l'hydrogène. Cet ajustement aura un impact considérable sur le coût de réalisation du projet car il permettra d'effectuer une économie en ayant une production d'énergie suffisant pour la consommation.

Comme l'illustre la figure nous observons une production d'énergie par les panneaux photovoltaïque durant toute l'année de 8h à 17h tenant compte des irradiances solaires liées aux données météorologiques, des pics de production s'approchant à la barre des 140 kW.

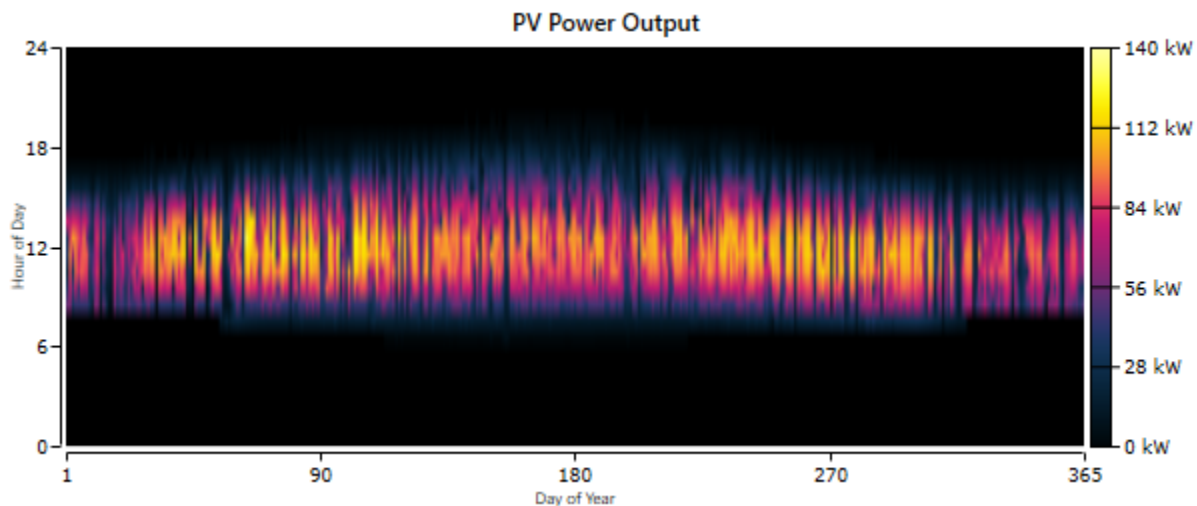


Figure 4. 10: Production des PV dans le scénario 1

Les piles à combustibles ont une durée d'opération de 5,381 heures par an c'est-à-dire au moment d'intermittence ou de disfonctionnement des PV pour une production d'électricité de 32.600 kWh/an avec une consommation en hydrogène de 1,956 kg produit par les électrolyseurs. La technologie de notre pile à combustible consomme spécifiquement 0.0600 kg pour la production d'un kWh d'électricité et à un rendement de 50%.



Figure 4. 11: Utilisation de la pile (Scénario 1)

Les électrolyseurs qui consomment l'excédant de l'énergie pour produit par les panneaux photovoltaïque pour l'alimentation des charges à une capacité moyenne de 60 kW et une durée de fonctionnement de 2,439 heures/ans du faite de l'exploitation des surproductions engendrés durant la journée en ayant une capacité de consommation élevé pendant les pics d'ensoleillement au tour de 12h à 1h quand le soleil est au zénith. Ils ont une consommation spécifique de 46.4 kWh/kg d'hydrogène produit stocker dans le réservoir, en gros ils ont une capacité totale de production en hydrogène de 1,958 kg/ans.

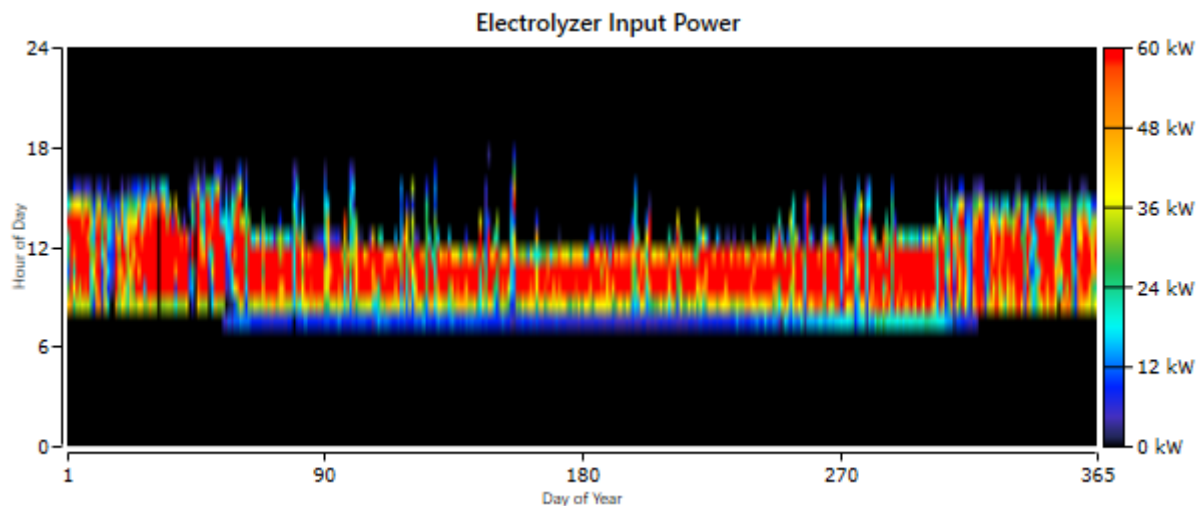


Figure 4. 12: Consommation des électrolyseurs (Scénario 1)

Les réservoirs de stockage avec une capacité de 20 kg soit 667 kWh en énergie stocker ont une autonomie de 80 heures. Sur le graphe nous observons la diminution de la quantité d'hydrogène stocker durant les mois d'hiver par faute d'un ensoleillement pas assez conséquent d'où des disfonctionnements dans la production par PV, ainsi la consommation des charges se reposent sur l'utilisation de l'hydrogène stocker dans le réservoir convertis au niveau du pile afin d'assurer l'alimentation des charges.

A travers le graphe de stockage du réservoir, nous constatons l'importance majeur du stockage de l'énergie sous forme hydrogène durant les moments de fortes rayonnement solaire pendant la journée et selon les mois pour pouvoir palier au phénomène de l'intermittence ou d'irrégularité de rayonnement en fonction des saisons, ainsi amoindrir les coûts de consommation car nous présentons des coûts de production assez faible par rapport au cas où nous utilisons des batteries pour le stockage.

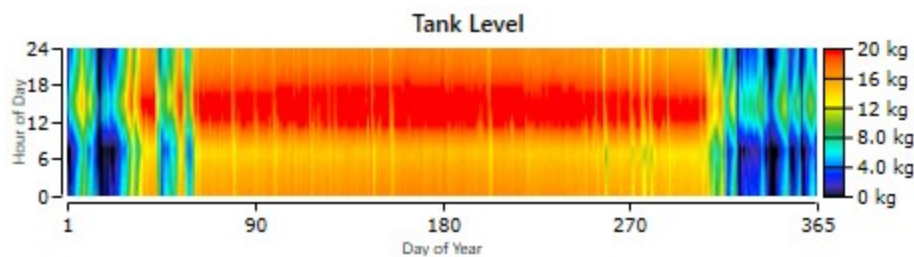


Figure 4. 13: Niveau de stockage dans le réservoir (Scénario 1)

