



**REPUBLIQUE ALGERIENNE
DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT
SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Faculté des Sciences Appliquées
Département Génie Mécanique**



N° d'ordre :
N° de série :

Mémoire

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER PROFESSIONNEL

Spécialité : Génie Mécanique

Option : Energétique

Présenté par :

Chaoubi Houssam

Bougueffa Eutamene Mohamed Lamine

Thème

**Choix de site optimal pour la production d'hydrogène solaire par
approche SIG basée sur l'analyse multicritères : Application
région de Ouargla**

Soutenu publiquement le : 31/05/2017

Devant le jury composé de :

Mr. Settou Noureddine Pr. Président Université Kasdi Merbah Ouargla
Mr. Negrou Belkhir MCA Examineur Université Kasdi Merbah Ouargla
Mlle. Rahmouni Soumia MAB Encadreur Université Kasdi Merbah Ouargla

Année universitaire : 2016/2017

DEDICACES



Je dédie ce mémoire à :

· Mes parents :

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie, reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

Mon père, qui peut être fier et trouver ici le résultat de longues années de sacrifices et de privations pour m'aider à avancer dans la vie. Puisse Dieu faire en sorte que ce travail porte son fruit ; Merci pour les valeurs nobles, l'éducation et le soutien permanent venu de toi.

Mes frères et sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

A toute ma famille, mes amis pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

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 modeste travail, Nous remercions profondément la directrice du mémoire **Mlle. Soumia Rahmouni** 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 :

Mr. Nouredine Settou

Mr. Belkhir Negrou

Dans l'impossibilité de citer tous les noms, notre sincères remerciements vont à tous ceux et celles, qui de près ou de loin, ont permis par leurs conseils et leurs compétences la réalisation de ce mémoire et en particulier :

Mr. Abderrahmane Gouareh

Choix de site optimal pour la production d'hydrogène solaire par approche SIG basée sur l'analyse multicritères : Application région de Ouargla

Résumé

L'utilisation de l'hydrogène-carburant dans le secteur des transports nécessite un changement dans la chaîne d'approvisionnement énergétique actuelle. Ces dernières années, l'Algérie a intensifié ses efforts pour diversifier ses ressources et assurer un environnement durable par la mise en œuvre des politiques et stratégies énergétiques et économiques. L'intégration de l'hydrogène dans le secteur du transport routier comme carburant peut aider le pays à atteindre ses objectifs stratégiques. L'objectif de ce travail est de développer une méthodologie permettant d'aider à choisir une ou plusieurs zones favorables considérées comme un site de production d'hydrogène afin de le distribuer vers le consommateur final, reposant sur le couplage de la simulation et le Système d'Information Géographique (SIG). Cette étude présente une estimation de la demande en hydrogène pour la région de Ouargla, à l'horizon 2050. Les données statistiques décrivant la situation actuelle du parc automobile, et de la population par Daïra sont collectées de différentes sources bibliographiques. La répartition géographique de la demande d'hydrogène en se basant sur plusieurs taux de pénétration au marché des véhicules à hydrogène est présentée. Le potentiel de la production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire photovoltaïque est estimé pour les différentes Daïras. Ensuite, afin de sélectionner la zone favorable pour la production d'hydrogène solaire, nous avons considéré plusieurs critères (La proximité de routes principales, des stations-service, le potentiel de l'énergie solaire... etc.). Les résultats sont discutés selon deux scénarios.

Mots-clés : Transport routier, Demande en hydrogène, Zone favorable, Hydrogène-carburant, Système d'Information Géographique (SIG).

ملخص

يتطلب استخدام الهيدروجين في المستقبل كبديل للطاقة في قطاع النقل تحولا في سلسلة إمدادات الطاقة الحالية . في السنوات الأخيرة، كثفت الجزائر جهودها لتنويع مواردها وضمان الاستدامة البيئية من خلال تنفيذ سياسات واستراتيجيات حيوية واقتصادية. إن إدماج الهيدروجين في قطاع النقل البري كوقود يمكن أن يساعد البلد على تحقيق أهدافه. والهدف من هذا العمل هو وضع منهجية للمساعدة في اختيار المنطقة أو أكثر المناطق مواتية التي ستعتبر منشأة لإنتاج الهيدروجين لتوزيعها على المستهلك النهائي، استنادا إلى المحاكاة ونظم المعلومات الجغرافية (SIG). تقدم هذه الدراسة تقدير الطلب على الهيدروجين لمنطقة ورقلة إلى غاية 2050. ويتم جمع البيانات الإحصائية التي تصف الوضع الحالي لعدد المركبات، والسكان في كل دائرة. ويُرَد التوزيع الجغرافي للطلب على الهيدروجين بناء على الافتراضات المتعلقة باختراق السوق للمركبات التي تعمل بالهيدروجين. ويقدر إمكانات لإنتاج الهيدروجين من الطاقة الشمسية لمختلف الدوائر، لتحديد المنطقة الملائمة لإنتاج الهيدروجين الشمسي، تم اختيارها وفقا لمعايير مختلفة (القرب من الطرق الرئيسية ومحطات البنزين، وإمكانات الطاقة الشمسية ... الخ). وتناقش النتائج في إطار سيناريوهين.

الكلمات المفتاحية : النقل البري، الطلب على الهيدروجين، المنطقة الأنسب، الهيدروجين كوقود، نظم المعلومات الجغرافية.

Sommaire

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

Chapitre I : L'hydrogène comme un carburant vert

1. Introduction	3
2. Propriétés de l'hydrogène	3
3. Méthodes de production de l'hydrogène	4
3.1. Production de l'hydrogène par vaporeformage	4
3.2. Production d'hydrogène par oxydation partielle	5
3.3. Production d'hydrogène par la Gazéification de charbon	5
3.4. Production d'hydrogène par électrolyse	6
3.5. Production d'hydrogène par nucléaire	7
3.6. Production d'hydrogène à partir la biomasse	8
4. Stockage de l'hydrogène	9
4.1. Stockage gazeux	9
4.2. Stockage liquide	10
4.3. Stockage solide	10
5. Transport de l'hydrogène	11
5.1. Transport par pipelines	11
5.2. Transport par rail	11
5.3. Transport par navire	12
5.4. Transport par camion	12
6. Travaux mondiaux	13
7. L'utilisation de l'hydrogène	14
7.1. Dans l'industrie	14
7.2. Dans le spatial	15
7.3. Pour l'énergie	15
7.3.1. Véhicules à hydrogène	15
7.3.2. Pile à combustible	16

8. Conclusion	18
---------------	----

Chapitre II : SIG comme un outil d'aide à la décision

1. Introduction	19
2. Définition d'un système d'information géographique	19
3. Différents domaines d'applications du SIG	20
3.1. Transport	20
3.2. Gaz, Electricité et Mines	20
3.3. Planification énergétique	20
4. Mode de présentation des données dans un SIG	21
4.1. Données vectorielles	21
4.1.1. Les points	21
4.1.2. Les lignes	22
4.1.3. Les polygones	22
4.2. Le mode raster	22
4.3. Données alphanumériques	23
5. Logiciels utilisés	23
6. Les outils utilisés dans le SIG	24
6.1. L'interpolation spatiale	25
6.2. Distance euclidienne	25
6.3. La reclassification	26
7. Conclusion	26

Chapitre III : Développement d'une infrastructure de la distribution d'hydrogène

1. Introduction	27
2. Développement d'une infrastructure de la distribution de l'hydrogène solaire	27
3. Présentation de la région d'étude	28
3.1. Situation géographique et Cadre physique	28
3.2. Les données climatiques	29
4. Etude prospective de la distribution spatio-temporelle de la demande en hydrogène dans le secteur de transport routier	30
4.1. Modélisation de la demande en hydrogène	30
4.1.1. Population	31
4.1.2. Parc automobile	32

4.1.3. Taux de pénétration au marché de véhicule	33
4.1.4. Consommation spécifique pour un véhicule à hydrogène	34
4.2. Projection des données statistiques à l'horizon 2050	35
4.2.1. Projection de la population	35
4.2.2. Projection de nombre de véhicules	36
4.2.3. Estimation de la demande en hydrogène	37
5. Potentiel de production d'hydrogène solaire	39
5.1. Modélisation de la chaîne de production d'hydrogène solaire par l'électrolyse de l'eau	40
5.1.1. Modélisation énergétique de la production d'énergie électrique photovoltaïque	40
5.1.2. Modélisation énergétique de l'électrolyseur	42
5.2. Evaluation du potentiel de la production de l'hydrogène dans la région de Ouargla	43
6. Le choix de site de production d'hydrogène solaire	44
6.1. Développement des cartes	45
6.1.1. La carte routière	45
6.1.2. La carte des stations-services	47
6.1.3. La carte de demande en hydrogène	48
6.1.4. La carte des zones habitantes, des lacs, autres zones	49
6.2. La reclassification des couches d'information	50
6.3. Poids et combinaison des couches d'information	51
6.4. Résultats et discussion	52
6.4.1. Scénario 1 : Poids égaux	52
6.4.2. Scénario 2 : Poids pondérés	52
6.4.3. Comparaison entre les résultats de deux scénarios	52
6.5. Le site de production d'hydrogène solaire	54
7. Conclusion	56
Conclusion générale	57
Bibliographie	59
Annexe 1	62
Annexe 2	63
Annexe 3	64

Nomenclature

Symbole	Définition	Unité
A_{pv}	Surface totale de générateur photovoltaïque	m ²
CSVH	Consommation spécifique pour un véhicule à hydrogène	KgH ₂ /an/véh H ₂
D_H	La demande en hydrogène	kg H ₂ / an
E_{el}	Energie absorbée par l'électrolyseur	kWh
E_{PV}	Energie électrique photovoltaïque	kWh
E_{pv}	Energie électrique délivrée par le panneau PV	kWh
G	Irradiation solaire globale sur un plan horizontal	kWh/m ²
KPA	Kilométrage parcouru annuelle	km/an
m_{H_2}	Masse d'hydrogène	Kg
NV_{hab}	Nombre de véhicule par habitant	Véh. /hab.
P	La population	habitants
PCI_{H_2}	Pouvoir calorifique supérieur d'hydrogène	kWh/kg
P_m	Nombre (d'habitants ou véhicules) pour l'année m	Hab. ou Véh.
P_n	Nombre (d'habitants ou véhicules) pour l'année n	Hab. ou Véh.
TCAM	Taux de Croissance Annuel Moyen	%
TP	Taux de penetration	%

Lettres grecques

η_{pv}	Rendement de générateur photovoltaïque	%
η_{elec}	Rendement d'électrolyseur	%
η_p	Rendement supplémentaire inclus pour tenir compte les pertes d'énergie dans l'électrolyseur	%

Liste d'abréviations

EME	Electrode – Membrane - Électrode	-
Esri	Environmental Systems Research Institute	-
GNL	Gaz Naturel Liquéfier	-
GRDF	Gaz Réseau Distribution France	-
IDW	Inverse Distance Weighted	-
PEM	Proton Exchange Membrane	-
PV	Panneau photovoltaïque	-
SIG	Système d'Information Géographique	-
SOEC	Solid Oxid Electrolyser Cell	-

Liste des tableaux

Chapitre I : L'hydrogène comme un carburant vert

Tableau(I.1)	Propriétés physico-chimiques de l'hydrogène	4
Tableau(I.2)	Données techniques des différents électrolyseurs	7
Tableau(I.3)	Principaux pipeline transportant de l'hydrogène en Europe	13
Tableau(I.4)	Les différents types des piles à combustible	17

Chapitre III : Développement d'une infrastructure de la distribution d'hydrogène

Tableau(III.1)	Daïras et communes de la région de Ouargla	28
Tableau(III.2)	Croissance de la population dans la région de Ouargla de 1998-2015	31
Tableau(III.3)	Croissance de parc automobile dans la région de Ouargla de 1997-2013	32
Tableau(III.4)	Taux de pénétration au marché de véhicule à hydrogène	34
Tableau(III.5)	TCAM de population de la région de Ouargla	36
Tableau(III.6)	TCAM de parc automobile de la région de Ouargla	37
Tableau(III.7)	La demande annuelle en hydrogène pour l'année 2050	38
Tableau(III.8)	La reclassification de potentiel de production d'hydrogène	50

Liste des figures

Chapitre I : L'hydrogène comme un carburant vert		
Figure (I.1)	Cellule d'électrolyse de l'eau	7
Figure (I.2)	Différents procédés de production d'hydrogène	9
Figure (I.3)	Réseaux de pipelines hydrogène d'air Liquide du nord de l'Europe	14
Figure (I.4)	Composition d'une cellule élémentaire d'une pile à combustible	17
Chapitre II : SIG comme un outil d'aide à la décision		
Figure (II.1)	Schéma général d'un SIG	21
Figure (II.2)	Représentation de l'information en mode vectoriel	22
Figure (II.3)	Représentation des données en mode raster	22
Figure (II.4)	Exemple des données alphanumériques	23
Figure (II.5)	Le système ArcGIS	24
Chapitre III : Développement d'une infrastructure de la distribution d'hydrogène		
Figure (III.1)	Cartographie de la température annuelle moyenne dans la région de Ouargla	29
Figure (III.2)	Organigramme de calcul de la demande en hydrogène	31
Figure (III.3)	Croissance de la population dans la région de Ouargla de 1998-2015	32
Figure (III.4)	Croissance de nombre de véhicules dans la région de Ouargla de 1997-2013	33
Figure (III.5)	Variation du taux de pénétration des véhicules à hydrogène dans parc automobile en fonction des périodes	34
Figure (III.6)	Projection de la population de l'année 2017-2050 dans la région de Ouargla	36
Figure (III.7)	Projection du nombre de véhicules à l'horizon 2050	37
Figure (III.8)	Evolution de la demande en hydrogène	38
Figure (III.9)	Demande en hydrogène par daïra	39
Figure (III.10)	Schéma de principe de fonctionnement de l'installation de production de l'hydrogène (PV/H ₂)	40
Figure (III.11)	Cartographie de l'irradiation solaire dans la région de Ouargla	41

Figure (III.12)	Schéma de principe de fonctionnement de l'électrolyse de l'eau à PEM	42
Figure (III.13)	Répartition de la production d'hydrogène sur la région de Ouargla	44
Figure (III.14)	Méthodologie utilisée pour choisir les sites de production	45
Figure (III.15)	Cartographie de réseau routier de la région de Ouargla	46
Figure (III.16)	La carte routière après le traitement	46
Figure (III.17)	Répartition spatiale des stations-services dans la région de Ouargla	47
Figure (III.18)	Les stations-services après le traitement	48
Figure (III.19)	Cartographie de la demande en hydrogène dans la région de Ouargla	49
Figure (III.20)	Cartographie des zones habitantes, des lacs et autres différents zones	50
Figure (III.21)	La reclassification de la couche de production d'hydrogène	51
Figure (III.22)	Interface Raster Calculator sur l'ArcGIS	51
Figure (III.23)	Résultat de scénario 1	53
Figure (III.24)	Résultat de scénario 2	53
Figure (III.25)	Le site de production d'hydrogène solaire	55

Introduction générale

Introduction générale

La consommation mondiale de l'énergie est sans cesse croissante, notamment dans le secteur des transports. L'épuisement des ressources d'énergie fossiles et le réchauffement climatique de la planète ont conduit les différents pays à promouvoir les politiques de développement durable et de protection de l'environnement. La grande préoccupation du monde actuelle est d'atténuer cette pollution en essayant d'adapter les sources d'énergie classiques à des critères très sévères et de développer d'autres alternatives mettant en valeur les différentes formes des énergies renouvelables.

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 36.5 % de la consommation totale du pays, est considéré comme l'une des premières sources de pollution en Algérie avec des émissions atteignant 14 millions de tonnes équivalent CO₂, soit un taux de 46% des émissions de gaz à effet de serre. L'essentiel de l'énergie consommée dans ce secteur provient des dérivés du pétrole dont 65% gasoil et 26% essence, alors que le GPL, qui est un carburant propre, ne représente que 3% [1].

Pour remédier aux 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'intérêt de l'hydrogène ne se limite pas à la seule valorisation des combustibles fossiles, mais aussi aux autres formes d'énergie primaire. En effet, il présente plusieurs caractéristiques intéressantes, susceptibles d'en faire un des vecteurs énergétiques du futur. En particulier, il peut facilement être utilisé pour alimenter des moteurs de véhicule [2].

Afin d'utiliser l'hydrogène, nous avons besoin de développer une infrastructure, qui achemine de l'hydrogène produit depuis le lieu de production jusqu'aux différents sites d'utilisation. Plusieurs études dans ce domaine ont été effectuées au niveau national (en Allemagne [3], la Chine [4]) ou régional tel qu'en Californie du sud [5].

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 dans la région de Ouargla à l'horizon 2050 et un choix d'un ou plusieurs sites de production d'hydrogène 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).

Ce travail a été organisé de façon à permettre une lecture à différents niveaux. Il est ainsi structuré autour de trois chapitres :

Le premier chapitre présentera d'une façon générale les caractéristiques d'hydrogène, les modes de production, les méthodes de stockage et quelques travaux mondiaux dans le transport de l'hydrogène. Les différentes méthodes de transport d'hydrogène, et ses applications dans l'industrie et le domaine énergétique seront présentées.

Le deuxième chapitre vise à aborder toutes les questions liées à la fois à l'utilisation des systèmes d'aide à la décision basée sur le Système Information Géographique SIG et une présentation générale sur le logiciel ArcGIS.

Le dernier chapitre, nous proposons une étude rétrospective du secteur de transport routier dans la région de Ouargla, 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 dans cette région. 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). Puis nous utilisons une méthodologie basé sur des différents critères afin d'arrivé au choix d'une zone favorable pour la production d'hydrogène solaire dans la région de Ouargla. Enfin, nous proposons des scénarios afin de déterminer la zone favorable de production d'hydrogène optimale. Nous terminons ce travail par une conclusion générale et quelques recommandations.

