



UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES

N°d'ordre :
N° de série :

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Génie Energétique

Présenté par :

Bouziane Ahmed Sefyane

Ouled Haddar Djilali

Thème

**Modélisation prospective sur la durabilité des systèmes
énergétiques hydrogène**

Soutenu publiquement le : 01 /06/2016

Devant le jury composé de :

Mme. Imane Rezgui	MAA	Présidente	Université Kasdi Merbah Ouargla
Mr. Belkhir Negrou	MCB	Examineur	Université Kasdi Merbah Ouargla
Mlle. Soumia Rahmouni	MAB	Encadreur	Université Kasdi Merbah Ouargla

Année universitaire : 2015/2016

Remerciements

En premier lieu, je tiens à remercier notre **Allah**, pour le courage et la force qu'il nous a donné pour effectuer ce travail. Au moment d'achever ce travail modeste, Nous remercions profondément la directrice du mémoire Mlle. **Rahmouni soumia** Maître Assistant à l'université de Ouargla, Qui a passé un temps précieux pour ce travail. Nous ont encouragés à continuer et à persévérer.

Et les membres de jury d'avoir accepté notre travail

Mme. **Imane Rezgui**

Mr. **Belkhir Negrou**

Et tous ceux qui nous ont aidé de près ou de loin durant toute la période de travail et en particulier :

Mr. **Djidel**

Mlle. **Souad Zighmi**

Mr. **Mourad Boukhatem**



Dédicace

Pour chaque début il y a une fin, et ce qui est beau dans toute fin c'est la réussite et l'atteinte des objectifs.

Je dédie ce modeste travail, fruit de très longues années de labeur: A la seule femme de ma vie qui à énormément souffert pour faire de moi ce que je suis et qui me donne toujours l'espoir de vivre et qui n'a jamais cessé de prier pour moi ; Ma très chère Mère.

A mon très cher père, pour ses encouragements, son soutien, surtout pour son amour et son sacrifice afin que rien n'entrave le déroulement de mes études.

Je remercie également mon frère Mohamed, qui se tenait à côté de moi tout au long de mon école de carrière

Je remercie tous mes sœurs princesses en son nom et ma chère amie Amira

Merci au meilleur de ma voiture DFM



Modélisation prospective sur la durabilité des systèmes énergétiques hydrogène

Résumé

Considéré comme vecteur énergétique du futur, l'hydrogène semble être la solution miracle pour sortir de la crise énergétique et environnementale actuelle. Ceci peut être vrai à condition de résoudre tous les problèmes inhérents à son cycle de vie (production, distribution, stockage et utilisation). Cette étude a été réalisée pour l'intégration de l'hydrogène comme un combustible renouvelable dans le secteur de transport routier en Algérie à l'horizon 2045 et pour créer des cartes qui permettent au lecteur de visualiser facilement les résultats. Pour atteindre cet objectif, nous avons étudié rétrospectivement le développement des véhicules et la consommation de carburant et les émissions de CO₂ pour déterminer la distribution spatio-temporelle de la demande en hydrogène dans le secteur des transports routiers. Ensuite le déploiement de la chaîne logistique de l'approvisionnement de l'hydrogène sera discuté en termes de potentiel de la production de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire. Enfin, nous avons développé des scénarios afin de déterminer l'impact environnemental avant et après l'intégration de l'hydrogène comme un carburant dans le secteur de transport routier. Toutes les étapes du travail ont été effectuées par la combinaison des modèles technique avec des données spatiales dans un Système d'Information Géographique (SIG). Les résultats obtenus montrent que l'intégration de l'hydrogène comme carburant alternatif, nous a permis de diminuer la consommation énergétique d'une part, et faire des économies environnementales en terme des émissions de CO₂.

Mots clés : Secteur de transport routier, Etude prospective, Hydrogène carburant, Système d'Information Géographique (SIG), Impact environnemental.

Abstract

Regarded as an energy carrier of the future, hydrogen appears to be the miracle solution to end the current energy and environmental crisis. This may be true as long to solve all the problems inherent in its life cycle (production, distribution, storage and use). This study was conducted for the integration of hydrogen as a renewable fuel in the road transport sector in Algeria in 2045 and to create maps that allow the reader to easily view the results. To achieve this goal, we studied retrospectively the development of vehicles and fuel consumption and CO₂ emissions to determine the spatial and temporal distribution of hydrogen demand in the road transport sector. Then the deployment of the supply chain of supply of hydrogen will be discussed in terms of potential for the production of hydrogen from solar energy. Finally, we develop scenarios to determine the environmental impact before and after the integration of hydrogen as a fuel in the road transport sector. All stages of the work were carried out by the combination of technical models with spatial data in a Geographic Information System (GIS). The results show that the integration of hydrogen as an alternative fuel, allows us to reduce energy consumption on the one hand, and make environmental savings in terms of CO₂ emissions.

Keywords: Road transport sector, Prospective, Hydrogen Fuel, Geographic Information System (GIS), Environmental Impact

ملخص

تعتبر حاملية الطاقة في المستقبل، يظهر الهيدروجين ليكون الحل السحري لإنهاء الطاقة الحالية والأزمة البيئية. قد يكون هذا صحيحا طالما لحل جميع المشاكل الكامنة في دورة حياتها (الإنتاج والتوزيع والتخزين والاستخدام). وقد أجريت هذه الدراسة لدمج الهيدروجين كوقود المتجددة في قطاع النقل البري في الجزائر في 2045 وإنشاء الخرائط التي تسمح للقارئ بسهولة لعرض النتائج. ولتحقيق هذا الهدف، درسنا بأثر رجعي تطوير السيارات واستهلاك الوقود وانبعاثات CO₂ لتحديد التوزيع المكاني والزمني للطلب الهيدروجين في قطاع النقل البري. ثم ستناقش نشر سلسلة التوريد الهيدروجين من حيث القدرة على إنتاج الهيدروجين من الطاقة الشمسية. وأخيرا، فإننا وضع سيناريوهات لتحديد الأثر البيئي قبل وبعد دمج الهيدروجين كوقود في قطاع النقل البري. تم تنفيذ جميع مراحل العمل من قبل مجموعة من النماذج الفنية مع البيانات المكانية في نظام المعلومات الجغرافية (GIS). وأظهرت النتائج أن اندماج الهيدروجين كوقود بديل، يسمح لنا للحد من استهلاك الطاقة من جهة، وتحقيق وفورات البيئية من حيث انبعاثات CO₂.

الكلمات الدلالية قطاع النقل البري، دراسة توقعية، وقود الهيدروجين، نظام المعلومات الجغرافية، الأثر البيئي

Sommaire

	Page
Nomenclature	I
Listes des figures	III
Liste des tableaux	V
Introduction générale	1

Chapitre 1 : Situation énergétique en Algérie

1	Introduction	3
2	Le risque d'épuisement des réserves fossiles	3
2.1	Réserves de pétrole	3
2.2	Réserves de gaz naturel	4
3	Production des énergies fossiles	4
3.1	Production de pétrole	4
3.2	Production de gaz naturel	4
4	Une forte consommation énergétique intérieure	4
4.1	La consommation d'énergie par produit	5
4.1.1	Consommation de pétrole	5
4.1.2	Consommation de gaz naturel:	5
4.2	La consommation d'énergie par secteur d'activité	6
5	Une forte dépendance à l'égard des exportations d'hydrocarbure	7
5.1	Exportations de pétrole	7
5.2	Exportations de gaz naturel	7
6	La problématique du réchauffement climatique	7
6.1	Dans le monde	7
6.2	En Algérie	7
7	Situation de secteur de transport	8
7.1	Transport ferroviaire	9
7.2	Metro & Tramway	10
7.2.1	Le métro d'Alger :	10
7.2.2	Le métro d'Oran :	10
7.2.3	Tramway	10
7.2.4	Le tramway d'Alger :	10
7.2.5	Le tramway de Constantine :	10

7.2.6	Le tramway d'Oran :	11
7.3	Transport aérien	11
7.4	Transport maritime	11
7.5	Transport routier.....	12
7.5.1	Projet d'autoroute transsaharienne.....	12
7.5.2	Projet d'autoroute des hauts plateaux.....	12
8	Conclusion.....	13

Chapitre II : Hydrogène comme un vecteur énergétique

1	Introduction	14
2	Propriétés de l'hydrogène.....	14
2.1.	Caractéristiques de l'hydrogène	14
2.1	L'hydrogène : vecteur d'énergie	16
3	Production de l'hydrogène.....	17
3.1	Production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles.....	17
3.1.1	Hydrogène du gaz naturel	17
3.1.2	Hydrogène à partir du charbon	18
3.2	Production d'hydrogène par électrolyse.....	18
3.3	Production d'hydrogène par nucléaire.....	19
3.4	Production d'hydrogène par biomasse.....	20
3.5	Production d'hydrogène par énergie renouvelable	21
4	Transport de l'hydrogène	22
4.1	Pipeline	22
4.2	Rail.....	23
4.3	Navire	23
4.4	Camion	23
5	Stockage de l'hydrogène	24
5.1	Stockage gazeux.....	24
5.2	Stockage liquide	25
5.3	Stockage solide	25
6	Véhicule à hydrogène.....	26
6.1	Définition	26
6.2	Principe de fonctionnement.....	26
6.2.1	Moteur à hydrogène	26
6.2.2	Moteur à explosion	27

6.2.3	Voiture à hydrogène.....	27
6.3	La pile à combustible	27
6.4	Les avantages des piles à combustible	28
6.4.1	Faible pollution dans l'environnement	28
6.4.2	Rendements (point de vue Automobile).....	28
6.4.3	Silencieuse	28
6.4.4	Fiabilité et durée de vie	28
6.4.5	Combinaison avec batterie.....	29
7	Travaux mondiaux	29
7.1	En France	29
7.2	En Allemagne	30
7.3	Aux États-Unis.....	30
8	Conclusion.....	31

Chapitre III : Conception de la future chaîne d'approvisionnement d'hydrogène pour le secteur de transport

1	Introduction	32
2	Etude rétrospective du secteur de transport routier en Algérie.....	32
2.1	Evolution du parc automobile national	32
2.2	Consommation énergétique du parc automobile.....	33
2.3	Analyse de kilométrage annuel parcouru	34
3	Etude prospective de la distribution spatio-temporelle de la demande en hydrogène dans le secteur de transport routier.....	37
3.1	Modélisation de la demande en hydrogène.....	37
3.1.1	Densité de population.....	39
3.1.2	Taux de pénétration au marché de véhicule.....	39
3.1.3	Consommation spécifique pour un véhicule à hydrogène.....	40
3.2	Projection des données statistiques à l'horizon 2045	41
3.2.1	Projection du nombre de véhicule	41
3.2.2	Population	42
3.2.3	Estimation de la demande en hydrogène	43
4	Dévoilement de la chaîne logistique de l'approvisionnement de l'hydrogène.....	46
4.1	Station services à hydrogène	46
4.2	Potentiel de production d'hydrogène solaire.....	50
4.3	Modélisation de la chaîne de production d'hydrogène solaire par électrolyse de l'eau	51

4.3.1	Champ photovoltaïque	51
4.3.2	Modélisation énergétique de la production d'énergie électrique photovoltaïque	52
4.3.3	L'électrolyse de l'eau	54
4.4	Evaluation du potentiel de la production de l'hydrogène dans Algérie	55
5	Comparaison entre la production et la demande en hydrogène	56
6	Impact environnemental de l'intégration de l'hydrogène carburant dans le secteur de transport à l'horizon 2045	58
6.1	Scénario A : Avant intégration d'hydrogène.....	58
6.2	Scénario B : Après intégration d'hydrogène	60
7	Conclusion	61
	Conclusion générale.....	63
	Bibliographie	64
	Annexe I:.....	67
	Annexes II.....	68
	Annexes III.....	70
	Annexes IV.....	71

Nomenclature

Symbole	Définition	Unité
A	Surface/Superficie	m ²
CC	Consommation de carburant	tep
CPAC	Capacité de la pile à combustible dans un véhicule à hydrogène	kg/ km ²
CSVH	Consommation spécifique pour un véhicule à hydrogène	KgH ₂ /an/véhicH ₂
DDH	Densité de la demande en hydrogène	kgH ₂ /an/km ²
DP	Densité de population	habit / km ²
E	Energie	kWh
E _{CO₂}	Émissions de CO ₂ pour le carburant	tCO ₂
E _{source}	Energie électrique délivrée par la source renouvelable	kWh
FE	Facteur d'émission par combustible	tCO ₂ /tep
G	Irradiation solaire globale sur un plan horizontale	kWh/m ²
KPA	Kilométrage parcouru annuelle	km/an
M	Masse	kg
NV	Nombre de véhicule	-
NS	Nombre de station hydrogène	-
PCI	Pouvoir calorifique inférieur d'hydrogène	kWh/kg
TCAM	Taux de Croissance Annuel Moyen	%
TP	Taux de pénétration au marché	%
Indice		
<i>a</i>	Carburant	-
<i>n</i>	année	-
H ₂	Hydrogène	-
S	station-service	-
El	Electrolyseur	-
PV	Photovoltaïque	-
Lettres grecques		
η_p	Rendement supplémentaire inclus pour tenir compte les pertes d'énergie dans l'électrolyseur	%

η_{PV}	Rendement de générateur PV	%
η_{elec}	Rendement d'électrolyseur	%

Abréviations

AIE	Agence Internationale d'Energie
PV	Photovoltaïque
EnR	Energie Renouvelable
GES	Gaz à Effet de Serre
BP	Statistical Review of World Energy
EMA	Entreprise du Métro d'Alger
SNTF	Société Nationale des Transports Ferroviaires

Liste des figures

Chapitre III : Situation énergétique en Algérie

Figure I-1 :	Consommation énergie final par produit 2014	4
Figure I-2 :	Consommation énergie final par secteur 2014	6
Figure I-3 :	Le bilan des émissions par secteur en 2012	8

Chapitre II : Hydrogène comme un vecteur énergétique

Figure II-1:	Densité d'énergie massique pour différents vecteurs d'énergie	17
Figure II-2:	Réacteurs nucléaire pour la production de l'hydrogène	20
Figure II-3 :	Principe de fonctionnement moteur à hydrogène	27
Figure II-4:	La pile à combustible	28

Chapitre III : Conception de la future chaine d'approvisionnement d'hydrogène pour le secteur de transport

Figure III -1:	Croissance de nombre de véhicules en Algérie de 1996-2013	33
Figure III -2:	Consommation énergétique du parc automobile en Algérie de 2006-2014	34
Figure III -3 :	Classification véhicules selon kilométrage annuel	35
Figure III -4 :	Emissions de CO ₂ pour le secteur de transport routier	37
Figure III -5 :	Organigramme de calcul de la densité de la demande en hydrogène	38
Figure III -6 :	Croissance de la population en Algérie de 1996-2014	39
Figure III -7 :	Variation du taux de pénétration des véhicules à hydrogène dans parc automobiles en fonction de périodes	40
Figure III -8:	Projection de nombre de véhicules pour l'année 2045	42

Figure III -9 :	Projection de la population pour l'année 2045	43
Figure III -10 :	la demande hydrogène pour l'année 2045	44
Figure III -11 :	la distribution spatiale de la demande hydrogène par wilaya	45-46
Figure III -12 :	Répartition spatiale de nombre de stations-services en Algérie pour l'année 2015	47
Figure III -13 :	la distribution spatiale des stations-service hydrogène par wilaya	49-50
Figure III -14 :	Schéma de principe de fonctionnement de l'installation de production de l'hydrogène (PV/H ₂)	51
Figure III -15 :	Schéma de principe de la conversion photoélectrique	52
Figure III -16 :	potentiels d'irradiation solaire disponible dans l'ensemble du territoire algérien	53
Figure III -17 :	Schéma de principe de l'électrolyse de l'eau à PEM	54
Figure III -18 :	Répartition de la production d'hydrogène sur le territoire national	56
Figure III -19 :	Comparaison entre production et demande sur l'hydrogène pour l'année 2045	57
Figure III -20 :	Evolution de la consommation des combustibles fossiles en Algérie de 2020-2045	58
Figure III -21 :	Evolution l'émissions de CO ₂ en Algérie de 2020-2045	59
Figure III -22 :	Evolution de la consommation des combustibles fossiles avant et après intégrant l'hydrogène	60
Figure III -23 :	Evolution l'émission de CO ₂ avant et après intégrant l'hydrogène	61

Liste des tableaux

Chapitre VII : Situation énergétique en Algérie

Tableau I-1 :	Réserves prouvées de pétrole en Algérie	3
Tableau I-2 :	Production de pétrole en Algérie	4
Tableau I-3 :	Production de gaz naturel en Algérie	4
Tableau I-4 :	Exportations pétrole brut et produits pétroliers en Algérie	7
Tableau I-5 :	Exportations de gaz naturel en Algérie	7
Tableau I-6 :	Récapitulatif des infrastructures de transport	9
Tableau I-7 :	Longueur du Réseau Ferroviaire	10

Chapitre II : Hydrogène comme un vecteur énergétique

Tableau II-1 :	Caractéristiques de l'hydrogène	16
Tableau II-2 :	Les différents types de réservoirs gazeux	25

Chapitre III : Conception de la future chaîne d'approvisionnement d'hydrogène pour le secteur de transport

Tableau III-1 :	Evolution du parc automobile en Algérie.	33
Tableau III-2 :	Classification des véhicules selon le kilométrage annuel moyen	36
Tableau III-3 :	Facteur d'émission par combustible	36
Tableau III-4 :	Croissance de la population en Algérie de 1996-2014	39
Tableau III-5 :	Taux de pénétration au marché de véhicule à hydrogène.	40
Tableau III-6 :	TCMA de parc automobile	41
Tableau III-7 :	TCMA de population	42
Tableau III-8 :	la demande hydrogène pour l'année 2045	44
Tableau III-9 :	les spécifications techniques des stations-services selon la capacité	47
Tableau III-10 :	Comparaison entre les stations d'hydrogène et aux stations actuelle	48

Introduction générale

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 [1].

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 total 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% [2].

Pour remédier les problèmes causés par le secteur de transport, 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.

L'objectif principal de cette étude est d'étudier l'impact de l'intégration de l'hydrogène comme un carburant vert dans le secteur de transport routier en Algérie à l'horizon 2045.

Le travail réalisé dans le cadre de ce mémoire se décompose en trois chapitres. Nous commençons dans le premier chapitre présent les principales motivations du choix de cette problématique, qui sont résumées dans les deux points, la première est lié aux risques et les enjeux de l'énergie en Algérie; Dans La deuxième section, nous examinons la situation de tous les transports et son impact sur l'environnement comme le plus grand secteur entraînera des émissions de gaz de CO₂.

Dans le deuxième chapitre, nous introduit l'hydrogène comme futur vecteur énergétique grâce à ses caractéristiques comme une alternative aux combustibles fossiles

nous décrivons les méthodes de production, de transport et de stockage et d'utilisation comme carburant pour les véhicules.

Le dernier chapitre, nous proposons une étude rétrospective du secteur de transport routier en Algérie, pour déterminer la distribution spatio-temporelle de la demande en hydrogène dans le secteur des transports routiers. Ensuite le déploiement de la chaîne logistique de l'approvisionnement de l'hydrogène sera discuté en termes de potentiel de la production de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire. Toutes les étapes du travail ont été effectuées par la combinaison des modèles techniques avec des données spatiales dans un Système d'Information Géographique (SIG). Enfin, nous développons des scénarios afin de déterminer l'impact environnemental avant et après l'intégration de l'hydrogène comme un carburant dans le secteur de transport routier.

Nous terminons ce travail par une conclusion générale et quelques recommandations.

1 Introduction

Dix-huitième producteur mondial de pétrole et troisième en Afrique (derrière la Angola et le Nigeria) et neuvième producteur de gaz naturel et deuxième en Afrique, l'Algérie, 51 ans après son indépendance, reste prisonnière d'une économie de rente [2].

Ainsi, 97% de ses entrées en devises proviennent de l'exportation des hydrocarbures. Le pays dépend donc aujourd'hui et plus que jamais, pour son fonctionnement, de l'étranger: il importe quasiment tout, des produits manufacturés en passant par les services, jusqu'aux quelques dérivés de pétrole tel que l'essence et le gasoil [2]

Aujourd'hui, le changement climatique et l'érosion progressive des ressources naturelles fait évoluer les mentalités. La question des énergies renouvelables devient de plus en plus préoccupante et fait naître des nouveaux modes de production et de consommation

Dans ce chapitre, nous proposons la situation actuelle de l'énergie en Algérie, par conséquent, nous décrivons le réserve, la production et la consommation de gaz naturel et du pétrole, qui sont les éléments vitaux de l'économie nationale, ainsi que nous concentrons sur le mode de transport vue qu'il est considéré comme le secteur qui pose le plus grand menace pour l'environnement par l'émission de CO₂ qui est liée à ce secteur.

Une analyse qui nous aide comme une donnée de base pour justifier notre choix de l'hydrogène comme un carburant de future, une énergie de substitution des énergies fossile qui répond à de nos besoins essentiels.

2 Le risque d'épuisement des réserves fossiles

2.1 Réserves de pétrole

Les réserves prouvées de pétrole de l'Algérie était estimées par BP à 1.5 milliards de tonne fin 2014 (12.2 milliards de barils), soit 22 années de production au rythme de 2014. Ces réserves classaient l'Algérie au 17e rang mondial avec 0.7 % du total mondial, et au 4e rang en Afrique derrière la Libye, le Nigeria et l'Angola [3].

Tableau I.1 : Réserves prouvées de pétrole en Algérie [4].

Année	2002	2003	2004	2005	2006	2008	2010	2014
Réserves prouvées (milliards de barils)	13.1	13.1	11.87	12.46	11	14.79	13.42	12.2

2.2 Réserves de gaz nature

Les réserves prouvées de gaz naturel en Algérie étaient estimées par BP à 4 500 milliards de m³ fin 2014 (159.1 trillions US de pieds cubes), soit 54 années de production au rythme de 2014. Ces réserves classaient l'Algérie au 10^e rang mondial avec 2.4 % du total mondial, et au 2^{ème} rang en Afrique derrière le Nigeria [3].

3 Production des énergies fossiles

3.1 Production de pétrole

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. Elle se classe au 18^e rang mondial avec 1.6 % de la production mondiale et au 3^e rang en Afrique derrière le Nigeria 2.7 % et l'Angola 2.0 % [3].

Tableau I.2 : Production de pétrole en Algérie [5].

Année	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Production (millions de tonnes)	66.8	65.8	70.9	70	83.6	86.4	86.2
	2007	2008	2009	2010	2011	2014	
	86.5	85.6	77.2	74.1	73.5	66	

3.2 Production de gaz naturel

En 2014, 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). Elle se classe au 9^e rang mondial avec 2.4 % de la production mondiale et au 1^{er} rang en Afrique [3].

Tableau I.3 : Production de gaz naturel en Algérie [6].

Année	1990	2000	2010	2011	2012	2014
Production (millions tep)	38.85	69.85	71.96	69.59	72.51	83.3

4 Une forte consommation énergétique intérieure

Cette consommation qui comprend tous les usages à caractère final d'énergie, a atteint 39.4 Mtep en 2014, reflétant une hausse de 1.9 Mtep par rapport à 2013. L'évolution de la consommation finale par produit et par secteur d'activité est détaillée ci-après [7].

4.1 La consommation d'énergie par produit

Les produits pétroliers sont toujours la première forme d'énergie consommée, avec 38.1% de la consommation finale. Le gaz naturel, en croissance, consolide sa seconde place du bouquet énergétique final avec 28.5 %. L'électricité, en hausse également, représente 27.7 % de l'ensemble [7].

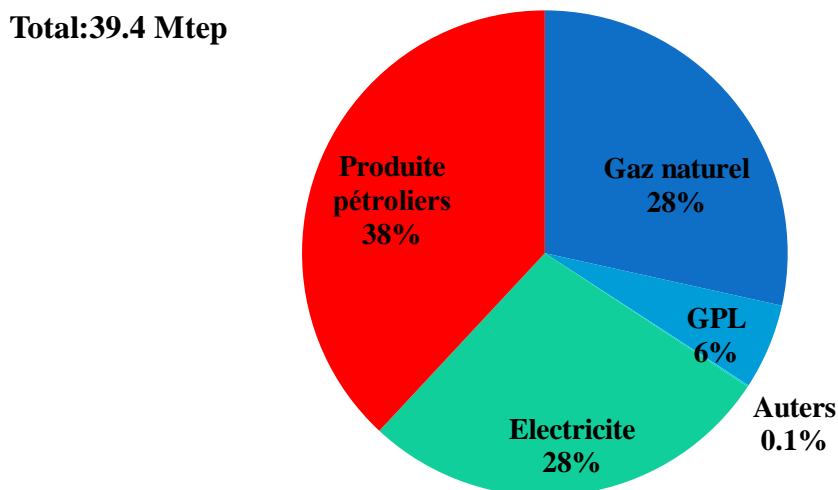


Figure I.1 : Consommation d'énergie finale par produit 2014[7].