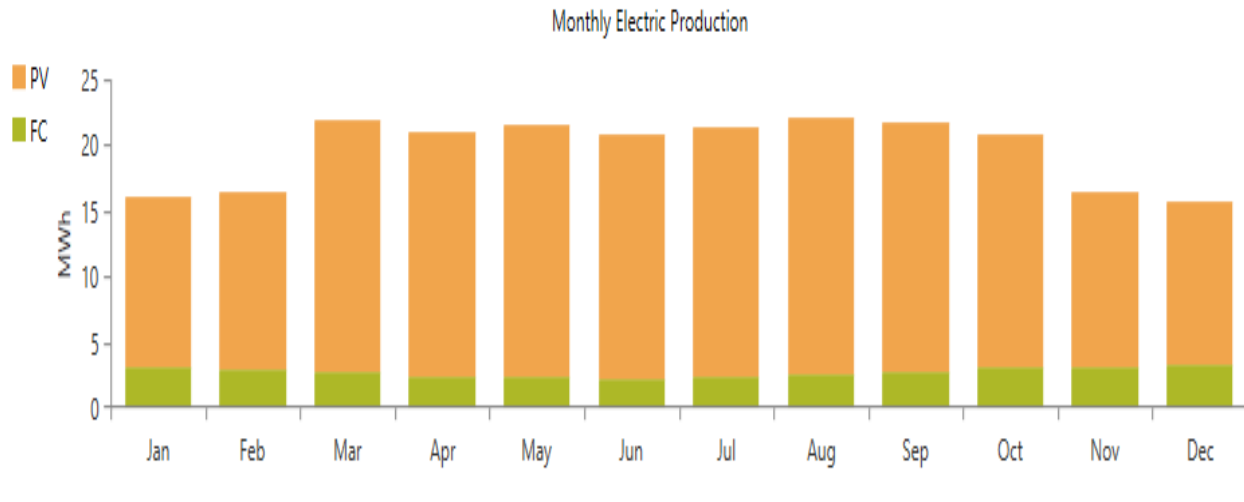


Figure 4. 14: Production d'énergie mensuelle (Scénario 1)

Tableau 4. 7: Bilan énergétique du scénario 1

Composant	Production		Excès
	PV	PC	
Energie [kWh/an]	202,954	32,600	72,365
[%]	86.2	13.8	30.7

Dans ce tableau, on note que 86% de l'énergie annuelle produite dans le scénario 1 est de sources photovoltaïques alors que seulement 13.8% de l'énergie est produit par les piles à combustibles. Ceux qui nous montrent le potentiel de la wilaya de Laghouat pour la production d'énergie via des sources renouvelables durant toute l'année.

Dans le deuxième scénario avec l'entrée de nos différents composants avec les mêmes charges de consommation et de production comme dans la scène 1 mais avec seulement des coordonnées géographiques et météorologiques différents en se déplaçant de Laghouat à Tlemcen, le logiciel optimise notre système en procédant à une diminution de coût basé sur l'optimisation de la puissance de production et de consommation de nos composants.

Dans la scène 2 nous observons des graphes à peu près identiques que ça soit au niveau des panneaux photovoltaïque, de la pile à combustible, de l'électrolyseur et même du réservoir d'hydrogène. Les différences marquantes se situent au niveau du capital d'investissement d'une part et des différentes données de production et de consommation des composants, données qui sont intimement liés aux coordonnées géographiques de la wilaya.

Dans le fonctionnement des panneaux photovoltaïque nous avons une production annuelle d'énergie de 198,154 kWh avec une capacité nominale de 120 kWh. Avec les piles à combustibles la wilaya de Tlemcen offre une durée d'opération de 5,502 heures/ans pour une production d'électricité de 32,813 kWh/ans avec une consommation en hydrogène de 1,969 kg produit par les électrolyseurs. Comme dans le premier scénario, les piles à combustibles ont une consommation spécifique de 0.0600 kg pour pouvoir produire 1 kWh d'électricité.

Les électrolyseurs avec une capacité de 60 kW produisant de l'hydrogène à partir de l'énergie générée par les panneaux photovoltaïques ont une durée de fonctionnement de 2,489 heures/ans avec une consommation spécifique de 46.4 kWh d'hydrogène produit, il y a une production annuelle de 1,970 kg.

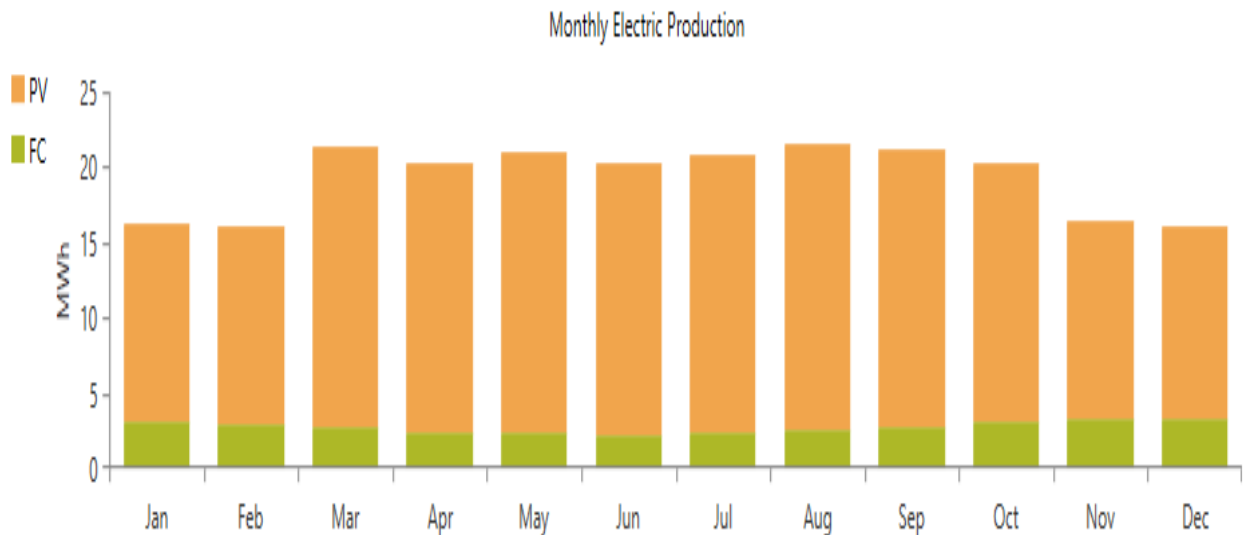


Figure 4. 15: Production d'énergie mensuelle (Scénario2)

Tableau 4. 8: Bilan énergétique du scénario 2

Composant	Production		Excès
	PV	PC	
Energie [kWh/an]	198,668	32,826	67,861
[%]	85.8	14.2	29.3

Dans ce tableau, on note que 85% de l'énergie annuelle produite dans le scénario 2 est de sources photovoltaïques alors que seulement 14.2% de l'énergie est produit par les piles à combustibles. Ceux qui nous montrent le potentiel de la wilaya de Laghouat pour la production d'énergie via des sources renouvelables durant toute l'année.

Dans le scénario 3 et 4 s'effectuant respectivement dans la wilaya de Tlemcen et de Laghouat, nous avons simulé la production d'hydrogène utilisant une éolienne combinée à un système photovoltaïque incluant une pile à combustible d'appoint. Avec l'ajout de ces nouveaux composants nous augmentons ainsi la capacité de production de l'énergie dans le secteur pour l'approvisionnement du marché internationale en hydrogène.

Dans ce scénario nous avons comme ajout de composant une éolienne d'une capacité de 1500 kW et une charge de consommation en hydrogène destinée pour l'acheminement vers le marché. D'après la figure illustrée par le logiciel nous avons une production d'énergie par éolienne assez dense durant toute l'année et près que à toute heure de la journée en fonction des coordonnées météorologiques du vent engendré par le logiciel.



Figure 4. 16: Variation mensuelle du vent à Tlemcen

Tableau 4. 9: Donnée mensuelle de l'évolution du vent

Mois	Vitesse moyenne du (m/s)
Janvier	6.030
Février	5.930
Mars	5.630
Avril	5.580
Mai	4.860
Juin	4.420
Juillet	4.200
Aout	4.190
Septembre	4.410
Octobre	4.900
Novembre	5.920
Décembre	6.090

L'éolienne à une capacité nominale de 1,500 kW et une production d'énergie annuelle de 3,970,045 kWh. La production d'énergie n'est pas uniforme comme dans le cas des PV, c'est-à-dire indépendant du lever ou du coucher de soleil car en tout temps une fluctuation des vents est probable selon les données générées par le logiciel dans le tableau 4.8.