Chapitre I :
L'hydrogène comme un
carburant vert

1. Introduction

Ces dernières années, en réponse à une inquiétude de plus en plus marquée à l'égard de l'impact écologique de la consommation d'énergie et à une vive préoccupation sur la sécurité des réserves de combustibles fossiles, la fourniture de services énergétiques à base d'hydrogène suscite un intérêt croissant. L'hydrogène, comme vecteur énergétique, peut en principe remplacer toutes les formes d'énergies utilisées aujourd'hui et fournir des services énergétiques à tous les secteurs de l'économie.

Dans ce chapitre nous commencerons par décrire des généralités sur les propriétés de l'hydrogène. Pour y voir plus clair, il est à noter que l'hydrogène est un vecteur énergétique et non une énergie primaire, et comme il est l'élément le plus abondant sur terre, il est donc nécessaire de posséder des technologies capables de le produire. Pour cette raison, nous rappellerons les différentes méthodes de production d'hydrogène. Par la suite nous mentionnerons les modes de stockage et de transport de l'hydrogène, et nous citerons quelques travaux mondiaux sur le transport d'hydrogène. Nous terminerons ce chapitre par l'utilisation finale de l'hydrogène produit dans différents domaines d'applications.

2. Propriétés de l'hydrogène

L'hydrogène est l'atome situé en première place dans le tableau périodique des éléments. Il est l'élément chimique le plus simple; son isotope le plus commun est constitué seulement d'un proton et d'un électron. L'hydrogène est ainsi le plus léger atome existant. Comme il ne possède qu'un électron, il ne peut former qu'une liaison covalente: c'est un atome univalent. Les propriétés physico-chimiques de l'hydrogène sont données dans le tableau (I.1).

L'élément hydrogène est extrêmement abondant sur Terre, dans l'eau des lacs, des rivières et des océans ainsi que dans les combustibles fossiles; c'est le constituant essentiel de notre univers mais il n'existe pas à l'état libre. Le dihydrogène est la forme moléculaire de l'élément hydrogène, qui existe à l'état gazeux aux conditions normales de température et de pression. Les molécules comportent deux atomes d'hydrogène, sa formule chimique est H_2 . Il est également appelé « molécule d'hydrogène » ou « gaz hydrogène » et, dans le langage courant, lorsqu'il n'y a pas d'ambiguïté avec l'élément chimique du même nom, il est très

fréquemment désigné par «hydrogène ». Le dihydrogène est un gaz incolore, inodore et non corrosif, et présente l'avantage d'être très énergétique [2].

Tableau(I.1): Propriétés physico-chimiques de l'hydrogène [6].

Propriété	Valeur numérique
PCI (Pouvoir calorifique inférieur)	119 930 kJ/kg 33.33 kWh/kg
Densité gazeuse à 20,3K	1.34 kg/m ³
Densité gazeuse à 273K	0.08988 kg/Nm ³
Chaleur spécifique (Cp)	14 266 J/kg.K (293K)
Chaleur spécifique (Cv)	10 300 J/kg.K
Masse atomique	1.0079
Température de solidification	14.01K
Température d'ébullition (à 1013 mbar abs.)	20.268K
Vitesse de flamme dans l'air	260 cm/s

3. Méthodes de production de l'hydrogène

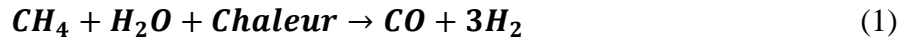
L'hydrogène n'est pas directement disponible dans la nature. Mais il peut être produit à partir de diverses matières premières. Notamment les ressources fossiles, comme le gaz naturel et du charbon, ainsi que des ressources renouvelables, comme la biomasse et de l'eau avec l'apport des sources d'énergie renouvelables (par exemple la lumière du soleil, le vent, les vagues ou l'hydroélectricité...etc.).

Une variété de technologies de procédé peut être utilisée, y compris chimique, biologique, électrolytique, photo-lytique et thermochimique. Chaque technologie est à un stade de développement différent, et chacun offre des opportunités uniques, des avantages et des défis.

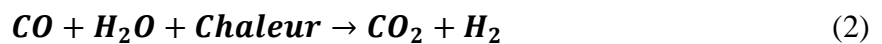
3.1. Production de l'hydrogène par vaporeformage

Aujourd'hui, 95 % du l'hydrogène est produit à partir des combustibles fossiles par reformage: cette réaction chimique casse les molécules d'hydrocarbure sous l'action de la chaleur pour en libérer l'hydrogène.

Le vaporeformage est généralement effectué à partir de gaz naturel. Il peut également l'être à partir de méthane ou de naphta. Selon la nature des hydrocarbures utilisés, appelés charge de vaporeformage, et la pureté d'hydrogène souhaitée, différents procédés existent. Pour maximiser la production d'hydrogène, les deux principales réactions chimiques à mettre en œuvre sont la production de gaz de synthèse et la conversion du CO [7].



Le CO produit peut être en outre converti en CO_2 et d'hydrogène par la réaction de conversion eau-gaz :



Le vaporeformage du gaz naturel est le procédé le plus courant (utilisant un catalyseur au nickel). Le gaz naturel est exposé à de la vapeur d'eau très chaude, et libère ainsi l'hydrogène qu'il contient. Mais la production de l'hydrogène par reformage a l'inconvénient de rejeter du gaz carbonique (CO_2), principal responsable de l'effet de serre dans l'atmosphère. Pour éviter cela, sa production à partir de combustibles fossiles supposerait donc d'emprisonner le gaz carbonique par des techniques qui doivent faire l'objet de développements (on envisage, par exemple, de réinjecter le gaz carbonique dans les puits de pétrole épuisés) [8].

3.2. Production d'hydrogène par oxydation partielle

L'oxydation partielle consiste à transformer les hydrocarbures en gaz de synthèse par oxydation ménagée en présence d'oxygène. Cette réaction a lieu à haute température (1200 à 1500°C) et pression élevée (20 à 90 bar) et ne nécessite pas la présence d'un catalyseur [9].

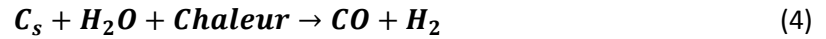
La réaction générale d'oxydation partielle est la suivante :



3.3. Production d'hydrogène par la Gazéification de charbon

L'hydrogène peut être produit à partir du charbon par une variété des procédés de gazéification (par exemple lit fixé, lit de fluidisation ou écoulement entraîné). Dans la pratique, des procédés entraînés à hautes températures d'écoulement sont favorisés pour

maximiser la conversion du charbon en gaz, de ce fait évitant la formation des quantités significatives du charbon, goudrons et phénols. Une réaction typique pour le processus est donnée dans l'équation suivante, dans laquelle le carbone est converti en oxyde de carbone et hydrogène [10].

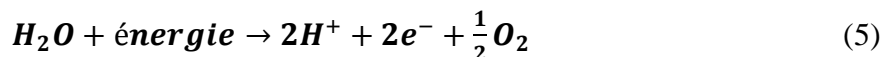


3.4. Production d'hydrogène par électrolyse

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 à combustible. 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 [11].

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) :

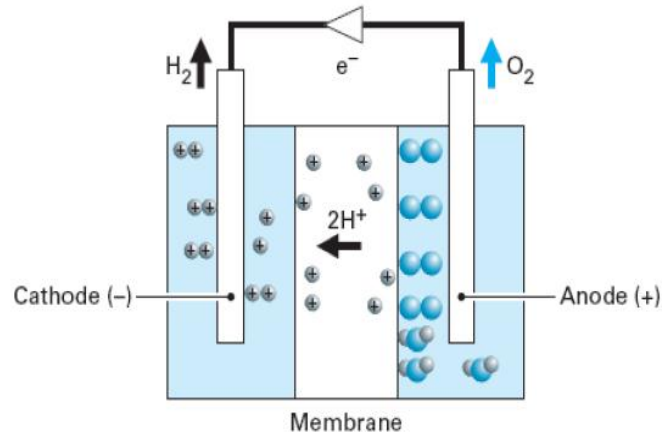


A la cathode, les protons, passés à travers la membrane, se réduisent avec les électrons pour donner de l'hydrogène (réduction):



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 [11].



Figure(I.1) : Cellule d'électrolyse de l'eau [12].

Il existe actuellement trois types d'électrolyseurs d'eau classés selon la nature de leur électrolyte dont résulte leur température de fonctionnement, le tableau (I.2) résume les principales caractéristiques de ces trois types d'électrolyte.

Tableau(I.2): Données techniques des différents électrolyseurs [13].

Type	PEM	Alcalin	SOEC
Température de fonctionnement (°C)	80-100	50-100	800-1000
Pression de fonctionnement (bar)	1-70	3-30	-
Consommation électrique (kWh/Nm ³ d'H ₂)	6	4-5	3-3.5
Rendement énergétique (%)	80-90	75-90	80-90
Etat du marché	Développement	Commercialisé	Recherche

3.5. Production d'hydrogène par nucléaire

L'énergie nucléaire peut être utilisée pour l'électrolyse ou pour fournir de la chaleur pour réduire les besoins énergétiques associés à la reformation à la vapeur du gaz naturel ou dans un procédé thermochimique de dissociation des molécules d'eau. L'uranium utilisé pour alimenter les centrales nucléaires est une ressource domestique relativement abondante, mais il existe des obstacles importants à l'expansion de l'énergie nucléaire. L'énergie nucléaire est une source potentielle attrayante d'hydrogène pour l'économie de l'hydrogène [14].

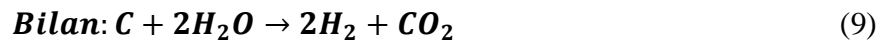
3.6. Production d'hydrogène à partir la biomasse

La biomasse correspond à tous les végétaux qui se développent sur la planète grâce à l'assimilation de l'énergie solaire. Elle représente une ressource renouvelable considérable. On distingue, parmi les ressources utilisables pour la production d'énergie :

- La biomasse forestière : bois d'œuvre, rémanents forestiers, bois de taillis, écorces, chutes ;
- La biomasse agricole : paille, plantations possibles sur la jachère ;
- Les déchets : bois, papiers et cartons usagés, farines animales, autres résidus.

Pour produire du l'hydrogène à partir la biomasse, il faut faire une transformation thermochimique. Les produits de la biomasse sont composés principalement de $C_6H_9O_5$.

La première étape consiste donc à sécher la matière qui devient alors $C_6H_7O_4$, on chauffe à 600°C , pour provoquer la dégradation thermique : c'est la thermolyse. Après cette étape, les produits sont à 70% gazeux, sous forme de CH_4 , H_2 , CO , CO_2 et quelques indésirables tels les goudrons. Les 30% solides restants sont essentiellement composés de carbone. On continue donc à élever la température jusqu'à 1000°C pour gazéifier le carbone. On introduit ensuite de la vapeur d'eau qui, réagissant avec le carbone, produit du dihydrogène et du monoxyde de carbone. On convertit ensuite le CO par une réaction avec de l'eau [15].



Après cette opération, on élève la température jusqu'à 1100°C afin d'éliminer les acides et les goudrons. Enfin, on raffine le gaz de biomasse pour récupérer l'hydrogène.

En fin le choix des méthodes de production changera selon la disponibilité de la matière de base ou de la ressource, de la qualité exigée et de la pureté souhaitée de l'hydrogène. Dans toute production d'hydrogène, trois aspects doivent être pris en considération, à savoir : la matière première (l'eau ou les hydrocarbures), l'énergie nécessaire

pour la production (peut-être : conventionnelle, nucléaire ou renouvelable) et le procédé de production Figure(I.2).

H ₂ à partir de combustibles fossiles	H ₂ à partir de nucléaire	H ₂ à partir de la biomasse	H ₂ à partir de renouvelables
<ul style="list-style-type: none">•Gazéification de charbon•Reformage autotherme•Oxydation partielle•Vaporeformage	<ul style="list-style-type: none">•Electrolyse•Thermochimie	<ul style="list-style-type: none">•Gazéification de la biomasse•Thermochimie	<ul style="list-style-type: none">•Solaire-électrolyse•Eolien-électrolyse•Photochimique•Photobiologique

Figure (I.2): Différents procédés de production d'hydrogène [16].

4. Stockage de l'hydrogène

Une fois produit, l'hydrogène doit être stocké pour pouvoir ensuite être distribué. La problématique du stockage est l'un des verrous technologiques pour l'usage de l'hydrogène en tant que vecteur d'énergie. D'une part, il doit permettre un haut degré de sécurité et d'autre part, il doit être facile d'utilisation.

Aujourd'hui, l'hydrogène peut être stocké sous trois formes différentes: gazeux, liquide ou solide. Ces trois méthodes de stockage diffèrent par leurs densités volumiques et gravimétriques par leurs aspects sécuritaires et par leurs coûts.

4.1. Stockage gazeux

Le stockage du gaz hydrogène sous des pressions de l'ordre de 200 à 250 bars dans un réservoir en acier est une technique éprouvée depuis de nombreuses années et largement répandue de nos jours dans le monde industriel. Toutefois, cette technologie est fortement pénalisée par le poids des bouteilles. A température ambiante, la capacité volumique est de l'ordre de 14 g/dm³ sous 200 bars. Compte tenu des problèmes de fragilisation de l'acier induit par l'hydrogène, les parois doivent être suffisamment épaisses et résistantes. Toute augmentation de pression entraîne ainsi un accroissement de la masse de l'enveloppe limitant tout développement futur de cette technique. La solution innovante pour le stockage sous pression vient aujourd'hui des structures en fibres bobinées et en résine qui permettent d'atteindre des pressions de stockage beaucoup plus élevées tout en réduisant la masse de l'enveloppe. Actuellement, des pressions de service de 350 bars sont couramment proposées

et les recherches s'orientent vers des pressions encore plus importantes de l'ordre de 700 à 800 bars. Dans ces conditions, des capacités volumiques de l'ordre de 40 g/dm³ sont obtenues et des capacités massiques de plus de 10 % pour le système complet sont envisageables [17].

4.2. 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 bars), 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 [18].

4.3. Stockage solide

L'hydrogène peut être stocké dans les hydrures métalliques. En effet, l'hydrogène peut réagir de manière réversible avec certains métaux et alliages. Il réagit avec différents types de poudres métalliques ce qui crée un stockage solide à pression modérée. Il existe deux classes d'hydrures : les hydrures hauts et basse température. L'hydrogène absorbé doit être pur pour ne pas détériorer les propriétés absorbantes du matériau. Les densités énergétiques sont faibles pour les hydrures à basse température et fortes pour les hydrures hautes température. L'intérêt d'utiliser les hydrures métalliques pour stocker l'hydrogène est de minimiser le risque de manipuler de grandes quantités de cet élément très réactif [19].

Cette méthode a comme autres avantages le fait que les pressions mises en jeu, à température ambiante, sont relativement faibles et que l'hydrogène obtenu est très pur.

Parmi les inconvénients de ce mode nous pouvons citer :

- La capacité qui est encore limitée ;
- La cinétique de remplissage est lente à basse température ;
- Le coût est élevé pour certains métaux.

5. Transport de l'hydrogène

Le transport d'hydrogène entre un centre de production et un lieu d'utilisation ou de distribution s'opère de diverses manières selon la durée souhaitée de ce transfert, la masse d'hydrogène en jeu, la géographie des lieux considérés et les facteurs technico-économiques [20].

5.1. Transport par pipelines

L'hydrogène peut être fourni par l'intermédiaire d'un réseau de distribution de pipeline auquel plusieurs fournisseurs et consommateurs sont rattachés. Il peut être fait par deux formes qui sont liquides et gazeux. Les systèmes de canalisations d'hydrogène liquide sont techniquement possibles. Cependant, en raison des investissements de capitaux extrêmement élevés impliqués dans la mise en place de ces systèmes de pipeline, exigences matérielles et minimisation de l'ébullition. Il ne peut pas être une option pour la distribution d'hydrogène liquide dans les stations-service d'autoroute dans un proche avenir. D'autre part, les systèmes de pipelines gazeux comprimés impliquent un investissement en capital plus faible que les systèmes de canalisations d'hydrogène liquide [21].

5.2. Transport par rail

La distribution de l'hydrogène peut également être effectuée par des voies ferrées. Les réservoirs cryogéniques cylindriques tels que ceux utilisés pour le transport routier sont adoptés pour le transport ferroviaire. Ils ont de plus grandes capacités et peuvent transporter jusqu'à 9100 kg d'hydrogène, avec des taux d'évaporation estimés à 0,2% par jour. Toutefois, en raison de l'écart entre l'infrastructure ferroviaire et les stations-service et les coûts de transport élevés liés aux trains, il est peu probable que cela devienne une option pour la distribution d'hydrogène [21].

5.3. Transport par navire

Le transport intercontinental d'hydrogène sera réalisé sous forme liquide à l'aide de navires. A cet effet, les navires spécialisés avec des réservoirs appropriés et des installations portuaires sont conçus. Le transport d'hydrogène gazeux par navire n'est économiquement pas réalisable puisque la quantité transportée est faible par rapport à la zone qu'elle couvre sur

le navire. Cependant, un certain perspectif camion-citerne d'hydrogène à grande échelle a été étudié en détail dans le cadre du programme de recherche du Réseau mondial de l'énergie.

En 1998, la conclusion principale 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 pouvait être construit en utilisant dans une large mesure le concept de base et les concepts utilisés pour le transport de GNL [21].