Enfin, le GPL qui a connu une baisse en 2014, représente 5.7% de l'ensemble. Sa consommation a été de 1.9 millions de tonnes, en diminution de (-7.4%) par rapport à 2013, suite à une substitution de plus en plus croissante des foyers au gaz naturel.

4.1.1 Consommation de pétrole

En 2014, l'Algérie a consommé 18.0 Mt (millions de tonnes) de pétrole, soit 395 kb/j (millions de barils par jour), en hausse de 1.6 % en 2014 et de 70 % depuis 2004. Elle se classe au 40e rang mondial avec 0.4 % de la consommation mondiale. Sa consommation n'absorbe que 27 % de sa production [3].

4.1.2 Consommation de gaz naturel:

En 2014, l'Algérie a consommé 37.5 milliards de m³ de gaz naturel, soit 33.7 (millions de tonnes équivalent pétrole), en progression de 12.4 % en 2014 et de 70 % depuis 2004. Elle se classe au 27e rang mondial avec 1.1 % de la consommation mondiale. Sa consommation absorbe 45 % de sa production [3].

4.2 La consommation d'énergie par secteur d'activité

La consommation d'énergie par secteur d'activité en Algérie, est représentée sur la figure suivante:

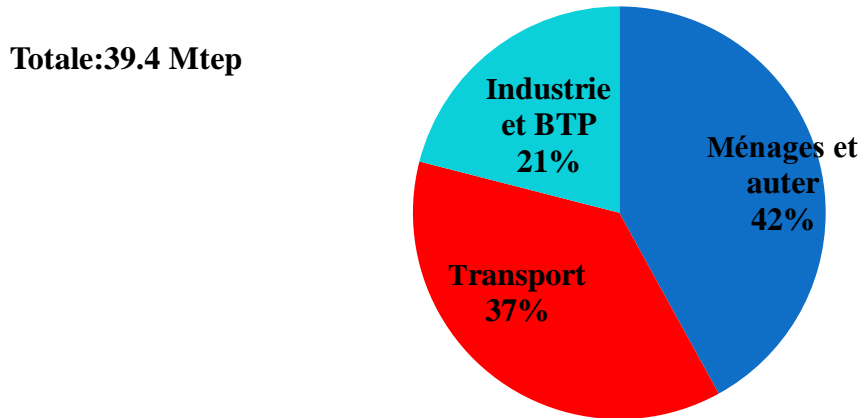


Figure I.2 : Consommation énergie final par secteur 2014 [7].

L'analyse de l'utilisation finale de l'énergie par secteur d'activité met en lumière la prépondérance du secteur des 'ménages et autres' (y compris agriculture), qui représente 42% contre 37% pour le transport et 21% pour l'industrie. Ceci reflète notamment l'amélioration du niveau de vie des citoyens [7].

Par secteur d'activité, l'évolution de la consommation finale en 2014 fait ressortir ce qui suit :

- La consommation du secteur "Industries et BTP" a connu une légère hausse 2.8% par rapport à l'année 2013 à 8.2 Mtep. En effet, la hausse de la consommation des sous-secteurs des matériaux de construction 3.4%, des industries manufacturières 7.3% et BTP 17.6% a largement compensé la baisse (-1.6%) de la consommation du sous-secteur «autres industries»;
- La consommation du secteur des "transports" s'est accrue de 5.7% en 2014, pour atteindre 14.6 Mtep, due essentiellement à la croissance du transport routier (0.74 Mtep)
- La consommation des "Ménages et autres", qui comprend également le secteur de l'agriculture, a augmenté de 0.9 Mtep par rapport à l'année 2013 pour atteindre 16.6 Mtep en 2014, tirée principalement par l'accroissement de la consommation du sous- secteur résidentiel (0.5 Mtep).

5 Une forte dépendance à l'égard des exportations d'hydrocarbure

5.1 Exportations de pétrole

En 2014, les exportations de pétrole de l'Algérie par gazoduc ont atteint 19267 k tep, Là où il était en 2011 estimé presque 20954 ktep. Elle se classe au 16 e rang mondial [4].

Tableau I.4 : Exportations pétrole brut et produits pétroliers en Algérie [8].

Année	1990	2000	2010	2011	2012
Exportations pétrole brut	33604	39843	40881	40163	38663
Exportations produits pétroliers	18221	22868	21516	20954	19267

5.2 Exportations de gaz naturel

En 2014, les exportations de gaz naturel de l'Algérie par gazoduc ont atteint 23.5 Mds m³, destinées surtout à l'Espagne : 111 Mds m³ et à l'Italie : 6.2 Mds m³. Ses exportations par voie maritime sous forme de GNL ont atteint 17.3 Mds m³, destinées surtout à l'Espagne : 4.9 Mds m³, à la France : 4.4 Mds m³ et à la Turquie : 4.1 Mds m³. Au total, ses 40.8 Mds m³ exportés la classent au 8^{ème} rang mondial [3].

Tableau I.5 : Exportations de gaz naturel en Algérie [5].

Année	1990	2000	2010	2011	2012	2014
Exportations (millions tep)	26.68	53.01	48.64	44.81	44.5	40.8

6 La problématique du réchauffement climatique

6.1 Dans le monde

Au niveau mondial, les émissions de dioxyde de carbone (CO₂) dues à l'énergie en 2012 sont estimées par l'AIE à 31 734 Mt, en progression de 51 % depuis 1990, dont 44 % produites par le charbon, 35 % par le pétrole et 20 % par le gaz naturel ; par secteur, 47 % étaient issues de l'industrie de l'énergie, 23 % des transports, 20 % de l'industrie, 6 % des ménages et 4 % des services et de l'agriculture. Les émissions de CO₂ par habitant en 2012 sont estimées à 4,51 tonnes dans le monde [9].

6.2 En Algérie

Les études d'atténuation des émissions de gaz à effet de serre (GES) réalisées en Algérie ont mis en évidence l'existence d'un potentiel assez important, estimé à 90 Millions de Tonnes de CO₂. Le Figure suivante, présente une répartition sectorielle de ce potentiel dont la majeure

quantité de CO₂ a été émise par le secteur de transport [12].

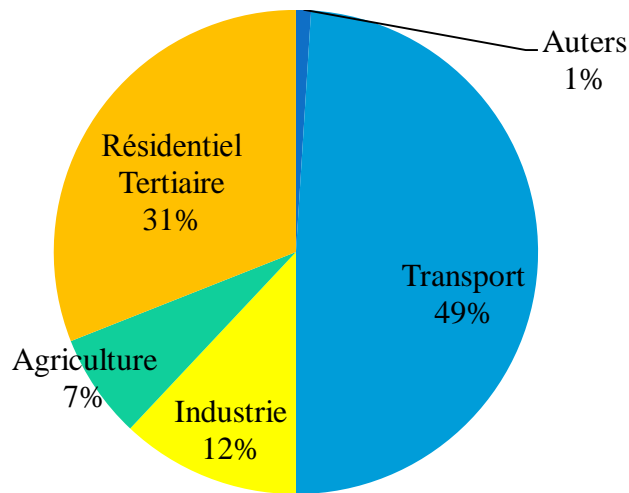


Figure I.3 : Le bilan des émissions par secteur en 2012 [10].

Les émissions dues à l'énergie finale consommée sont de 90 Millions de tonnes CO₂ soit :

- Un niveau d'émissions par habitant de 2.357 tCO₂;
- Un niveau d'émissions par tep consommée de 3,2 tCO₂;
- Un niveau d'émissions par Millions de DA produit de 0.117 tCO₂;

Les émissions totales dues à l'énergie primaire sont de 152.6 Millions de tCO₂ soit : 0% due a l'électricité ; 60% aux produits pétroliers ; 40% aux produits gazeux.

7 Situation de secteur de transport

Le transport en Algérie est diversifié vu la superficie de l'Algérie. Même si quelques régions algériennes demeurent encore isolées en raison de l'absence d'infrastructure routière, le réseau routier algérien demeure l'un des plus denses du continent africain, sa longueur est estimée à 108 302 km de routes (dont 76 028 km goudronnées) et plus de 3 756 ouvrages d'art. L'autoroute Est-Ouest de 1 216 km permet de relier la ville d'Annaba de l'extrême Est jusqu'à la ville de Tlemcen à l'extrême Ouest [11].

Le gouvernement algérien a des importants programmes pour mettre à niveau ce secteur, ce qui est une condition préalable essentielle pour l'Algérie d'entrer dans l'ère de la mondialisation.

Le secteur algérien des transports connaît un réel changement. De nombreux projets ont été achevés ou sont en cours de construction dans le but de rendre le secteur plus

efficace et efficace dans sa contribution au développement économique du pays (106,5 millions USD des investissements dans le secteur des transports et plus de 40 milliards de dollars depuis 1999) [11].

Tableau I.6 : Récapitulatif des infrastructures de transport [12].

Type d'infrastructure	Situation physique
Routes	118 306 km (RN, CW et CC)
Autoroutes	2 451 km
Aéroports	35 dont 13 internationaux
Voies ferrées	4 200 km opérationnels et 6 300 km en cours de réalisation (programme quinquennal 2010-2014)
Ports	40 ports dont 13 seulement destinés à l'activité commerciale

RN : route nationale ; **CW** : chemin de wilaya (route départementale) ; **CC** : chemin communal.

Donc le Situation du réseau de transport en Algérie comprend :

7.1 Transport ferroviaire

Le réseau des chemins de fer algérien est aujourd'hui parmi les plus modernes d'Afrique. Il sert au transport de personnes et de marchandises. L'ambition des pouvoirs publics est de connecter toutes les villes d'Algérie entre elles par le réseau ferroviaire. Actuellement ce réseau est de plus de 4 000 km [13].

Le réseau ferroviaire est estimé à 4 200 km en 2011, il connaît depuis peu une électrification au niveau de certains tronçons, ce qui doit conduire incessamment à l'installation de trains à grande vitesse qui devraient relier les villes les plus importantes du pays. Le trafic du réseau ferroviaire est géré par la Société nationale des transports ferroviaires (SNTF). Ce réseau s'étend sur 4 209 km et doté de plus de 200 gares couvrant surtout le nord du pays. Il est constitué de 2 888 km de voies normales dont [13] :

- 299 km de voies électrifiées;
- 305 km de voies doubles;
- 1 085 km de voies étroites.

Tableau I.7 : Longueur du Réseau Ferroviaire [14].

Année	1996	1999	2004	2005	2006	2008	2013
Chemins de fer (km)	4820	4820	3973	3973	3973	3973	4573

7.2 Metro & Tramway

7.2.1 Le métro d'Alger :

Est un réseau ferroviaire de transport urbain de type métro desservant la ville d'Alger. Quatre extensions d'une longueur totale de 29 km sont en cours de construction [13].

7.2.2 Le métro d'Oran :

Un avis d'appel d'offres national et international a été lancé par l'Entreprise du Métro d'Alger (EMA), le 12 septembre 2010 pour la désignation d'un bureau d'études pour la réalisation du métro d'Oran. Un bureau d'études espagnol, en l'occurrence SENER, a été retenu le 8 juillet 2012 pour la réalisation du métro d'Oran. Le tracé du futur métro partira de Haï Bouamama jusqu'au pôle universitaire de Belgaïd d'une longueur de 17 km et desservant 20 stations [15].

7.2.3 Tramway

Dans le cadre du plan quinquennal (2010-2014), l'Algérie a lancé un autre plan de développement et modernisation du transport en commun urbain ou interurbain circulant sur des voies ferrées, le Tramway.

7.2.4 Le tramway d'Alger :

C'est un système de transport en commun desservant l'agglomération d'Alger. En 2012, il comprend une ligne de 16,2 km et 28 stations et devrait s'étendre sur 23 km et comprendre 38 stations [15].

7.2.5 Le tramway de Constantine :

C'est un projet de transport en commun desservant l'agglomération de Constantine, il est en construction depuis 2008. Les premiers essais techniques du tramway de Constantine ont été effectués le 30 mai 2012, son tracé comprend une ligne de 9 km et 10 stations [15].

7.2.6 Le tramway d'Oran :

C'est un autre projet de transport en commun desservant l'agglomération d'Oran, il est le plus long du pays avec une distance globale de 48 km, il est en service depuis mai 2013.

Plusieurs villes comme Sidi Bel-Abbés, Batna, Ouargla, Mostaganem, Sétif et Annaba se doteront du tramway, il a été procédé dernièrement à l'élaboration d'études techniques de projets de tramways concernant ces six villes du pays et d'autres études appropriées seront entamées pour des projets de tramways dans huit autres wilayas. Un accord de partenariat a été signé le 14 novembre 2010 par l'entreprise du métro d'Alger (EMA), l'entreprise Ferroviaire et le groupe français Astome, pour l'assemblage de tramway au niveau du complexe Ferroviaire d'Annaba [13].

7.3 Transport aérien

L'Algérie compte 55 aéroports dont 36 ouverts à la circulation aérienne publique, dont 13 internationaux qui sont tous gérés par l'Établissement de gestion de services aéroportuaires. Le plus important est l'Aéroport d'Alger avec une capacité, depuis 2006, de 6 millions de passagers par an [13].

L'Algérie a développé son secteur du transport aérien afin d'en faire un véritable moyen d'intégration au niveau régional et international. Un budget de 60 milliards de dinars (600 millions de dollars) sera dépensé pour renouveler la flotte d'Air Algérie au cours de la période 2013-2017. L'objectif de l'opération est de permettre à l'entreprise d'arracher des parts de marché et de conquérir l'Afrique. Le réseau couvert par Air Algérie est de 96 400 km. Plus de trois millions de passagers et près de 20 000 tonnes de fret sont transportés chaque année par la société [15].

7.4 Transport maritime

L'économie de l'Algérie dépend de ses ports méditerranéens congestionnés. La livraison est essentielle à l'économie nationale avec la grande majorité des échanges commerciaux de l'Algérie se déplaçant à travers le réseau portuaire national. Le port le plus important en termes de trafic est Arzew à Oran, suivie par Skikda. Arzew a été développé avec un accent particulier sur les exportations pétrochimiques [13].

Pour le trafic de conteneurs, Alger est le port le plus important après Arzew, la manipulation près de 60% du trafic de conteneurs du pays. Alger est un port et de congestion

congestionnées suppléments sont régulièrement mises en œuvre par les compagnies maritimes. Les retards sont fréquents [13].

La Compagnie Nationale Algérienne de Navigation (CNAN) et Algérie Ferries sont des acteurs du transport maritime en Algérie. Plusieurs transbordeurs font la liaison des passagers vers les côtes européennes ainsi que le transport de marchandises à travers le monde [13].

7.5 Transport routier

Les routes sont le principal mode de transport en Algérie. On estime que 85% des marchandises et des passagers utilisent la route comme leur principal mode de transport. Le développement des routes suit essentiellement les modes d'habitat et le réseau est beaucoup plus développé dans la région côtière du nord où les activités économiques et des concentrations de population sont plus lourdes [13].

Le réseau routier algérien demeure l'un des plus denses du continent africain, d'une longueur de 108 302 km, répartie sur 76 028 km de routes nationales/départementales et 32 274 km de routes secondaires, le réseau routier est en plein développement grâce au programme de modernisation des transports routier et ferroviaire qui prévoit la réalisation de l'Autoroute Est-Ouest de (1 216 km) l'autoroute des hauts plateaux de (1 330 km), et la réalisation de 19 000 km de route, ainsi la finition de la route transsaharienne (nord-sud) [13].

7.5.1 Projet d'autoroute transsaharienne

L'Algérie sera traversée du Nord au Sud par la route transsaharienne. Cette route est promue par le gouvernement pour accroître le commerce entre les six pays traversés par la route transsaharienne (Algérie, Mali, Niger, Nigeria, Tchad et Tunisie) [15].

7.5.2 Projet d'autoroute des hauts plateaux

Considéré comme l'un des plus grands projets de travaux publics dans le monde et il est prévu que le projet contribuera de manière significative à la réduction de l'isolement des provinces de l'Est et de l'Ouest ainsi que de faciliter de meilleures relations avec le Maroc et la Tunisie [15].

- Longueur : 1330 km;
- Début des travaux 2009, achèvement en 2013;
- Coût du projet : quelque 11 milliards de dollars.

8 Conclusion

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons observé un manque d'efficacité énergétique, forte consommation intérieure, une économie rentière plus que productive, une forte dépendance aux recettes des hydrocarbures et un risque d'épuisement des réserves fossiles, cause du réchauffement climatique..., autant de points faibles de la politique énergétique actuelle de l'Algérie.

La deuxième partie de ce chapitre a été à l'évaluation de secteur de transport en Algérie, que est le plus grand secteur consomme les combustibles fossiles, surtout le transport routier (95%) [7].

L'Algérie doit développer en urgence un modèle de consommation énergétique, un modèle qui permettra de freiner la consommation d'énergie fossile et optimisera celle des énergies renouvelables fortement disponibles dans notre pays.

1 Introduction

En cette période où les changements climatiques commencent réellement à se faire sentir, où les ressources pétrolières s'épuisent, où les guerres et affrontements pour le pétrole font rage, où les inégalités entre riches et pauvres s'accroissent, et où finalement une crise mondiale et humanitaire se profile, quelle solution, quelle échappatoire reste-t-il à notre société pour sortir de ce marasme ?

La pile à combustible est présentée comme une technologie d'avenir et l'hydrogène comme l'un des vecteurs d'énergie alternatifs au pétrole. Mais qu'en est-il vraiment? L'hydrogène est-il la solution à toute la problématique de l'approvisionnement énergétique? Ou encore l'économie hydrogène n'en est-elle qu'une partie ou alors n'est-elle qu'une utopie, voire un prétexte, prôné par quelques scientifiques persuadés que la science et la technologie sauveront notre planète sans nécessiter un changement radical de nos modes de vie ? [16]

Nous commençons ce chapitre par décrire des généralités sur l'hydrogène comme étant le vecteur d'énergie pour l'avenir, puis nous rappelons les méthodes de production d'hydrogène comme l'élément le plus abondant, qui est lié à d'autres composants chimiques, nous allons également traiter des moyens de transport et de stockage. En fin, nous présentons leurs utilisations spécialement les véhicules à hydrogène et aussi nous citons certaines expériences qui ont commencé à exploiter l'hydrogène.

2 Propriétés de l'hydrogène

2.1. Caractéristiques de l'hydrogène

L'hydrogène est l'élément chimique le plus simple; son isotope le plus commun est constitué seulement d'un proton et d'un électron. De ce fait, c'est un atome univalent. 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 l'élément le plus abondant de l'Univers : 75 % en masse et 95 % en nombre d'atomes. Cet élément se trouve en grande quantité dans les étoiles et les planètes gazeuses. Relativement à son abondance dans l'univers, l'hydrogène est très rare dans l'atmosphère terrestre [16].

Sur Terre, l'hydrogène ne représente que 0,22 % des atomes, loin derrière l'oxygène (47 %) et le silicium (27 %). Il est rare également dans l'atmosphère terrestre, puisque le dihydrogène ne représente en volume que 0,55 ppm des gaz atmosphériques. Sur Terre, la source la plus commune d'hydrogène est l'eau, dont la molécule est constituée de deux atomes d'hydrogène et d'un atome d'oxygène [17].

L'hydrogène est néanmoins très abondant mais sous forme d'eau et dans la plupart des matières organiques. Sa molécule est la plus énergétique : 120MJ/kg, soit 2,2 fois le gaz naturel. L'hydrogène a un contenu énergétique de 39,4kWh/kg tandis que le charbon, selon sa forme, oscille dans la fourchette 7,8 - 8,7 kWh/kg, soit environ 5 fois moins par unité de masse. Il n'est ni polluant, ni toxique et sa combustion dans l'air ne génère que de l'eau.

C'est le plus léger des gaz, ce qui est un facteur positif vis-à-vis de la sécurité (grande vitesse de diffusion dans l'air). En conséquence, en dehors d'une situation dite "confinée" (c'est-à-dire emprisonné avec de l'air dans un volume fermé), l'hydrogène est moins dangereux que le gaz naturel. Néanmoins, la faible densité de l'hydrogène implique aussi une densité énergétique volumique moins favorable au transport et au stockage sous forme gazeuse, que pour le gaz naturel (facteur 4 à 200 bars, par exemple).

L'hydrogène a un large domaine d'inflammabilité dans l'air: 4 à 75% (contre de 5 à 15% pour le méthane), ce qui augmente les risques pour un gaz riche en hydrogène. Sa combustion thermique à haute température, en présence d'air, génère des oxydes d'azote. La flamme de l'hydrogène est à peine visible à l'œil nu, ce qui peut représenter un danger pour les secours intervenant en cas d'incendie, sa température est de 2300°C dans l'air. Ces conditions sont valables à températures et pression ambiantes, et varient en fonction de la pression, de la température et de la présence d'autres constituants inertes dans le mélange gazeux. L'énergie d'inflammation est très faible (10 fois plus faible comparativement aux autres hydrocarbures) : 0,02 MJ. Néanmoins, l'hydrogène a pour avantage de se diffuser très vite dans l'air: de ce fait, en cas de fuite, l'hydrogène s'échappe vers le haut et sa concentration diminue très rapidement, passant sous la limite inférieure d'inflammabilité; ceci représente un facteur de sécurité. Enfin, en raison de sa faible densité, l'hydrogène aura tendance à fuir par toutes les micro-couvertures possibles [16]. Les caractéristiques physico-chimiques de l'hydrogène sont reprises dans le tableau 1.

Tableau II.1 : Caractéristiques de l'hydrogène [18].

Propriété	Valeur numérique
PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	119 930 kJ/kg 33.33 kWh/kg
PCS (Pouvoir calorifique supérieur inclut l'énergie de la vapeur d'eau)	141 860 kJ/kg 39.41 kWh/kg
Densité gazeuse à 273K	0.0898 kg/Nm ³ (gaz naturel 0.6512 kg/Nm ³)
Chaleur spécifique (C _p) et (C _v) à 293K	14 266 J/kg. k / 10 300J/kg. K
Conductivité thermique du gaz	0.1897W/ (m. K)
Température de solidification	14.01K
Température critique	33.30K
Température d'auto inflammation dans l'air	858K (gaz naturel 813K)
Température de flamme dans l'air à 300K	2 318K (gaz naturel 2 148K)
Limites d'inflammabilité dans l'air (vol%)	4-75 (gaz naturel 5.3-15)
Limites de détonation dans l'air (vol %)	13-65 (gaz naturel 6.3-13.5)
Energie minimale d'inflammation (μJ)	20 (gaz naturel 290)
Suppression de détonation (mélange stœchiométrique)	14.7 bars (gaz naturel 16.8 bars)
Coefficient de diffusion dans l'air	0.61 cm ² /s (gaz naturel 0.16)
Vitesse de flamme dans l'air	260 cm/s (7 fois le gaz naturel)
Vitesse de détonation dans l'air	2.0 km/s (gaz naturel 1.8 km/s)
Mélange stœchiométrique dans l'air (vol)	29.53% (gaz naturel 9.48%)

2.1 L'hydrogène : vecteur d'énergie

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:

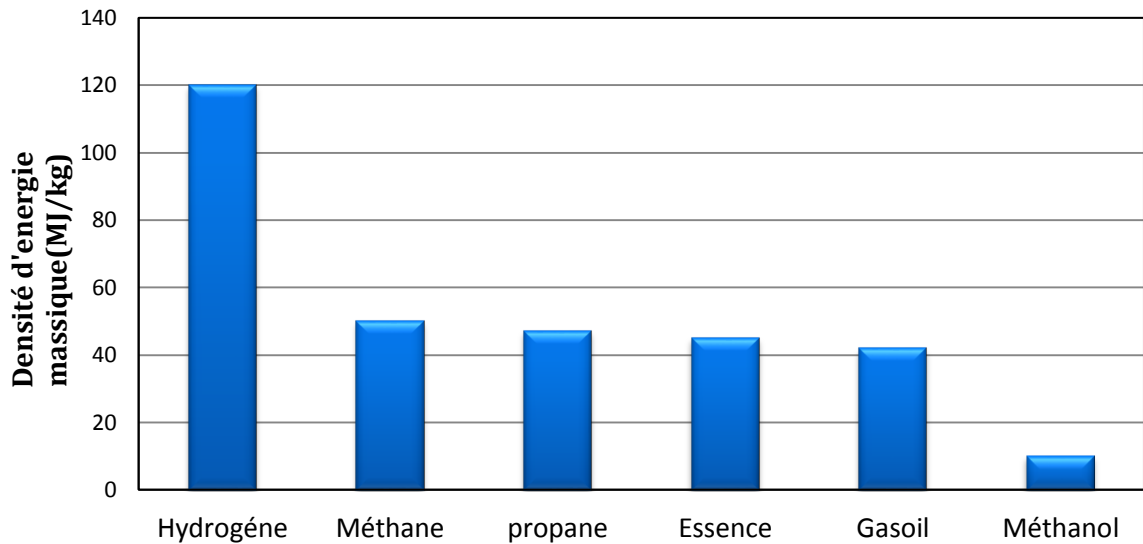


Figure II.1: Densité d'énergie massique pour différents vecteurs d'énergie [19].