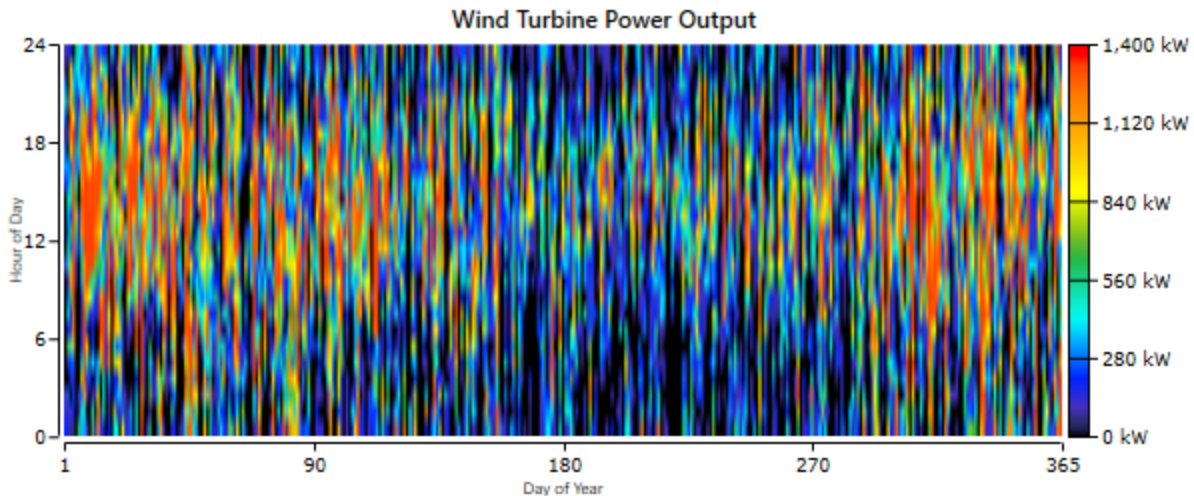


Figure 4. 17: Production de l'éolienne (Scène 3)

Nous avons une production en énergie assez faible du faible au niveau du pile à combustible du fait de l'immense production en éolienne, ceux qui se traduit par une durée d'opération annuelle de 2,090 heures avec une production d'électricité de 14,783 kWh/ans et une consommation en hydrogène de 887 kg.

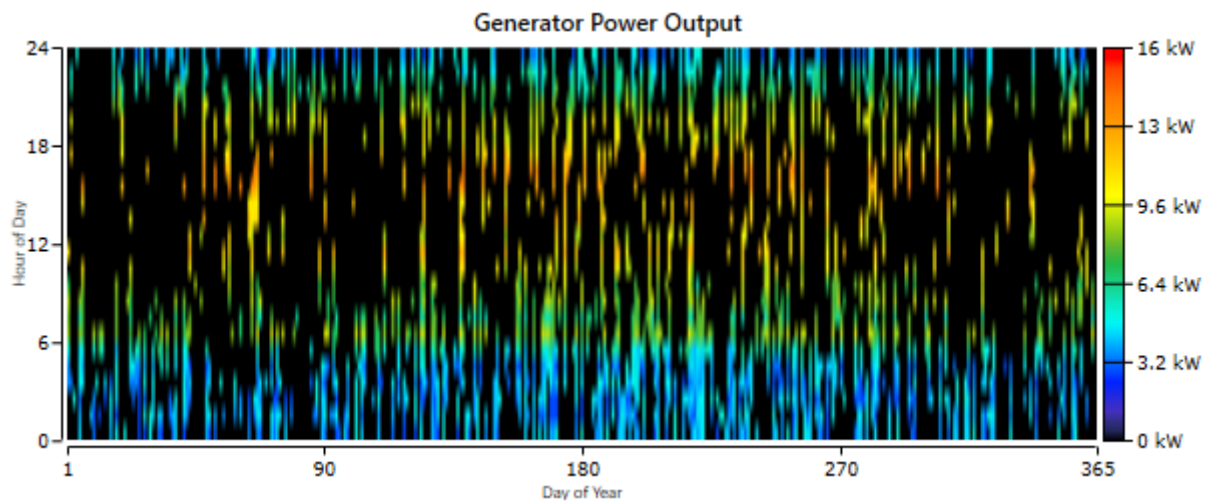


Figure 4. 18: Production de la pile à combustible

L'électrolyseur d'une capacité nominale de 60 kW à une consommation total en énergie de 233,386 kWh/ans et une production annuelle en hydrogène de 5,029 kg. Sur le schéma nous constatons une instabilité de charge dans l'électrolyseur due à l'approvisionnement non uniforme de l'éolienne.

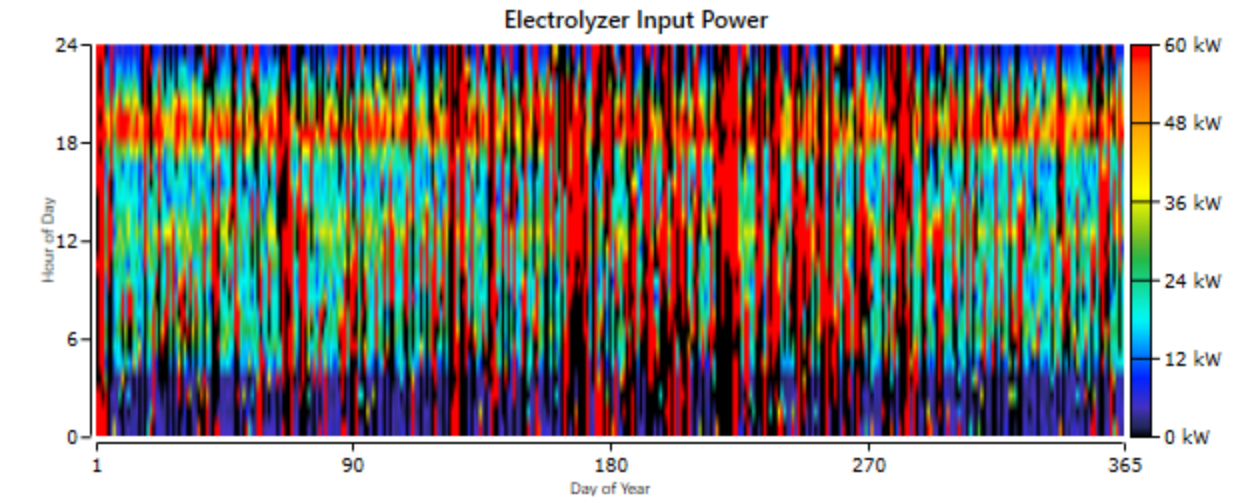


Figure 4. 19: Consommation de l'électrolyseur

Avec la production de l'hydrogène via l'électrolyseur nous avons une consommation de 4,106 kg/ans pour la charge de l'hydrogène destiner à approvisionner le marché.

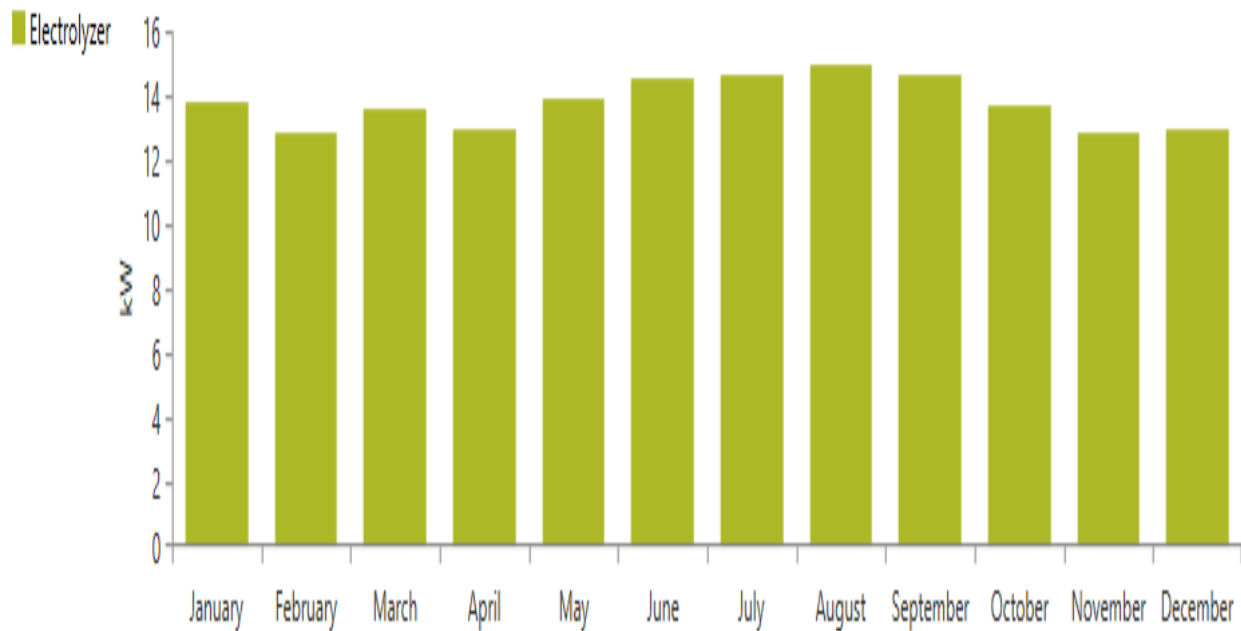


Figure 4. 20: Consommation mensuelle de l'électrolyseur

Quant à la capacité de stockage du réservoir nous avons une augmentation de 20 à 40 kg avec une capacité de stockage en énergie de 1,333 kWh et une autonomie de 160 heures.