5.4. Transport par 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 à haute pression, des remorques à tubes et sous forme liquide dans des réservoirs cryogéniques. Si l'hydrogène doit être transporté sous forme de gaz, il doit être comprimé à une pression très élevée pour maximiser les capacités du réservoir.

Les bouteilles de gaz à haute pression, par exemple, sont évaluées à 200 bar et conservent environ 1,8 kg d'hydrogène, mais elles sont très coûteuses à manipuler et à transporter.

Remorques à tubes, constituées de plusieurs cylindres en acier montés sur un cadre de protection peut être configuré pour contenir 63-460 kg d'hydrogène, selon le nombre de tubes. Les pressions de service sont de 20 à 60 MPa.

L'hydrogène liquide est transporté en utilisant des réservoirs isolés à double paroi spéciaux pour empêcher l'ébullition de l'hydrogène liquide.

Les camions citernes peuvent transporter 360-4300 kg d'hydrogène liquide. Les taux d'ébullition des camions sont de 0,3% -0,6% / jour.

Le principal problème avec le transport d'hydrogène liquide serait les exigences d'isolations spécialisées et les pertes de pompage et de re-refroidissement de l'hydrogène liquide le long du chemin [21].

6. Travaux mondiaux

Le transport et la distribution d'hydrogène par un système de pipelines est à l'heure actuelle la solution la plus compétitive d'un point de vue économique pour les gros volumes.

Des réseaux de pipelines transportant de l'hydrogène gazeux existent d'ors et déjà en Europe (voir Tableau I. 3) et en Amérique du Nord, et s'étendent respectivement sur 1500 et 420 km. La France compte quant à elle plusieurs réseaux qui totalisent 303 km. Ils acheminent de l'hydrogène gazeux depuis le lieu de production jusqu'aux différents sites d'utilisation [22].

Tableau(I.3) : Principaux pipeline transportant de l'hydrogène en Europe [22].

Localisation	Exploitant	Longueur (km)	Remarques
Allemagne	Linde Gas	150	/
France + Benelux	Air Liquide	834	Dia = 10 cm 10 bars
France	Air Liquide	33	
		57 42	
Pays-Bas	Air Products	50	/
Suède	/	18	
Total		1184	

Cependant, la construction de nouveaux pipelines dédiés uniquement à cela représenterait un investissement trop important. C'est pourquoi des programmes de recherche, comme le projet NaturalHy, explorent la possibilité d'utiliser les réseaux de gaz existant pour transporter l'hydrogène. Ceci serait en effet une solution efficace pour distribuer de l'hydrogène. D'après la société GRDF, la France dispose de 188 637 km de réseau de gaz naturel, ce qui est le plus long réseau de gaz naturel en Europe. Il permet de desservir 9265 communes, ce qui représente 77% de la population française [22].



Figure(L3): Réseaux de pipelines hydrogène d'air Liquide du nord de l'Europe [20].

7. L'utilisation de l'hydrogène

Les applications qui utilisent de l'hydrogène sont nombreuses et peuvent être classées dans des différents domaines.

7.1. Dans l'industrie

En électronique, l'hydrogène est utilisé comme gaz vecteur (gaz permettant de transporter des gaz actifs) pour des applications diverses comme la fabrication de composants électroniques. Il assure une excellente protection contre les impuretés et l'oxydation.

L'hydrogène est largement utilisé dans la chimie industrielle pour de nombreuses applications. Par exemple, il peut être associé à de l'azote pour fabriquer de l'ammoniac, une base des engrais. C'est un réactif qui entre dans la composition des fibres textiles comme le nylon, des mousses polyuréthanes et de diverses matières plastiques [23].

L'hydrogène est alors utilisé comme réactif chimique pour : le raffinage ; la synthèse d'ammoniac, de méthanol, d'eau oxygénée et divers autres composés chimiques. L'hydrogène est aussi utilisé pour gonfler des ballons météorologiques ou sous sa forme liquide pour refroidir certaines installations.

Dans le domaine de l'hydrogène chimique, il est consommé environ 600 milliards de Nm^3 par an (ce qui correspond à 57 millions de tonnes par an) dans le monde. Cette

consommation ne devrait cesser d'augmenter, pour atteindre 900 milliards de Nm³ (81 millions de tonnes) dans quelques années [22].

L'hydrogène est employé en métallurgie pour les atmosphères de traitement thermique qui permettent de produire des pièces mécaniques (frittage de pièces moulées) ou de modifier leurs propriétés (recuit de pièces métalliques) [23].

7.2. Dans le spatial

L'hydrogène est le carburant qui concentre le plus d'énergie pour une masse donnée. C'est pour cela qu'il est utilisé pour propulser des fusées. Dès les origines de l'industrie spatiale, l'hydrogène a immédiatement joué un rôle important en tant que carburant des fusées. C'est le carburant qui concentre le plus d'énergie : 1 kg d'hydrogène contient 3 fois plus d'énergie que 1 kg d'essence. Un critère de première importance quand on sait qu'un lanceur spatial doit être le plus léger possible [23].

7.3. Pour l'énergie

Les applications de l'hydrogène énergies sont quant à elle toujours en phase de développement : ces applications concernent les véhicules, ou la production d'électricité et de chaleurs [21].

L'hydrogène utilisé dans une pile à combustible permet de produire de l'électricité directement à bord d'un véhicule propulsé par un moteur électrique. Ces véhicules à « zéro émission locale » ne rejettent que de l'eau [23].

7.3.1. Véhicules à hydrogène

L'hydrogène peut alimenter des véhicules équipés de moteurs à combustion fonctionnant au gaz. Par ailleurs, un réservoir d'hydrogène peut-être associé à une pile combustible pour améliorer l'autonomie de véhicules électriques [24].

Le moteur à hydrogène, un moteur à combustion interne utilisant l'hydrogène comme carburant. Le dihydrogène (H₂) « explose » dans le dioxygène (O₂), cette réaction aboutissant à la production d'eau (H₂O) et à une libération d'énergie. Cette énergie est utilisée pour propulser le véhicule. La combustion d'un kilogramme de dihydrogène libère trois fois plus d'énergie que celle d'un kilogramme d'essence [24].

7.3.2 Pile à combustible

Une pile à combustible est un générateur d'électricité qui transforme directement l'énergie chimique d'un combustible en énergie électrique.

Une pile à combustible fonctionne selon le principe inverse de l'électrolyse de l'eau, puisqu'elle produit de l'électricité, de l'eau et de la chaleur à partir d'hydrogène et d'oxygène.

En effet, la réaction d'oxydo-réduction se produit au sein d'un générateur électrochimique élémentaire, appelé cellule ou EME (Electrode – Membrane - Électrode), constitué de deux électrodes (l'anode et la cathode) séparées par une membrane, électrolyte solide ou liquide permettant le passage des ions. Les électrodes mettent en jeu des catalyseurs pour activer la réaction d'oxydation de l'hydrogène d'un côté, la réduction de l'oxygène de l'autre côté [25].

A l'anode (pôle négatif), l'hydrogène va se transformer en ions H^+ en libérant des électrons selon la réaction :



A la cathode (pôle positif), les ions H^+ se combinent aux ions O^- constitués à partir de l'oxygène de l'air pour former de l'eau selon la réaction:

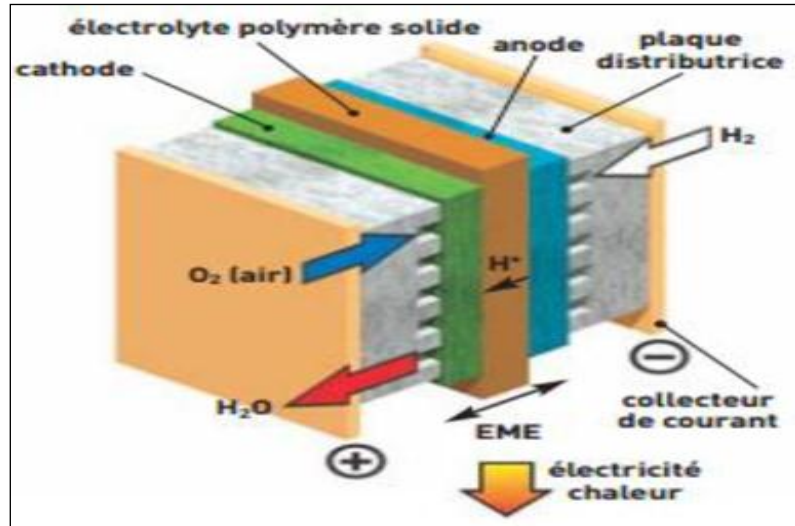


C'est le transfert des ions H^+ et des électrons vers la cathode qui va produire un courant électrique continu et de l'eau à partir de l'hydrogène et de l'oxygène.

Il est donc nécessaire de placer en aval de la pile un onduleur permettant la transformation du courant continu en courant alternatif.

Comme les électrons ne peuvent pas traverser la membrane (dans ce modèle) ils coulent dans une file en faisant du travail électrique et Comme la réaction est exothermique elle produise aussi la chaleur selon l'équation suivante [25] :





Figure(I.4): Composition d'une cellule élémentaire d'une pile à combustible [25].

Le tableau (I.4) représente les différents types des piles à combustible :

Tableau(I.4) : les différents types des piles à combustible [22] [12].

Type de pile	Température de Fonctionnement (°C)	Electrolyte	Domaine d'utilisation
AFC	60-90	Alcalin Potasse liquide	Espace, transport
PEMFC	60-90	Polymère solide	Portable, transport, stationnaire
PAFC	160-220	Acide phosphorique liquide	Stationnaire, transport
MCFC	620-660	Sel fondu liquide	Stationnaire
SOFC	750-1000	Céramique solide	Stationnaire, transport

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 spécialement dans le secteur de transport d'hydrogène par pipelines.

En fin l'hydrogène produit à partir des ressources renouvelables peut apporter une contribution importante à la transition vers un modèle énergétique décarboné, notamment dans les secteurs du transport et du stockage d'énergie.

Chapitre II :
SIG comme un outil
d'aide à la décision

1. Introduction

Un Système d'Information Géographique (SIG) est avant tout un système de gestion de base de données capable de gérer des données localisées, et donc capable de les saisir, de les stocker, les extraire (et notamment sur des critères géographiques), de les interroger et analyser, et enfin de les représenter et les cartographier. L'objectif affiché est essentiellement un objectif de synthèse, permettant à la fois la gestion des données comme un outil d'aide à la décision.

Dans ce chapitre nous commençons par une définition du Système d'Information Géographique puis nous rappelons les différents domaines d'applications du SIG, aussi les modes de présentation des données. Par la suite, nous citons les outils exploités pour extraire une nouvelle information en utilisant une analyse spatiale.

2. Définition d'un système d'information géographique

Un Système d'Information Géographique (SIG) est un système informatique permettant, à partir de diverses sources, de rassembler et d'organiser, de gérer, d'analyser et de combiner, d'élaborer et de présenter des informations localisées géographiquement, contribuant notamment à la gestion de l'espace [26].

Alors un projet SIG est considéré comme un ensemble d'activités déclenché pour prendre une décision liée à une problématique. Cet ensemble d'activités se déroule en différentes phases [27] :

- Identification des objectifs par rapport à une problématique ;
- Evaluation des besoins en couches thématiques, conception de la base de données ;
- Collecte et acquisition des données ;
- Intégration et structuration des données dans la base ;
- Traitement des données (gestion, tableaux attributaires ou spatiales) ;
- Restitution des résultats (cartes, tableaux, diagrammes) ;
- Interprétation et décision.

3. Différents domaines d'applications du SIG

Les usages et les potentialités d'application des SIG sont diverses et variés nous citons :

3.1. Transport

Planification des transports urbains, optimisation d'itinéraires. L'utilisation de l'information géographique par un transporteur va permettre à ce dernier de gérer sa flotte de véhicules en fonction de zones de désert, du trafic ou des perturbations de l'infrastructure (bouchons etc.). Le SIG va par ailleurs permettre une optimisation des tournées (calcul du plus court chemin, prise en compte des gabarits du matériel roulant en fonction des caractéristiques techniques de la voie...). Un SIG va donc permettre de gérer, d'analyser et de planifier l'utilisation d'un réseau [27].

3.2. Gaz, Electricité et Mines

Le SIG est utilisé dans le cadre de la gestion de réseaux de gaz et d'électricité et permet, par exemple, de connaître à tout moment les caractéristiques de chaque tronçon d'un réseau de distribution ou du réseau entier d'acheminement (permettant ainsi une intervention rapide et efficace sur le réseau). Le SIG permet ainsi de cataloguer et de géo-localiser toute conduite de gaz et/ou d'électricité dans un tissu urbain. Dans le cadre de l'exploration minière, le SIG peut permettre une connaissance précise de la structure géologique des sols, la prospection minière, la contrainte des terrains, les caractéristiques des tracés d'acheminement de la ressource (localisation des pipelines), l'implantation et les caractéristiques des concessions exploitées (onshore/offshore) [27].

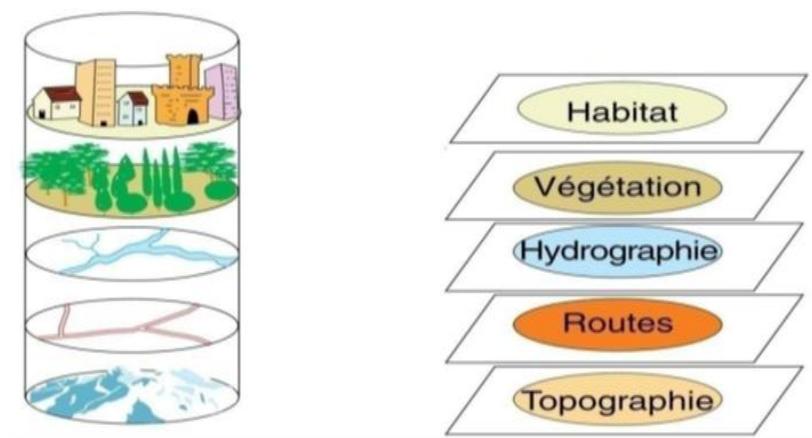
3.3. Planification énergétique

Le SIG est très utile dans le domaine de planification et de gestion des ressources énergétiques dans un cadre de préservation des ressources et de renforcement des capacités de production. La planification énergétique territoriale est un élément de réponse permettant de participer à l'atteinte des objectifs que se sont fixés tous les acteurs impliqués dans la gestion et l'aménagement énergétique du territoire. Le SIG est désormais possible d'appréhender de manière systémique l'approvisionnement et la consommation d'énergies d'un territoire, grâce à une structuration spatiale des données et une mise en forme des résultats sur un outil cartographique. Il est notamment utilisé pour l'aménagement des ressources énergétiques afin de localiser, évaluer et identifier les zones à fortes potentialités. Il est ainsi conçu comme un

système d'aide à la décision pour le choix des sites favorables d'implantations des nouveaux projets énergétiques, en association avec un système d'aide à la décision sur le long terme [27].

4. Mode de présentation des données dans un SIG

Les informations dans un SIG sont généralement liées à des coordonnées spatiales longitude et latitude (x,y), et parfois l'altitude (z) qui vont indiquer l'emplacement de ces données dans l'espace. Les objets géographique (données géo-localisées) sont organisés sous formes des couches (figure II.1) contenant un ensemble homogène des données et référencé à un thème tels que : la couche de réseau électrique, de sites de productions, de réseau routier, des stations météorologiques etc [27].



Figure(II.1) : Schéma général d'un SIG [27].

Alors Il y a trois types de données qui peuvent être distingué dans un SIG :

4.1. Données vectorielles

Les limites des objets spatiaux sont décrites à travers leurs constituants élémentaires, à savoir les points, les arcs et les arcs des polygones. Chaque objet spatial est doté d'un identifiant qui permet de le relier à une table attributaire [28].

4.1.1. Les points

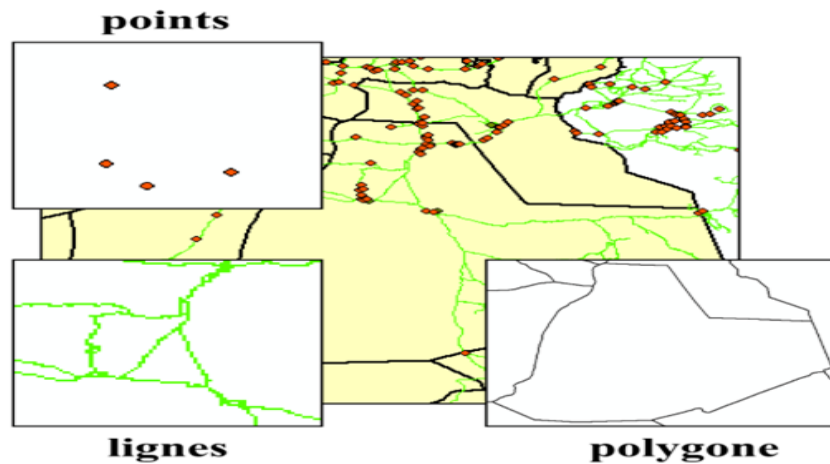
Ils définissent des localisations d'éléments séparés pour des phénomènes géographiques trop petits pour être représentés par des lignes ou des surfaces qui n'ont pas de surface réelle [28].

4.1.2. Les lignes

Les lignes représentent les formes des objets géographiques trop étroits pour être décrits par des surfaces (par exemple : rue ou rivières) ou des objets linéaires qui ont une longueur mais pas de surface comme les courbes de niveau [28].