3 Production de l'hydrogène

L'hydrogène n'existe pas dans la nature dans son état élémentaire, mais il doit être produit à partir de sources comme l'eau ou le gaz naturel ...etc. Idéalement, l'énergie fournie au système pour la production d'une quantité donnée d'hydrogène doit être égale à l'énergie qu'est capable de restituer cette quantité. Malheureusement, des pertes énergétiques sont toujours associées aux procédés d'élaboration de l'hydrogène. Il existe plusieurs types de technologies pour la production d'hydrogène.

3.1 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 CO_2 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.

3.1.1 Hydrogène du gaz naturel

Il existe trois procédés chimiques différents qui permettent de produire de l'hydrogène à partir de gaz naturel: le méthane de reformage à la vapeur, oxydation partielle et le reformage auto thermique [20].

Le processus de reformage à la vapeur est une technologie de pointe d'aujourd'hui (environ 95% de l'hydrogène produit aujourd'hui dans les États-Unis se fait via le méthane de

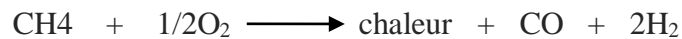
reforming à la vapeur). Il convertit le méthane et la vapeur d'eau en hydrogène et en monoxyde de carbone dans une réaction endothermique.



La chaleur nécessaire est généralement fournie par la combustion d'une partie du méthane de gaz d'alimentation. Une température de 700 à 850 ° C, et sous une pression de 3 à 25 bars, sont requises pour la réaction de se produire. Le CO produit peut être en outre converti en CO₂ et d'hydrogène par la réaction de conversion eau-gaz :



Dans le processus d'oxydation partielle de gaz naturel, de l'hydrogène est produit par la combustion partielle du méthane (propane et du méthanol peut être utilisé en variante) avec de l'oxygène :



La réaction étant exothermique, aucun chauffage externe du réacteur est nécessaire et une conception plus compacte possible. Le CO produit est en outre converti en un atome d'hydrogène tel que décrit précédemment [20].

3.1.2 Hydrogène à partir du charbon

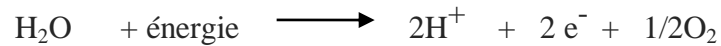
Bien qu'il soit considéré comme un combustible sale en raison de ses fortes émissions à effet de serre, le charbon peut être utilisé pour produire de l'hydrogène propre. Coal pourrait alors devenir une source majeure de l'hydrogène propre. Alors que les ressources de charbon seront largement survivre ressources pétrolières et du gaz naturel, le développement de technologies propres du charbon peut conduire à haute énergie des rendements de conversion et de faibles émissions par rapport à la centrale classique au charbon [20].

3.2 Production d'hydrogène par électrolyse

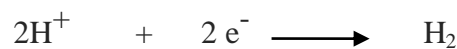
Jusqu'aux années 50, l'électrolyse de l'eau était utilisée pour la production d'hydrogène et d'oxygène. Aujourd'hui, l'électrolyse fournit seulement un petit pourcentage de l'hydrogène du monde, lequel est fourni aux applications qui exigent de petits volumes d'hydrogène de grande pureté. Du point de vue de la réaction électrochimique, il s'agit de la réaction inverse à celle qui a lieu dans une pile. La cellule électrolytique est formée de deux électrodes, une cathode et une anode, d'un électrolyte et d'un générateur de courant. L'électrolyte est soit une membrane polymère échangeuse de protons soit une membrane céramique conductrice d'ions

oxygène [21]. Dans le cas d'une membrane échangeuse de protons, les réactions sont les suivantes :

A l'anode, des électrons sont formés suite à l'oxydation de l'eau en oxygène et en protons (oxydation) :



A la cathode, les protons, passés à travers la membrane, se réduisent avec les électrons pour donner de l'hydrogène (réduction):



Ainsi, grâce à du courant, l'eau est dissociée en hydrogène et en oxygène. Etant donné que l'enthalpie de dissociation de l'eau est de 285kJ/mole, il faut nécessairement un apport d'énergie électrique.

Désormais, l'électrolyse est associée à une future utilisation des énergies renouvelables. Cela pourrait être intéressant au vu de la non-simultanéité de la production par ces procédés avec les besoins des industriels et des individus. Une autre possibilité réside dans l'utilisation de l'électricité produite par des centrales nucléaires, et plus particulièrement lors des heures creuses. L'hydrogène permettrait ainsi le stockage de l'électricité sous forme chimique, et une réutilisation ultérieure lorsque les besoins se font sentir. En outre, le rendement de l'électrolyse est en pratique de l'ordre de 65%, bien que, théoriquement, il soit possible d'atteindre 80 ou 85% [21].

3.3 Production d'hydrogène par nucléaire

Une autre possibilité de production d'hydrogène réside dans le nucléaire. Depuis quelques années, des chercheurs étudient des réacteurs nucléaires dits de 4^{ème} génération. Non seulement plus sûrs, ils permettront une moindre consommation de combustible nucléaire, une production plus faible de déchets mais également en plus de la fourniture d'électricité, la production d'hydrogène. Les rendements devraient être de l'ordre de 50 %. Aujourd'hui, une dizaine de pays travaillent sur cette innovation technologique : la France, les USA, le Japon, le Royaume-Uni, la Suisse, l'Afrique du Sud, l'Argentine, le Brésil, le Canada et la Corée du Sud. En outre, au total, six nouvelles technologies de réacteur sont à l'étude : un réacteur refroidi avec de l'eau supercritique, un réacteur à

neutrons rapides à refroidissement avec au choix sodium liquide ou alliage de plomb liquide (Figure II.2 (a)). Un réacteur à gaz à très haute température et un réacteur à sels fondus (Inel, 2010). Le CEA a choisi de retenir en particulier le réacteur à gaz à haute température (1100°C), noté VHTR (Figure I.2 (b)).

Le haut niveau de température permet la décomposition de l'eau en hydrogène et en oxygène. S'agissant du Japon et des USA, ils se tournent plutôt vers le réacteur à refroidissement au sodium liquide. Néanmoins, cette technologie ne serait commercialement disponible que vers 2030-2040. Quant au projet ITER de fusion nucléaire également productrice d'hydrogène, ses retombées ne sont attendues que pour la fin du siècle Ryland et al. 2007 [21].

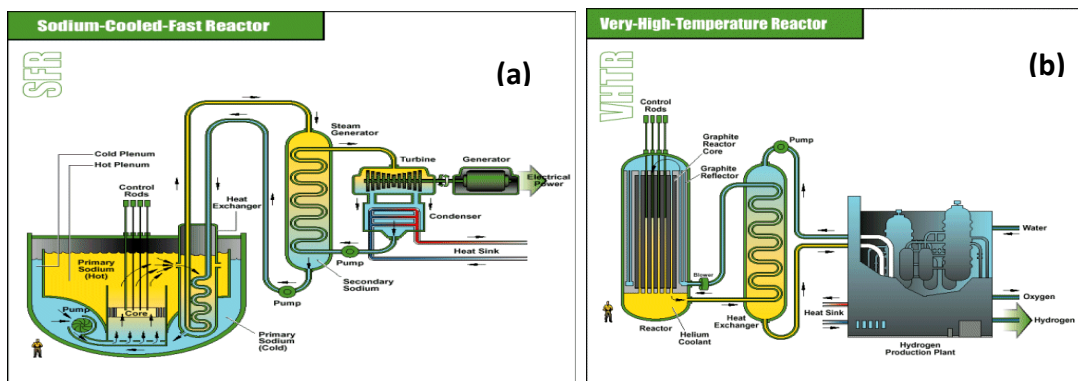


Figure II.2: Réacteurs nucléaires pour la production de l'hydrogène (Inel, 2010)

(a) Réacteur à refroidissement au sodium liquide (b) Réacteur à gaz à haute température

3.4 Production d'hydrogène par biomasse

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 [22].

Parce que les ressources de la biomasse consomment du CO₂ de l'atmosphère dans le cadre de leur processus de croissance naturel, la production d'hydrogène à partir de la gazéification de biomasse est neutre en termes d'émissions de gaz à effet de serre. Afin de convertir la biomasse en hydrogène, un contenant de l'hydrogène du gaz de synthèse est normalement produit suivant un processus similaire à la gazéification du charbon, comme la

gazéification à la vapeur, la gazéification à flux entraîné et des concepts plus avancés tels que la gazéification en eau supercritique, l'application de thermochimique cycles, ou la conversion d'intermédiaires comme l'éthanol. Gazéification et la pyrolyse sont des technologies à moyen terme les plus prometteuses pour atteindre la commercialisation. Gazéification de la biomasse est un domaine R&D partagé entre la production d'hydrogène et la production de biocarburants.

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 [20].

3.5 Production d'hydrogène par énergie renouvelable

De nombreux auteurs ont convenu que ni combustibles fossiles, la biomasse, ou nucléaire ne peut pas satisfaire les besoins en électricité existants et ne peut pas fournir de l'énergie de la neutralité climatique suffisante pour voies probables pour la production d'hydrogène avenir à long terme. La biomasse, hydraulique et géothermique même leur matière première peut être estimée par la précision, mais ils ont un potentiel limité et ils ne sont pas toujours neutres pour le climat [22].

Le seul moyen restant pour produire de l'hydrogène est alors les énergies intermittentes, en particulier les énergies solaire et éolienne. Contrairement à ces méthodes de production, les énergies renouvelables sont une source d'énergie souhaitée pour la production d'hydrogène en raison de leur diversité, régionaliste, l'abondance et le potentiel de durabilité. L'électricité produite à partir de sources renouvelables peut être transformé en hydrogène en utilisant le procédé d'électrolyse. En fait, environ 55 kWh d'électricité sont nécessaires pour libérer 1kg de l'hydrogène à partir de 9 kg d'eau par électrolyse.

Electrolyse entraînée par l'énergie renouvelable peut être une option pour une production d'hydrogène durable. En fait, l'électricité produite par les systèmes d'énergie renouvelable est transférée au système d'électrolyseurs pour la production de l'hydrogène par

électrolyse en faisant passer l'électricité à travers deux électrodes dans l'eau. Un avantage de l'électrolyse de l'eau est que de nos jours; il est compatible avec une grande variété de technologies d'énergies renouvelables disponibles à savoir, solaire, hydraulique, éolienne, géothermique, etc. [22].

4 Transport de l'hydrogène

L'émergence de systèmes de transport de l'énergie de l'hydrogène est une partie primordiale de la réussite économique de l'hydrogène. La partie de transport jouera le rôle entraîné dans la construction d'un marché de l'hydrogène dans des territoires différents. Il facilitera le transport de l'hydrogène en base territoriale et entre les différents territoires. ont indiqué que le choix du mode le plus bas coût de livraison (camions à gaz comprimé, camions liquides cryogéniques ou gazoducs) dépend des caractéristiques géographiques et des marchés spécifiques (par exemple, la population de la ville et de rayon, densité de population, la taille et le nombre des stations de ravitaillement et la pénétration du marché des véhicules à pile à combustible). Selon de nombreux auteurs, les principaux facteurs qui influent sur le choix du mode de transport de l'hydrogène sont l'application, la quantité à transporter, la densité de la demande, et la distance entre le site de production les points de livraison [22]. Méthodes de distribution possible sont les suivantes:

4.1 Pipeline

L'hydrogène peut être fourni par l'intermédiaire d'un réseau de distribution de pipeline pour lequel de multiples fournisseurs et consommateurs sont attachés. Cela peut se faire par deux formes qui sont liquides et gazeux. Systèmes de canalisation d'hydrogène liquide sont techniquement possibles. Cependant, en raison de très haute capitale investissements impliqués dans la mise en place de ces réseaux de pipelines, les exigences matérielles et minimisation bouillir-off, etc., il ne peut pas être une option pour la distribution de l'hydrogène liquide de l'autoroute stations-service dans un avenir proche. D'autre part, les systèmes de pipelines gazeux comprimés impliquent un investissement en capital plus faible que liquides réseaux de pipelines d'hydrogène [23].

Néanmoins, pour un petit nombre de stations-service, l'établissement d'un pipeline ne serait pas économiquement viable. Pour construire un pipeline, une demande stable avec des infrastructures à grande échelle est nécessaire. Seulement de cette manière, les coûts de transmission faibles peuvent être atteints. Cependant, si le pipeline est pensé pour une

application à petite échelle, alors le coût de pipeline augmente considérablement et provoque les prix des carburants augmentent. Par conséquent, le calcul des coûts détaillés doivent être effectuées avant de décider d'installer un pipeline [23].

4.2 Rail

Distribution de l'hydrogène peut également être effectuée par des voies ferrées. Réservoirs cryogéniques cylindriques tels que ceux utilisés pour le camionnage sont adoptées pour le transport ferroviaire. Ils ont de plus grandes capacités et peuvent transporter jusqu'à 9.100 kg d'hydrogène, avec des taux évaporation estimée à 0,2% par jour .Toutefois, en raison de l'écart entre l'infrastructure ferroviaire et les stations-service et les coûts élevés de transport liés avec le train, il est peu probable que cela deviendra une option pour la distribution de l'hydrogène [23].

4.3 Navire

Le transport intercontinental d'hydrogène sera effectué sous forme utilisant liquides navires. A cet effet, les navires spécialisés avec des réservoirs appropriés et des installations portuaires sont conçus. Transport de l'hydrogène gazeux par bateau n'est économiquement pas réalisable puisque la quantité transportée est faible par rapport à la zone qu'il couvre sur le navire. Cependant, certains potentiels pétroliers d'hydrogène à grande échelle ont été étudiés en détail dans le cadre du programme de recherche du réseau mondial de l'énergie. En 1998, la principale conclusion d'une première étude de trois ans était qu'un navire-citerne d'une capacité de 200.000 m³ ou environ 14 millions de kg d'hydrogène liquide pourrait être construit à l'aide dans une large mesure la conception de base et les concepts en cours d'utilisation pour le transport de GNL [23].

4.4 Camion

Aujourd'hui, la méthode la plus courante pour le transport de l'hydrogène se fait par camions. L'hydrogène peut être transporté sous forme gazeuse en utilisant des cylindres haute pression, remorques porte-tubes et sous forme liquide dans des réservoirs cryogéniques.

Si de l'hydrogène est transporté sous forme de gaz, il doit être comprimé à une pression très élevée afin de maximiser les capacités du réservoir. Bouteilles de gaz à haute pression par exemple sont classés aussi haut que 200 bars et détiennent environ 1,8 kg d'hydrogène, mais sont très coûteux à manipuler et à transporter.

Remorque tube, constitué de plusieurs cylindres en acier montés sur un cadre de protection peuvent être configurés pour contenir de 63 à 460 kg d'hydrogène, en fonction du nombre de tubes. Les pressions de fonctionnement sont 20-60 M Pa.




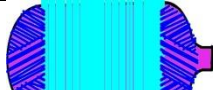




L'hydrogène liquide est transporté en utilisant des réservoirs isolés à double paroi spéciales pour empêcher l'ébullition de l'hydrogène liquide. Certains liquides pétroliers utilisent également des écrans thermiques de l'azote pour refroidir la paroi extérieure de la cuve d'hydrogène liquide pour minimiser le transfert de chaleur supplémentaire. Les camion-citerne peuvent transporter 360-4,300 kg d'hydrogène liquide. Taux évaporation pour camions sont de 0,3% -0,6% / jour. Le principal problème avec le transport d'hydrogène liquide serait les exigences d'isolation spécialisées et les pertes de pompage et ré-refroidissement de l'hydrogène liquide le long du chemin [23].

5 Stockage de l'hydrogène

5.1 Stockage gazeux

Le stockage de l'hydrogène sous forme gazeuse est la méthode la plus commune. Pour augmenter sa densité d'énergie volumétrique, le gaz d'hydrogène est comprimé sous haute pression allant jusqu'à 700 bar. Ceci impose d'une part, une perte d'énergie de 20% lors de la compression et de sévères exigences en terme de sécurité, et d'autre part, des pénalités en terme de coût liées à la quantité et le prix du matériau composite à utiliser pour le renforcement de la structure du réservoir de stockage. Par conséquent, les recherches se concentrent sur le développement de matériaux composites moins chers sans compromettre les capacités volumétrique et gravimétrique du réservoir. Deux approches sont suivies pour améliorer les performances de cette technique: l'adaptation de la forme du réservoir généralement cylindrique afin d'exploiter au maximum l'espace restreint dans le véhicule, et la compression de l'hydrogène à 77 K, température de l'azote liquide, permettant ainsi de stocker plus de gaz dans le même volume [23].

Tableau II.2 : Les différents types de réservoirs gazeux [23].

TYPE	I	II	III	IV
Schéma				
Réalisation				

Pour chaque type de réservoir, le choix de l'enveloppe (liner) en contact avec l'hydrogène est de première importance. Dans le cas du Type I, les contraintes mécaniques sont directement reprises par le liner ; un matériau à grande limite élastique sera donc privilégié (Acier). En revanche, dans le cas des réservoirs de type III et IV, le liner sert de barrière à hydrogène. Un matériau peu perméable à l'hydrogène sera alors préféré (Aluminium dans le cas de type III).

5.2 Stockage liquide

L'hydrogène est transformé de son état gazeux à l'état liquide en le refroidissant à une température de 20 K sous pression atmosphérique. Bien que la capacité volumétrique de l'hydrogène à cet état soit supérieure à celle à l'état gazeux (70 kg/m³ comparée à 39 kg/m³ pour le stockage à 700 bar), stocker l'hydrogène à cette basse température résulte en des pertes thermiques inévitables et une évaporation journalière de l'hydrogène stocké, ramenée à 1% par jour pour un système super-isolé. L'inconvénient majeur du stockage liquide est l'énergie requise pour la liquéfaction d'hydrogène, représentant 30% de son pouvoir calorifique inférieur, ce qui pénalise gravement le rendement global de ce mode de stockage [24].

5.3 Stockage solide

Le stockage de l'hydrogène sous une forme solide, c'est-à-dire conservé au sein d'un autre matériau, est aussi une piste de recherche prometteuse. Les méthodes de stockage de l'hydrogène sous forme solide sont des techniques mettant en jeu des mécanismes d'absorption ou d'adsorption de l'hydrogène par un matériau.

Un exemple est la formation d'hydrures métalliques solides par réaction de l'hydrogène avec certains alliages métalliques. Cette absorption résulte de la combinaison chimique réversible de l'hydrogène avec les atomes composant ces matériaux. Les matériaux parmi les plus prometteurs sont les composés à base de magnésium et les alanate.

Seulement une faible masse d'hydrogène peut être stockée dans ces matériaux, c'est pour l'instant l'inconvénient de cette technologie. En effet, les meilleurs matériaux permettent à ce jour d'obtenir un rapport poids d'hydrogène au poids total du réservoir ne dépassant pas 2 à 3%.

Avant d'envisager des applications à grande échelle, il faut aussi maîtriser certains paramètres comme la cinétique, la température et la pression des cycles de charge et décharge de l'hydrogène dans ces matériaux [25].

Une pastille de MgH_2 contenant 600 litres d'hydrogène est soumise à une chaleur intense (chalumeau) pendant 5 minutes. La pastille ne prend pas feu, ni explose. Cela prouve la sécurité liée au stockage d'hydrogène sous forme solide [26].

6 Véhicule à hydrogène

6.1 Définition

La notion de véhicule à hydrogène désigne tout moyen de transport qui utilise une transformation chimique de l'hydrogène comme énergie de propulsion. Cette appellation englobe des appareillages du domaine de l'aérospatiale (comme les fusées) ou du domaine militaire (comme des sous-marins à hydrogène), même si l'usage courant renvoie plutôt au monde des transports [27]. Le véhicule à hydrogène est dit (décarbonné) et peut faire partie des véhicules propres.

6.2 Principe de fonctionnement

6.2.1 Moteur à hydrogène

Le moteur à hydrogène utilise le principe de la combustion du dihydrogène (H_2) et du dioxygène (O_2) pour laisser comme produit de l'eau (H_2O) et de l'énergie (l'énergie dégagée par la combustion d'un kilogramme d'hydrogène équivaut à celle de 3 kilogrammes d'essence) [27].

6.2.2 Moteur à explosion

Il s'agit d'une réaction explosive qui actionne un piston de la même manière qu'avec l'essence ou le gazole. La réaction chimique est la suivante :

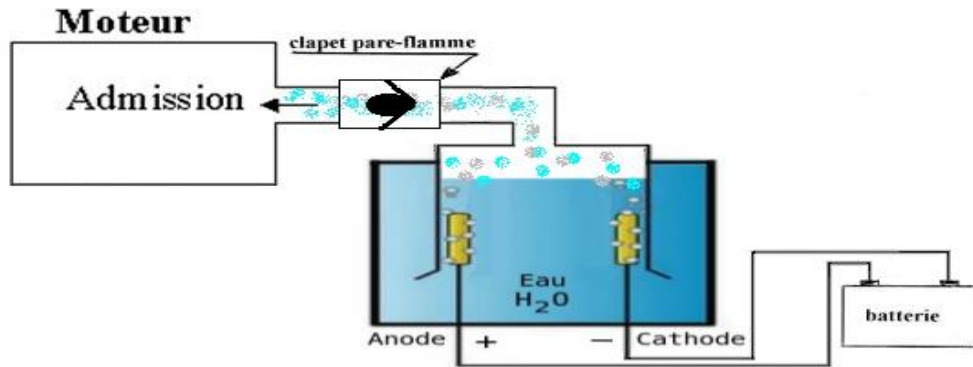


Figure II.3 : Principe de fonctionnement moteur à hydrogène [27]

6.2.3 Voiture à hydrogène

Le principe de fonctionnement de la voiture à hydrogène est celui de la pile à combustible et de la motorisation électrique. La pile à combustible oxyde le dihydrogène contenu dans un réservoir avec le dioxygène de l'air, produisant ainsi de l'électricité et de la vapeur d'eau. Une voiture à hydrogène est donc une voiture électrique qui produit sa propre électricité.

Le rendement du couplage moteur électrique et pile à combustible à hydrogène est à peu près le double de celui d'un moteur thermique conventionnel (20-25 %) [28].

6.3 La pile à combustible

Les piles à combustible sont des générateurs d'électricité qui transforment l'énergie d'une réaction chimique en courant électrique de façon continue.

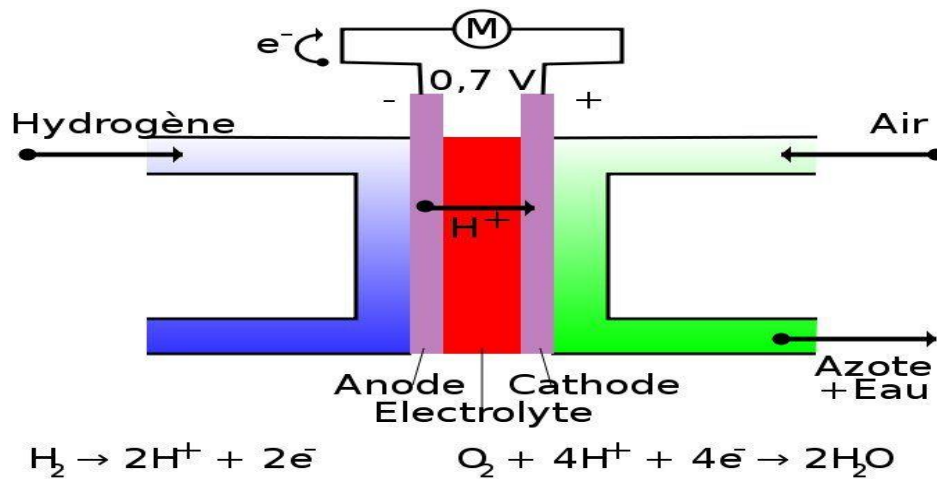


Figure II.4 : La pile à combustible [28].

6.4 Les avantages des piles à combustible

6.4.1 Faible pollution dans l'environnement

L'émission dégagée par un véhicule équipé d'une pile à combustible est quasiment nulle. En effet, le système en lui-même n'émet pas de CO_2 mais c'est dans la fabrication de l'hydrogène que l'on dégage des éléments polluants [29]. L'ensemble de la pollution émise serait 97% moins élevée qu'un véhicule traditionnel à essence.

6.4.2 Rendements (point de vue Automobile)

La solution technologique du véhicule hybride diesel-électricité est beaucoup plus avantageuse que les moteurs traditionnels, mais le système PAC à hydrogène (méthane) peut être seulement 3% moins performant qu'une combinaison hybride évaluée à son meilleur rendement [29].