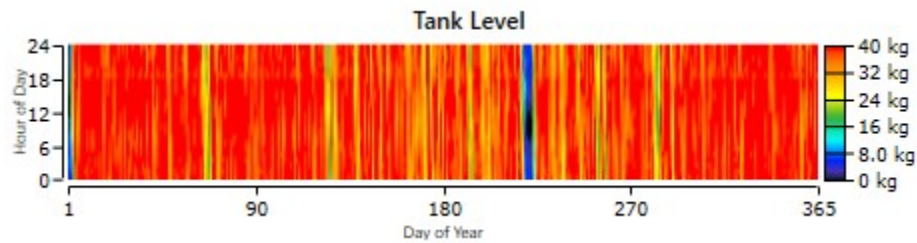


Figure 4. 21: Niveau du réservoir

Sur le schéma nous observons un stockage près qu'uniforme durant toute l'année à cause de l'immense énergie générer par notre système, ce qui est un avantage considérable pour l'approvisionnement du marché internationale.

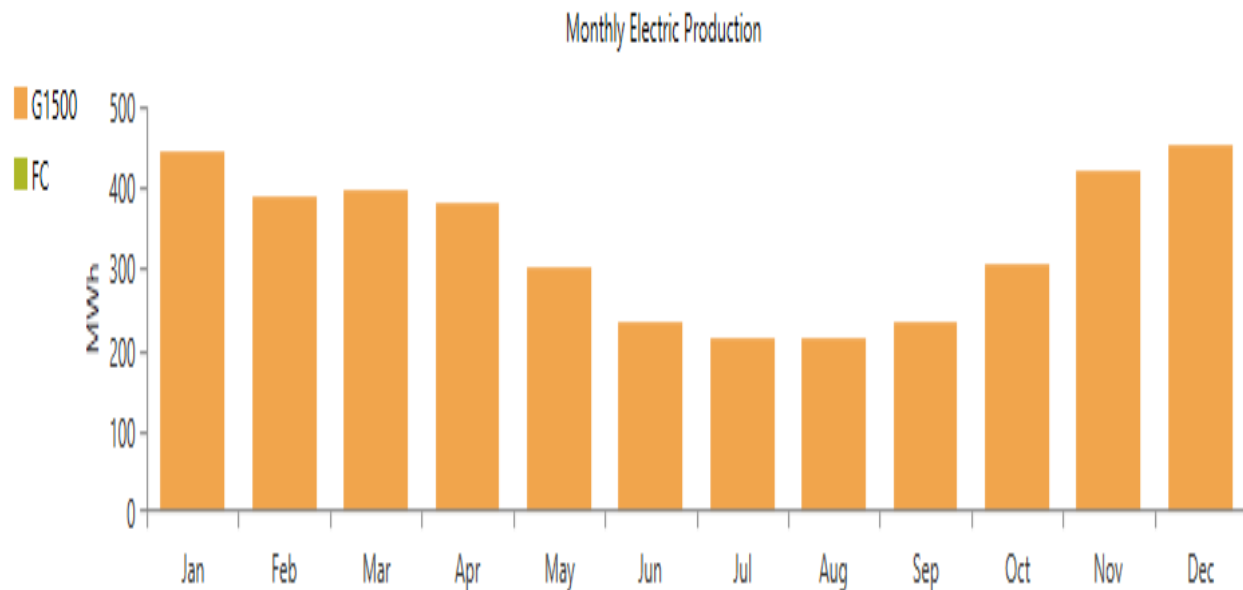


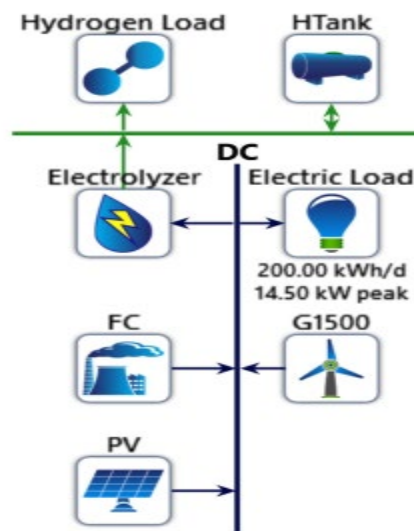
Figure 4. 22: Production de l'énergie par mois

Tableau 4. 10: Bilan énergétique du scénario 3

Composant	Production		Excès
	Eolienne	PC	
Energie [kWh/an]	3,970,045	14,783	3,678,530
[%]	99.6	0.371	92.3

Dans ce tableau, nous notons que près que la quasi-totalité de l'énergie durant l'année dans le scénario 3 est produit par l'éolienne. Ceux-ci témoignent de la capacité de la wilaya de Tlemcen dans la production de l'hydrogène qui pourra être acheminer vers le marché international d'une part et l'alimentation en énergie de la ville via les sources renouvelables.

Au niveau du scénario 4, nous avons l'installation des mêmes composants avec les mêmes charges de consommations communautaires et d'hydrogène qui pourrait être destiner pour l'approvisionnement du marché international à partir des différentes infrastructures gazières mis au point.

**Figure 4. 23:** Configuration du scénario 3 et 4

Dans ce scénario nous avons une production d'énergie plus dense par rapport à l'ancienne du fait de la variation des coordonnées météorologiques du vent émis par le logiciel.

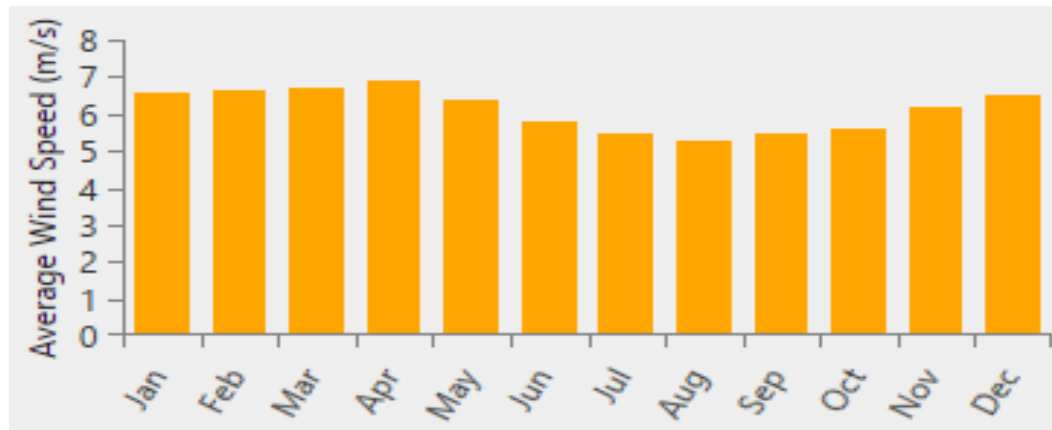


Figure 4. 24: Variation mensuelle du vent à Laghouat

Tableau 4. 11: Donnée mensuelle de l'évolution du vent

Mois	Vitesse moyenne du (m/s)
Janvier	6.550
Février	6.630
Mars	6.680
Avril	6.890
Mai	6.360
Juin	5.820
Juillet	5.470
Aout	5.270
Septembre	5.450
Octobre	5.620
Novembre	6.210
Décembre	6.490

L'éolienne d'une capacité nominale de 1.5 MW à une production annuelle d'énergie de 5,269,126 kWh, avec une pénétration de vent de l'ordre de 7,218 % et une durée d'opération annuelle estimée à 7,147 heures avec un rendement de 40.1%.