4.1.3. Les polygones

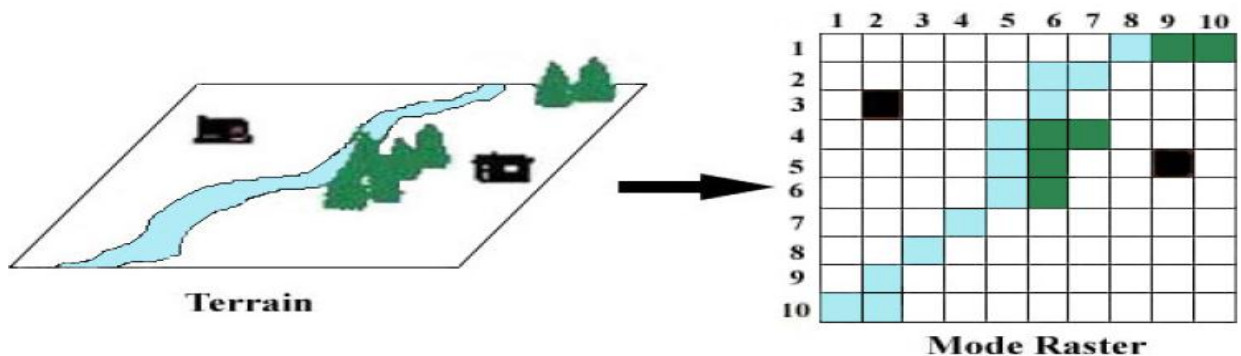
Ils représentent la forme et la localisation d'objets homogènes comme des pays, des parcelles, des types de sols [28].



Figure(II.2): Représentation de l'information en mode vectoriel [27].

4.2. Le mode raster

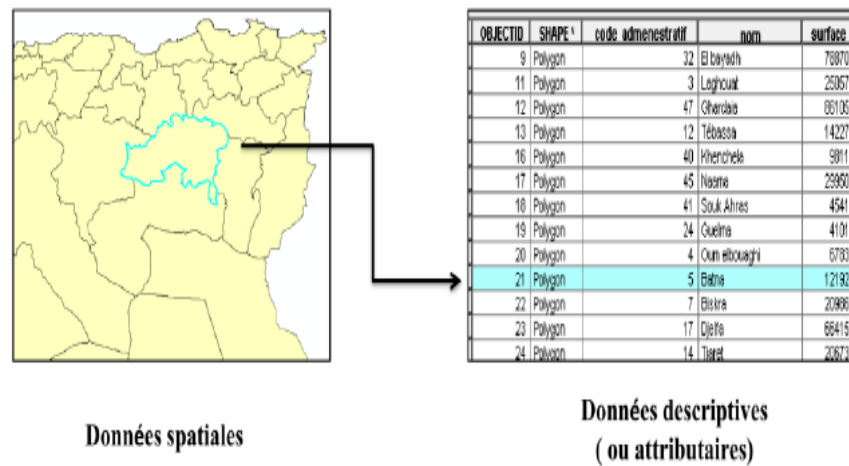
La réalité est décomposée en une grille régulière et rectangulaire, organisée en lignes et en colonnes, chaque maille (= pixel) de cette grille ayant une intensité/valeur de gris ou une couleur. La juxtaposition des points recrée l'apparence visuelle du plan et de chaque information. Une forêt sera représentée par un ensemble des points d'intensité identique [28].



Figure(II.3) : Représentation des données en mode raster [29].

4.3. Données alphanumériques

Les données alphanumériques sont l'ensemble des données qualitatives et quantitatives associées à chaque entité du fichier de formes. Ils sont présentés sous forme de tableaux attributaires contenant des données alphanumériques avec des liens directs à des objets géométriques [27] [28].



Figure(II.4): Exemple des données alphanumériques [27].

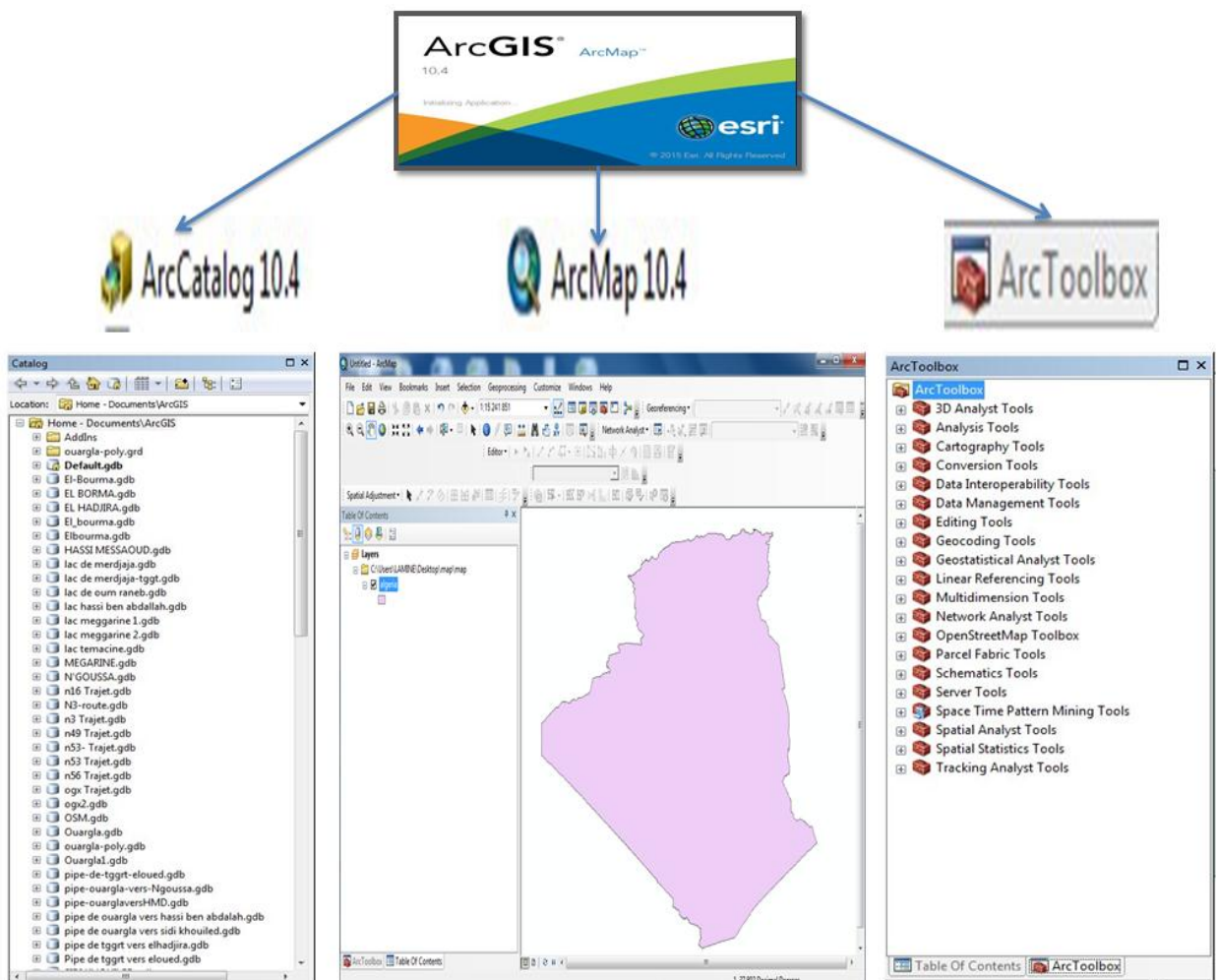
5. Logiciels utilisés

Esri développe le système ArcGIS (auparavant appelé ArcView GIS). Ce système est composé de différentes plateformes qui permettent aux utilisateurs SIG, qu'ils soient bureautiques, web, ou mobiles, de collaborer et de partager l'information géographique.

Dans ce travail, nous avons utilisé la version ArcGIS 10.4, elle est disponible en ligne depuis Avril 2016 [30]. L'ArcGIS englobe la gamme complète des tâches SIG de conception, gestion et édition de données, à la production et visualisation des cartographies et l'analyse spatiales des données géographiques. L'ArcGIS est constitué de trois applications qui sont [27]:

- **ArcMap** : est l'application principale dans l'ArcGIS utilisé pour créer des cartes, éditer des données, et permet la visualisation des résultats de l'analyse, tel que des cartographies numérisées ;

- **ArcCatalog** : est employé pour établir des bases de données de SIG et les organiser selon le type vecteur (points, lignes, polygones) ou raster. Il est également employé pour rechercher, et contrôler les données géographiques ;
- **ArcToolbox** : est la troisième application de l'ArcGIS. Bien que ce ne soit pas accessible dans le menu principal, il est facilement accédé et employé dans ArcMap et ArcCatalog. Les outils dans ArcToolbox sont utilisés pour le traitement, l'analyse, conversion des données géographiques pour développer des nouvelles bases de données.



Figure(II.5): Le système Arc GIS.

6. Les outils utilisés dans le SIG

L'analyse spatiale est le processus de manipulation de l'information spatiale pour extraire une nouvelle information et la signification des données originales. Habituellement,

L'analyse spatiale est réalisée avec un Système d'Information Géographique (SIG). Un SIG fournit généralement des outils d'analyses spatiales pour le calcul des entités statistiques et la réalisation des activités de géo-traitement comme interpolation des données [31].

6.1. L'interpolation spatiale

L'interpolation spatiale est le processus d'utilisation des points avec des valeurs connues pour des valeurs estimées à d'autres points inconnus. L'interpolation spatiale peut estimer la température à des endroits sans données enregistrées en utilisant des relevés de températures connus dans des stations météo à proximité, aussi les données d'altitude, de précipitations, d'accumulation de neige, de table d'eau et de densité de population sont d'autres types de données qui peuvent être calculées par interpolation.

Afin de générer une carte continue, une méthode d'interpolation adaptée doit être utilisée pour estimer de manière optimale les valeurs à ces endroits où aucun des échantillons ou mesures ont été pris. Les résultats de l'analyse d'interpolation peuvent ensuite être utilisés pour les analyses qui couvrent la zone entière et pour la modélisation [31].

Il existe plusieurs méthodes d'interpolation telles que **Kriging, Natural Neighbor, Spline, Idw**.

Dans notre cas, nous avons choisi la méthode IDW, c'est l'une des méthodes les plus populaires et les plus employées.

La méthode d'interpolation inverse distance (IDW) -Inverse Distance Weighted- est une méthode de moyenne pondérée où chaque valeur du point inconnu (à interpoler) est calculée comme une moyenne pondérée des observations. Elle effectue des estimations par interpolation basée sur les distances entre le point dont nous souhaitons estimer sa valeur et les points voisins dont nous disposons déjà de mesures issues d'un échantillonnage sur le terrain. [32].

6.2. Distance euclidienne

Les outils de distance euclidienne décrivent la relation de chaque cellule avec une source ou un ensemble de sources selon la distance en ligne droite. L'outil Distance euclidienne donne la distance entre chaque cellule du raster et la source la plus proche. La source identifie l'emplacement des objets considérés, tels que les puits, les centres commerciaux, les routes et les peuplements forestiers [33].

6.3. La reclassification

Les outils de reclassification permettent de reclasser ou de modifier des valeurs de cellules à l'aide de diverses méthodes. Nous pouvons reclasser une valeur à la fois ou des groupes de valeurs un par un à l'aide des champs secondaires, en fonction de critères tels que les intervalles définis (par exemple, regrouper les valeurs en 10 intervalles) ou par superficie (par exemple, regrouper les valeurs en 10 groupes contenant le même nombre de cellules). Les outils sont conçus pour vous permettre de redéfinir facilement plusieurs valeurs d'un raster en entrée sur les valeurs souhaitées ou sur d'autres valeurs spécifiées [33].

7. Conclusion

Les SIG ont été conçus pour traiter des quantités importantes d'informations et permettent aux scientifiques de mener leurs recherches avec une grande vitesse et une excellente précision. Ils sont très utilisés comme un outil d'aide à la décision dans des domaines très variés (urbanisme, planification, environnement,...) dans la mesure où ils permettent la gestion et l'analyse de l'information spatiale, et il permet aux utilisateurs d'extraire commodément des synthèses utiles à la décision.

Cette étape du travail a été consacrée à la présentation d'un Système d'Informations Géographiques (SIG), qui a permis de faire une caractérisation spatiale de l'information en utilisant conjointement les données en mode raster et en mode vecteur.

L'utilisation des tables alphanumériques a été orientée vers l'établissement de graphiques montrant l'évolution spatiotemporelle de la variable étudiée. Aussi, l'exploitation des différentes données rassemblées nous a permis d'élaborer des cartes relatives à la zone d'étude. Le système d'information géographique ainsi élaboré nous a donc permis de gérer un nombre important de données acquises depuis plusieurs années et qui peuvent être actualisées régulièrement.

Chapitre III :
Développement d'une
infrastructure de la
distribution
d'hydrogène

1. Introduction

En Algérie, le secteur des transports, qui représente à lui seul environ 36% de la consommation totale du pays, l'essentiel de l'énergie consommée dans ce secteur provient des dérivés du pétrole. Il est considéré comme l'une des premières sources de pollution avec des émissions atteignant 40 millions de tonnes équivalent CO₂, soit un taux de 46% des émissions de gaz à effet de serre [27]. Pour réduire sa facture et sa dépendance énergétique et diminuer ses émissions de gaz à effet de serre, l'Algérie doit faire un effort vigoureux de maîtrise de l'énergie dans le secteur de transport routier. En tenant compte du poids des consommations énergétiques dans le secteur de transport, l'hydrogène carburant semble une solution particulièrement attrayante aux yeux du grand public, mais nous sommes besoin de développer une infrastructure, qui achemine de l'hydrogène produit depuis le lieu de production jusqu'aux différents sites d'utilisation.

Nous commencerons ce chapitre par une présentation de la région de Ouargla. Puis nous proposons une étude rétrospective du secteur de transport routier dans cette région. En utilisant des taux de croissance annuel moyenne nous effectuons une étude prospective pour déterminer la distribution spatio-temporelle de la demande en hydrogène dans le secteur de transport routier à l'horizon 2050.

Ensuite nous proposons une méthodologie nous a permis d'identifier des sites favorables pour l'implantation d'une installation de la production d'hydrogène solaire dans la région de Ouargla en utilisant un système d'information géographique.

2. Développement d'une infrastructure de la distribution de l'hydrogène solaire

Le développement d'une infrastructure de la distribution de l'hydrogène a été étudié dans divers endroits et rapporté dans de nombreuses études de recherche. Chacun de ces plans traitent des aspects particuliers liés à la transition vers l'économie de l'hydrogène. Cela peut varier selon les plans nationaux ou régionaux, les politiques spécifiques ou les objectifs environnementaux spécifiques [16].

Pour ce faire, nous avons besoin de procéder cinq étapes :

1. Délimitation de l'échelle d'étude : national ou régional ;
2. Estimation de la demande en hydrogène à un horizon du temps donnée ;

3. Détermination du potentiel de production de l'hydrogène à partir d'une source renouvelable choisie ;
4. Choix de site de production : décentralisée ou centralisée ;
5. Choix de mode de transport : transmission et distribution d'hydrogène produit.

3. Présentation de la région d'étude

3.1. Situation géographique et Cadre physique de l'étude

Dans ce travail, nous avons choisi de développer une infrastructure d'hydrogène à l'échelle régionale, dont nous ferons l'application sur la région de Ouargla. La Région de Ouargla est située au Sud-Est du pays couvrant une superficie de 163.230 Km². Elle demeure une des collectivités administratives les plus étendues du pays. Elle est limitée [34]:

- Au nord : par les Wilaya de Djelfa, d'El-Oued et de Biskra
- A l'Est : par la Tunisie
- Au Sud : par les Wilaya de Tamanrasset et d'Illizi
- A l'Ouest : par la Wilaya de Ghardaïa.

Elle compte actuellement 21 communes regroupées en 10 Daïras comme suit:

Tableau (III.1) : Daïras et communes de la région de Ouargla.

Daïra	Communes
OUARGLA	OUARGLA, ROUISSAT
N'GOUSSA	N'GOUSSA
SIDI-KHOULED	SIDI-KHOULED, AIN-BEIDA, HASSI-BEN ABDALLAH
HASSI-MESSAOUD	HASSI-MESSAOUD
EL-BORMA	EL-BORMA
EL-HADJIRA	EL-HADJIRA , EL-ALIA
TEMACINE	TEMACINE , BLIDET-AMOR
TOUGGOURT	TOUGGOURT , NEZLA , TEBESBEST , ZAOUIA EL-ABIDIA
MEGGARINE	MEGGARINE , SIDI-SLIMANE
TAIBET	TAIBET , BENNACEUR , M'NAGUEUR

3.2. Les données climatiques

La région de Ouargla est caractérisée par un climat Saharien, avec une pluviométrie très réduite, des températures élevées, une forte évaporation et par une faiblesse de la vie biologique de l'écosystème.

En 2015, les températures moyennes mensuelles enregistrées au mois le plus chaud (Aout) sont de 35,10 ° C à Ouargla et de 35,60°C à Hassi-Messaoud. Alors que celles du mois le plus froid (Décembre) sont de 10,30°C à Touggourt et de 10,90 à Ouargla [34].

Une cartographie montre la répartition de la température annuelle moyenne dans la région de Ouargla est illustrée sur la figure suivante.