6.4.3 Silencieuse

La base de la pile n'émet aucun bruit, seuls les équipements qui la compose peuvent être audibles (ventilateurs, pompes, compresseurs). Le tout reste très silencieux [29].

6.4.4 Fiabilité et durée de vie

Aujourd'hui, nous n'avons pas encore assez de recul sur la fiabilité des systèmes à PAC, mais une enquête d'experts, parue sur le site « European Commission Mobility & Transport », souligne que 400 véhicules roulent actuellement dans le monde, qu'ils ont parcouru 15 millions de km et ont effectué sans problème 80 000 pleins [29].

6.4.5 Combinaison avec batterie

La combinaison hybride d'une pile à combustible avec une batterie est la technologie la plus performante en termes de rendement. Le principe est simple, la batterie est branchée en aval comme accumulateur de courant, elle couvre les besoins en énergie et peut donc livrer des courants importants pour le démarrage et les consommations de pointe, la pile à combustible branchée en amont comme générateur de courant, charge en continu la batterie [29].

7 Travaux mondiaux

7.1 En France

La Banque publique d'investissement (BPIFrance) a annoncé en juillet 2015 sa participation au financement du projet de développement d'une chaîne de traction hydrogène pour véhicules lourds baptisé Hytrac, à hauteur de 10,8 millions d'euros sur les 26 millions de coût total. Ce projet cible les bus, camions de livraison ou encore engins de chantier et appartient au programme des investissements d'avenir. Il repose sur une pile à combustible produisant de l'électricité à partir d'hydrogène stocké dans le véhicule, avec une autonomie plus importante que les solutions basées sur des batteries. Hytrac réunit de nombreuses expertises françaises sur l'hydrogène, notamment Symbio FCell sur la pile à combustible, Green GT pour le groupe motopropulseur et McPhy Energy sur la production d'hydrogène par électrolyse et le stockage. Tronico, spécialiste de l'électronique de puissance, est le chef de file du projet, qui entend proposer ses solutions dès 2018 [30]

Dans le cadre du projet de Nouvelle France industrielle, revisité par Emmanuel Macron en mai 2015, un groupe sur l'hydrogène a été mis en place, piloté par Florence Lambert, du CEA, avec pour objectif de parvenir à déployer 100 stations de recharge sur le territoire français à l'horizon 2018. Plutôt que de cibler un marché de masse, les industriels visent d'abord une utilisation plus professionnelle : véhicules de livraisons, taxis, flottes de sociétés. Le principal obstacle est le coût de l'infrastructure (1 million d'euros par station), du transport et stockage de l'énergie. Des industriels misent aussi sur la complémentarité entre l'électrique et l'hydrogène : Renault propose depuis l'automne 2014 des utilitaires Kangoo électriques dotés d'une pile à combustible qui fonctionne comme un prolongateur d'autonomie [31]

Le 5 octobre 2015 à Bordeaux, a été présenté au grand public « Alpha », le premier vélo à assistance électrique (VAE) fonctionnant à l'hydrogène et fabriqué en série

Le conseil départemental de la Manche a été la première collectivité publique française à s'équiper d'une station-service et d'une flotte de véhicules hydrogène

7.2 En Allemagne

Le gouvernement allemand s'est fixé un ambitieux objectif pour 2020 : disposer de 1 million de véhicules électriques, en misant notamment sur la pile à combustible. Une initiative a été lancée en 2008 pour favoriser l'usage de l'hydrogène dans l'économie, notamment dans les transports. Une enveloppe de 700 millions d'euros d'argent public, couplée à une somme identique venant de l'industrie, a été investie entre 2008 et 2015, une bonne moitié de la somme étant dédiée à des projets dans la mobilité. Une enveloppe supplémentaire de 160 millions d'euros pour les années 2016 à 2018 est déjà budgétisée. Mais les progrès sont encore très modestes : le parc automobile équipé de cette technologie est à peine de 100 véhicules outre-Rhin en septembre 2015, et le nombre de stations de recharge à hydrogène, implantées dans les grandes villes n'est encore que de 19 au début septembre 2015 et devrait atteindre 25 fin 2015, alors que l'objectif des pouvoirs publics était de 50 stations fin 2015 ; un parc de 400 stations est visé pour 2023 ; mais les constructeurs ne proposent encore qu'un modèle : la Mercedes Classe B ; Mercedes a repoussé en 2017 le lancement d'un second modèle ; Toyota commence à commercialiser sa Mirai en Europe [32]

7.3 Aux États-Unis

Pour son premier discours sur l'état de l'Union, en 2003, George W. Bush avait parié sur la voiture à hydrogène. Douze ans et 1,5 milliard de dollars de subventions plus tard, les premières voitures à hydrogène font leur apparition sur le marché américain. Elles sont surtout le fait des constructeurs asiatiques : Hyundai avec sa Tucson et Toyota avec sa Mirai. La Californie a montré la voie : d'ici 2025, les constructeurs devront vendre au moins 15 % de véhicules propres. Le « Golden State » a par ailleurs choisi de promouvoir particulièrement la voiture à hydrogène, avec un système de crédits de CO₂ et un bonus à l'achat deux fois plus élevé que pour la voiture électrique. L'état finance enfin la construction de 100 stations de chargement d'hydrogène, dont 50 à la fin 2016, pour un total de 200 millions de dollars. Le département de l'Énergie fédéral investit depuis quinze ans dans l'hydrogène, et consacre aujourd'hui 100 millions de dollars par an dans les piles à combustible ; ses projets ont permis de réduire de 50 % le coût des piles à combustible servant au transport depuis 2006, de doubler leur autonomie, et de diviser par cinq la quantité de platine utilisée ; il cherche

désormais à réduire l'empreinte carbone de ces véhicules, en produisant l'hydrogène à partir de sources renouvelables, comme l'eau ou le vent [33].

8 Conclusion

Dans ce chapitre, les différentes technologies de production, d'utilisation, de distribution et de stockage de l'hydrogène ont été décrites, qui peut être utilisés dans le développement d'une infrastructure future. Plusieurs exemples de projets et tentatives d'économies basées sur l'hydrogène ont été exposés.

Si nous ne regardons que du point de vue de l'utilisation, l'hydrogène semble être la solution miracle pour sortir de la crise énergétique et environnementale actuelle. En effet, l'hydrogène semble inépuisable et est partout sous forme d'eau, il peut donc être produit dans tous les pays, ce qui résout les tensions économiques et sociopolitiques entre les pays. De plus, il ne crée a priori aucune pollution.

1 Introduction

Face aux préoccupations environnementales de plus en plus pressantes, telles que la maîtrise des rejets de gaz à effet de serre, et face à l'épuisement annoncé des réserves d'énergies fossiles, l'hydrogène obtenu à partir des énergies renouvelables est perçu comme un vecteur énergétique prometteur [34].

Dans ce chapitre, nous proposons une étude rétrospective du secteur de transport routier en Algérie, nous décrivons le développement des véhicules et la consommation de carburant et les émissions des gaz à effet de serre. En utilisant des taux de croissance annuel nous effectuons une étude prospective pour déterminer la distribution spatio-temporelle de la demande en hydrogène dans le secteur de transport routier en Algérie à l'horizon 2045.

Ensuite le déploiement de la chaîne logistique de l'approvisionnement de l'hydrogène sera discuté en termes de potentiel de la production de l'hydrogène à partir de l'énergie solaire, ainsi que le nombre de stations-service à hydrogène nécessaire pour le ravitaillement des véhicules à hydrogène pour chaque période du temps. Toutes les étapes du travail ont été effectuées par la combinaison des modèles techniques avec des données spatiales dans un Système d'Information Géographique (SIG).

Enfin, nous développons des scénarios afin de déterminer l'impact environnemental avant et après l'intégration de l'hydrogène comme un carburant dans le secteur de transport routier.

2 Etude rétrospective du secteur de transport routier en Algérie

Étude rétrospective signifie généralement de prendre un regard rétrospectif sur les événements qui ont déjà eu lieu pour comprendre comment l'évolution d'un phénomène particulier. Dans ce chapitre nous effectuons un aperçu rétrospectif sur le transport routier.

2.1 Evolution du parc automobile national

Dans notre étude, nous avons collecté les données de nombre véhicules à la fin de chaque période à partir des rapports de l'Office National des Statistique [35], pour les années allant de 1996 à 2013. Les résultats sont présentés dans le Tableau suivant :

Tableau III.1 : Evolution du parc automobile en Algérie.

Année	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003
Véhicules (million)	2.7	2.7	2.8	2.8	2.91	2.93	2.97	3.02
2004	2005	2006	2007-	2009	20010	2011	2012	2013
3.107526	3.2110	3.40229	3.7	4.17182	4.31460	4.51392	4.81	5.12

A partir de données présentées dans le tableau, nous remarquons que le nombre de véhicules en Algérie ne cesse pas d’augmenter. Dont le taux d’augmentation du parc pour la période 1996-2003 est un peu faible (1.3%) par rapport aux dernières années (à partir de 2008). Nous remarquons qu’il y a un fort développement de ce parc avec un taux d’augmentation de (6.71%). Pour l’année 2015, le parc automobile en Algérie atteint 5 millions véhicules.

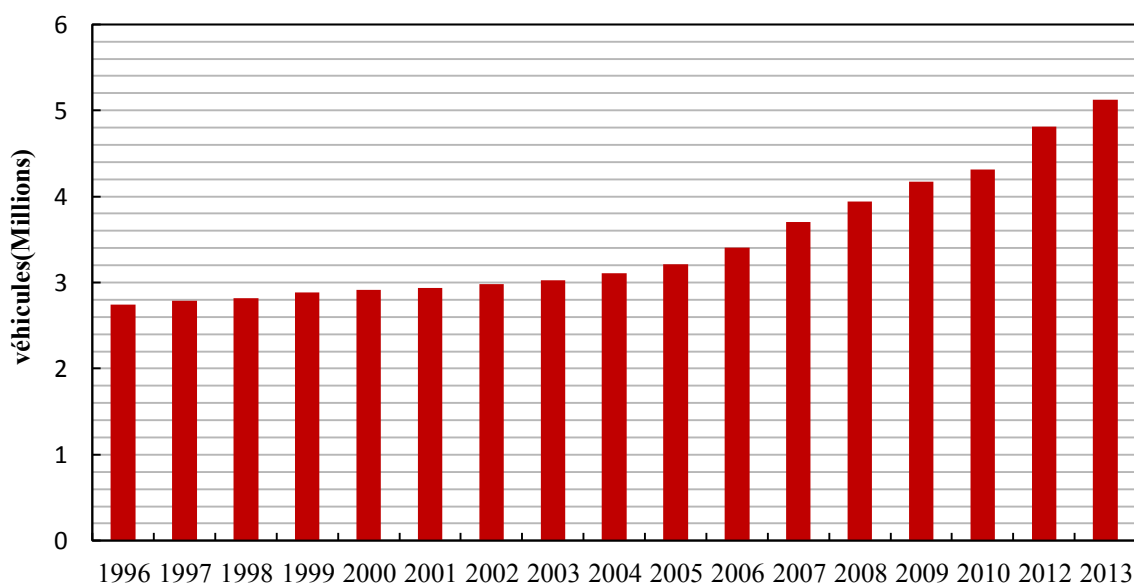


Figure III.1 : Croissance de nombre de véhicules en Algérie de 1996-2013 [35].

2.2 Consommation énergétique du parc automobile

Nous savons tous que les véhicules consomment généralement un type spécifique de carburant. En utilisant les statistiques du ministère de l’Energie et des Mines [7] et exactement ceux de secteur des transports pour estimer la consommation de trois carburants (Essence, Gasoil, GPL) consommés par les véhicules, par rapport à la consommation totale du secteur des transports. Tout ceci est montré sur la figure suivante.

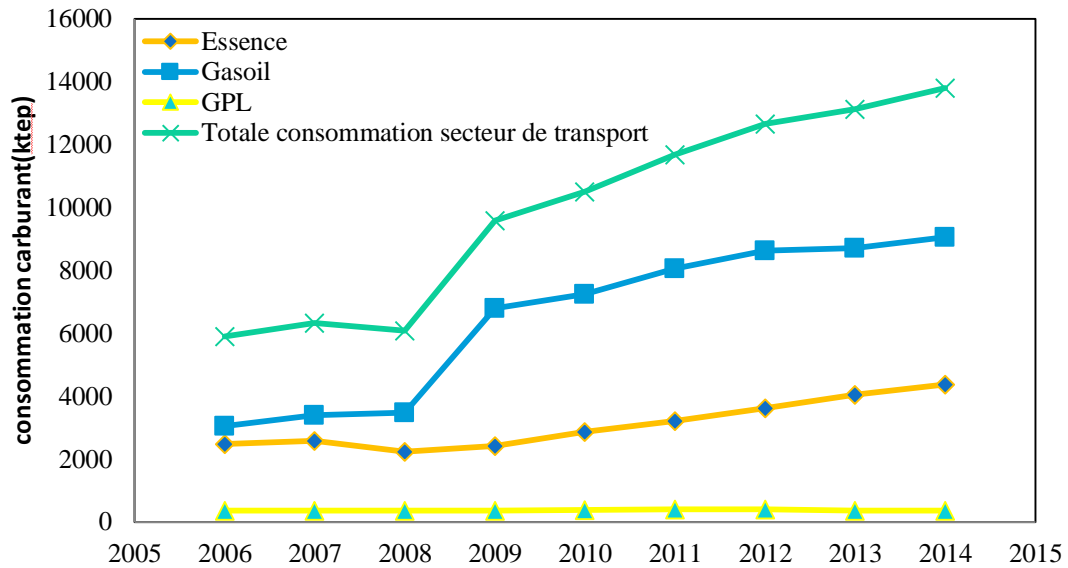


Figure III.2 : Consommation énergétique du parc automobile en Algérie de 2006-2014 [7].

La consommation de carburant en Algérie est importante dans le secteur de transport routier qui représente 95% de la consommation du secteur totale [7]. Nous notons que la consommation totale du secteur routier est stable (environ 6000ktep) dans la période allant de 2006 à 2008. Mais à partir de l’année 2008, la consommation de carburant devient très grande, surtout pour le carburant gasoil.

2.3 Analyse de kilométrage annuel parcouru

La méthodologie utilisée pour analyser le kilométrage annuel parcouru par les véhicules est basée sur les véhicules d’observation et la collecte des données par les enquêtes [36]. Les enquêtes sont menées régulièrement dans différents sites à travers le pays au cours des années 1998, 2001, 2003, 2005. En 2003, deux enquêtes ont été menées à Blida et Alger pour mesurer la vitesse avec tachymètre pour différentes catégories de véhicules. Pour les véhicules utilitaires légers pour tous les types de carburant. Kilométrage annuel qui a été déterminé pour chaque catégorie de véhicule et par classe d’âge de véhicules. Les résultats de terrain renseignent sur les trajets parcourus par les différentes catégories de véhicules de 1994 à 2005 en Algérie.

Les véhicules particuliers roulent le moins, avec en moyenne 25 000 km/an, suivis des véhicules utilitaires légers qui parcourent annuellement 43 000 km, puis des camions avec 63 000 km/an. Les tracteurs routiers effectuent près de 78 000 km/an. Ce sont les transports en

commun qui roulent le plus avec 153,000 km/an [36]. La figure ci-dessous présente la classification des véhicules selon kilométrage annuel :

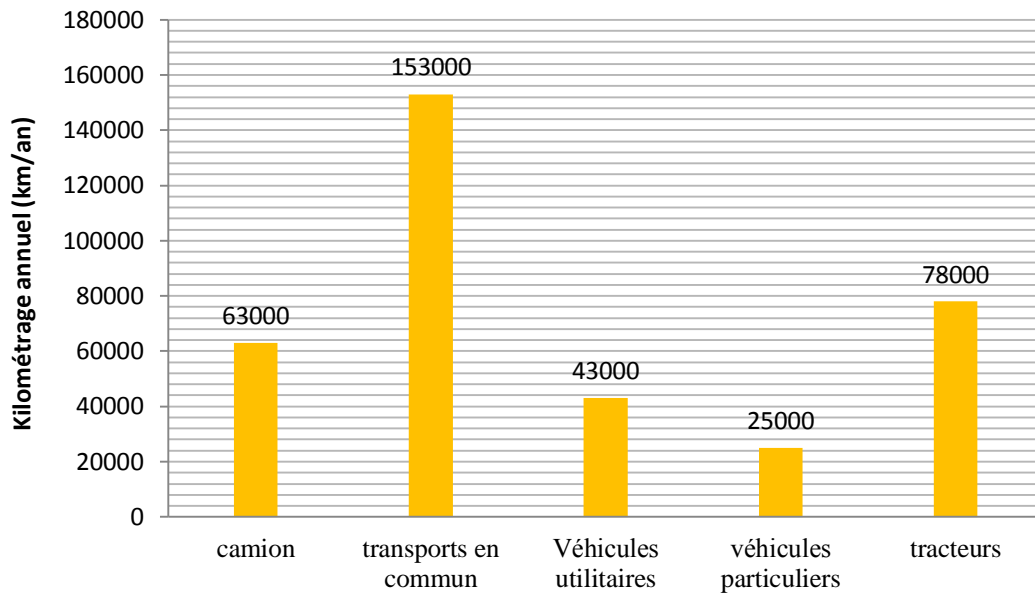


Figure III. 3 : Classification véhicules selon kilométrage annuel [36].

Sur la base de la classification des véhicules en fonction du kilométrage annuel, nous notons que le transport en commun a la première place par un kilométrage annuel parcouru égal à 153,000 km/an, suivie par les tracteurs et les camions. Cependant, les véhicules utilitaires représentent environ les deux tiers du parc total roulant (environ 3 millions) mais il est classé à la quatrième position en termes de kilométrage annuel. Afin de faire un équilibre entre le kilométrage parcouru et le nombre de véhicule nous devons faire une réorganisation des données.

Au début, Nous avons regroupé le différent type de véhicules de [ONS, 2013] selon les 5 classes de [36], puis nous avons calculé le somme des véhicules regroupés dans chaque catégorie. Le rapport entre le nombre de véhicule par catégories par le nombre total de véhicules pour l’année 2013, représente le pourcentage de véhicules dans chaque catégorie. Le kilométrage annuel parcouru est déterminé à partir de la sommation des valeurs obtenues par la multiplication du pourcentage calculé par le kilométrage annuel de Boughedaoui. Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau suivant :

Tableau III.2 : Classification des véhicules selon le kilométrage annuel moyen.

Type de Véhicules selon [Boughedaoui]	camion	Transports En commun	Véhicules utilitaires	véhicules particulier	Tracteurs
classification véhicules [ONS, 2013]	-Camion -Camion nette -Remorque	-Autocar -Autobus	- Véhicules Tourisme	-Moto -Véhicule spécial	-Tracteur agricole -Tracteur routier
Nombre de véhicule par Catégories	1539869	80212	3268220	22146	213258
Pourcentage (Nombre de véhicule par catégories/ Nombre de véhicules total 2013)	0.30	0.0156	0.637	0.0043	0.0416
Kilométrage annuel (km/an) selon [3]	63000	153000	43000	25000	78000
Kilométrage annuel (km/an)	18900	2386.8	27391	107.5	3244.8

2.4. Estimation des émissions de CO₂ dans le secteur

Afin de calculer les émissions de CO₂, nous avons utilisé les facteurs d'émission de CO₂ pour chaque carburant, et la consommation par type de carburant dans le secteur de transport routier pour les années 2006-2014 [10]. La relation suivante est utilisée pour calculer les émissions de CO₂ pour chaque type de carburant consommé [37]:

$$E_{CO_2a} = FE_a * CC_a \quad (1)$$

E_{CO_2a} Émissions de CO₂ (tCO₂)

FE_a Facteur d'émission par combustible (tCO₂/tep)

CC_a Consommation de carburant (tep)

a Carburant.

Tableau III.3: Facteur d'émission par combustible [10]

Produits	TCO ₂ /TJ	TCO ₂ /TEP
GPL	63.1	2.64
Essences	69.3	2.9
Kérosène	71.9	3.01
Dissel	74.1	3.10

Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure suivante :

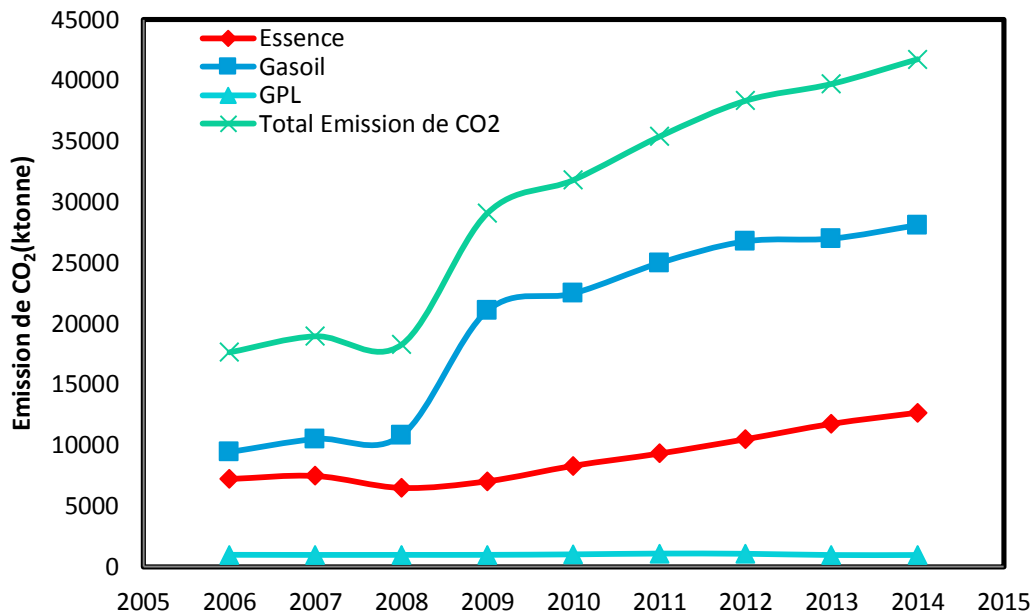


Figure III.4 : Emissions de CO₂ pour le secteur de transport routier.

La figure (III.4) présente l'évolution des émissions de CO₂ pour les trois carburants consommés dans le secteur de transport au cours du temps. Nous remarquons que les émissions totales atteignent une valeur de 42.000 ktCO₂ à la fin de l'année 2014. Le principal responsable de ces émissions est la consommation importante de gasoil par les véhicules lourds qui font une grande partie dans le parc total (%). Suivi par l'essence qui représente 25 % des émissions totales suivi par le GPL (367 ktep).

3 Etude prospective de la distribution spatio-temporelle de la demande en hydrogène dans le secteur de transport routier

3.1 Modélisation de la demande en hydrogène

Nous avons utilisé une méthode basée sur le Système d'Information Géographique SIG (Annexe 1), pour modéliser l'ampleur et la répartition spatiale de la demande d'hydrogène. L'estimation de la demande en hydrogène pour une infrastructure de distribution dépend de plusieurs caractéristiques spatiales et temporelles telles que : le taux de pénétration de véhicule à hydrogène dans le marché ; des données sur la population ; parc automobile...ect. Cette approche est appliquée pour estimer la demande sur toute l'Algérie, mais elle peut être appliquée à n'importe quelle échelle régionale ou nationale [38].