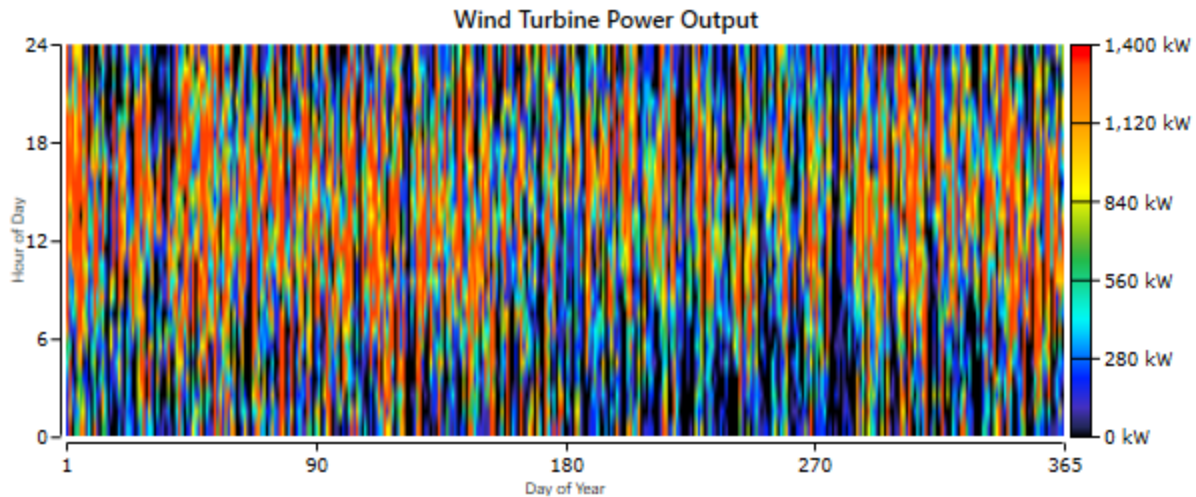


Figure 4. 25: Production de l'éolienne (scène 4)

La pile à combustible à une production d'énergie annuelle de 11,311 kWh avec un rendement électrique de 50% et une consommation en hydrogène de 679 kg, ce qui se traduit par une durée d'opération annuelle de 1,613 heures plus faible comparé à celle du scénario 3, causé par l'immense production de l'éolienne s'étendant sur la quasi-totalité de l'année.

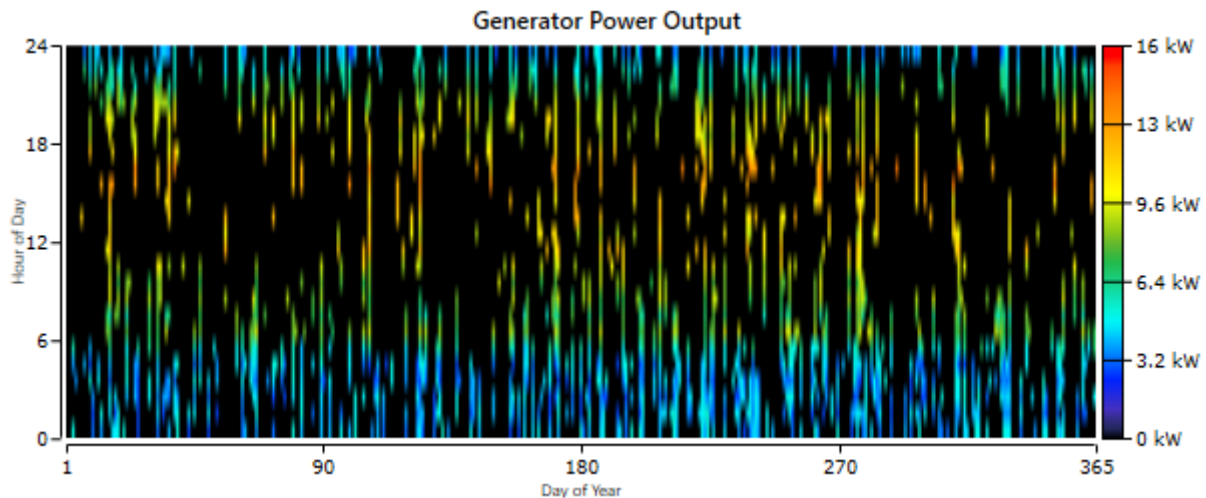


Figure 4. 26: Production de la pile à combustible

Avec une capacité de 40 kW optimisée par le logiciel, notre électrolyseur a une consommation annuelle en énergie de 223,749 kWh soit une consommation spécifique de 46.4 kWh/kg, et une production totale en hydrogène de 4,822 kg. Elle a une durée de fonctionnement annuelle de 7,147 heures et une capacité de 63.9 %.

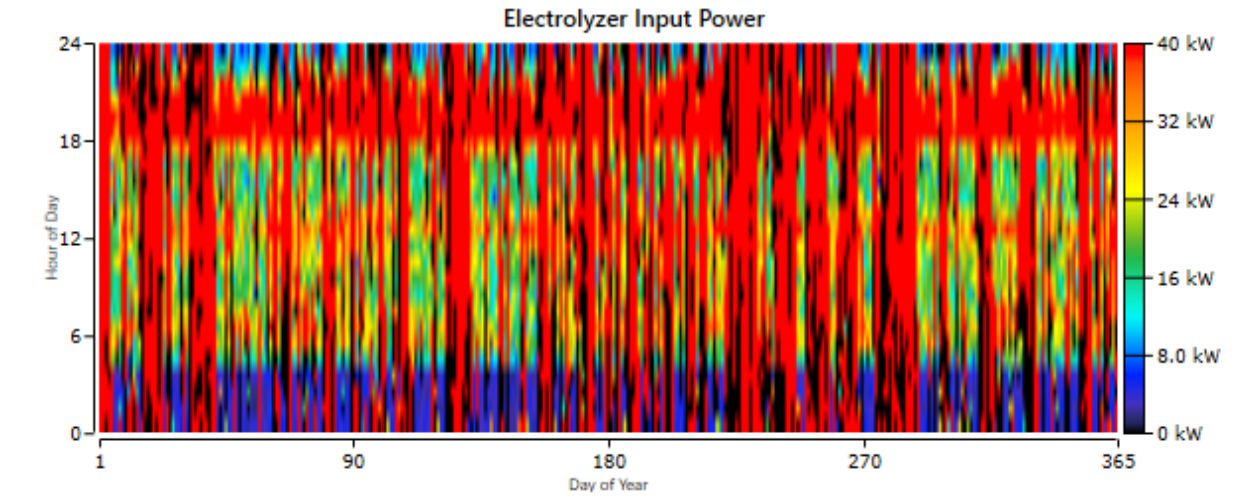


Figure 4. 27: Consommation de l'électrolyseur

Comme pour le scénario 3, le réservoir de stockage a les mêmes capacités et autonomies de fonctionnement.

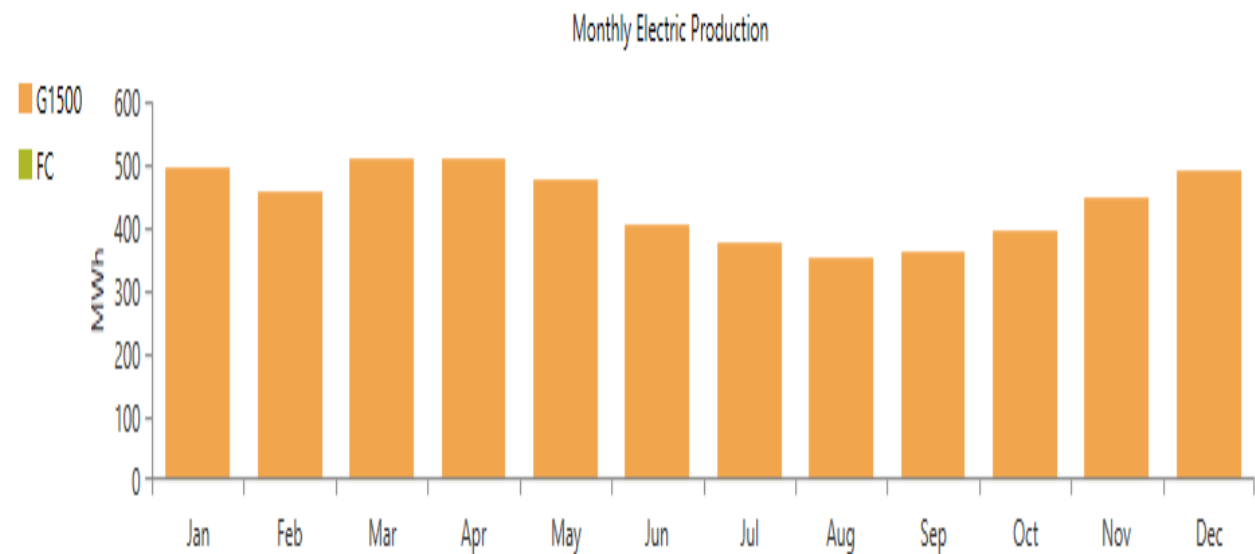


Figure 4. 28: Production d'énergie mensuelle

Tableau 4. 12: Bilan énergétique de la scène 4

Composant	Production		Excès
	Eolienne	PC	
Energie [kWh/an]	5,269,126	11,311	4,983,689
[%]	99.8	0.214	94.4

Dans cette scène plus de 99% de la production de l'énergie est fournie par l'éolienne identique au scénario 3, contre une

Dans ce tableau, nous notons que près que la quasi-totalité de l'énergie durant l'année dans le scénario 3 est produit par l'éolienne. Ceux-ci témoignent de la capacité de la wilaya de Tlemcen dans la production de l'hydrogène qui pourra être acheminer vers le marché international d'une part et l'alimentation en énergie de la ville via les sources renouvelables.