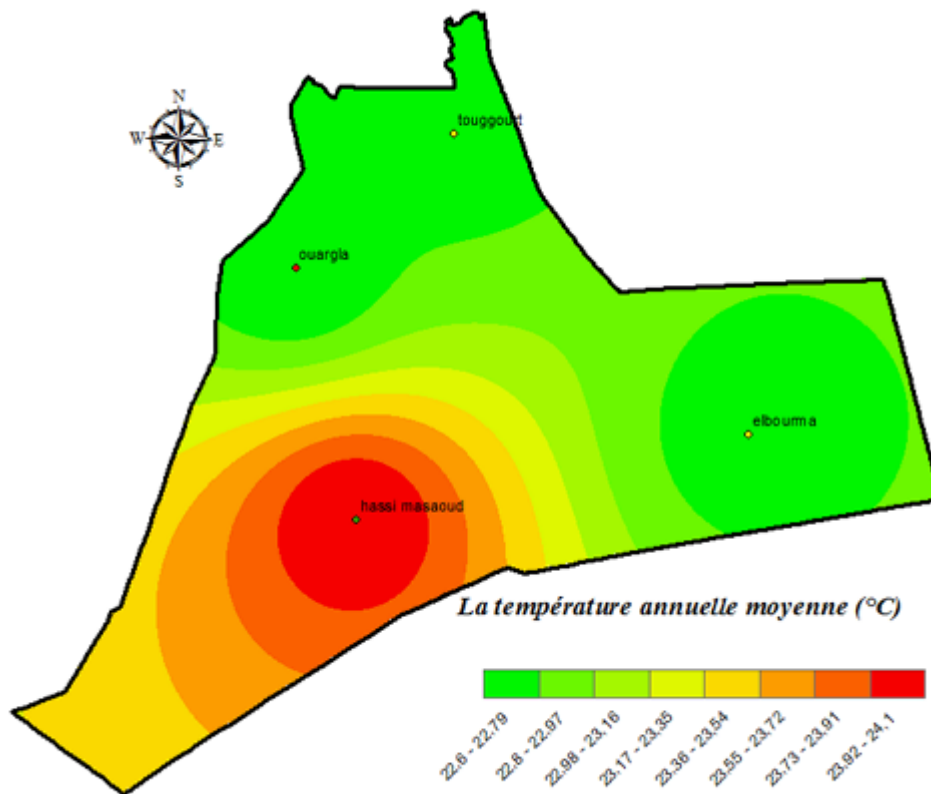


Figure (III.1) : Cartographie de la température annuelle moyenne dans la région de Ouargla.

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

4.1. Modélisation de la demande en hydrogène

Nous avons utilisé une méthode basée sur le Système d'Information Géographique SIG (Chapitre II), 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 peut être appliquée pour estimer la demande à n'importe quelle échelle régionale ou nationale [35], dans notre étude nous avons estimé la demande sur toute la région de Ouargla.

Notre méthodologie est basée sur une étude rétrospective de la population et de parc automobiles dans les dix daïra de la région de Ouargla pour connaître le taux de croissance moyen annuel durant les années précédentes. Ensuite, nous avons proposé plusieurs hypothèses telles que : le taux de pénétration au marché des véhicules à hydrogène jusqu'à l'année de 2050, la consommation spécifique d'hydrogène, et les kilométrages annuels parcourus par un véhicule à l'hydrogène.

Nous avons calculé la demande en hydrogène en utilisant la relation suivante [36] :

$$D_H = P \times NV_{hab} \times TP \times CSVH \quad (1)$$

D_H : la demande en hydrogène (kg H₂ / an)

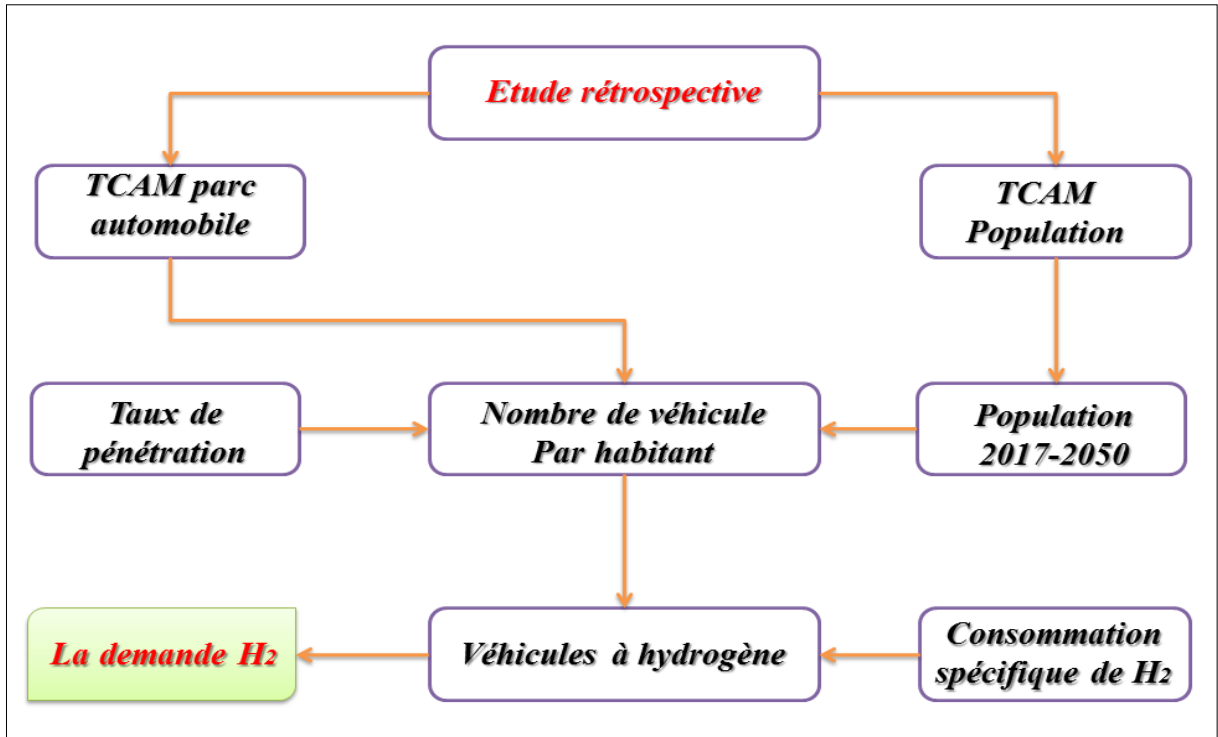
P : La population (habitants)

NV_{hab} : Nombre de véhicule par habitant (Véhicules / habitant)

TP : Taux de pénétration de véhicule à hydrogène au marché (1%, 10%,.... 50%)

$CSVH$: Consommation spécifique pour un véhicule à hydrogène (kg H₂/an/véhicule H₂)

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



Figure(III.2): Organigramme de calcul de la demande en hydrogène.

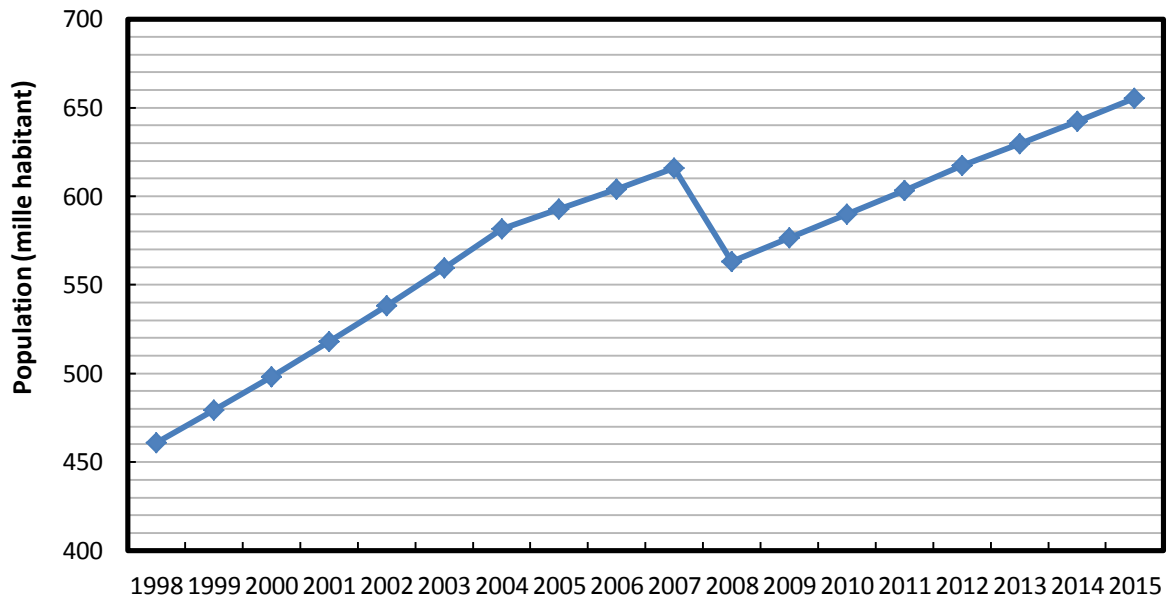
4.1.1. Population

Dans notre étude, nous avons collecté les données de la population à la fin de chaque période à partir Les annuaires statistiques de la wilaya de Ouargla [34], pour les années allant de 1998 à 2015. Les résultats sont présentés dans le Tableau suivant :

Tableau(III.2): Croissance de la population dans la région de Ouargla de 1998-2015.

Année	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
Population (Habitants)	458823	477240	496262	515969	536299	557499	579607	590958	602038
Année	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Population (Habitants)	613872	561319	574704	587921	601443	615276	627677	640368	653 358

La figure suivante présente l'évolution de nombre d'habitant annuellement.



Figure(III.3): Croissance de la population dans la région de Ouargla de 1998-2015.

Nous remarquons que la population dans la région de Ouargla est en croissance jusqu'à l'année 2008, puis une chute de nombre d'habitant est remarquée. Cette chute est causée par le recensement réel de la population effectuée par l'état en 2008. La population estimée environ de 654 000 habitants à la fin de l'année 2015.

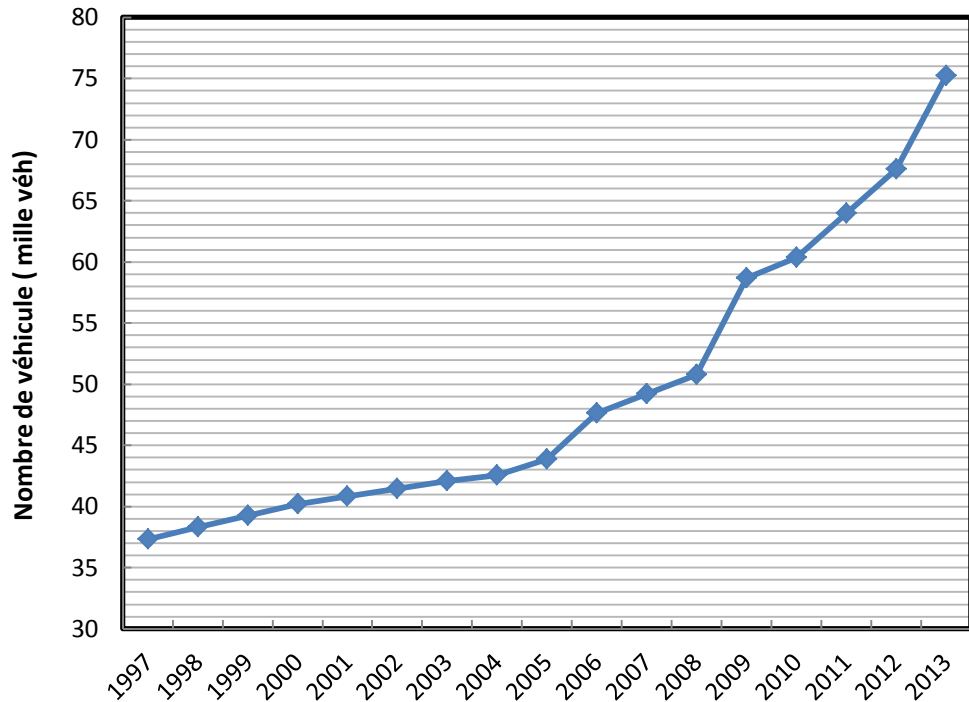
4.1.2. Parc automobile

Dans notre étude, nous avons collecté les données de nombre véhicules dans la région de Ouargla à la fin de chaque période à partir des rapports de l'Office National des Statistique [37], pour les années allant de 1997 à 2013. Les résultats sont présentés dans le Tableau suivant :

Tableau(III.3): Croissance de parc automobile dans la région de Ouargla de 1997-2013.

Année	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005
Nombre de véhicule	37 340	38 326	39 249	40 172	40 801	41 438	42 074	42 529	43 838
Année	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	/
Nombre de véhicule	47 632	49 185	50 788	58 677	60 380	63 981	67 581	75 235	/

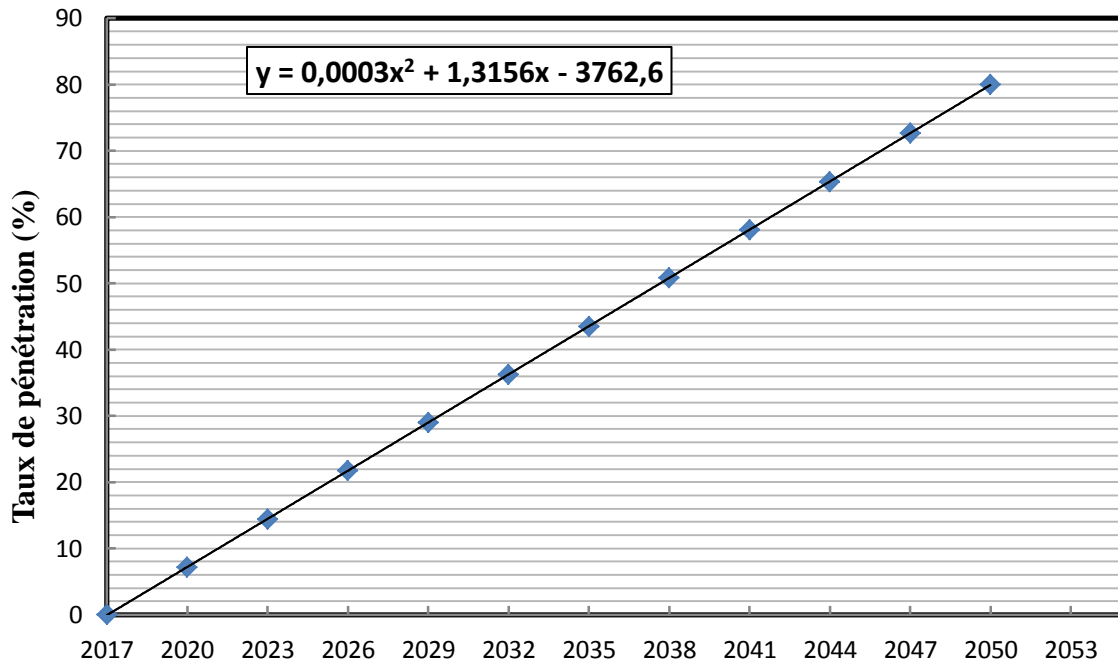
A partir de données présentées dans le tableau, nous remarquons que le nombre de véhicules dans la région de Ouargla ne cesse pas d'augmenter. Dont le taux d'augmentation du parc pour la période 1997-2005 est un peu faible par rapport aux dernières années (à partir de 2009). Pour l'année 2013, le parc automobile dans la région estimé environ de 75235 véhicules.



Figure(III.4): Croissance de nombre de véhicules dans la région de Ouargla de 1997-2013.

4.1.3 Taux de pénétration au marché de véhicule

Les taux de pénétration sont choisis de façon à avoir une courbe de tendance polynomiale de second degré en allant de l'année 2017 jusqu'à l'année 2050, comme indiqué la figure suivante :



Figure(III.5): Variation du taux de pénétration des véhicules à hydrogène dans le parc automobiles en fonction des périodes.

Avant de définir les taux de pénétration des véhicules à hydrogène dans le marché d'automobile dans la région, nous devons découper l'horizon du temps à des périodes triennales. L'horizon de temps que nous avons choisi divisé en onze périodes, comme indiqué dans le tableau suivant :

Tableau(III.4): Taux de pénétration au marché de véhicule à hydrogène.

Période	2017/2020	2020/2023	2023/2026	2026/2029	2029/2032	2032/2035
Taux de pénétration (%)	7,18	14,45	21,72	29	36,27	43,54
Période	2035/2038	2038/2041	2041/2044	2044/2047	2047/2050	/
Taux de pénétration (%)	50,81	58,09	65,36	72,63	80	/

4.1.4. 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 Mirai : 1kg H₂/ 100km [38] ;

- La moyenne annuelle de kilométrage parcouru de différents types de véhicules en Algérie égal à 38000 km/an [36].
- Consommation spécifique pour un véhicule à hydrogène [39] :

$$CSVH = \frac{KPA \times 1KgH_2}{100Km} \quad (2)$$

KPA : Kilométrage parcouru annuelle (km/an).

D'où nous avons établi une consommation moyenne d'hydrogène de 380 Kg/an.

4.2. Projection des données statistiques à l'horizon 2050

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 [36]:

$$TCAM = \left[\left(\sqrt[n-m]{\frac{Pn}{Pm}} \right) - 1 \right] \times 100 \quad (3)$$

Pour projeter les données collectées de la rétrospective de la population et le nombre de véhicules dans la région de Ouargla, nous avons utilisé la formule suivante [36]:

$$Pn = Pm(1 + TCAM)^{n-m} \quad (4)$$

Avec :

TCAM : Taux de Croissance Annuel Moyen (%);

Pn : Nombre (d'habitants ou véhicules) pour l'année n ;

Pm : Nombre (d'habitants ou véhicules) pour l'année m;

n – m : Période considérée.