Notre méthodologie est basée sur une étude rétrospective de la population et des véhicules dans 48 wilayas en Algérie pour connaître le taux de croissance moyen annuel durant les années précédentes, ainsi que l’identification de la superficie de chaque wilaya pour calculer la densité de population. Ensuite, nous avons proposé plusieurs hypothèses telles que : le taux de pénétration au marché des véhicules à hydrogène jusqu’au l’année de 2045, la consommation spécifique d’hydrogène, et les kilométrages annuels parcourus par un véhicule à l’hydrogène .Nous avons calculé la densité de la demande en hydrogène en utilisant la relation suivante [38] :

$$DDH = DP * NV * TP * CSVH \quad (2)$$

DDH	Densité de la demande en hydrogène (kg H ₂ / an / km ²)
DP	Densité de population (habitants / km ²)
NV	Nombre de véhicule (Véhicules / habitant)
TP	Taux de pénétration au marché (1%, 10%,..... 50%)
CSVH	Consommation spécifique pour un véhicule à hydrogène (kg H ₂ /an/véhicule H ₂)

Les étapes de calcul sont résumées sur l'organigramme suivant :

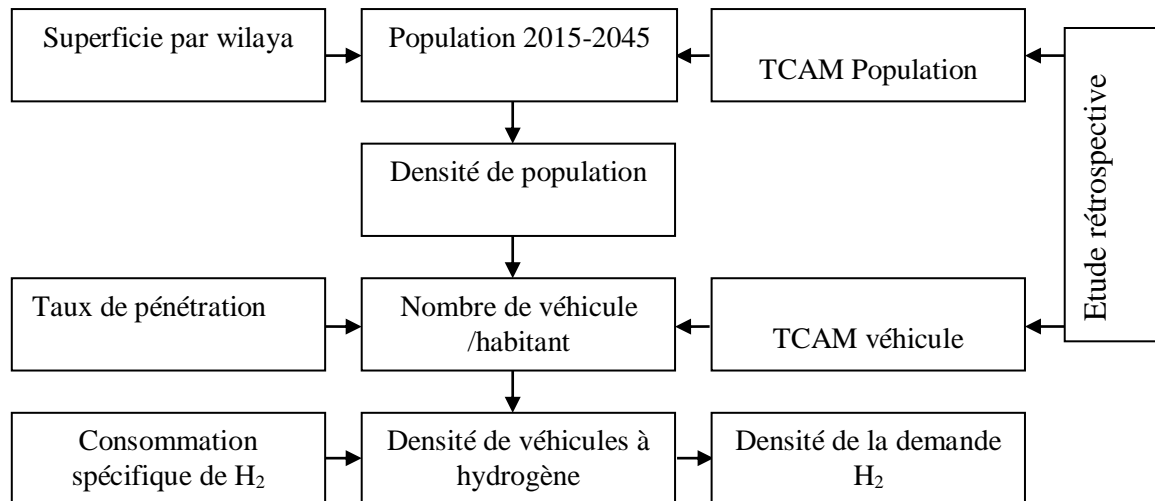


Figure III.5 : Organigramme de calcul de la densité de la demande en hydrogène.

3.1.1 Densité de population

Dans notre étude, nous avons collecté les données de la population à la fin de chaque période à partir des rapports de l’Office National des Statistique [35], pour les années allant de 1996 à 2014. Les résultats sont présentés dans le Tableau suivant :

Tableau III.4 : Croissance de la population en Algérie de 1996-2014.

Année	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004
Population (million habit)	28.5	29.0	29.5	29.9	30.4	30.8	31.3	31.8	32.3
	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
	32.9	33.4	34.0	34.5	35.2	35.9	36.7	37.4	38.2

Notez que la population en Algérie est en croissance de presque constante, la population estimée 39 million à la fin de l’année 2014.

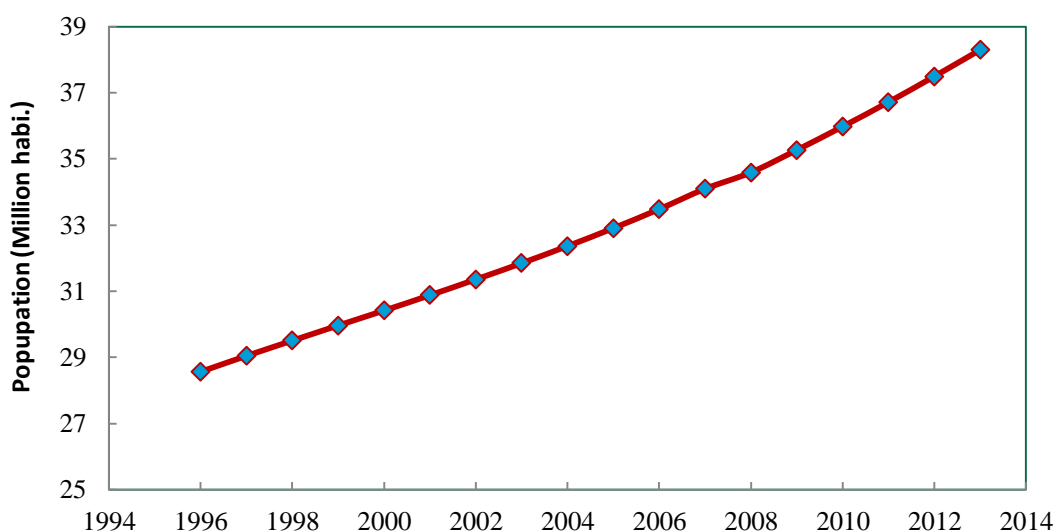


Figure III.6 : Croissance de la population en Algérie de 1996-2014 [35].

3.1.2 Taux de pénétration au marché de véhicule

Avant de définir les taux de pénétration des véhicules à hydrogène dans le marché d’automobile en Algérie, nous devons découper l’horizon du temps à des périodes quinquennales. L’horizon de temps que nous avons choisi s’étend de 2015 à 2045, divisé en six périodes, comme indiqué dans le tableau suivant :

Tableau III.5 : Taux de pénétration au marché de véhicule à hydrogène.

Période	2015-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035	2035-2040	2040-2045
Taux de pénétration	1%	3%	10%	20%	30%	50%

Les taux de pénétration sont choisis de façon à avoir une courbe de tendance polynomiale de second degré en allant de l’année 2015 jusqu’à l’année 2045, comme indiqué sur la figure suivante :

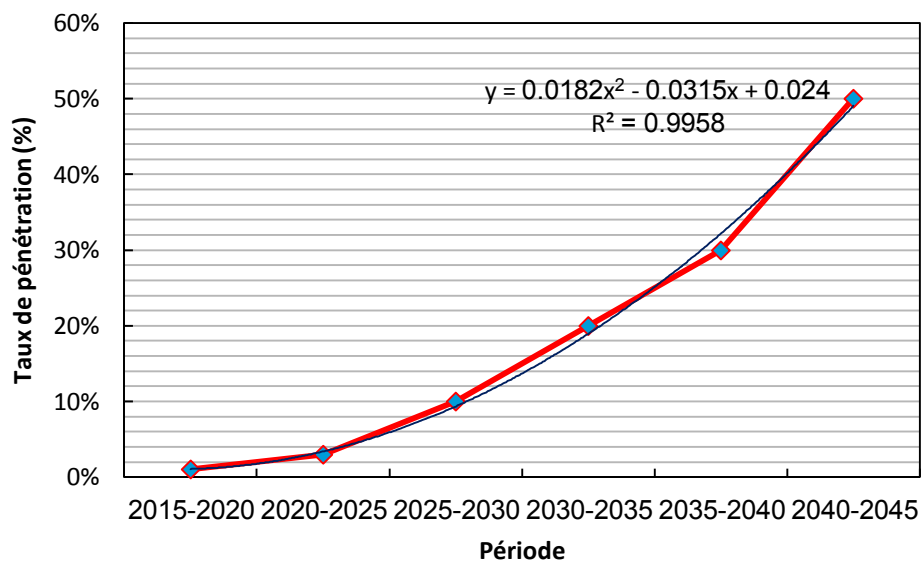


Figure III.7 : Variation du taux de pénétration des véhicules à hydrogène dans parc automobiles en fonction de périodes.

Chacune des variables ou des données considérées correspondent à une période de l’horizon et se rapporte plus précisément à la dernière année de la période.

3.1.3 Consommation spécifique pour un véhicule à hydrogène

Pour calculer la consommation spécifique, nous avons considéré les hypothèses suivantes :

- Consommation d’hydrogène pour une pile à combustible d’un véhicule prototype de Toyota : 1kg H₂/ 100km [39] ;
- La moyenne annuelle de kilométrage parcouru de différents types de véhicules égal à 52030 km/an.
- Consommation spécifique pour un véhicule à hydrogène

$$CSVH = KPA * \frac{1 \text{ kg } H_2}{100 \text{ km}} \quad (3)$$

KPA Kilométrage parcouru annuelle (km/an) ;

D’où nous avons établi une consommation moyenne d’hydrogène de 520.30 km/an.

3.2 Projection des données statistiques à l’horizon 2045

Pour connaître la façon avec laquelle évoluer au cours du temps de nos données collectées, nous avons utilisé un paramètre mathématique appelé : le taux de croissance annuel moyen, exprimé en pourcentage, sur n périodes (années, mois, semaines, etc.) qu’est donné par la formule suivante [40] :

$$TCAM = \left[\left(\sqrt[n-m]{\frac{P_n}{P_m}} \right) - 1 \right] * 100 \quad (4)$$

Avec :

TCAM Taux de Croissance Annuel Moyen (%) ;

P_n Nombre (d’habitants ou véhicules) pour l’année n (Million);

P_m Nombre (d’habitants ou véhicules) pour l’année m (Million);

n – m Période considérée.

3.2.1 Projection du nombre de véhicule

Nous avons utilisé l’équation (4) pour calculer le TCMA de parc automobile.

Tableau III.6 : TCMA de parc automobile

Année	1996-1997	1998-1999	2000-2001	2002-2003	2004-2005	2006-2007	2008-2009	2010-2011	2012-2013
TCAM	1.6	2.39	0.82	1.66	3.33	/	/	4.61	6.46

A partir de résultats obtenus, nous avons trouvé que la moyenne du TCAM égale à 3.35%.

Pour projeter les données collectées de la rétrospective de la population et de nombre de véhicule en Algérie, nous avons utilisé la formule (5) suivante [40]:

$$P_n = P_m (1 + TCAM)^{n-m} \quad (5)$$

Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure suivante :

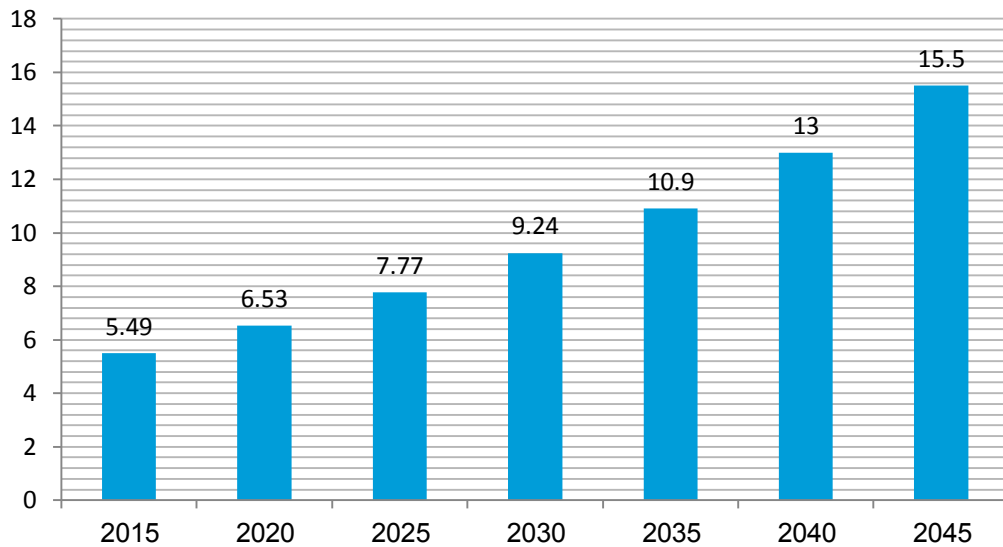


Figure III.8 : Projection de nombre de véhicules pour l’année 2045.

La figure (III.8) montre l’évolution du nombre de véhicules en Algérie jusqu’à l’horizon de 2045. En remarquant que l’augmentation des véhicules devienne près de 7.7 millions jusqu’à 2025 et arrive jusqu’à le double 15,5 millions véhicules à la fin de l’année 2045.

3.2.2 Population

Nous avons utilisé l’équation (4) pour calculer le TCMA de développement de la population, les résultats obtenus sont présentés sur le tableau suivant :

Tableau III.7: TCMA de population

Année	1996-1997	1998-1999	2000-2001	2002-2003	2004-2005	2006-2007	2008-2009	2010-2011	2012-2013
TCAM	1.67	1.55	1.52	1.56	1.67	1.83	1.95	2.05	2.13

A partir de résultats de ce tableau, nous avons calculé la moyenne du taux TCAM qui est égale à 1.76%.

Pour projeter le nombre d’habitants en Algérie, nous avons utilisé la formule (5).

Les résultats obtenus sont illustrés dans le tableau suivant :

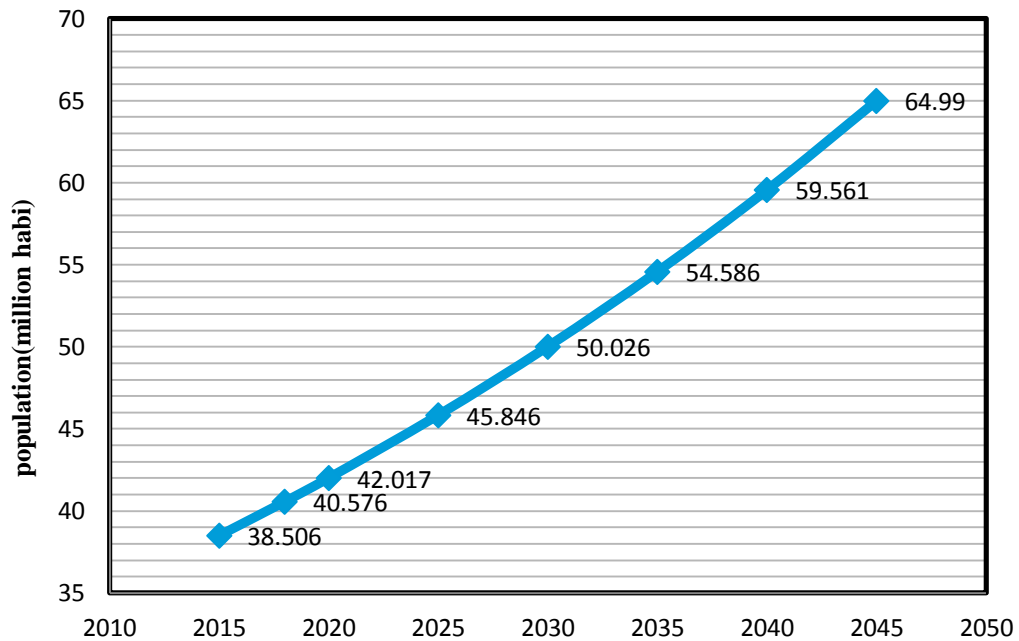


Figure III.9 : Projection de la population pour l’année 2045.

La croissance démographique persiste d’ un rythme rapide, dont , en se basant sur les données statistiques et les taux de croissance moyens, il est prévu que le nombre de la population sera presque 50 millions d’habitants en 2030 et 62 millions d’habitants en 2045 .

3.2.3 Estimation de la demande en hydrogène

Nous avons utilisé l’équation (3) pour calculer la demande, Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-après :

Tableau III.8 : la demande hydrogène pour l'année 2045.

Période	2015-2020	2020-2025	2025-2030	2030-2035	2035-2040	2040-2045
Taux de pénétration	1%	3%	10%	20%	30%	50%
La densité demande de H ₂ (kg H ₂ /ans/km ²)	14.27	50.93	201.9	480.5	857.5	1700
Demande H ₂ (ktonne H ₂ /an)	33.9	121.3	481	1144	2042	4049

Tableau (III.8) montre l'évolution de la demande d'hydrogène en six périodes de pénétration du marché par les véhicules à hydrogène. Dans la première période de 2015 à 2020 pour 1% du taux de pénétration, le besoin de l'Algérie en hydrogène est estimé à 33.9 k tonne H₂/ an et une augmentation estimée à 10% par rapport à la première période, où le besoin est estimé à 481 k tonnes H₂ / an. De ce fait, nous concluons que la demande croissante de l'hydrogène a une relation directe avec l'augmentation du taux de pénétration dans le marché de véhicule. La demande d'hydrogène arrive à 4049 k tonnes H₂ / an en 2045 et c'est un pourcentage élevé associé à un taux de pénétration de 50 %.

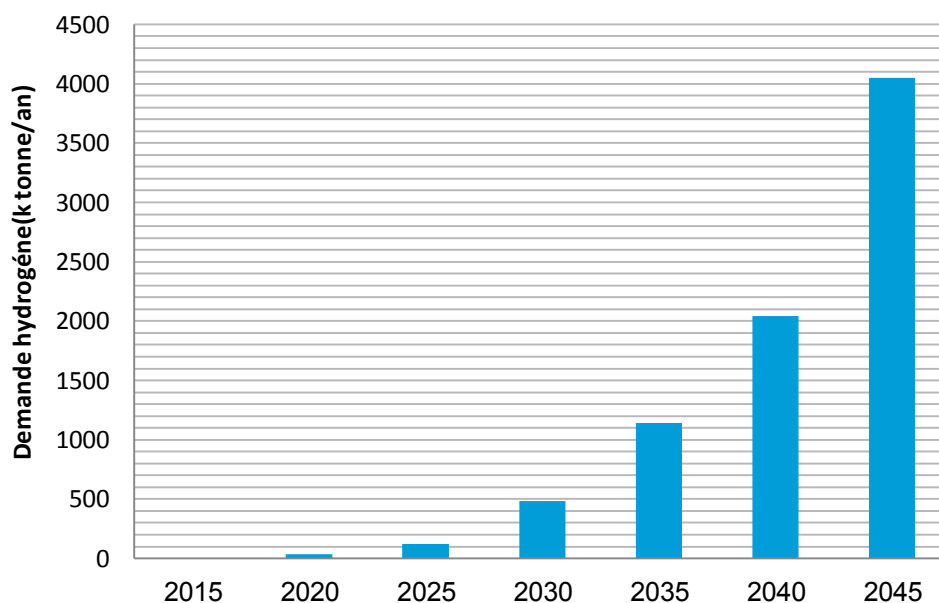
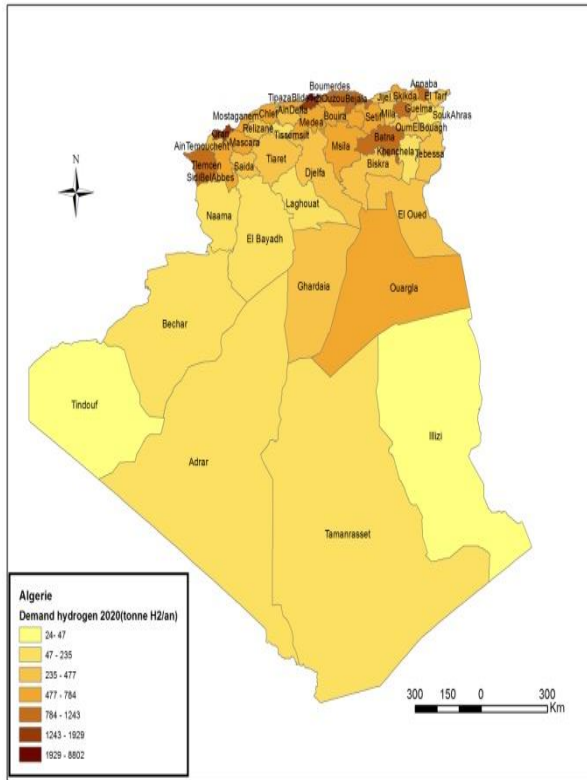
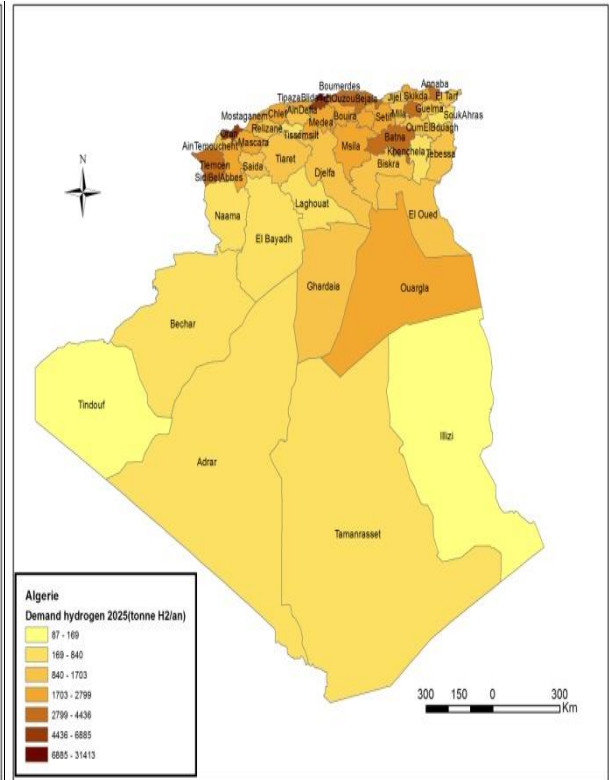


Figure III.10 : Evolution de la demande en hydrogène.

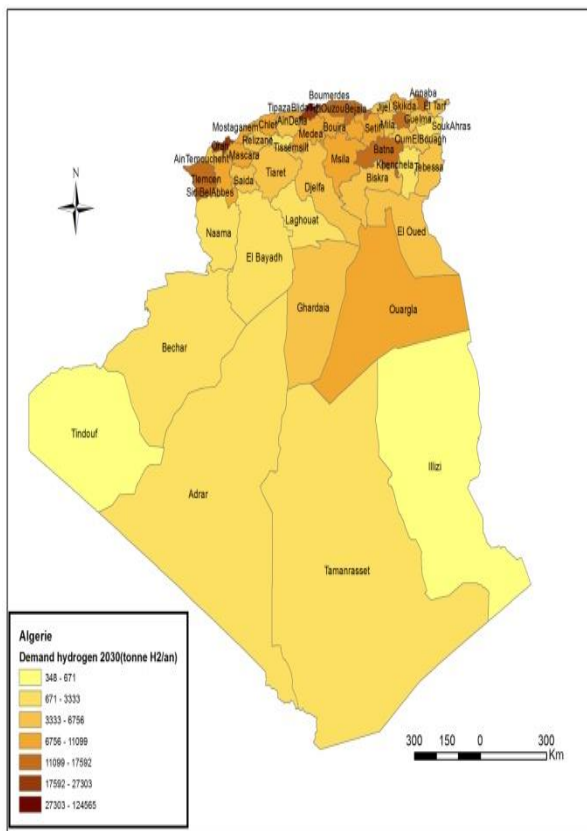
Pour bien comprendre la distribution spatiale de la demande par wilaya (Annexe II), nous avons utilisé le SIG (Système d'Information Géographique).



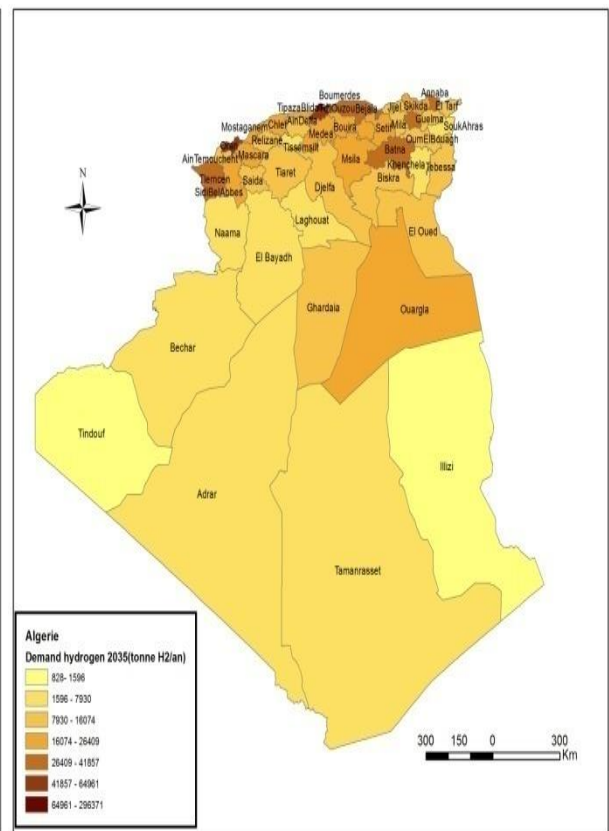
(a) 2015-2020



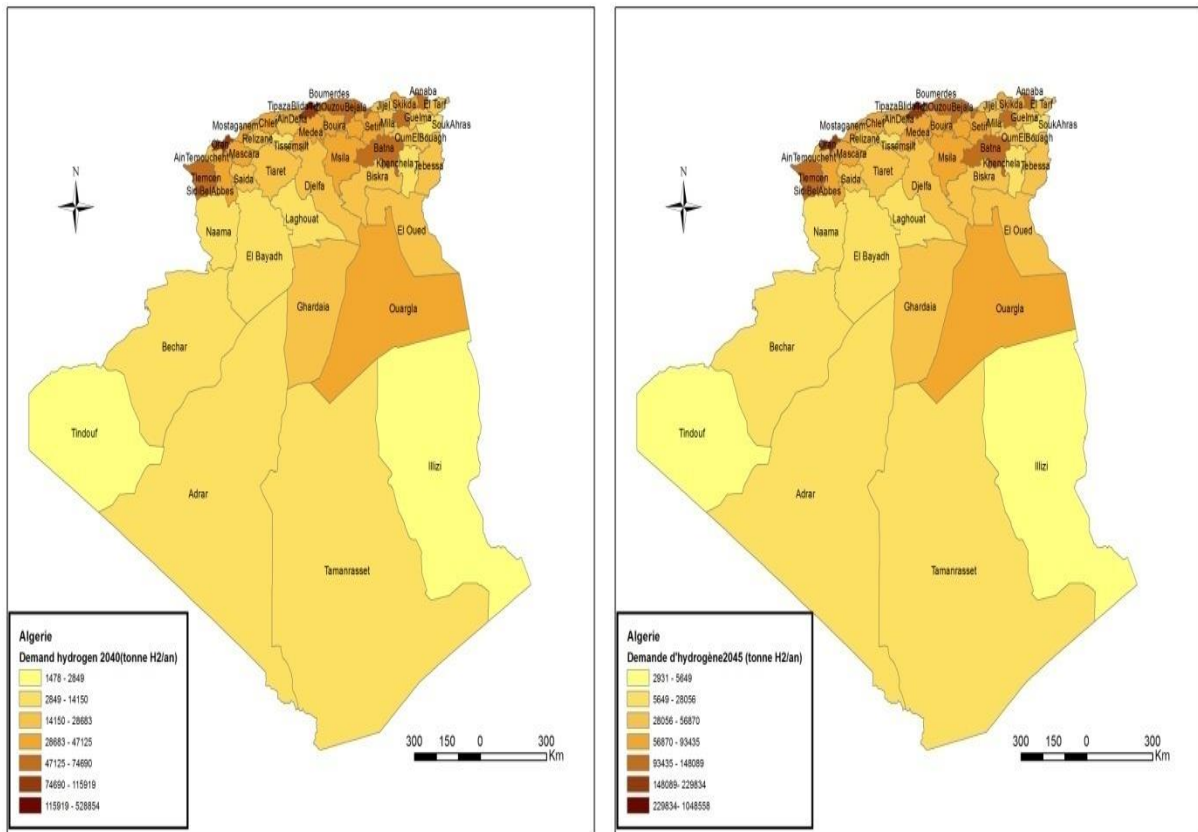
(b) 2020-2025



(c) 2025-2030



(d) 2030-2035



(e) 2035 2040

(f) 2040-2045

Figure III.11 : Distribution spatio-temporelle de la demande en hydrogène par wilaya.