4.6.2 Résultat de simulation :

Dans le scénario 1 et 2 toute l'énergie électrique produite par le système photovoltaïque a été utilisée par l'électrolyseur dont la production de l'hydrogène a servi d'une part à stocker de l'énergie pour pouvoir subvenir au besoin énergétique durant les périodes d'intermittence par l'alimentation de la pile à combustible. Ce résultat est valable pour les deux sites mais la différence majeure se situe au niveau de leur coût d'exploitation et leur capacité de production optimiser par le logiciel HOMER, optimisation basée sur les coordonnées géographiques et météorologiques des sites.

Comme illustration le bilan économique du scénario 1 se présente dans la figure ci-dessous.

Architecture								Cost	
				PV (kW)	FC (kW)	Electrolyzer (kW)	HTank (kg)	NPC (\$)	Initial capital (\$)
				120	20.0	60.0	20.0	\$963,901	\$570,000
				120	20.0	60.0	20.0	\$963,901	\$570,000

Figure 4. 29: Bilan économique du scénario 1

Au niveau du scénario 2 nous constatons un coût d'exploitation supérieur par rapport au scénario 1.

Architecture								Cost	
				PV (kW)	FC (kW)	Electrolyzer (kW)	HTank (kg)	NPC (\$)	Initial capital (\$)
				120	20.0	60.0	20.0	\$972,086	\$571,172
				120	20.0	60.0	20.0	\$972,086	\$571,172

Figure 4. 30: Bilan économique du scénario 2

Ce qui témoigne d'un coût initial de production du projet plus faible au niveau de Laghouat avec un rendement énergétique supérieur causé par son rayonnement assez dense et ses

différentes données climatiques par rapport à la wilaya de Tlemcen dans la production d'électricité utilisant une pile à combustible combinée à un système photovoltaïque.

Par ailleurs dans le scénario 3 et 4, l'introduction d'un système éolienne a permis de produire suffisamment d'hydrogène qui pourra être destinée pour un mini approvisionnement du faite de la proximité du wilaya au marché international d'une part et l'utilisation des infrastructures gazières existants en passant par une mise à niveau technique du système, en parallèle il alimentera un besoin communautaire chiffre à 200 kWh/jour, besoin représentant 23.8 à 24.6% de la consommation totale en énergie. Son bilan économique se présente ci-après.

Architecture										Cost	
					PV (kW) 	G1500 	FC (kW) 	Electrolyzer (kW) 	HTank (kg) 	NPC (\$)  	Initial capital (\$) 
						1	20.0	60.0	40.0	\$4.37M	\$3.24M
						1	20.0	60.0	40.0	\$4.37M	\$3.24M

Figure 4. 31: Bilan économique du scénario 3

Architecture										Cost	
					PV (kW) 	G1500 	FC (kW) 	Electrolyzer (kW) 	HTank (kg) 	NPC (\$)  	Initial capital (\$) 
						1	20.0	40.0	40.0	\$4.29M	\$3.20M
						1	20.0	40.0	40.0	\$4.29M	\$3.20M

Figure 4. 32: Bilan économique du scénario 4

Nous remarquons les mêmes variations du coût d'exploitation différent ainsi les deux sites de production ayant les mêmes configurations d'installations mais des coordonnées géographiques et météorologiques différentes. Ces résultats favorisent ainsi la production dans la wilaya de Laghouat car elle présente une capacité de production avec des rendements énergétiques supérieurs et des coûts d'exploitation modérés.

4.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a fait une présentation du logiciel HOMER incluant son utilisation suivie par une simulation regroupant différents scénarios. Comme coordonnées géographiques nous

avons choisi la wilaya de Laghouat connu pour son rayonnement solaire assez dense et ses installations gazières, et la wilaya de Tlemcen du fait de sa proximité au marché international d'hydrogène. Les résultats obtenus dans le scénario 1 et 2 respectivement dans la wilaya de Laghouat et de Tlemcen démontre une viabilité du projet plus fiable se basant sur les coûts d'investissement dans le scénario 1 lors de la production d'électricité en utilisant une pile à combustible combinée à un système photovoltaïque et son irradiation solaire presque constant durant toute l'année. La région de Tlemcen se démarque par sa position géographique du faite de sa proximité au marché international dans le cadre de la production d'hydrogène utilisant une éolienne combinée à un système photovoltaïque incluant une pile à combustible d'appoint dans le scénario 3, mais dans le quatrième scénario effectuer dans la région de Laghouat nous avons des coûts d'exploitation inférieurs avec des rendements énergétiques assez conséquents sans oublier les infrastructures gazières existants qui pourront accélérés le processus en passant par une mise à niveau technique de ces infrastructures.

Conclusion générale

Dans le cadre de cette étude, nous avons examiné en détail la production de l'hydrogène vert en Algérie et les différentes stratégies nécessaires pour une transition énergétique durable. Nous avons analysé les tendances mondiales en matière d'énergie et souligné le rôle crucial que l'hydrogène vert peut jouer dans la transition vers des sources d'énergies plus propres et durables, analysé le potentiel des énergies renouvelables en Algérie en passant par les différentes ressources énergétiques que possède le pays pour pouvoir mettre en lumière son potentiel qui pourrait contribuer à la diversification de son mix énergétique, à renforcer sa sécurité énergétique et à réduire ses émissions de gaz à effet de serre. Après avoir passé en revue les propriétés et caractéristiques de l'hydrogène, nous avons exploré les méthodes variées de production de l'hydrogène liées aux différents types d'hydrogène en partant du fossile au renouvelable, ceux qui nous ont éclairés sur les différentes manières de production de l'hydrogène en commençant par les combustibles fossiles par le biais du reformage jusqu'à la technologie de production à partir des électrolyseurs autour duquel nous avons parlé des technologies déjà existantes, suivi des améliorations à apporter dans ce domaine et enfin l'apparition de nouvelles technologies pour la production d'hydrogène à partir des eaux polluées qui pourrait remédier aux problèmes liés à la disponibilité de l'eau.

Au niveau du chapitre 3, nous avons fait en premier lieu une analyse approfondie sur l'impact environnemental de la production de l'hydrogène en tenant compte des différents aspects liés à la consommation et la préservation de l'environnement. Nous avons effectué une analyse politique du marché de l'hydrogène en considérant la dynamique du marché tout en mettant le point sur la proximité de l'Algérie au marché international. Par sa politique énergétique qui est en pleine mutation, reflétant la volonté de réduire sa dépendance historique aux hydrocarbures tout en diversifiant son mix énergétique, consciente des risques liés à la volatilité des prix des énergies fossiles et des impératifs environnementaux mondiaux, l'Algérie s'efforce de développer ses ressources renouvelables notamment l'énergie solaire grâce à son potentiel exceptionnel en ensoleillement. Des initiatives ambitieuses telles que le programme national des énergies renouvelables visant à augmenter significativement la part des énergies propres dans la production nationale de l'électricité. Parallèlement, l'Algérie explore activement le potentiel de l'hydrogène vert comme solution énergétique d'avenir tout en améliorant l'efficacité énergétique dans divers secteurs. Malgré les défis liés à l'attraction des investissements et au développement des infrastructures, cette transition énergétique offre des opportunités importantes pour la

création d'emplois, l'innovation industrielle et la sécurité énergétique. En définitive, la politique énergétique de l'Algérie se dirige résolument vers un modèle plus durable, visant à assurer une croissance économique équilibrée et à répondre aux enjeux climatiques mondiaux.