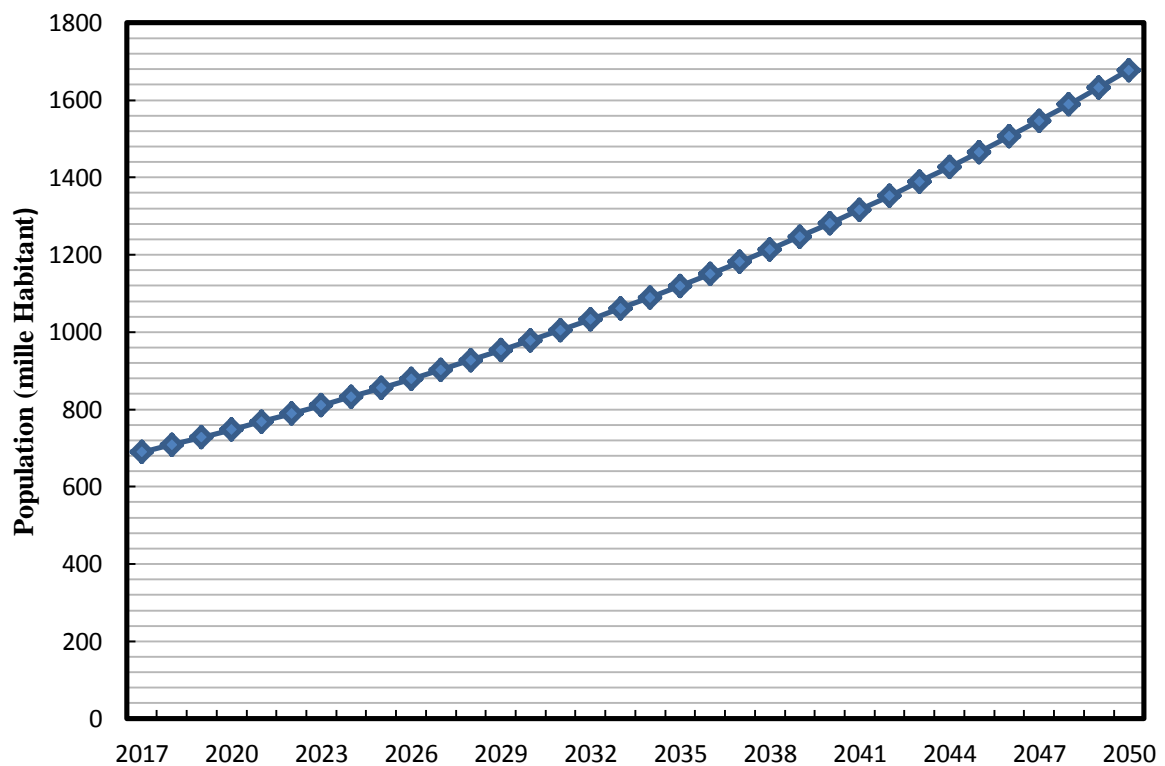
4.2.1 Projection de la population

Nous avons utilisé l'équation (3) pour calculer le TCMA de développement de la population, les résultats obtenus sont présentés sur le tableau suivant :

Tableau(III.5): TCAM de population de la région de Ouargla.

Période	1998/ 1999	2000/ 2001	2002/ 2003	2004/ 2005	2006/ 2007	2008/ 2009	2010/ 2011	2012/ 2013	2014/ 2015
TCAM(%)	4,01	3,97	3,95	1,96	1,97	2,38	2,30	2,02	2,03

A partir de résultats de ce tableau, nous avons calculé la moyenne du taux TCAM qui est égale à 2,73%. Pour projeter les données collectées de la rétrospective de la population dans la région, nous avons utilisé la formule (4). Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure suivante :



Figure(III.6): Projection de la population de l'année 2017-2050 dans la région de Ouargla.

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 1 million d'habitants en 2030 et 1,7 millions d'habitants en 2050.

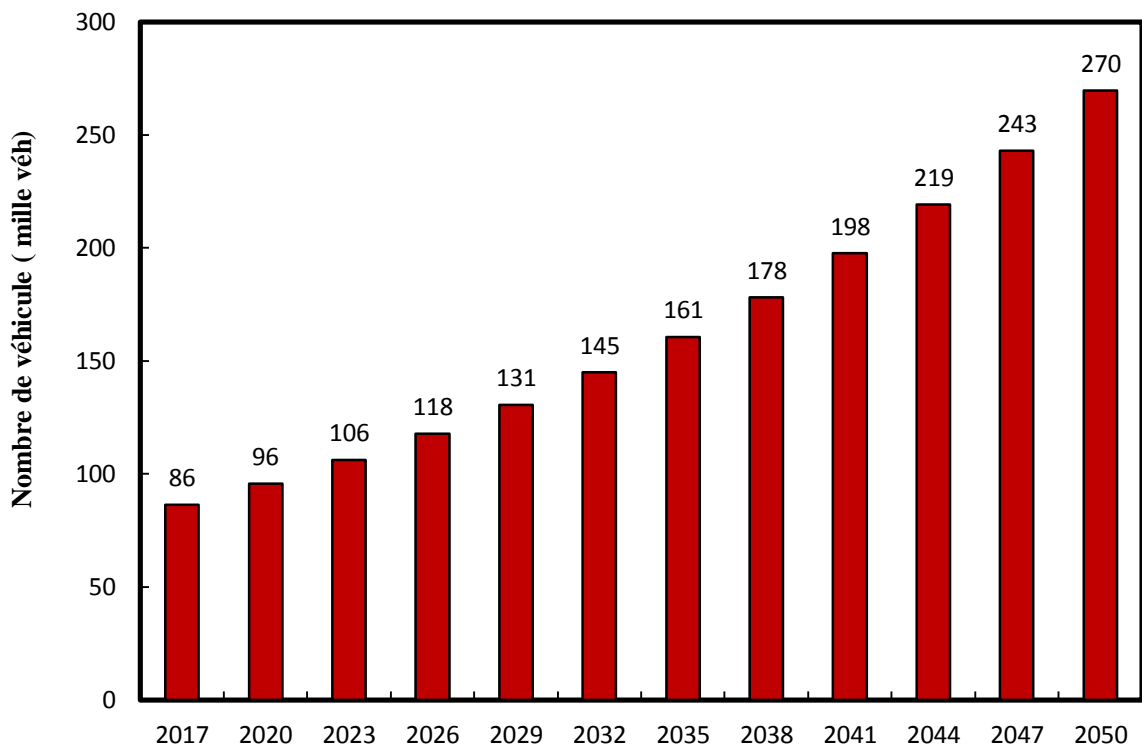
4.2.2. Projection de nombre de véhicules

Nous avons utilisé l'équation (3) pour calculer le TCAM de parc automobile.

Tableau(III.6) : TCAM de parc automobile de la région de Ouargla.

Période	1997/ 1998	1999/ 2000	2001/ 2002	2003/ 2004	2005/ 2006	2007/ 2008	2009/ 2010	2011/ 2012
TCAM(%)	2,64	2,35	1,56	1,08	8,65	3,26	2,90	5,63

A partir de résultats obtenus, nous avons calculé la moyenne du taux TCAM égale à 3,51%. Pour projeter les données collectées de la rétrospective de le nombre de véhicules dans la région, nous avons utilisé la formule (4). Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure suivante:



Figure(III.7): Projection du nombre de véhicules à l'horizon 2050.

La figure montre l'évolution du nombre de véhicules dans la région de Ouargla jusqu'à l'horizon de 2050. En remarquant que l'augmentation des véhicules devienne près de 150000 véhicules jusqu'à 2032 et arrive jusqu'à 270000 véhicules à la fin de l'année 2050.

4.2.3. Estimation de la demande en hydrogène

Nous avons utilisé l'équation (1) pour calculer la demande, Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau ci-après :

Tableau(III.7): La demande annuelle en hydrogène pour l'année 2050.

Période	2017-2020	2020-2023	2023-2026	2026-2029	2029-2032	2032-2035
Taux de pénétration(%)	7,18	14,45	21,72	29	36,27	43,54
Demande H₂ (ktonnes d'H₂/an)	2,61	5,83	9,71	14,38	19,95	26,56
Période	2035-2038	2038-2041	2041-2044	2044-2047	2047-2050	/
Taux de pénétration(%)	50,81	58,09	65,36	72,63	80	/
Demande H₂ (ktonnes d'H₂/an)	34,38	43,59	54,39	67,03	81,88	/

Le tableau (III.6) montre l'évolution de la demande d'hydrogène en onze périodes pour différents taux de pénétration au marché des véhicules à hydrogène. Dans la première période de 2017 à 2020 pour 7.18% taux de pénétration, le besoin de la région de Ouargla en hydrogène est estimé à 2.61 k tonne H₂/ an. Pour une augmentation estimée à 29% par rapport à la première période 2017-2020, le besoin est estimé à 14.38 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 82 k tonnes H₂/an en 2050 et c'est une quantité importante associée à un taux de pénétration de 80 %.

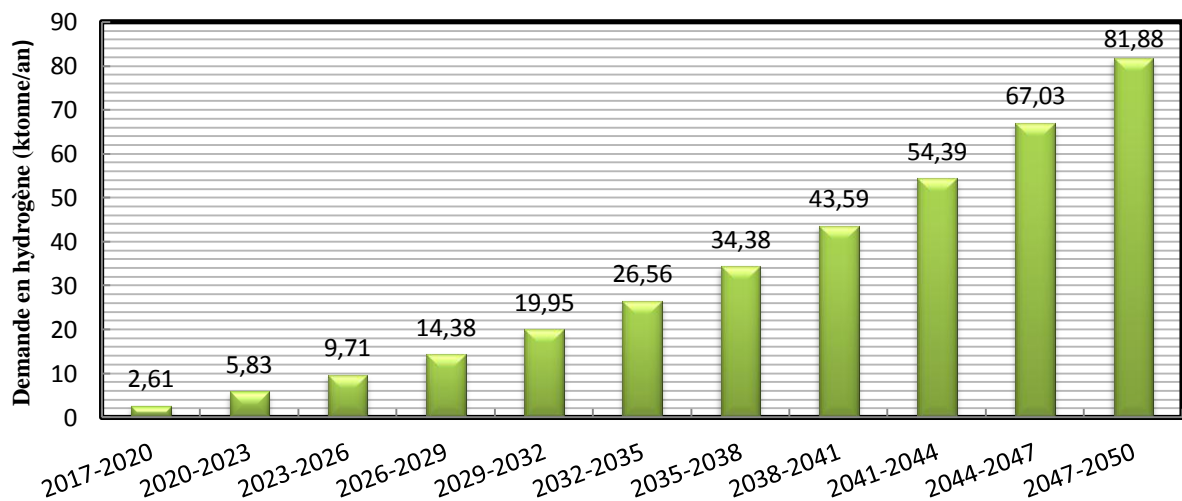
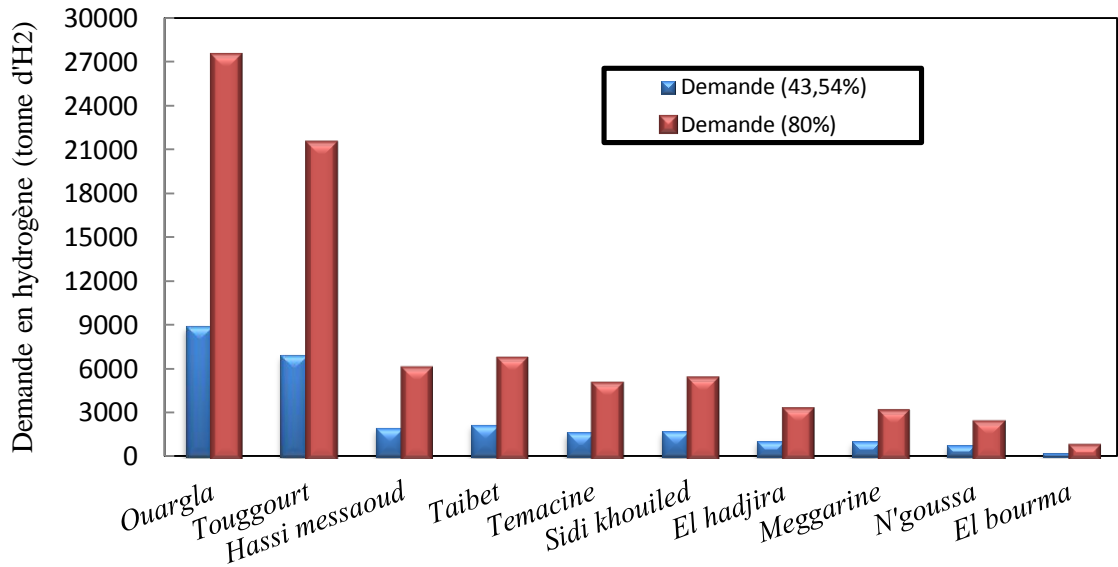


Figure (III.8): Evolution de la demande en hydrogène.

Pour bien comprendre la distribution spatiale de la demande dans la région de Ouargla par daïra, nous avons adapté la même méthodologie afin de calculer la demande annuelle en hydrogène (Voir Annexe1).



Figure(III.9) : Demande en hydrogène par daïra.

Nous remarquons que la demande dans la daïra de Ouargla est environ de 27500 tonne et dans la daïra de Touggourt est environ de 21500 tonne d'hydrogène pour un taux de pénétration égal à 80 % par contre pour un taux égal à 43.54% la demande dans la daïra de Ouargla est environ de 9000 tonne d'hydrogène et la demande dans la daïra de Touggourt est environ de 7000 tonne.

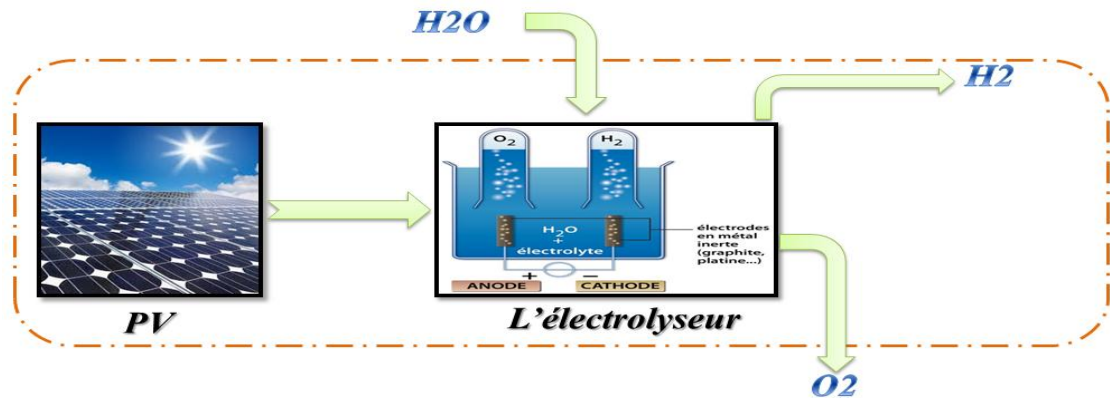
La demande en hydrogène dans les daïras de Hassi messaoud, Taibet, Temacine et Sidi Khouiled est environ 6000 tonne pour un taux de pénétration égal à 80% ,par contre pour un taux égal à 43.54 % la demande est environ de 2000 tonne .

La demande en hydrogène dans la daïra d'El-bourma est faible à cause de faible nombre de véhicule dans cette daïra.

5. Potentiel de production d'hydrogène solaire

Pour assurer l'approvisionnement en hydrogène qui va satisfaire le besoin dans toutes les daïras, 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 suivante [13] :



Figure(III.10): 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.

5.1. Modélisation de la chaîne de production d'hydrogène solaire par l'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 d'hydrogène, chaque entité de l'installation doit être modélisée. Nous présentons la modélisation choisie pour le champ photovoltaïque et l'électrolyseur de l'eau.

5.1.1. Modélisation énergétique de la production d'énergie électrique photovoltaïque

Les panneaux photovoltaïques génèrent de l'électricité directement à partir de la lumière du soleil grâce à un processus électronique qui se produit naturellement dans certains types de matériaux, appelés semi-conducteurs. Les électrons de ces matériaux sont libérés par l'énergie solaire et peuvent être amenés à se déplacer à travers un circuit électrique, alimentant des appareils électriques. L'énergie annuelle produite par le panneau photovoltaïque peut être exprimée comme suit [13]:

$$E_{PV} = \eta_{pv} \times A_{pv} \times G \quad (5)$$

E_{PV} : Energie électrique photovoltaïque (kWh) ;

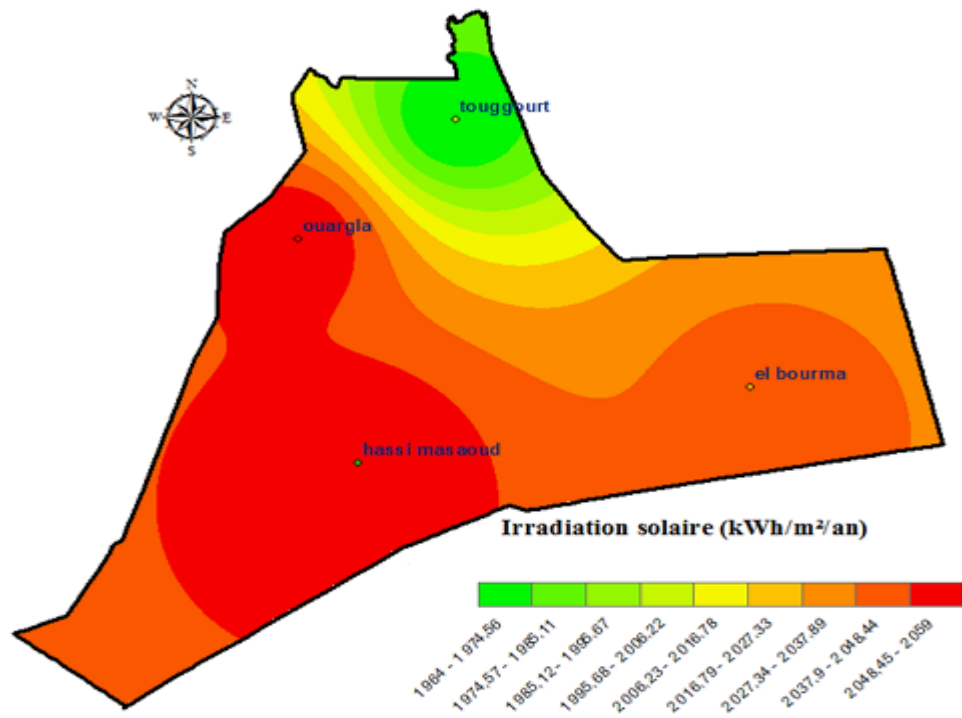
η_{pv} : Rendement de générateur photovoltaïque (%) ;

A_{pv} : Surface totale de générateur photovoltaïque (m²) ;

G : Irradiation solaire globale sur un plan horizontal (kWh/m²).