La figure (III.11), présente la distribution spatiale de la demande hydrogène nationale prévue pour six période jusqu’au 2045 à raison de 5 ans pour chaque période. L’analyse de ces figures, montre que les wilayas de Nord sont caractérisées par 65% de la demande nationale, alors que les wilayas de centre 29.5 % et le sud 5.5% seulement de la demande totale en hydrogène. La demande la plus élevée est marquée au nord du pays au niveau de la capitale « Alger » ; avec un pourcentage de l’ordre de 26% de demande totale ; ceci est due au son parc automobiles. En ce qui concerne les wilayas de sud pays, la wilaya de Ouargla à la grande partie de pourcentage de sud (5.5% de demande totale).

4 Dépeuplement de la chaîne logistique de l’approvisionnement de l’hydrogène

4.1 Station services à hydrogène

Une station-service, est une infrastructure positionnée sur le bord d’une route ou d’une autoroute destinée principalement à fournir du carburant aux automobilistes. Il existe plusieurs tailles et capacités des stations-services en termes de la quantité de carburant

délivrée par jours. Dans cette étude, nous avons pris les hypothèses proposés par le rapport du projet de UK H₂ Mobility [41]. En considérant qu'un véhicule à hydrogène équipé par une pile à combustible de taille de 5kg, les spécifications techniques des stations-services selon la capacité sont présentées dans le tableau (III.9)

Tableau III.9 : les spécifications techniques des stations-services selon la capacité [41]

Taille de la station	Capacité des stations H ₂ (kg H ₂ /j)	N véhicule (rempli véhicule/j)
Petite	80	16
Moyenne	400	80
Grande	1000	200

En adoptant les données de site internet de NAFTAL [42] pour connaître le nombre actuel de stations d'essence dans chaque wilaya et nous utilisons un programme qui combine l'information géographique pour comprendre la répartition spatiale de ces stations à travers les 48 wilayas.

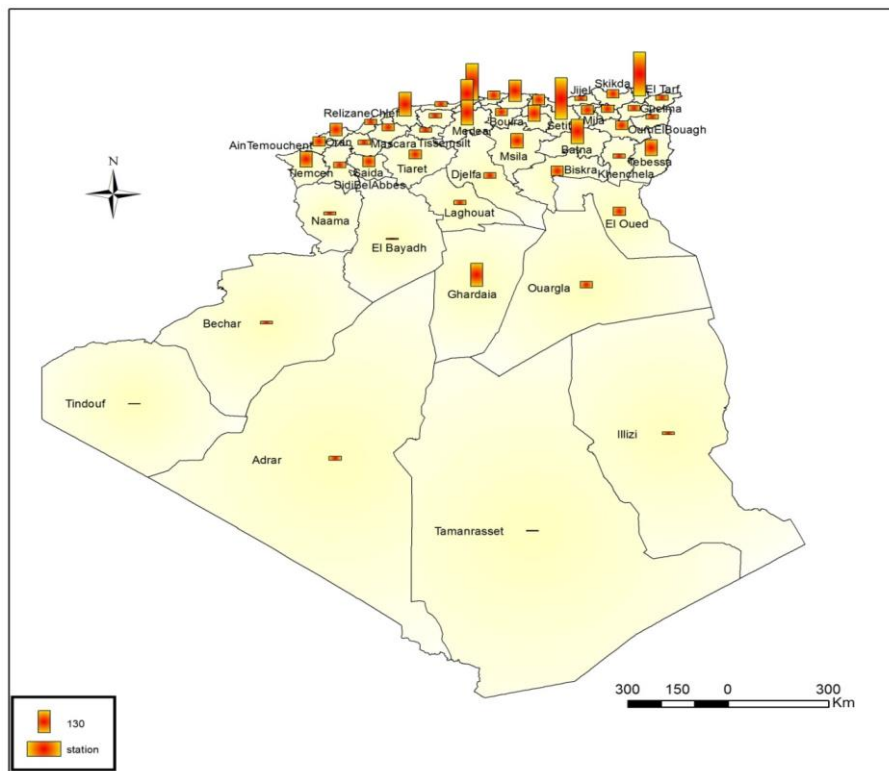


Figure III.12 : Répartition spatiale de nombre de stations-services en Algérie pour l'année 2015.

Selon la figure ci-dessus, qui montre la répartition des stations-service actuelle à travers le territoire national nous remarquons une forte concentration dans les wilayas du Nord et surtout celles côtières et celles à travers laquelle l'autoroute Est - Ouest. Nous enregistrons la plus forte proportion dans les quatre wilayas suivantes : Alger (6.84%), Blida (5.21%), Sétif (7.77%), et Annaba (8.1%) ; ceci est lié aux grands parcs de véhicules dans les wilayas précédentes. Pour les wilayas du sud le ratio est beaucoup moins élevé où le plus grand nombre de stations est concentré dans les wilayas de Ghardaïa et Ouargla.

Dans ce travail, pour estimer le nombre de stations-services nécessaire nous avons choisi une capacité journalière moyenne estimée de 1000 kg H₂/j signifiant que la station choisie est de grande de taille. En ce qui concerne les stations hydrogène dans chaque période de l'horizon du temps choisi, et puisque chaque véhicule à hydrogène équipé par une pile à combustible de taille 5kg H₂/véhicule, nous avons évalué la capacité journalière de chaque wilaya. Ensuite, nous avons déduit le nombre de stations à hydrogène pour chaque wilaya en utilisant la relation suivante :

$$NS_{H_2} = \frac{DDH * A}{365 * NV_s * CPAC} \quad (6)$$

NS_{H_2} Nombre de station hydrogène

$CPAC$ Capacité de la pile à combustible dans un véhicule à hydrogène (kg H₂/j)

NV_s Nombre de véhicule rempli par une station-service de capacité journalière égale 1000 kg H₂

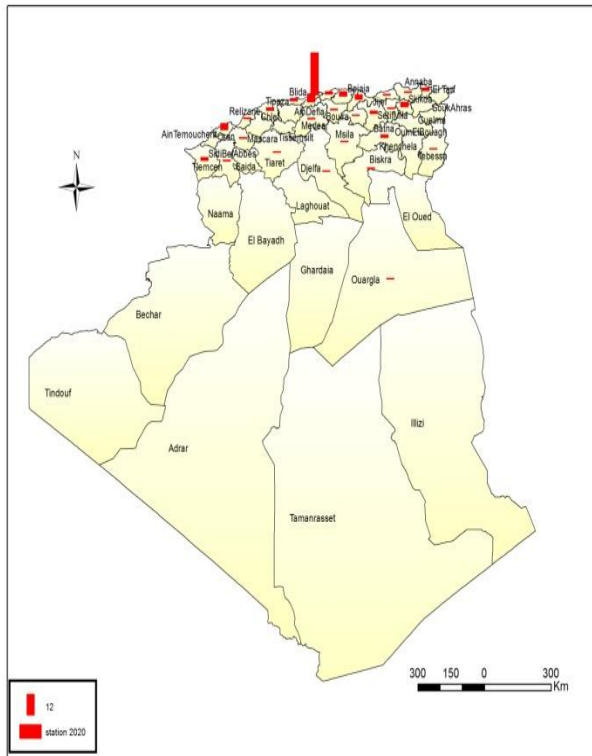
A Superficie par wilaya (m²)

Le tableau (III.10) montre une comparaison entre les stations d'hydrogène, par rapport aux stations actuelles obtenues à partir du site de NAFTAL (Annexe III). Pour l'année de référence 2015 [41].

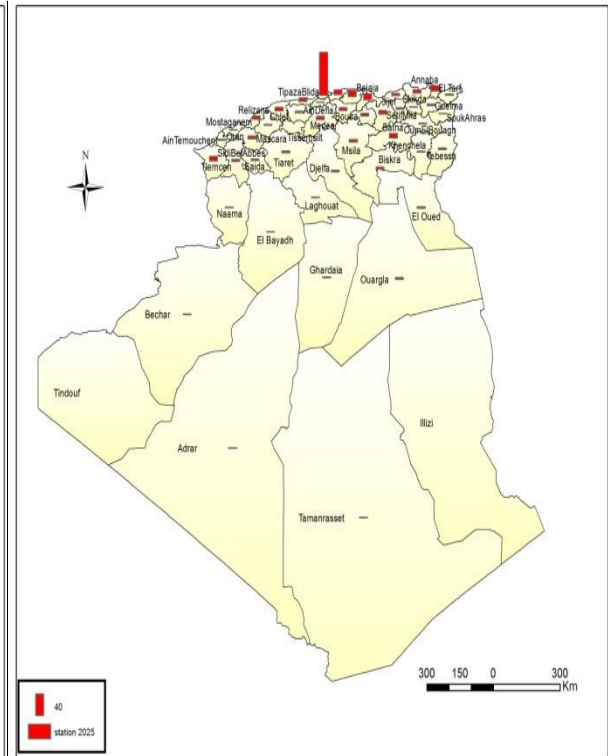
Tableau III.10 : comparaison entre les stations d'hydrogène et aux stations actuelles

Station classique	3241					
Taux de pénétration	1%	3%	10%	20%	30%	50%
Station hydrogène	71	190	1323	2369	5509	11029

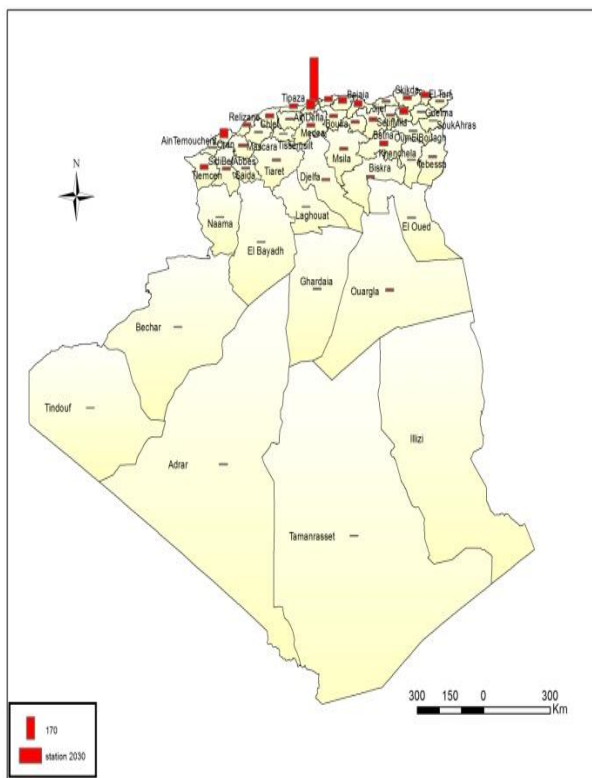
Pour bien comprendre la distribution spatiale des stations-service par wilaya, nous avons utilisé le SIG (annexe IV).



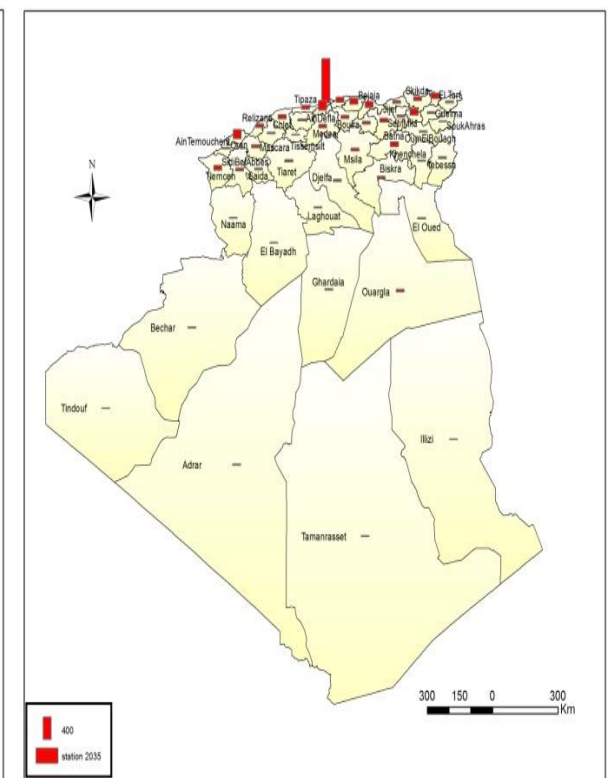
(a) 2015-2020



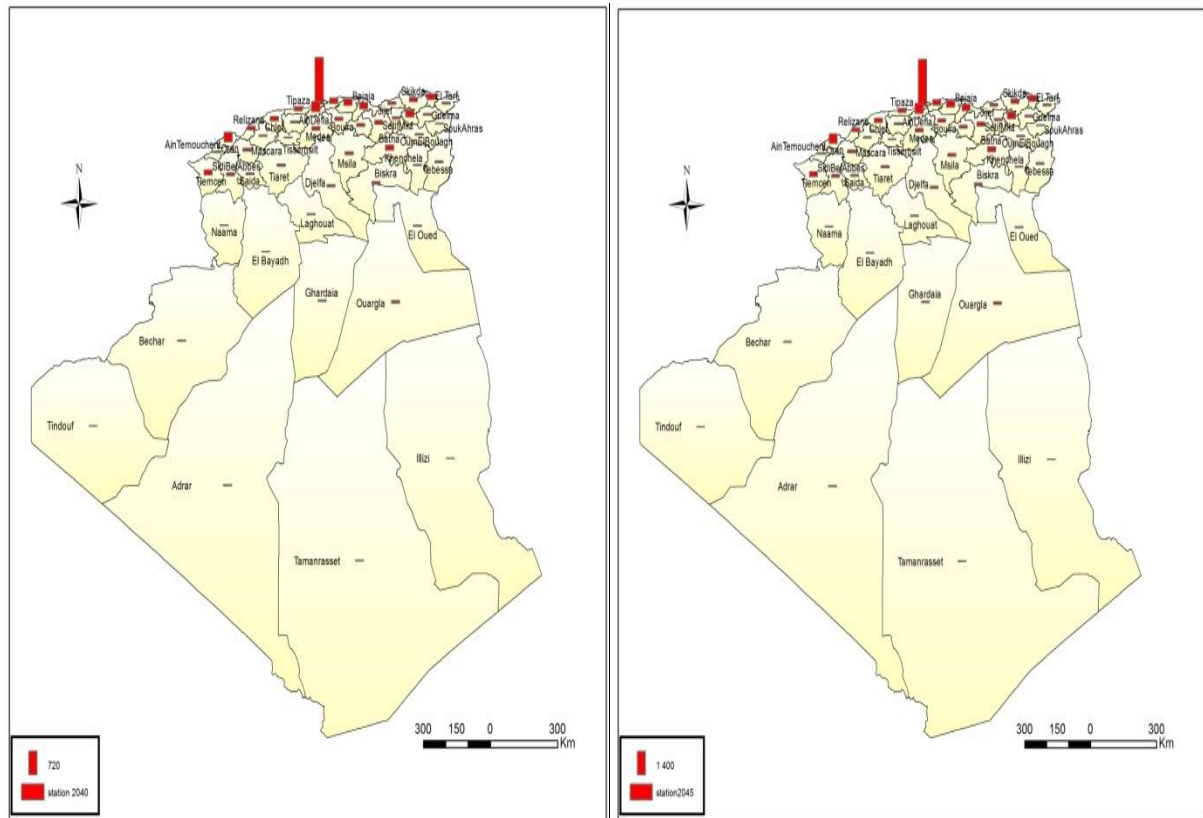
(b) 2020-2025



(c) 2025-2030



(d) 2030-2035



(e) 2035-2040

(f) 2040-2045

Figure III.13 : la distribution spatiale des stations-service hydrogène par wilaya.

La figure (III.13) montre la distribution spatiale du potentiel pour les stations d'hydrogène à travers le pays dans six longues périodes à partir de 2020 jusqu'en 2045, on observe une grande localisation de stations dans les régions du nord du pays par rapport aux régions du centre et celles du sud, ces dernières ,le nombre de stations est très limité spécialement dans les premières périodes de la pénétration du marché par le biais de véhicules à hydrogène; ainsi nous remarquons que le plus grand pourcentage (26%) des stations sont à Alger, elles sont de l'ordre de 24 stations en 2020 et 2861 stations vers 2045.

4.2 Potentiel de production d’hydrogène solaire

Pour assurer l’approvisionnement en hydrogène qui va satisfaire le besoin national, la production d’hydrogène est un paramètre clé pour la réaliser. Dans ce travail nous avons étudié une installation de production massive de l’hydrogène. Elle est composée principalement de deux sous-systèmes ; un premier pour la production d’énergie électrique renouvelable (système photovoltaïque) et un deuxième pour l’électrolyse (le stockage

d'hydrogène n'est pas considéré). Le principe de fonctionnement de l'installation est démontré sur la figure (III.14) :

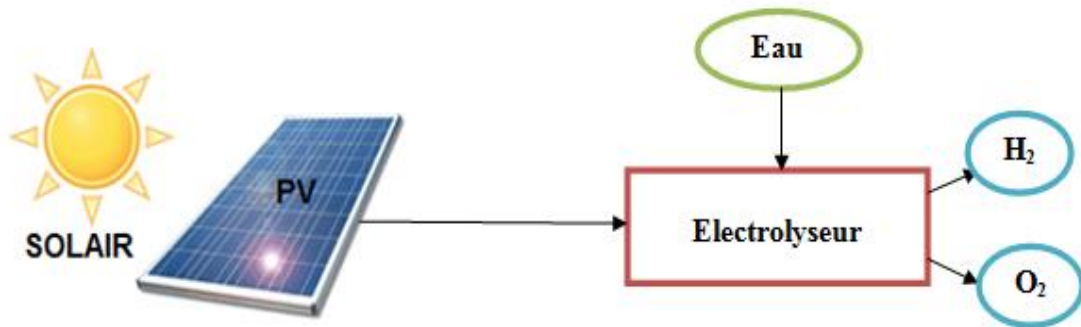


Figure III.14 : Schéma de principe de fonctionnement de l'installation de production de l'hydrogène (PV/H₂).

L'énergie électrique générée par le champ photovoltaïque sera envoyée à l'électrolyseur pour conduire le procédé d'électrolyse de l'eau afin de produire l'hydrogène et l'oxygène.

4.3 Modélisation de la chaîne de production d'hydrogène solaire par électrolyse de l'eau

Afin de déterminer les différents flux d'énergie au sein d'un système de production d'énergie électrique et le potentiel de la production de l'hydrogène, chaque entité de l'installation doit être modélisée. Nous présentons la modélisation choisie pour le champ photovoltaïque et l'électrolyseur de l'eau.

4.3.1 Champ photovoltaïque

La conversion photovoltaïque permet de transformer directement la lumière solaire en énergie électrique grâce au processus d'absorption de la lumière par un matériau semi-conducteur. Lorsqu'un photon est absorbé par le matériau, il passe une partie de son énergie par collision à un électron l'arrachant littéralement du matériau. Ce dernier étant précédemment à un niveau d'énergie inférieur où il était dans un état stable passe alors vers un niveau d'énergie supérieur, créant un déséquilibre électrique au sein du matériau se traduisant par une paire électron-trou, de même énergie électrique. Cette réaction entraîne une différence de répartition des charges créant ainsi une différence de potentiel électrique, c'est l'effet photovoltaïque [34].

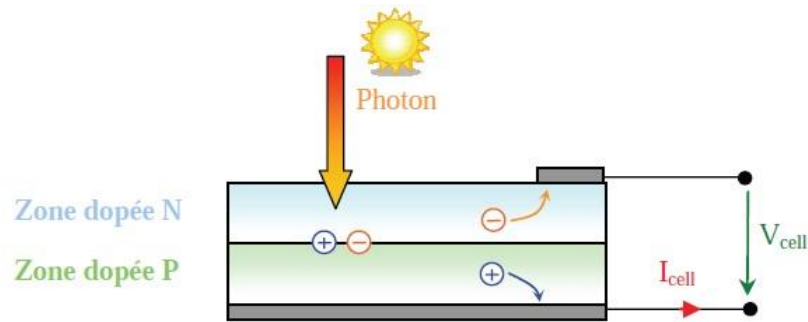


Figure III.15 : Schéma de principe de la conversion photoélectrique [34].

4.3.2 Modélisation énergétique de la production d'énergie électrique photovoltaïque

Les caractéristiques électriques des cellules photovoltaïques dépendant des conditions météorologiques, le modèle énergétique choisi doit prendre en compte ces considérations. Ici, nous utiliserons un modèle polynomial permettant de déduire l'énergie pouvant être obtenue en fonction de la puissance rayonnée incidente par unité de surface et de la température de cellule des panneaux. Ce modèle est aisément identifiable à partir des documents constructeurs [34] :

$$E_{PV} = \eta_{PV} A_{PV} G \quad (7)$$

E_{PV}	Energie électrique photovoltaïque (kWh)
η_{PV}	Rendement de générateur photovoltaïque (%)
A_{PV}	Surface totale de générateur photovoltaïque (m ²)
G	Irradiation solaire globale sur un plan horizontal (kWh/m ²)

Le principal intérêt de ce modèle qui donne de bons résultats de simulation réside dans sa simplicité et dans sa facilité d'utilisation. On peut simuler tout type de module PV à partir des caractéristiques techniques données du constructeur. Dans cette étude, concernant les générateurs PV, seule la technologie silicium poly cristallin a été considérée de rendement égal 15% [34].

La détermination de potentiel d'irradiation solaire disponible dans l'ensemble du territoire algérien est basée sur les données de l'RETScreen. Les données de la base sont celles des stations de mesure météorologiques.

Une représentation géographique du potentiel résultant de l'énergie solaire est mappée en utilisant le logiciel ArcGIS. Ce logiciel est un système d'ordinateur pour la capture, le

stockage, le contrôle et l’affichage des données relatives à des positions sur la surface de la Terre. Le système d’information géographique peut montrer de nombreux types de données sur une seule carte. Cela permet aux gens de voir plus facilement, d’analyser et de comprendre la carte des ressources renouvelables algérienne (SIG, 2015).