Enfin dans le chapitre 4, on a procédé à une présentation du logiciel HOMER Pro suivi par une explication bref de son utilisation. Nous avons effectué une simulation de cas regroupant différents scénarios avec des coordonnées géographiques différents pour pouvoir mettre sous les yeux des projecteurs le potentiel de production énergétique de l'Algérie à partir des sources d'énergies renouvelables et la position privilégiée que pourra occuper le pays dans la production et l'approvisionnement du marché international en hydrogène du fait de son immense ressource pétrolière et gazière et de son potentiel climatique assez dense en particulier ses irradiations solaires et vents forts.

Investir dans la recherche, le développement et le déploiement de l'hydrogène propre est une priorité pour de nombreux pays et entreprises. Des initiatives ambitieuses et des projets pilotes voient le jour à travers le monde. Dans ce cadre l'université peut jouer un rôle clé pour développer plusieurs axes de recherche comme l'utilisation des nanotechnologies pour améliorer l'efficacité et la rentabilité financière dans le cas des électrolyseurs.

Mettre en lumière le rôle crucial de l'hydrogène propre dans les plans de décarbonation à travers la réduction des émissions de dioxyde de carbone dans divers domaines tels que les transports longue distance, l'industrie lourde, la production d'énergie etc.... En définitive, l'hydrogène est devenu un facteur important dans la recherche d'une économie mondiale plus verte et décarbonée. Malgré les obstacles, son potentiel en tant que vecteur énergétique propre et polyvalent est de plus en plus reconnu et exploité à l'échelle mondiale, contribuant ainsi à un avenir plus durable pour notre planète.

Bibliographie

- [1] M. d. l'Energie, "Energie nouvelles, renouvelables et maitrise de l'énergie," 16 02 2024. [Online]. Available: <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie#:~:text=Le%20potentiel%20national%20en%20%C3%A9nergies,de%20richesse%20et%20d'emplois..>
- [2] F. COLLARD, "Les énergies renouvelables," *CAIRN.INFO*, Vols. N° 2252-2253, p. 5 à 72, 2015.
- [3] B. DESSUS, "Energies renouvelables," 04 2007. [Online]. Available: <https://base.d-p-h.info/fr/fiches/dph/fiche-dph-7414.html>.
- [4] B. DUDLEY, "Une voie non durable," BP Statistical Review of World Energy 2019, 11 06 2019. [Online]. Available: <https://www.bp.com/en/global/corporate/news-and-insights/press-releases/bp-statistical-review-of-world-energy-2019.html>.
- [5] R. Alexandre, "Energie et climat, Reussir la transition énergétique," édition Technip, 2008. [Online].
- [6] C. Zeyneb, *La part des énergies renouvelables dans le bilan énergétique national à l'horizon 2030*, Université M'hamed Bougara de BOUMERDES: Mémoire de Master, 2014.
- [7] REN21, "Renewables 2019 Global Status," REN21 Secretariat, Paris, 2019.
- [8] "IEA," Rapport sur la situation mondiale de l'énergie et du CO2 2019, Mars 2019. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/global-energy-co2-status-report-2019>.
- [9] S. Belkhir, *Contribution à la maîtrise de la transition énergétique en Algérie*, Université Kasdi Merbah Ouargla: Thèse de doctorat, 2021.
- [10] T. BELGACEM, "Les ressources de l'Algérie," 2016. [Online]. Available: <https://www.cairn.info/revue-outre-terre2-2016-2-page-152.htm>.
- [11] B. A. Sefyane and H. D. OULED, *Modélisation prospective sur la durabilité des systèmes énergétiques hydrogène*, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA: Mémoire de Master, 2016.
- [12] R. BOUNDRIES. and D. R., "Potentialities of hydrogen production in Algeria," *International Journal of Hydrogen Energy*, no. 33, pp. 4476 - 4487, 2008.
- [13] S. Mohammed and A. João, *Assessment of large-scale wind resource features in Algeria*, 2020.
- [14] A. B. LYNDIA, *Algerian Green Hydrogen Production Opportunities and challenges in light of a*

- sustainable energy system*, University center Aflou, (Algeria), 2021.
- [15] N. L, A. A, M. A and e. al., "Geothermal energy use in Algeria: A review on the current status compared to the worldwide, utilization opportunities and countermeasures," *Journal of Cleaner Production*, vol. 302, 2021.
- [16] O. S. A. Khellaf and K. Baddari, "Etude des ressources géothermiques du Sud Algérien," *Revues des énergies renouvelables*, vol. 10, no. 3, pp. 407 - 414, 2007.
- [17] A. Amine, "La bioénergie en Algérie : Un gisement important, et des bénéfices environnementaux," CDER, Alger, 2014.
- [18] K. Guernouti, "Portail algérien des énergies renouvelables," Environnement: les déchets comme source d'énergie propre, 23 08 2019. [Online]. Available: <https://portail.cder.dz/2019/08/23/environnement-les-dechets-comme-source-denergie-propre/>. [Accessed 05 2024].
- [19] P. B. Benmoussa, M. Banning, P. Ulrich and e. al., "Impact regional des énergies renouvelables sur le marché de travail en Algérie," 2021.
- [20] K. A. Cherif, "Algérie-Eco," Les enjeux et les défis de la transition énergétique en Algérie, 21 03 2017. [Online]. Available: <https://www.algerie-eco.com/2017/03/21/enjeux-defis-de-transition-energetique-algerie/>.
- [21] h. kaddour, "Énergies Renouvelables en Algérie : L'Étincelle d'un Avenir Vert et Lumineux," Portail algérien des énergies renouvelables, 26 12 2023. [Online]. Available: <https://portail.cder.dz/2023/12/26/energies-renouvelables-en-algerie-letincelle-dun-avenir-vert-et-lumineux/>. [Accessed 05 2024].
- [22] D. H. BENLATRECHE, *L'hydrogène*, UNIVERSITE MOSTFA BEN BOULAID - BATNA, 2019-2020.
- [23] L. B. Hugo, "La production d'hydrogène vert," *Encyclopédie de l'énergie*, no. 108, p. 2, 2016.
- [24] "LENNTECH," Chemical properties of hydrogen, [Online]. Available: <https://www.lenntech.fr/periodique/elements/h.htm#ixzz8TuJ6WqkY>.
- [25] B. A. Sefyane and O. D. Haddar, *Modélisation prospective sur la durabilité des systèmes*, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2016.
- [26] "Tout savoir sur l'hydrogène," IFP Energies Nouvelles, Janvier 2024. [Online]. Available: <https://www.ifpenergiesnouvelles.fr/enjeux-et-prospective/decryptages/energies-renouvelables/tout-savoir-lhydrogene#:~:text=Actuellement%2C%20l'hydrog%C3%A8ne%20a%20deux,produits%20p%>

C3%A9troliers%2C%20carburants%20et%20biocarburants.