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 monocristallin a été considérée de rendement égal à 15,28% [13].

La détermination du potentiel d'irradiation solaire disponible dans les dix daïras de la région de Ouargla est basée sur les données de 'SolarMedAtlas' [40]. Les données de la base sont celles des quatre stations de mesure météorologiques.



Figure(III.11) : Cartographie de l'irradiation solaire dans la région de Ouargla.

5.1.2. Modélisation énergétique de l'électrolyseur

L'électrolyse de l'eau est une réaction électrochimique de décomposition de la molécule d'eau en hydrogène et en oxygène.

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 [13]

Electrolyseur PEM

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. Les avantages de cette technologie sont la compacité, la simplicité du design de fonctionnement, la limitation des problèmes de corrosion et des performances sensiblement supérieures au type alcalin. L'électrolyte n'étant pas liquide, cela leur permet de fonctionner à une densité de courant plus élevée que le type alcalin (de 1 à 2 A/cm²). 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. [13]

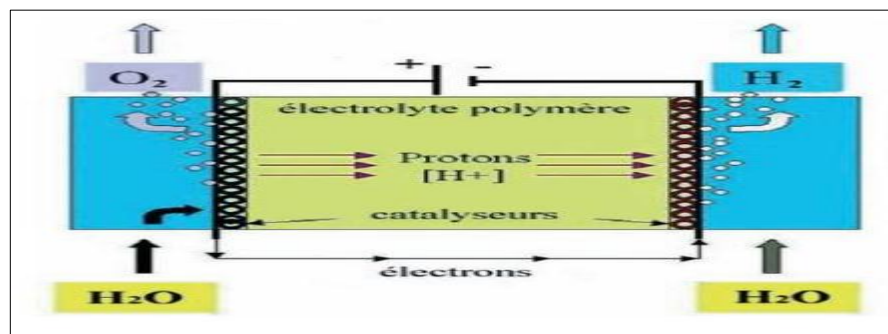


Figure (III.12) : Schéma de principe de fonctionnement de l'électrolyse de l'eau à PEM [13].

L'énergie transférée à l'électrolyseur est définie comme suit [13]:

$$E_{el} = \eta_{elec} \times \eta_p \times E_{pv} \quad (6)$$

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

η_{elec} : Rendement d'électrolyseur (%) ;

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

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

Finalemnt, les électrolyseurs à technologie PEM présentent une gamme de puissance allant du kW au MW. Les températures de fonctionnement sont généralement incluses dans l'intervalle 80- 90°C pour des pressions inférieures à 30 bars. Les rendements énergétiques de tels électrolyseurs sont de l'ordre de 75 à 90 %, pour une durée de vie supérieure à 80 000 heures de fonctionnement, pouvant même aller jusqu'à 160 000 heures (soit environ 18 ans) [13].

5.2. Evaluation du potentiel de la production de l'hydrogène dans la région de Ouargla

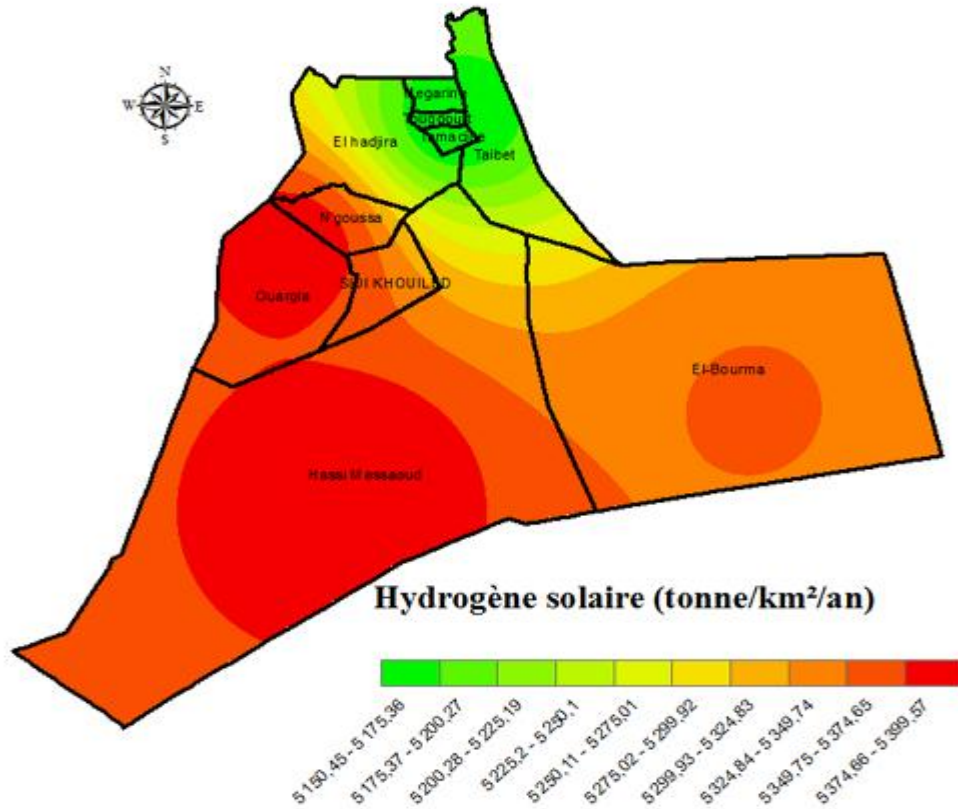
Une fois les données météorologiques d'énergie solaire ont été évaluées, l'estimation du potentiel de la production d'hydrogène solaire peut être calculée. L'évaluation du potentiel est basée sur l'utilisation de l'énergie électrique produite par le champ PV qui entraîne le fonctionnement d'un électrolyseur 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). Le rendement supplémentaire qui est inclut 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 [13] :

$$m_{H_2} = \frac{E_{el}}{PCS_{H_2}} = \frac{\eta_{elec} \eta_p E_{PV}}{PCI_{H_2}} \quad (7)$$

m_{H_2} : Masse d'hydrogène (kg) ;

PCS_{H_2} : Pouvoir calorifique supérieur d'hydrogène (kWh/kg).

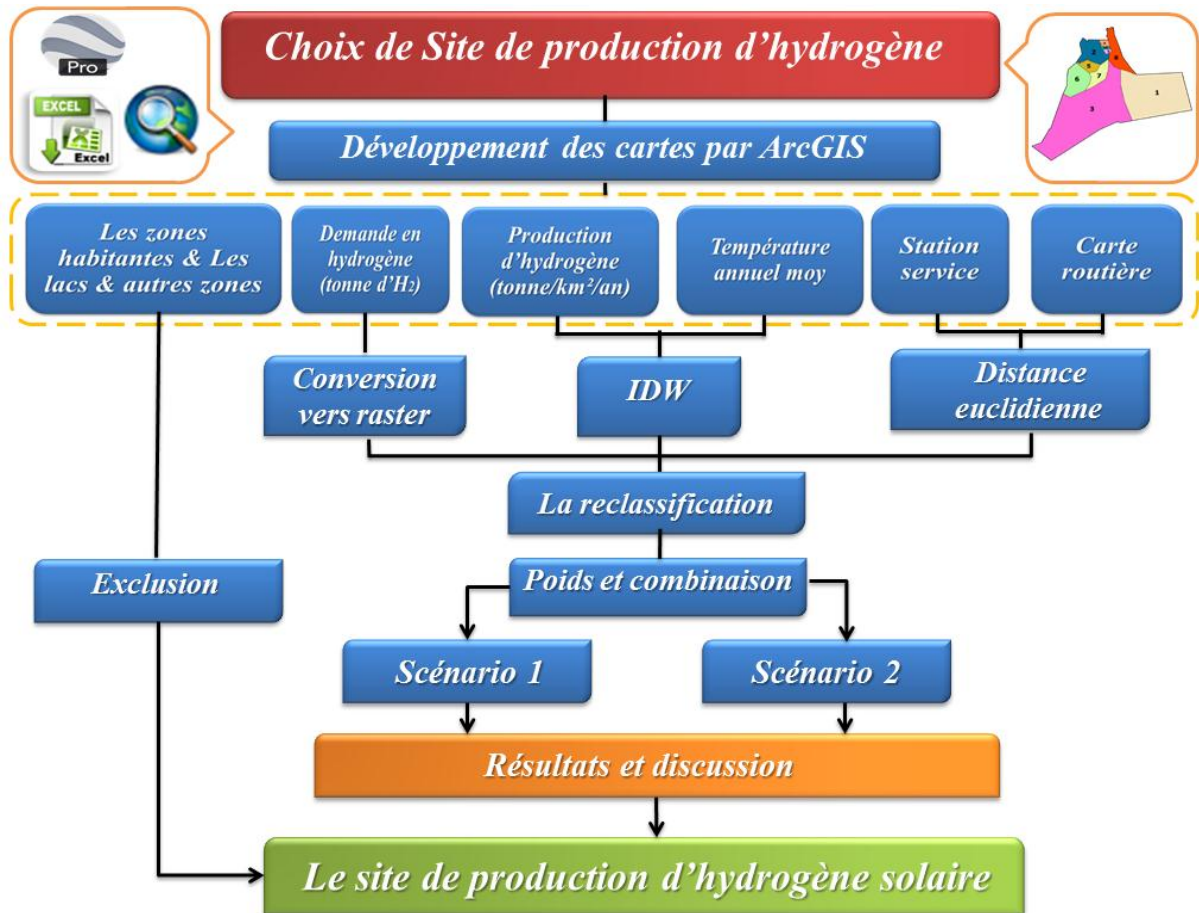
Les résultats de calcul de potentiel de la production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire photovoltaïque par l'électrolyse de l'eau obtenus sont illustrés dans la figure suivante :



Figure(III.13) : Répartition de la production d'hydrogène sur la région de Ouargla.

6. Le choix de site de production d'hydrogène solaire

Les critères de choix d'un site de production d'hydrogène solaire sont nombreux et très importants pour trouver le choix optimal pour l'installation, quel que soit le côté économique ou technique. Dans notre étude nous développons plusieurs cartes des données météorologiques, statistiques, topographiques en utilisant la combinaison entre l'ArcGIS, et le logiciel 'Google Earth pro'(Annexe2) pour développer des cartes géo-référencés afin d'arriver à une zone favorable après le traitement nécessaire. La méthodologie utilisée est présentée sur la figure suivante :

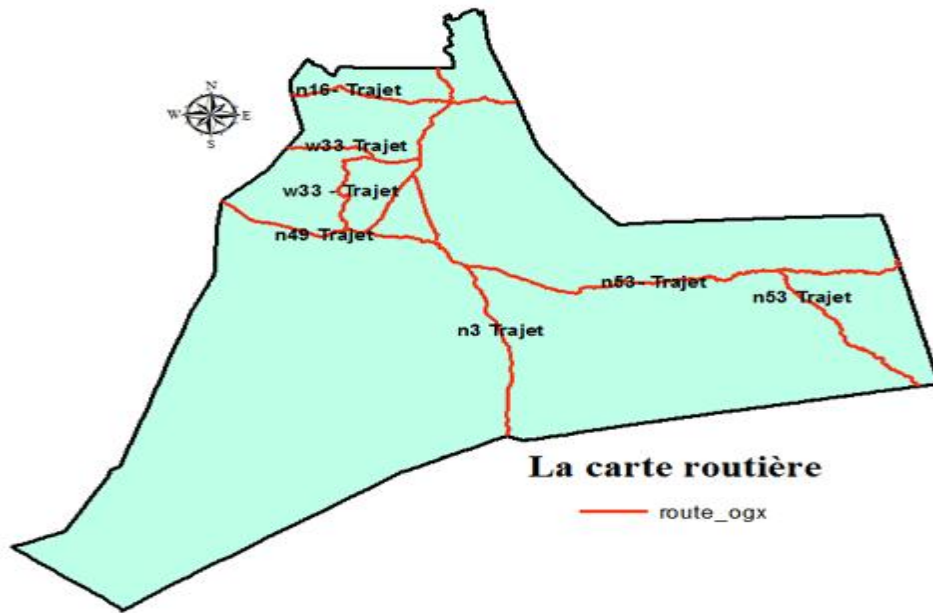


Figure(III.14): Méthodologie utilisée pour choisir les sites de production.

6.1. Développement des cartes

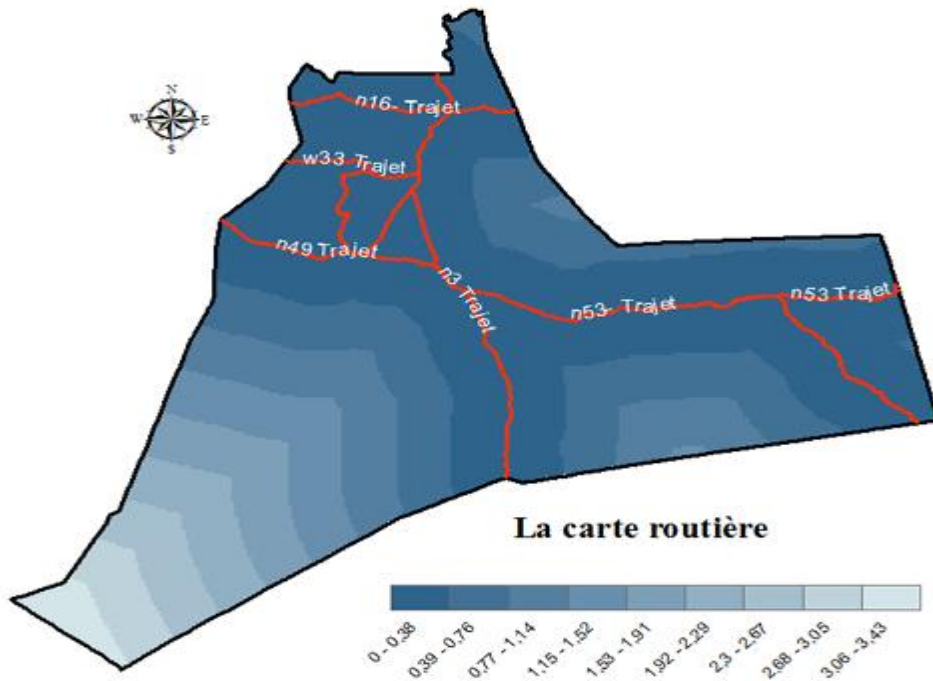
6.1.1. La carte routière

Le réseau routier dans cette région est composé de 1485 Km routes nationales, 366 Km de chemins de région et 235 Km de chemins communaux [34]. La figure suivante illustre la présentation spatiale du réseau routier de la région de Ouargla.



Figure(III.15) : Cartographie de réseau routier de la région de Ouargla.

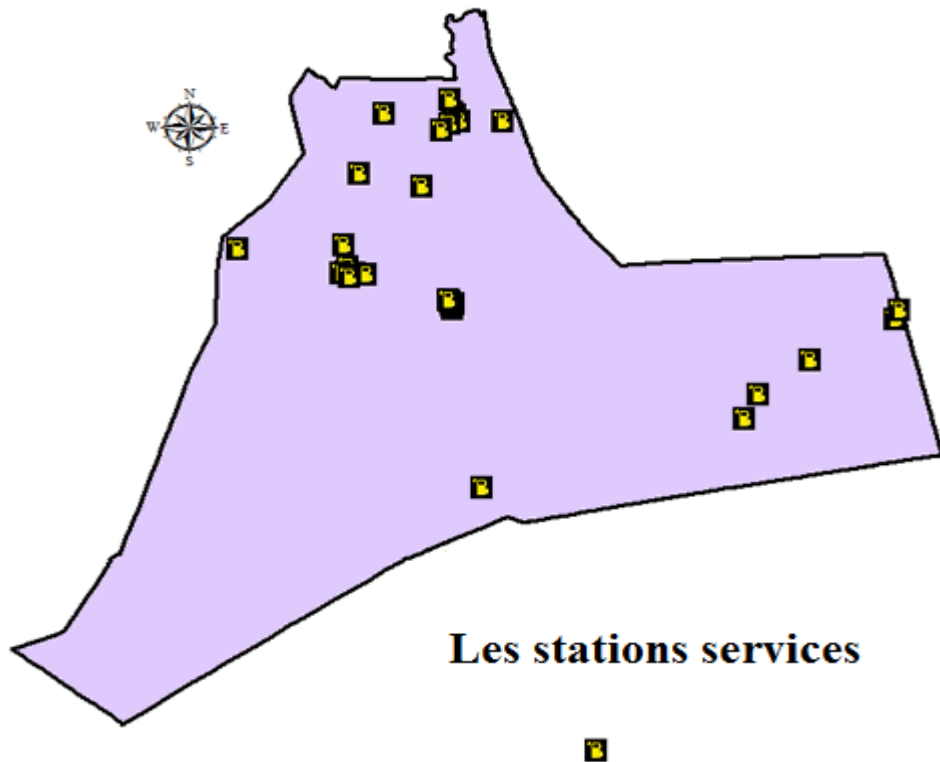
Après la création de la carte routière, nous traitons la carte dans le SIG, en appliquant l'outil distance euclidienne qui nous donne la distances entre chaque zone et la route la plus proche. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure suivante:



Figure(III.16) : La carte routière après le traitement.