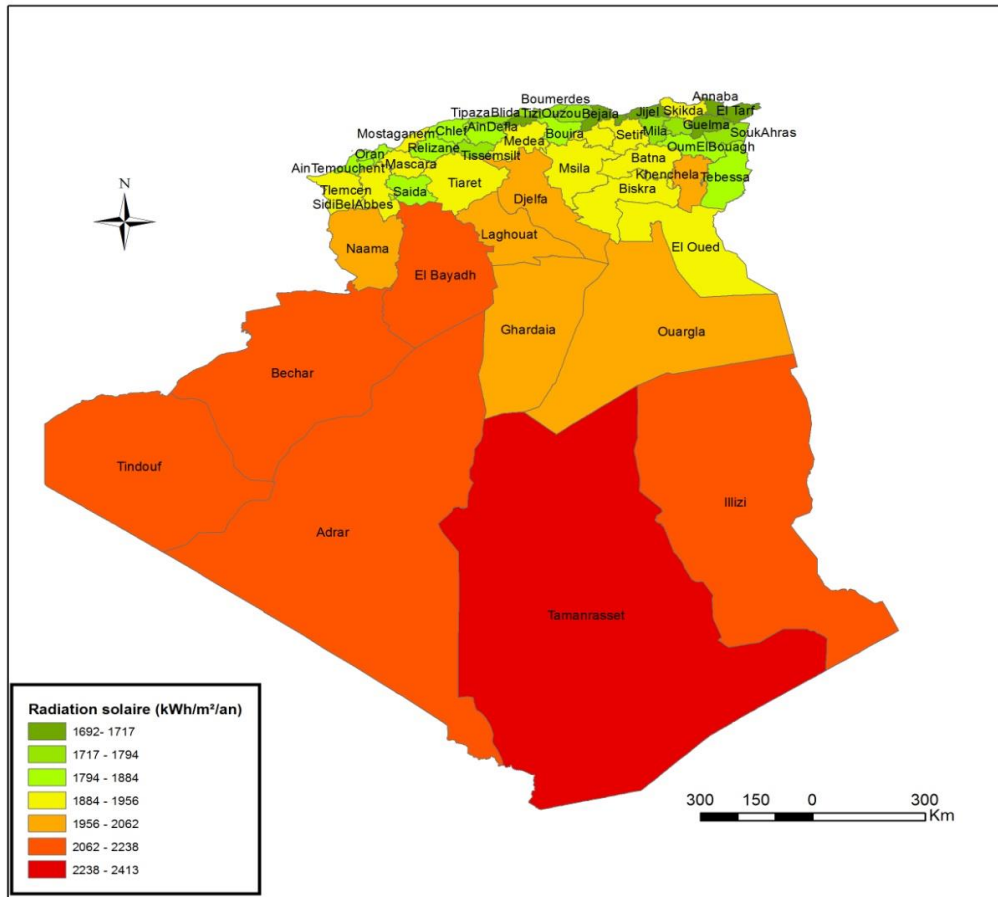


Figure III.16 : Potentiel d’irradiation solaire disponible dans l’ensemble du territoire algérien.

De l’analyse de la figure III.16, qui montre le potentiel de l’irradiation solaire disponible au niveau national, nous observons que le Sud en particulier la wilaya de Tamanrasset et les régions du sud-ouest sont les plus chaudes ; et cela en raison de la grande irradiation solaire, qui est de l’ordre de 2238 kWh/m²/an à 2400 kWh/m²/an dans ces régions. Une irradiation solaire moins intense est enregistrée dans des autres régions sud comme la wilaya de Ouargla, El Oued et Ghardaïa ; et des niveaux plus faibles de 1662 kWh/m²/an à kWh/m²/an dans les régions centrales et nordiques.

4.3.3 L'électrolyse de l'eau

L'électrolyse de l'eau est une réaction électrochimique de décomposition de la molécule d'eau en hydrogène et en oxygène. La réaction s'écrit de manière globale [34].



Il existe trois types d'électrolyte : l'alcalin, le PEM (Proton Exchange Membrane) et l'électrolyse à haute température SOEC (Solid Oxid Electrolyser Cell). Dans cette étude, un électrolyseur de type PEM a été utilisé. Il bénéficie d'un rendement élevé, un cycle de vie important et une bonne aptitude aux systèmes d'énergie renouvelable [34].

4.3.3.1 Electrolyseur PEM

Dans un électrolyseur PEM (Figure III.17), on injecte un courant électrique (à l'aide d'un générateur électrique) et de l'eau liquide, et l'on récupère en sortie de l'hydrogène et de l'oxygène gazeux. On fait donc de la chimie, c'est-à-dire que l'on transforme un composé chimique (l'eau) en d'autres composés chimiques (H_2 et O_2), avec de l'électricité [43].

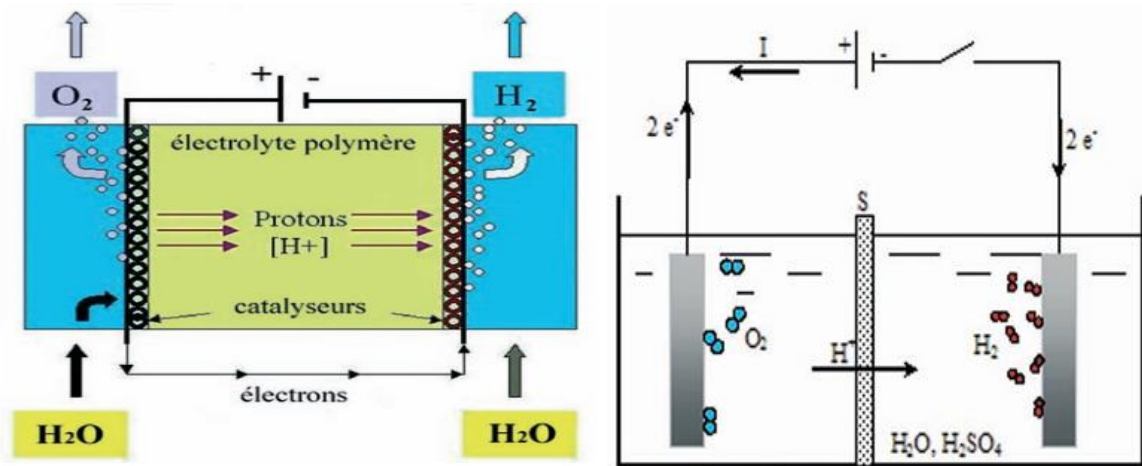


Figure III.17 : Schéma de principe de fonctionnement de l'électrolyse de l'eau à PEM [43]

Elle est rendue possible par le passage d'un courant continu à travers deux électrodes immergées dans un électrolyte liquide ou solide. La principale caractéristique de ce type d'électrolyseur est son électrolyte solide, constitué d'une membrane polymère. Celui-ci assure la conduction des ions hydronium (H_3O^+) produits à l'anode et permet la séparation de l'hydrogène et de l'oxygène produits. Ils ont par ailleurs la capacité de faire face aux variations de courant ce qui rend les électrolyseurs PEM les plus adaptés pour transformer l'électricité en provenance de sources renouvelables [34].

4.3.3.2 Modélisation énergétique de l'électrolyseur

L'énergie transférée à l'électrolyseur est définie comme suit [34] :

$$E_{el} = \eta_{elec} \eta_p E_{PV} \quad (9)$$

E_{el} Energie absorbée par l'électrolyseur (kWh)

η_{elec} Rendement d'électrolyseur (%)

η_p Rendement supplémentaire inclus pour tenir compte des pertes d'énergie dans l'électrolyseur (%)

E_{PV} Energie électrique délivrée par le panneau PV (kWh)

4.4 Evaluation du potentiel de la production de l'hydrogène dans Algérie

Une fois les données météorologiques d'énergie solaire ont été évaluées, l'estimation du potentiel de la production d'hydrogène solaire peut être calculée. L'évaluation du potentiel est basée sur l'utilisation de l'énergie électrique produite par le champ PV qui entraîne le fonctionnement d'un électrolyseur PEM. Dans cette analyse, une capacité de puissance de 52.5 kWh/kg pour l'électrolyseur a été considérée (ce qui correspond à environ 75% de rendement) [46]. Le rendement supplémentaire qui est inclus pour tenir compte des pertes d'énergie dans l'électrolyseur est égal à 90%. Le calcul de la masse d'hydrogène produite à partir de chaque source renouvelable est décrit comme suit [34]:

$$m_{H_2} = \frac{E_{el}}{PCI_{H_2}} = \frac{\eta_{elec} \eta_p E_{PV}}{PCI_{H_2}} \quad (10)$$

m_{H_2} Masse d'hydrogène (kg)

PCI_{H_2} Pouvoir calorifique inférieur d'hydrogène (kWh/kg)

Les résultats de calcul de potentiel de la production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire photovoltaïque par l'électrolyse de l'eau obtenus sont illustrés dans la figure suivante :

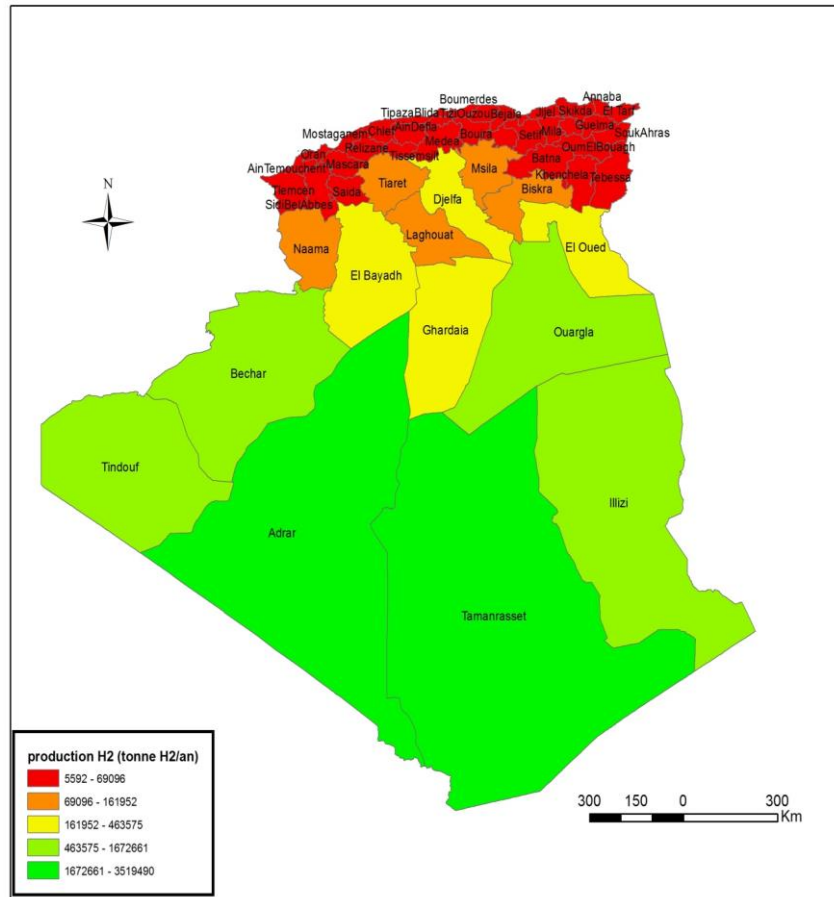


Figure III.18 : Répartition de la production d'hydrogène sur le territoire national

D'après l'analyse de la figure (III.18), qui montre la répartition de la production d'hydrogène en Algérie, il a été observé que les zones qui ont le potentiel de production d'hydrogène élevée situées dans le sud de l'Algérie et la production localisée surtout dans les wilayas de Tamanrasset et Adrar, avec une production entre (1672 k tonne/an) à (3500 k tonne/an) et un peu moins dans les régions de Bachar, Tindouf et Ouargla avec une production limitée entre (400 k tonne/an) à (1672 k tonne/an); et il y a une diminution de la production en allant vers le nord algérien.

5 Comparaison entre la production et la demande en hydrogène

Pour ce faire, l'interprétation des résultats obtenus dans chacun de la figure (III.18), qui représente la production d'hydrogène attendue en Algérie et de la figure (III.11), qui montre la répartition de la demande d'hydrogène sur le territoire national, nous prenons l'année 2045, par exemple, afin de comparer les résultats précédents. La comparaison est illustrée sur la figure suivante :

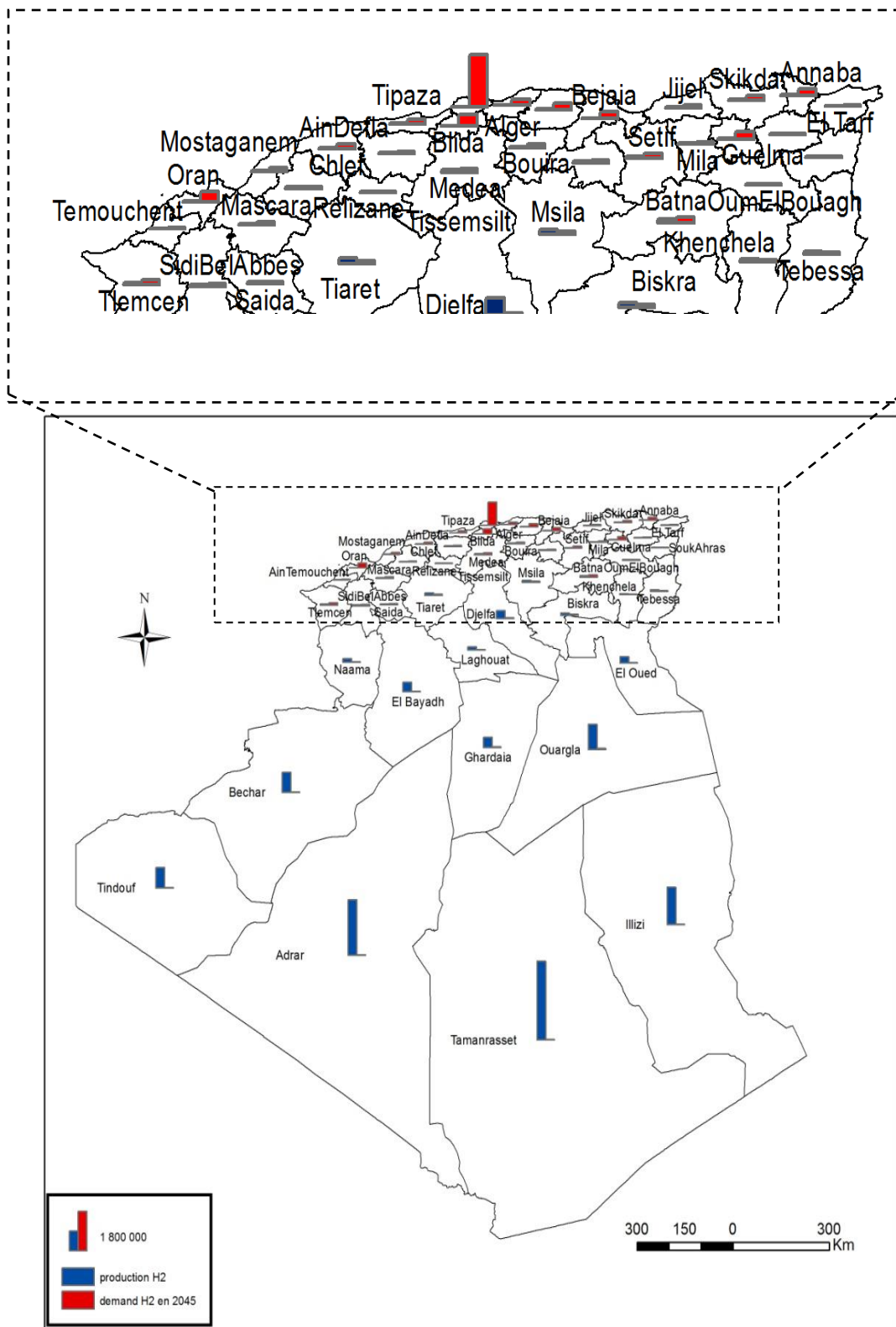


Figure III.19 : Comparaison entre production et demande sur l'hydrogène pour l'année 2045.

La figure (III.19) présente une comparaison entre la distribution de la production et la demande pour l'hydrogène pour l'année 2045 au niveau national. Et par recour aux résultats cités précédemment pour la demande et la production d'hydrogène, nous concluons que les wilayas du sud sont des wilayas productrices d'hydrogène par rapport aux wilayas du Nord qui sont des wilayas consommatrices notamment la région d'Alger.

Par conséquent, nous pouvons dire qu'à l'avenir pour construire une infrastructure à hydrogène, les centrales de production d'hydrogène seront situées au sud de l'Algérie, et l'approvisionnement des régions nordiques ou les régions de centre sera assuré par le transporter de l'hydrogène produit au sud par pipeline ou par des camions tous dépend de la distance et d'autres paramètres économiques.

6 Impact environnemental de l'intégration de l'hydrogène carburant dans le secteur de transport à l'horizon 2045

6.1 Scénario A : Avant intégration d'hydrogène

a. Evolution de la consommation des combustibles fossiles

Afin de calculer l'évolution de la consommation des différents types de combustibles fossiles dans le secteur des transports et par référence à la consommation au cours des années précédentes, qui concluent en fait un taux de croissance annuel moyen pour chaque type par la relation (4), et de là nous obtenons les prévisions sur la consommation tous les 5 ans jusqu'à l'horizon 2045 selon l'équation (5). Les résultats sont présentés dans la figure suivante :

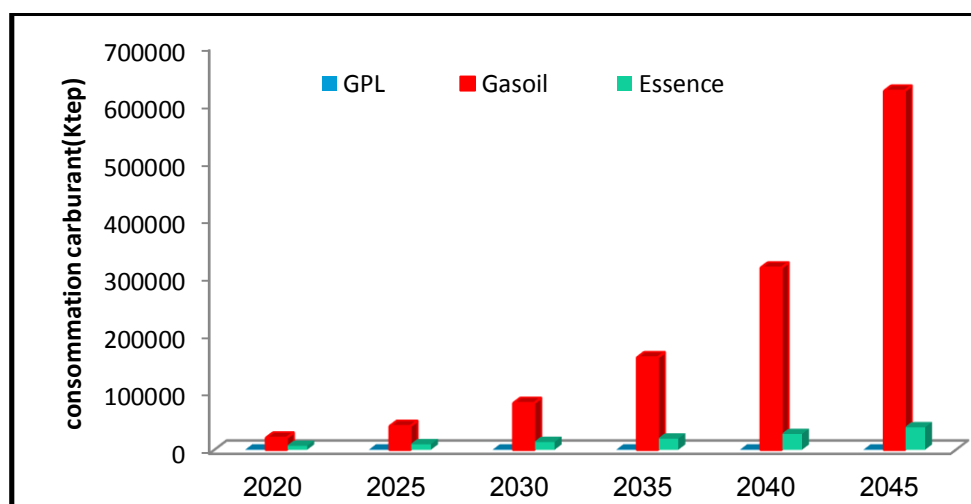


Figure III.20 : Evolution de la consommation des combustibles fossiles en Algérie de 2020-2045.

La figure ci-dessus affiche la consommation du combustible durant les années 2020-2045, où on remarque que la consommation GPL garder à peine stable jusqu’à 2045, on observe, aussi, une augmentation conséquente dans la consommation d’essence ; ou elle était de 6668 k tonne durant l’année de 2020 est a grimpé en 2045 à la valeur de 38764 k tonne. En ce qui concerne le Gasoil, nous observons une augmentation considérable jusqu’en l’an 2030 après quoi la consommation explose et atteint son maximum 622377 k tonne à l’année de 2045, valeur très élevée et qui met en danger les réserves de combustible en Algérie.

b. Emissions CO₂

Pour connaitre les émissions de CO₂ de chacun des carburant ; GPL, Gasoil et Essence dans le secteur du transport routier en Algérie on obtient le taux de croissance de la figure (III.4) que nous utilisons dans le calcul des émissions de chaque type par la relation (5) jusqu'en 2045 les résultats obtenus sont présentés dans la figure suivante :

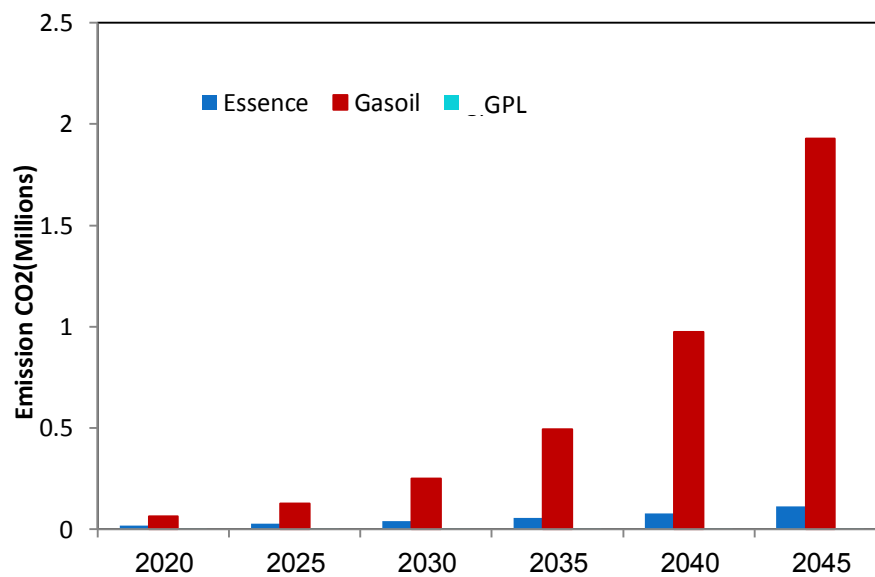


Figure III.21 : Evolution l’émissions de CO₂ en Algérie de 2020-2045.

La figure (III.21) montre les prévisions des émissions de CO₂ jusqu’à l’horizon 2045 ; ou nous observons que les émissions de CO₂ lors de la consommation de GPL est négligeable comparée à celles lors des combustions d’essence ou de gasoil. Nous enregistrons, aussi, une évolution à partir de 19373 k tonne, dans les émissions de CO₂ par la combustion de l’essence, jusqu’à 112000 k tonne en l’an 2045. Mais, nous soulignons que le plus grand danger sur l’environnement émanant du secteur des transports routiers est lié à la combustion du gasoil parce que le taux de croissance est très élevé est à pour valeur 2 million à l’horizon 2045.

6.2 Scénario B : Après intégration d'hydrogène

a. Evolution de la consommation des combustibles fossiles en intégrant l'hydrogène

Le secteur du transport routier en Algérie est le plus important secteur dans la consommation de combustible fossile. La figure suivante compare la consommation de combustibles fossiles prévue dans le cas où les véhicules actuels continuent et la consommation des véhicules par intégration de l'hydrogène dans le secteur des transports routiers comme carburant propre alternatif pour les véhicules.

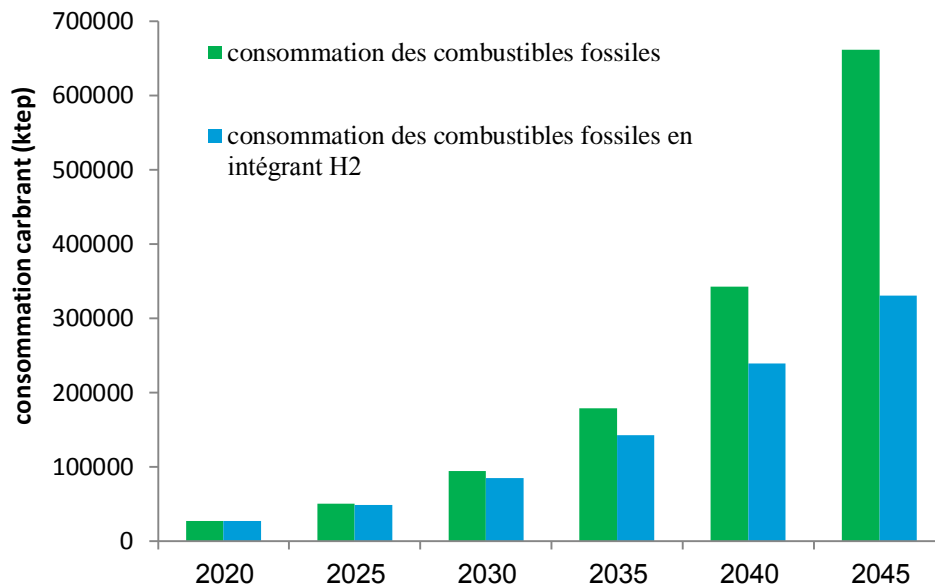


Figure III.22 : Evolution de la consommation des combustibles fossiles avant et après l'intégration de l'hydrogène.

La consommation des combustibles fossiles est grande dans le secteur des transports routiers en Algérie et par l'intégration de l'hydrogène dans le secteur de transport routière, nous contribuons à la réduction de consommation de carburant de divers types, alors qu'en 2020 la consommation réduit à 1%. Après quoi la tendance à la baisse sera plus accentuée et atteindra 10% en 2030 d'une valeur estimée à 84800 k tep et en 2045 la moitié de secteur de transport routière consomme l'hydrogène comme carburant.

b. Emissions CO₂ en intégration l'hydrogène

Les émissions de CO₂ restent toujours un gros problème, qui menace l'atmosphère et par conséquent la vie humaine sur Terre. Le secteur du transport routier en Algérie est le plus grand secteur dans les émissions de CO₂ (49%) et notre suggestion d'intégrer l'hydrogène

comme carburant propre pour les véhicules, nous avons obtenus des émissions de CO₂ de gaz jusqu'en 2045, en fonction de l'intégration des véhicules à hydrogène sur le marché et en comparaison aux émissions de CO₂ attendues des véhicules utilisant un carburant fossile.