- [27] G. Gondor, *Pour le stockage de l'hydrogène : Analyse thermodynamique de la formation d'hydrures métalliques et optimisation du remplissage d'un réservoir*, Thèse, 2008.
- [28] S. Jean-Marie, "Encyclopédie de l'énergie," La gazéification, 27 09 2019. [Online]. Available: <https://www.encyclopedie-energie.org/la-gazeification/>.
- [29] J.-F. FORTIER, "Aquaportail.com," Gazéification, 01 09 2023. [Online]. Available: <https://www.aquaportail.com/dictionnaire/definition/5959/gazeification>. [Accessed 03 2024].
- [30] B. Boumeddane, *Production du syngas par gazéification de la biomasse*, 2021.
- [31] A. B. Lynda, *Algerian Green Hydrogen Production Opportunities and challenges in light of a sustainable energy system*, University center Aflou, (Algeria), 2021.
- [32] "ACCELERERA," Electrolyseurs, 20 02 2023. [Online]. Available: <https://www.accelerazero.com/fr/news/what-is-an-electrolyzer-and-what-is-it-used-for#:~:text=Les%20diff%C3%A9rents%20types%20d%C3%A9lectrolyseurs,le%20mat%C3%A9riau%20d%C3%A9lectrolyte%20impliqu%C3%A9..>
- [33] "DEMACO," Hydrogen, 2023. [Online]. Available: <https://demaco-cryogenics.com/fr/blog/tout-sur-lelectrolyseur-dhydrogene/>.
- [34] K. S. AGBLI, *Modélisation multiphysique des flux énergétiques d'un Couplage Photovoltaïque-Electrolyseur PEM–Pile à Combustible PEM en vue d'une application stationnaire*, Abidjan, 2012.
- [35] M. Ni, L. K. H. Micheal and L. Y. C. Dennis, "Technological development of hydrogen production by solid oxide electrolyzer cell (SOEC)," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 9, pp. 2337- 2354, 2008.
- [36] S. S. Kumar and V. Himabindu, "Hydrogen production by PEM water electrolysis," *Materials Science for Energy Technologies*, p. 442 à 454, 2019.
- [37] Joseph, "Gren car congress," Une étude conclut que les cellules d'électrolyse microbienne constituent une approche prometteuse pour la production d'hydrogène renouvelable et durable, 10 11 2008. [Online]. Available: <https://www.greencarcongress.com/2008/11/study-concludes.html>.
- [38] A. Kadier, M. S. Kalil, P. Abdeshahian and a. all, *Recent advances and emerging challenges in microbial electrolysis cells (MECs) for microbial production of hydrogen and value-added chemicals*, 2016.
- [39] A. Hodges, K. Wagner and C.-Y. e. a. Lee, "A high-performance capillary-fed electrolysis cell promises more cost-competitive renewable hydrogen," *nature communications*, pp. 1-11, 2022.
- [40] C. Pornrungroj, A. B. M. Annuar, Q. Wang and et.al, "Hybrid photothermal–photocatalyst sheets for solar-driven overall water splitting coupled to water purification," *nature water*, vol. 1, pp. 952-960, 2023.

- [41] M. Randrianarisoa and J. Paiano, "TRUST MY SCIENCE," Ce dispositif solaire flottant produit de l'hydrogène et de l'eau potable à partir d'eau polluée ou de mer, 15 11 2023. [Online]. Available: <https://trustmyscience.com/dispositif-solaire-flottant-produit-hydrogene-eau-potable-avec-eau-polluee-mer/>. [Accessed 05 2024].
- [42] "ALGERIE PRESSE SERVICE," L'Algérie bien placée pour produire l'hydrogène vert à des couts "très compétitifs", 23 04 2022. [Online]. Available: <https://www.aps.dz/economie/138909-l-algerie-bien-placee-pour-produire-l-hydrogene-vert-a-des-couts-tres-competitifs>. [Accessed 04 2024].
- [43] A. Wang, J. Jens, D. Mavins and et.al, *Analysing future demand, supply, and transport of hydrogen*, Netherlands: Guidehouse, 2021.
- [44] S. E. Bouzerd, *Technologie et développement socioéconomique des énergies renouvelables et l'hydrogène vert en Algérie*, 2023.
- [45] "SPUTNIK Afrique," La première centrale à hydrogène d'Afrique verra le jour en Namibie, 26 06 2023. [Online]. Available: <https://fr.sputniknews.africa/20230626/la-premiere-centrale-a-hydrogene-dafrique-verra-le-jour-en-namibie-1060166633.html>. [Accessed 04 2024].
- [46] "INTERNATIONAL INSTITUT OF REFRIGERATION," Projet de production d'hydrogène en Namibie, 18 01 2022. [Online]. Available: <https://iifiir.org/fr/actualites/projet-de-production-d-hydrogene-vert-en-namibie>. [Accessed 04 2024].
- [47] Direction des études et de la prospective, *Stratégie nationale de développement de l'hydrogène en Algérie*, Alger: Ministère de l'énergie et des mines, 2023.
- [48] C. Fournier, "youmatter," L'hydrogène vert est-il vraiment écologique ?, 27 04 2023. [Online]. Available: <https://youmatter.world/fr/categorie-environnement/hydrogene-vraiment-ecologique-impact-environnemental/>. [Accessed 05 2024].
- [49] C. FOURNIER, "youmatter," L'hydrogène vert est-il vraiment écologique ?, 27 04 2023. [Online]. Available: <https://youmatter.world/fr/categorie-environnement/hydrogene-vraiment-ecologique-impact-environnemental/>. [Accessed 05 2024].
- [50] P. PATUREL, "XERFI," LE MARCHÉ DE L'HYDROGÈNE VERT ET BAS CARBONE, 13 06 2023. [Online]. Available: https://www.xerfi.com/presentationetude/le-marche-de-l-hydrogene-vert-et-bas-carbone_SCO55. [Accessed 05 2024].
- [51] "ALGERIE PRESSE SERVICE," L'Algérie bien placée pour produire l'hydrogène vert à des couts "très compétitifs", 23 04 2022. [Online]. Available: <https://www.aps.dz/economie/138909-l-algerie-bien-placee-pour-produire-l-hydrogene-vert-a-des-couts-tres-competitifs>. [Accessed 05 2024].
- [52] N. Bockstaller, "L'économie de l'hydrogène laisse entrevoir une nouvelle dynamique énergétique mondiale," International Renewable Energy Agency (IRENA), Abu Dhabi, 2022.
- [53] G. Wakim, "Clean Air Task Force," Régimes de prix potentiels pour un marché mondial de l'hydrogène à faible teneur en carbone, 13 10 2022. [Online]. Available: <https://www.catf.us/fr/2022/10/potential-pricing-regimes-global-low-carbon-hydrogen-market/>. [Accessed 05 2024].

- [54] A. Ghezlouna, N. Ouchera and S. Cherguia, "Energy policy in the context of sustainable development: case of Algeria and Tunisia," Elsevier, 2012.
- [55] G. Abderrahmane, *Maîtrise et optimisation de la gestion énergétique en Algérie*, Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, 2017.
- [56] S. Haddoum, H. Bennour and T. A. Zaïd, *Politique énergétique algérienne : perspectives, obstacles et opportunités manquées*, Global Challenges, 2018.
- [57] "CDER," Loi n° 04-09 du 14 août 2004 relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable en Algérie, [Online]. Available: http://www.cder.dz/loi/loi_avant.pdf.
- [58] L. Nabil, "Promotion du chauffe-eau solaire en Algérie programme ALSOL," *Bulletin des Energies Renouvelables*, no. 20, 2011.
- [59] "homerenergy," 11 2021. [Online]. Available: <https://www.saarcenergy.org/wp-content/uploads/2021/11/HOMER-Pro-Foundations-Student-Training-Guide-ver20211125.pdf>. [Accessed 05 2024].
- [60] "Tlemcen-dz," La ville de Tlemcen, [Online]. Available: <http://www.tlemcen-dz.com/ville/>. [Accessed 05 2024].
- [61] F. K. Aoual, "ResearchGate," Situation géographique de Laghouat et plan d'urbanisme, 06 2022. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Situation-geographique-de-Laghouat-et-plan-durbanisme_fig3_361534677. [Accessed 05 2024].
- [62] "Agence Internationale de l'énergie," Revue mondiale de l'hydrogène, 2021. [Online]. Available: <https://www.catf.us/fr/2022/10/potential-pricing-regimes-global-low-carbon-hydrogen-market/>. [Accessed 05 2024].
- [63] "assistance scolaire personnalisée," [Online]. Available: <https://www.assistancescolaire.com/enseignant/elementaire/ressources/base-documentaire-en-sciences/cea128>.
- [64] 21 03 2021. [Online]. Available: <https://globalsolaratlas.info/download>.
- [65] M. M. ISSIAKHEM, *La valorisation énergétique des déchets est une solution pour lutter contre le réchauffement de la planète*, Alger: CEREFEE, 2022.
- [66] S. Ouali and A. Khellaf, 01 2006. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Carte-de-gradient-geothermique-du-Sud-algerien_fig3_242139567.
- [67] "Sytraival," Unité de valorisation énergétique , 2021. [Online]. Available: <https://www.sytraival.com/valorisation-energetique/unite-valorisation-energetique.php>.
- [68] "Association Technique Energie et Environnement," [Online]. Available: <https://atee.fr/energies-renouvelables/club-biogaz/methanisation-et-biogaz>.
- [69] "valbiom," 03 2019. [Online]. Available: <https://www.valbiom.be/actualites/analyse-les-petites-unites-de-cogeneration-par-gazeification-de-bois-en-wallonie>.