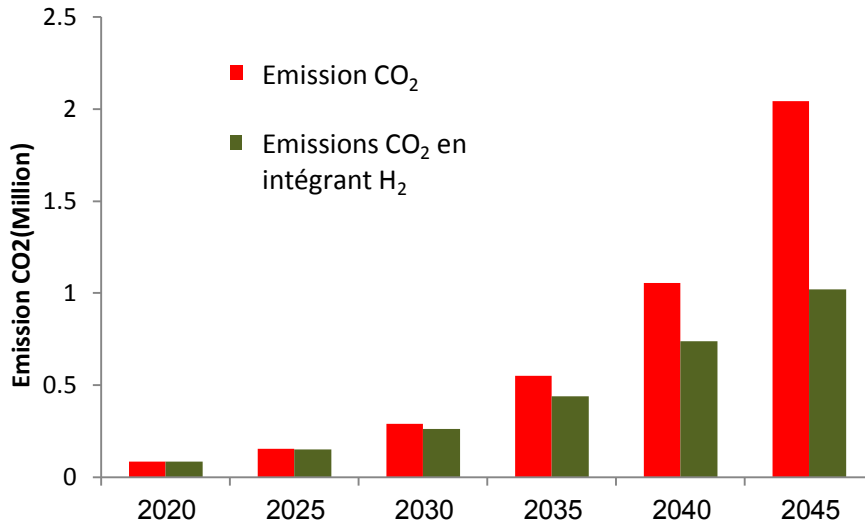


Figure III.23 : Evolution l'émission de CO₂ avant et après intégrant l'hydrogène.

La figure (III.23) montre les prévisions des émissions de CO₂ avant et après l'intégration de l'hydrogène dans le secteur du transport routier de sorte que nous enregistrons, pour 1% de pénétration du marché par les véhicules à hydrogène, une baisse des émissions de CO₂ du même taux précédent et la poursuite de l'augmentation du taux de pénétration cette baisse du taux des émissions de CO₂ se poursuit jusqu'à elle atteint 2% d'ici 2020. En 2045 nous enregistrons une baisse claire dans l'émission de CO₂ que nous évaluons à environ un million de tonnes au lieu de 2 millions de tonnes dans le cas de non-intégration de l'hydrogène dans le secteur des transports.

7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté une analyse sur le développement de la consommation énergétique et environnementale dans le secteur de transport routier à l'horizon du temps (2015-2045).

L'intégration de l'hydrogène comme carburant alternatif avec différents taux de pénétration au marché sur l'ensemble l'horizon a été étudié, nous a permis de diminuer la consommation énergétique d'une part, et faire des économies environnementales en terme des

émissions de CO₂, d'autre part. La part des véhicules à hydrogène devraient passer de 1% de nombre total de véhicules en 2020 à près de 10% en 2030, 30 % en 2040 et 50% en 2045.

Le secteur de transport routier consomme, 27.58 Mtep en 2020 et 342.03 Mtep en 2040 ; cette évolution est essentiellement due à la croissance rapide du parc automobile qui atteindra environ 15 millions véhicule en 2045. Après l'intégration de l'hydrogène, ses consommations de carburants fossile sont réduites à 27 Mtep en 2020 et 239.5 Mtep en 2040.

Le transport routier est à l'origine de l'émission de 88.13 KteqCO₂ en 2020 et 2.08 MteqCO₂ en 2045 ; c'est le secteur qui connaît la croissance « naturelle » la plus élevée sans aucune intervention. Les orientations inscrites dans le scénario B permettent de réduire les émissions du secteur de 83.34 KteqCO₂ en 2020 et 1.02 MteqCO₂ en 2045 en comparaison au scénario A. Cette réduction est obtenue principalement par la croissance du taux de pénétration de véhicule à hydrogène dans le marché national.

Comme nous l'avons conclu que les wilayas du Sud sont les wilayas productrices de l'hydrogène solaire par contre les wilayas du Nord sont les consommatrices avec une demande estimée environ 65% de la demande nationale, dont la capitale Alger représente 26% de la demande nationale. Ainsi, la plupart des stations-services sont concentrées la partie nordique du pays notamment dans la capitale.

Conclusion générale

Une réponse aux préoccupations actuelles suscitées par un bouquet énergétique principalement constitué de combustibles fossiles épuisables et nuisibles à l'environnement est de leurs substituer peu à peu des sources d'énergies renouvelables surtout dans le secteur de transport. L'hydrogène obtenu à partir des énergies renouvelables est perçu comme un carburant énergétique prometteur pour le secteur de transport.

L'objectif de ce travail est d'étudier les différents éléments techniques nécessaires pour l'intégration de l'hydrogène comme un carburant vert dans le secteur de transport routier en Algérie à l'horizon 2045.

Afin de réaliser cet objectif, nous avons tout d'abord commencé par le risque d'épuisement des ressources non renouvelables, le réchauffement climatique, font apparaître clairement que le modèle énergétique actuel n'est pas durable. Il est donc nécessaire d'engager une transition vers un modèle qui serait plus durable pour les besoins des générations présentes et futures. En ce qui concerne le secteur des transports est l'hydrogène comme carburant est la meilleure alternative.

Dans le deuxième chapitre, nous n'avons constaté que l'utilisation d'un vecteur énergétique tel que l'hydrogène offre une variété d'avantages sur plusieurs échelles. L'hydrogène facilite l'exploitation des ressources renouvelables pour les utilisées dans le secteur de transport. En effet, il permet de remplacer les carburants fossiles, assurant ainsi une réduction des émissions polluantes.

Dans le dernier chapitre, l'intégration de l'hydrogène comme carburant alternatif avec différents taux de pénétration au marché sur l'ensemble l'horizon a été étudié, nous a permet de diminuer la consommation énergétique d'une part, et faire des économies environnementales en terme des émissions de CO₂, d'autre part. Alors que le secteur de transport routier consomme, 661.5Mtep en 2045 est à l'origine de l'émission de 2.02 MteqCO₂ en 2045. Après l'intégration de l'hydrogène, ses consommations de carburants fossile sont réduites à 330.5 Mtep entraînant l'émission de CO₂ est estimé à environ 1.02 MteqCO₂.

Bibliographie

[1]	H. Derbal 1, R. Miri 1 et A. M’Raoui 2. Etude d’un système de production d’hydrogène par voie solaire Application sur l’électrolyse de la vapeur d’eau à très hautes températures ; Rev. Energ. Ren. Vol. 8 (2005) 137 – 156
[2]	Ministère de l’Énergie sur < http://www.energy.gov.dz/ > (Consulté le 25/02/2016)
[3]	BP Statistical Review of World Energy, BP, juin 2015, p 6-8-9-10-11-22-23-24-25-28
[4]	Réserves prouvées Années 2002 - 2010 : Pétrole - réserves prouvées (barils) [archive], CIA World Factbook, Index Mundi, 01 janvier 2011 et BP 2014
[5]	OPEP, « Annual Statistical Bulletin » [archive], sur http://www.opec.org/ [archive], 2013, p. 49 (World crude oil exports by country).
[6]	US Energy Information Administration, « Annual Energy Outlook 2014 » [PDF], 7 mai 2014.
[7]	Ministère de l’Énergie : Bilans énergétiques 1996-2014
[8]	IEA Statistics - Algeria : Balances for 2012 [archive], IEA, 7 octobre 2014.
[9]	FAO. Dossier sur le changement climatique à l’attention des décideurs. Organisation des nations unies pour l’alimentation et l’agriculture Rome, 2011 version 1.0
[10]	Ministère de l’Énergie : Consommation Énergétique Finale de l’Algérie Chiffres clés Année 2012
[11]	Transport & logistics and development prospects in Algeria ; November 2014
[12]	Ministère algérien des Transports. < http://www.ministeretransports.gov.dz/ > (Consulté le 25/02/2016)
[13]	Transport ferroviaire, De nouvelles lignes pour 2013-2014 [archive], Paru sur: Info-soir Le 02 juillet 2014
[14]	CIA World Factbook - Version du 01 janvier 2011 ,2013 : Consistance du Réseau Ferré, SNTF, 20 Aout 2014
[15]	L’Algérie et les perspectives de développement dans le secteur des transports et de la logistique
[16]	Mathieu viseur. Mémoire Master en Sciences et Gestion de l’Environnement; Etude de faisabilité de l’utilisation de l’hydrogène comme vecteur alternatif d’énergie viseur ; 2008
[17]	Mostafa Tazi , Thèse ,Modification du banc d'essai utilisé pour évaluer les performances d'un réservoir d'hydrogène à base d'hydrure métallique ,April 2009

[18]	Mémento de l'hydrogène, fiche 1.2. Les données de base physico-chimiques sur l'hydrogène ; révision de avril 2011 ; source : afh2
[19]	Germain gondor . Thèse ; Pour le stockage de l'hydrogène: analyse thermodynamique de la formation d'hydrures métallique set optimisation d'un réservoir ; 2008
[20]	Thèse ,Hydrogène Systems Modelling, Analysis and Optimisation ; Septembre 2009
[21]	Noureddine Hajjaji . Thèse ,Analyse de cycle de vie exégétique de systèmes de production d'hydrogène ; 2011
[22]	HananeDagdougui. Thèse ,Decision support systems for sustainable renewable energy systems and hydrogen logistics: modelling, control and risk analysis ; décembre 2011
[23]	Mustafa tasaltin . Economic and Environmental Supply of Hydrogen Fuels in Comparison with Conventional Fuels ; mars 2008
[24]	Maha bhouri. Optimisation des transferts de chaleur dans un système de stockage d'hydrogène à base d'alanate de sodium ; avril 2012
[25]	Air liquide ; [en ligne]. Disponible sur : < http://www.planetehydrogene.com/fr/lhydrogene/comment-le-stocker/sous-forme-solide.html > (Consulté le 25/02/2016)
[26]	McpHy energy ; [en ligne]. Disponible sur : < http://www.mcpHy.com/fr/produits/stockage-hydrogene-solide/ > (Consulté le 25/02/2016)
[27]	Inventaire des énergies renouvelables [en ligne]. Disponible sur : < http://energiein.e-monsite.com/pages/46-electrolyse-pour-moteur-thermique.html > (Consulté le 25/02/2016)
[28]	Changwei Ji et Shuofeng Wang, « Effect of hydrogen addition on combustion and emissions performance of a spark ignition gasoline engine at lean conditions », International Journal of Hydrogen Energy, vol. 34, septembre 2009
[29]	La pile à combustible ; [en ligne]. Disponible sur : http://lapileacombustible.e-monsite.com/pages/les-limites.html > (Consulté le 25/02/2016)
[30]	Hydrogène véhicule - bpfrance au tour de table d'ytrac [archive], La lettre des énergies renouvelables, 29 juillet 2015.
[31]	La France se penche sur le potentiel de la voiture à hydrogène [archive], Les Échos, 9 septembre 2015.
[32]	En Allemagne, un parc de pompes à hydrogène encore très limité [archive], Les Échos, 10 septembre 2015.

[33]	Voiture à hydrogène : les Etats-Unis en embuscade [archive], Les Échos, 22 décembre 2015.
[34]	Rahmouni Soumia ;Optimisation technico-économique de la production d'hydrogène à partir de différentes sources renouvelables dans le sud Algérien ; 12/06/2013
[35]	Office National des Statistique, 1996-2013
[36]	Boughedaoui M. 1, Chikhi S. 1, Driassa N. 1, Kerbachi R. 2, Joumard R, Caractérisation du parc de véhicule algérien et son usage ; Ghardaïa, Algérie, 16-18 fév. 2009. Actes, ENP ed., Alger, p. 201-208
[37]	S. Rahmouni, N. Settou, B. Negrou, N. Chennouf et R. Ghedamsi. Prospects ana analysis of hydrgen production from renewable elevtricity sources in Algeria. Progress in clean energy, volume 2. Springer International Publishing Switzerland 2015. p. 583-602.
[38]	Nils Johnson 1, Joan M. Ogden, 2, Christopher Yang,.3, ,Joshua Johnson 4 ; Estimating Hydrogen Demand Distribution Using Geographic Information Systems (Gis) ; March 29 – April 1, 2005
[39]	Toyota;[en ligne]. Disponible sur :< http://www.breezcar.com/actualites/article/essai-toyota-mirai-hydrogene-pile-a-combustible-1015 >(Consulté le 25/02/2016)
[40]	S. Rahmouni, N. Settou, B. Negrou, A. Gouareh. GIS-based method for future prospect of hydrogen demand in the Algerian road transport sector, international journal of hydrogen energy. 2016. p. 2128-2143.
[41]	UK H2 Mobility ;april 2013
[42]	Naftal;[en ligne]. Disponible sur :< http://www.naftal.dz >(Consulté le 25/02/2016)
[43]	Pierre Millet; Production d'hydrogène par électrolyse de l'eau sur membrane acide ; découverten n °343 décembre 2006

Annexe I: Système d'Information Géographique (SIG)

ArcMap représente l'information géographique comme une collection de couches et d'autres éléments dans une carte. Éléments cartographiques communs comprennent la trame de données contenant des couches cartographiques pour une mesure donnée plus une barre d'échelle, flèche nord, titre, texte descriptif, une légende de symbole, et ainsi de suite.

La principale application dans ArcGIS est ArcMap, qui est utilisé pour toutes les tâches de cartographie et d'édition ainsi que pour cartographie requête et d'analyse. Une carte est la vue la plus courante pour les utilisateurs de travailler avec l'information géographique. Il est la principale application dans tous les SIG à travailler avec l'information géographique.

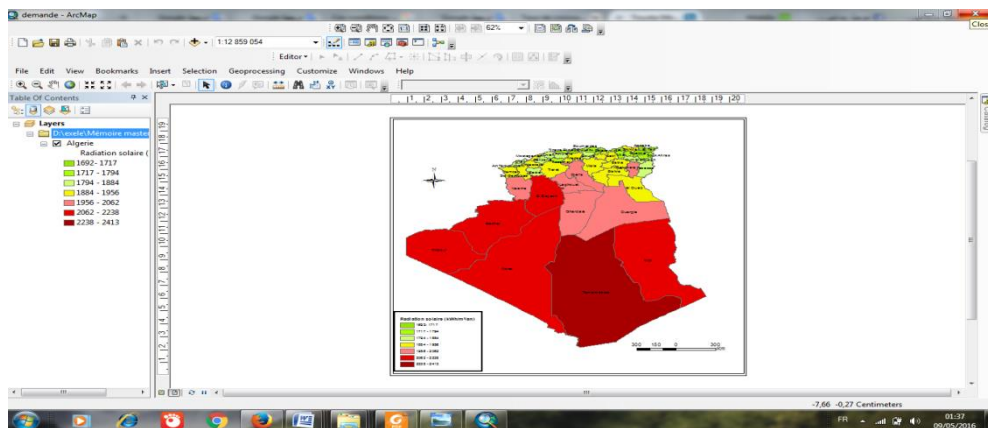


Figure 1 : Arc gis

Annexes II**Tableau 1 : La distribution spatio-temporelle de la demande en hydrogène dans tous les wilayas du territoire national**

Wilayas/Année	2020	2025	2030	2035	2040	2045
Adrar	165318,154	589996,773	2339570,93	5566395,32	9932833,15	19693809,1
AinTemouchent	266246,025	950193,864	3767895,08	8964717,98	15996896,2	31717015,2
Alger	8802042,22	31413225,9	124565885	296371847	528854302	1048558404
Annaba	1067618,1	3810175,81	15108856,5	35947560,7	64145843,4	127181840
Batna	910911,852	3250913,71	12891160,7	30671135,4	54730440,9	108513940
Bechar	145778,805	520263,639	2063051,43	4908489,71	8758847,78	17366150,6
Bejaia	1150778,1	4106961,92	16285731	38747624,9	69142357,1	137088418
Biskra	477397,056	1703761,6	6756089,68	16074343,2	28683512,3	56870744,6
Blida	1929326,62	6885489,89	27303695,1	64961980,3	115919994	229834348
BordjBouArreridj	528060,034	1884570,5	7473068,6	17780206,4	31727502,9	62906058,9
Bouira	602435,621	2150006,3	8525626,69	20284492,3	36196221,5	71766178,5
Boumerdes	969947,889	3461604,86	13726634,6	32658926,2	58277511,1	115546709
Chlef	779968,356	2783595,16	11038057,5	26262162,4	46862945	92915070,7
Constantine	1243127,23	4436542,74	17592649,5	41857094,6	74690982,7	148089667
Djelfa	400719,209	1430109,37	5670950,17	13492538,4	24076466,8	47736364,4
El Bayadh	137472,093	490618,178	1945495,43	4628796,05	8259754,5	16376599,3
El Oued	253447,585	904518,069	3586772,46	8533784,22	15227925,8	30192379,1
El Tarf	285367,384	1018435,25	4038499,23	9608549,56	17145767,4	33994880
Ghardaia	250793,684	895046,676	3549214,64	8444425,22	15068471,1	29876228,5
Guelma	307374,862	1096976,78	4349947,51	10349559	18468045,7	36616558,6
Illizi	47425,2183	169253,8	671158,366	1596845,28	2849455,85	5649610,62
Jijel	424902,886	1516417,44	6013195,87	14306822,2	25529498	50617286,4
Khenchela	235520,481	840538,807	3333069,34	7930164,19	14150809,1	28056782
Laghouat	166432,792	593974,758	2355345,22	5603926,1	9999804,14	19826592,4
Mascara	530601,144	1893639,36	7509030,22	17865767,7	31880180,8	63208773,1
Medea	645952,969	2305313,47	9141481,16	21749756,5	38810880,2	76950257,4
Mila	366583,402	1308283,57	5187862,62	12343158,3	22025480,5	43669877,7
Mostaganem	643073,486	2295037,01	9100730,92	21652802	38637871,9	76607234,1
Msila	545317,028	1946158,24	7717288,37	18361263,3	32764357,3	64961828
Naama	107403,39	383307,291	1519965,25	3616358,61	6453132,52	12794613,4
Oran	1801149,81	6428045,27	25489745,9	60646164,1	108218729	214565066
Ouargla	499165,682	1781450,7	7064157,76	16807310,4	29991439,7	59463969,6
OumElBouagh	275050,343	981615,211	3892493,17	9261166,46	16525887,2	32765844,7
Relizane	272814,431	973635,562	3860850,71	9185881,5	16391546,6	32499487,8
Saida	321891,703	1148785,3	4555388,82	10838352,8	19340263	38345902,2
Setif	776577,997	2771495,46	10990077,4	26148006,3	46659241,6	92511188,3
SidiBelAbbes	497089,004	1774039,34	7034768,76	16737386,9	29866666,4	59216581,8
Skikda	710210,557	2534639,59	10050850	23913361,2	42671677,6	84605053

SoukAhras	139867,239	499166,11	1979391,37	4709442,54	8403662,39	16661925,2
Tamanrasset	126975,913	453158,817	1796954,23	4275381,21	7629111,08	15126223,8
Tebessa	386361,603	1378869,13	5467762,33	13009106,2	23213816,8	46025989,8
Tiaret	426780,521	1523118,45	6039768,03	14370043,7	25642312,2	50840962,9
Tindouf	24608,3009	87823,4952	348254,949	828581,3	1478543,89	2931506,13
Tipaza	784340,659	2799199,28	11099934	26409381,4	47125646,6	93435928,7
Tissemsilt	180418,853	643889,001	2553274,96	6074848,02	10840130,5	21492705,9
TiziOuzou	1161174,76	4144066,11	16432863,8	39097688,8	69767021	138326938
Tlemcen	879144,652	3137541,13	12441593,5	29601508,2	52821767,9	104729617
AinDefla	343554,173	1226095,55	4861954,58	11567745,6	20641812,2	40926481,2

Annexes III : stations-services Naftal

NAFTAL : est une entreprise algérienne, filiale à 100 % de Sonatrach. Elle est chargée de la distribution des produits pétroliers sur le marché algérien.

Site NAFTAL vous obtenez lui sur les stations-service actuelles

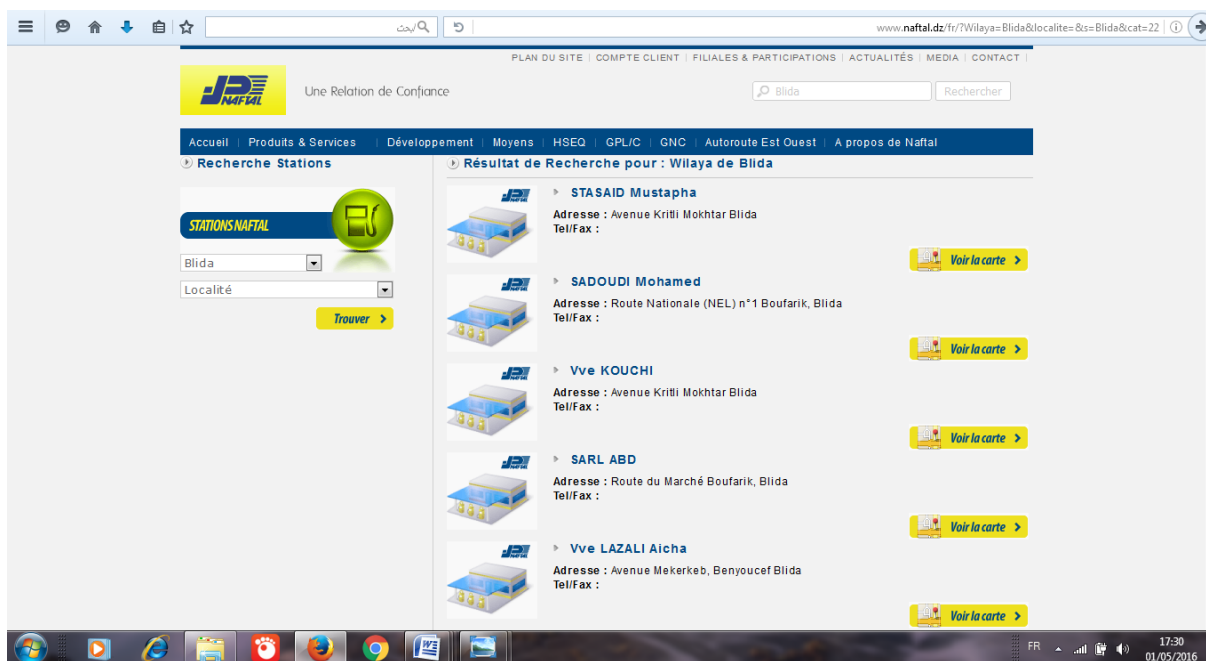


Figure 1 : Site de NAFTAL

Annexes IV**Tableau 2 : Distribution spatio-temporelle de station-service dans toutes les wilayas du territoire national**

Wilayas/Année	2020	2025	2030	2035	2040	2045
Adrar	0	1	6	15	27	53
Ain-Temouchent	0	2	10	24	43	86
Alger	24	80	340	808	1443	2861
Annaba	2	10	41	98	175	347
Batna	2	8	35	83	149	296
Bechar	0	1	5	13	23	47
Bejaia	3	11	44	105	188	374
Biskra	1	4	18	43	78	155
Blida	5	1	74	177	316	627
Bordj-Bou-Argeridj	1	5	20	48	86	171
Bouira	1	5	23	55	98	195
Boumerdes	2	9	37	89	159	315
Chlef	2	7	30	71	127	253
Constantine	3	1	48	112	203	404
Djelfa	1	3	15	36	65	130
El Bayadh	0	1	5	12	20	44
El Oued	0	3	9	23	42	82
El Tarf	0	2	11	26	46	92
Ghardaia	0	2	9	23	41	80
Guelma	0	3	11	28	50	100
Illizi	0	0	0	4	7	15
Jijel	1	4	16	39	69	138
Khenchela	0	2	9	21	38	76
Laghouat	0	1	6	15	27	54
Mascara	1	5	20	45	87	172
Medea	1	6	25	59	105	210
Mila	1	3	14	33	60	119
Mostaganem	1	6	25	59	105	209
Msila	1	5	21	50	89	177
Naama	0	1	4	9	17	35
Oran	4	1	69	165	295	585
Ouargla	1	4	19	45	81	162
OumElBouagh	0	2	10	25	45	89
Relizane	0	2	10	25	44	88
Saida	0	3	12	29	52	104
Setif	2	7	30	71	127	252
SidiBelAbbes	1	4	19	45	81	161
Skikda	1	6	27	65	116	230

SoukAhras	0	1	5	12	22	45
Tamanrasset	0	1	5	11	20	41
Tebessa	1	3	15	35	63	125
Tiaret	1	4	16	39	69	138
Tindouf	0	0	1	2	4	8
Tipaza	2	7	34	72	128	255
Tissemsilt	0		7	16	29	58
TiziOuzou	3	11	45	106	190	377
Tlemcen	2	8	34	80	144	285
AinDefla	0	3	13	31	56	111