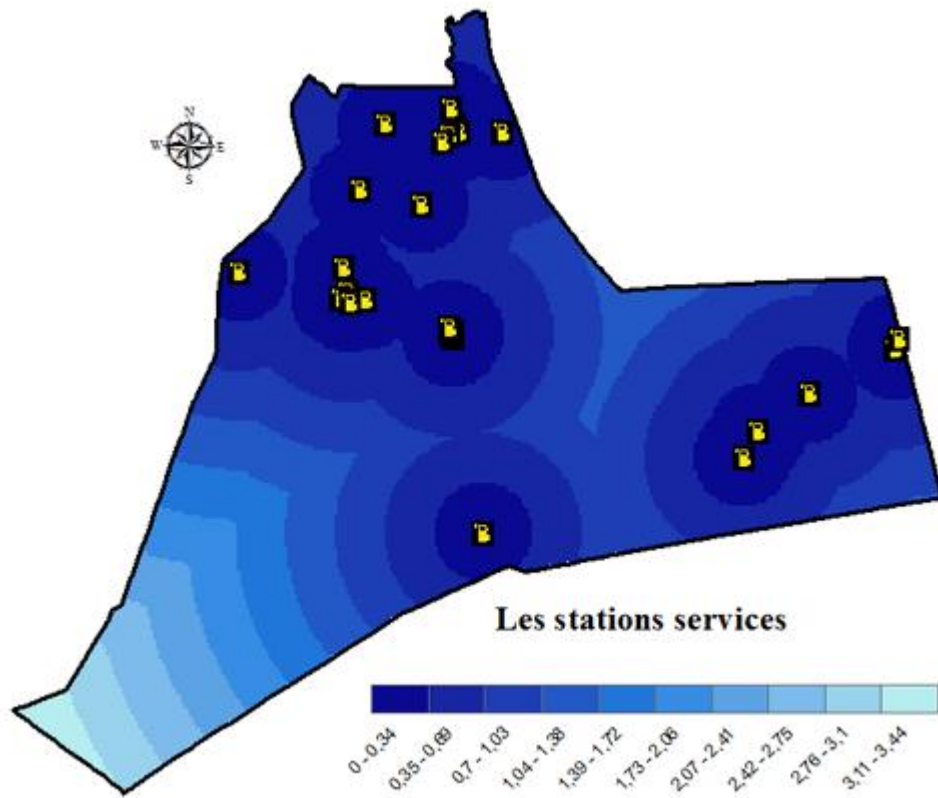
6.1.2. La carte des stations-services

En adaptant les données fournies par la société national NAFTAL [41] pour connaître le nombre actuel de stations de services dans la région, et nous utilisons un programme qui combine l'information géographique pour comprendre la répartition spatiale de ces stations dans la région.



Figure(III.17) : Répartition spatiale des stations-services dans la région de Ouargla.

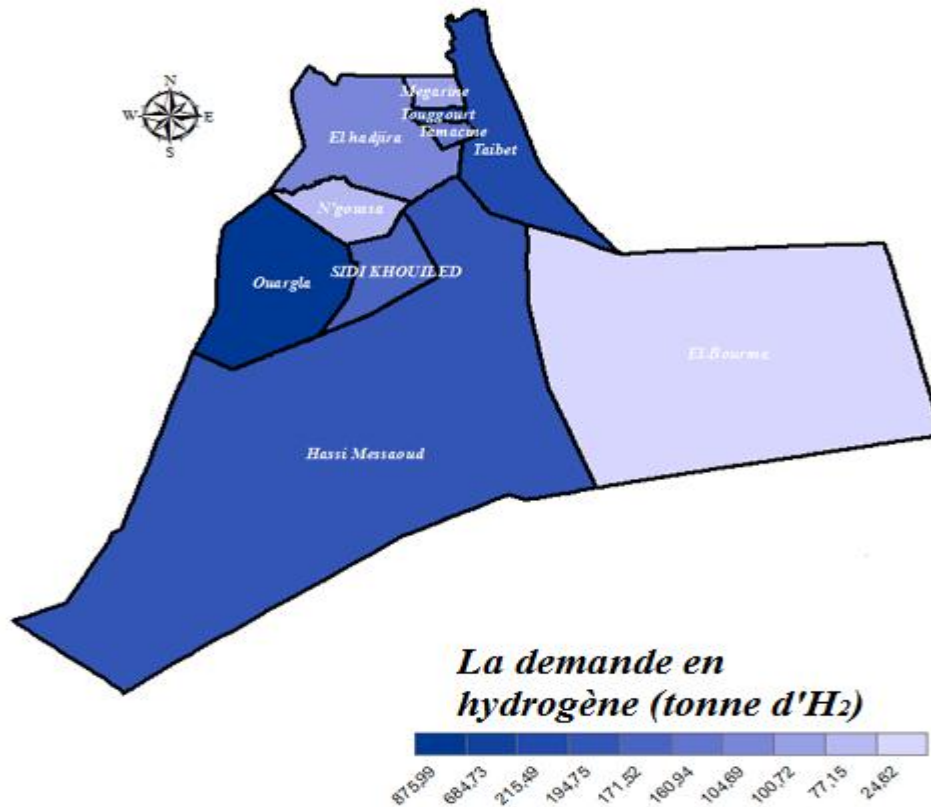
Nous avons entré les coordonnées spatiales (longitude x et latitude y) de chaque station dans l'ArcGIS, pour présenter la répartition spatiale de ces stations, puis nous traitons la carte par l'application de l'outil distance euclidienne qui donne la distance entre chaque zone et les stations plus proche. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure suivante:



Figure(III.18) : Les stations-services après le traitement.

6.1.3. La carte de la demande en hydrogène

Après l'estimation de la demande en hydrogène pour toutes les daïras de la région de Ouargla, nous avons utilisé les résultats obtenus pour créer une couche d'information dont les données sont introduites sous forme des surfaces. Les résultats obtenus sont illustrés dans la figure suivante:



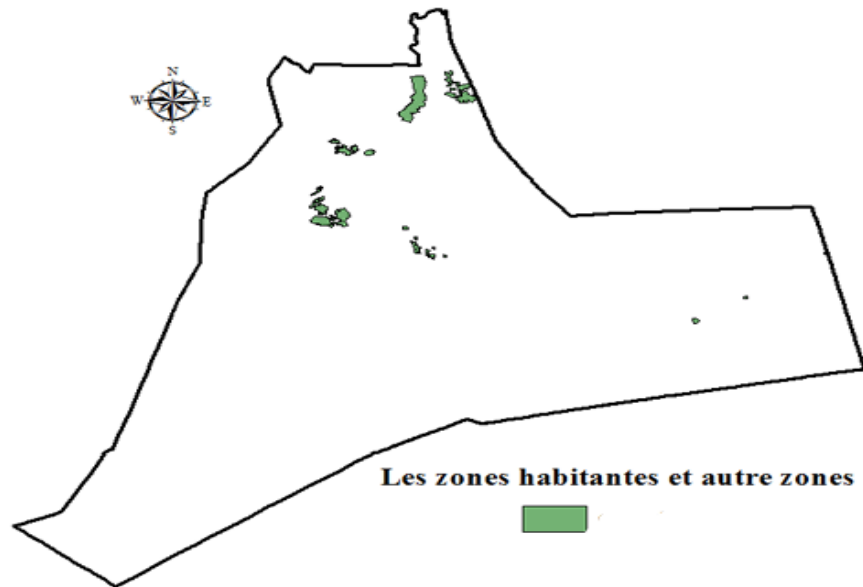
Figure(III.19) : Cartographie de la demande en hydrogène dans la région de Ouargla.

Pour ce type d'information, et afin d'obtenir une cartographie homogène et compatible avec les autres cartes, nous avons converti notre couche vers un format raster.

6.1.4. La carte des zones habitantes, des lacs, autres zones

Afin d'avoir un meilleur résultat, nous devons faire une exclusion pour quelques zones ; telles que, les zones habitantes, autres zones (les zones protégées, les bases de vie ...etc.), dont nous ne pourrions pas implanter les installations de production d'hydrogène.

La région de Ouargla dispose d'une superficie de 95,9 km² répartie entre les zones habitantes et autres différents zones, également elle dispose de plusieurs lacs, par exemple les lacs de Hassi Ben Abdallah, Zerzaim (Margarine), El Mir (El Hdjira), Merdjadja et Tataouine (Ennezla)[34].



Figure(III.20) : Cartographie des zones habitantes, des lacs et autres différents zones.

6.2. La reclassification des couches d'information

La reclassification des couches d'information effectuée dans un critère commun de 1 à 10, à noter que les valeurs supérieures sont les plus appropriées. Dans notre travail nous avons classé toutes les couches d'information, à titre d'exemple nous présentons le tableau suivant :

Tableau (III.8) : Reclassification de potentiel de production d'hydrogène.

Potentiel de production d'hydrogène (tonnes/km ² /an)	La reclassification
5150,45 - 5175,36	1
5175,36 - 5200,27	2
5200,27 - 5225,18	3
5225,18 - 5250,09	4
5250,09 - 5275	5
5275- 5299,92	6
5299,92- 5324,83	7
5324,83 - 5349,74	8
5349,74 - 5374,65	9
5374,65 - 5399,56	10

La figure suivante représente le résultat de la reclassification de potentiel de production d'hydrogène sur SIG :

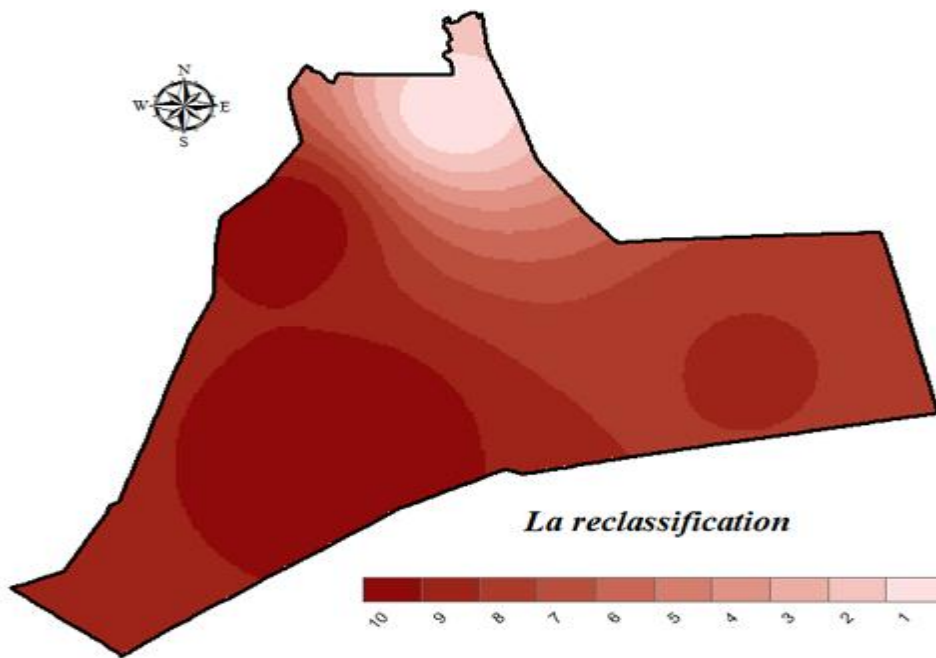


Figure (III.21) : La reclassification de la couche de production d'hydrogène.

6.3. Poids et combinaison des couches d'information

Dans cette étape, nous avons rassemblé toutes les couches d'information, puis nous avons donné pour chacune un poids selon son importance dans le projet.

Par la suite nous avons utilisé l'outil "raster calculator" disponible dans "Arctoolbox" afin d'arriver à une ou plusieurs zones favorables pour l'implantation d'une installation de production d'hydrogène. La figure suivante présente la méthode sur l'interface d'ArcGIS :

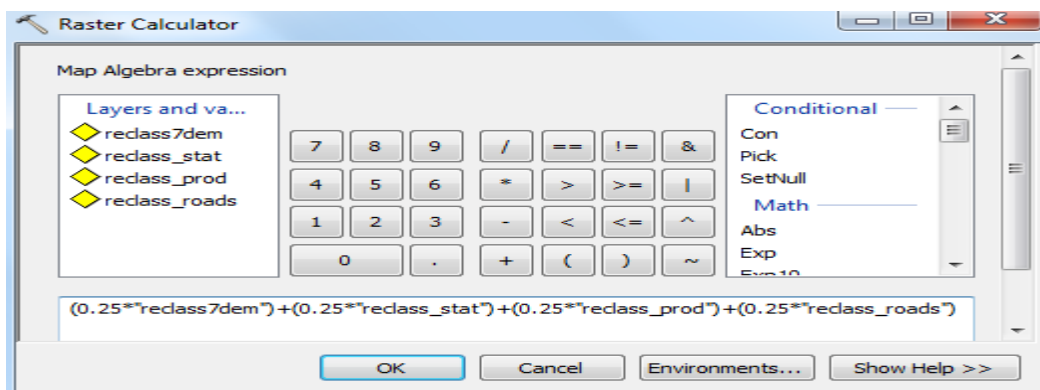


Figure (III.22): Interface Raster Calculator sur l'ArcGIS.

6.4. Résultats et discussion

6.4.1. Scénario 1 : Poids égaux

Ce scénario représente les résultats obtenus après la considération d'une égalité du poids entre les couches d'information, dont nous donnons une même importance pour chacune des couches (aucune influence de l'une sur les autres). Pour ce faire, nous multiplions chaque couche à un coefficient pour obtenir une somme des couches égale à 1. L'équation que nous avons utilisée est représentée ci-dessous :

$$(0.25 \times \text{La carte de la demande en hydrogène}) + (0.25 \times \text{La carte des stations-services}) + (0.25 \times \text{La carte de production d'hydrogène}) + (0.25 \times \text{La carte routière})$$

6.4.2. Scénario 2 : Poids pondérés

Ce scénario représente les résultats obtenus après la considération des poids pondérés des couches d'information, dont nous favorisons la couche de la demande en hydrogène par rapport aux autres couches, c'est-à-dire nous augmentons l'influence par un poids plus élevé (0.52) par rapport aux autres (0.16). Pour ce faire, nous multiplions chaque couche à un coefficient pour obtenir à la somme des couches égale à 1. L'équation que nous avons utilisée est représentée ci-dessous :

$$(0.52 \times \text{La carte de la demande en hydrogène}) + (0.16 \times \text{La carte des stations-services}) + (0.16 \times \text{La carte de production d'hydrogène}) + (0.16 \times \text{La carte routière})$$

6.4.3. Comparaison entre les résultats de deux scénarios

Les résultats des deux scénarios pour un taux de pénétration de véhicule à hydrogène au marché égal à 7.18%, en utilisant le SIG pour les répartir en cinq classes différentes, sont illustrés sur les deux figures suivantes :

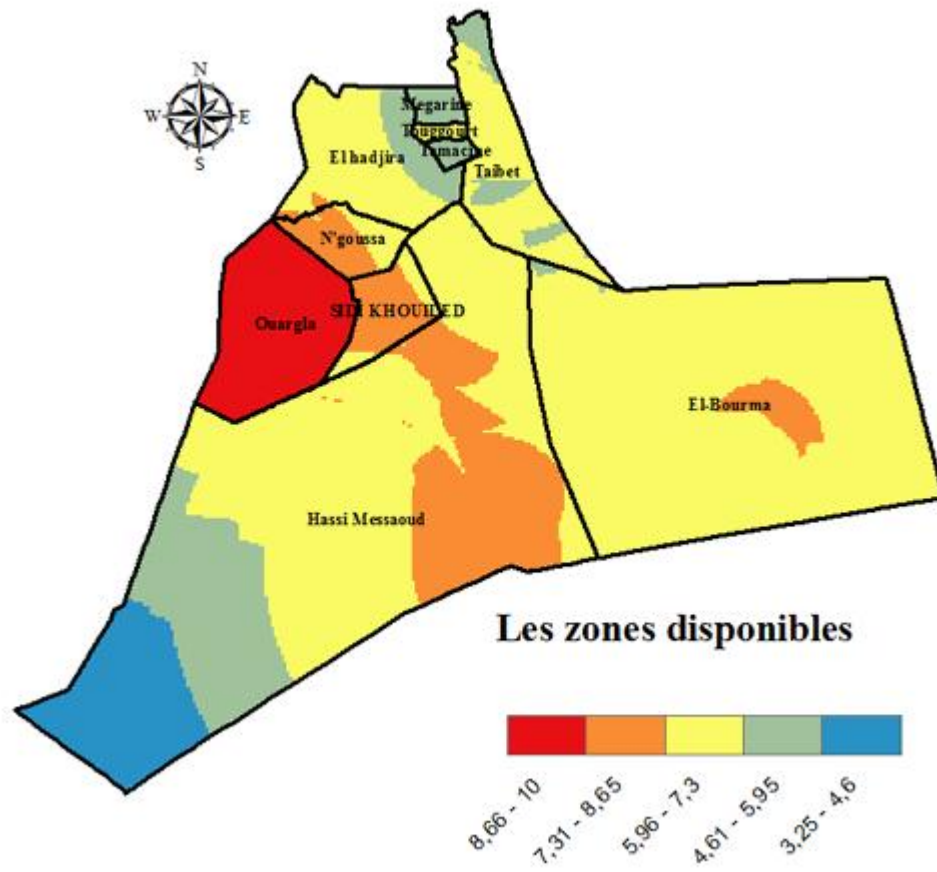
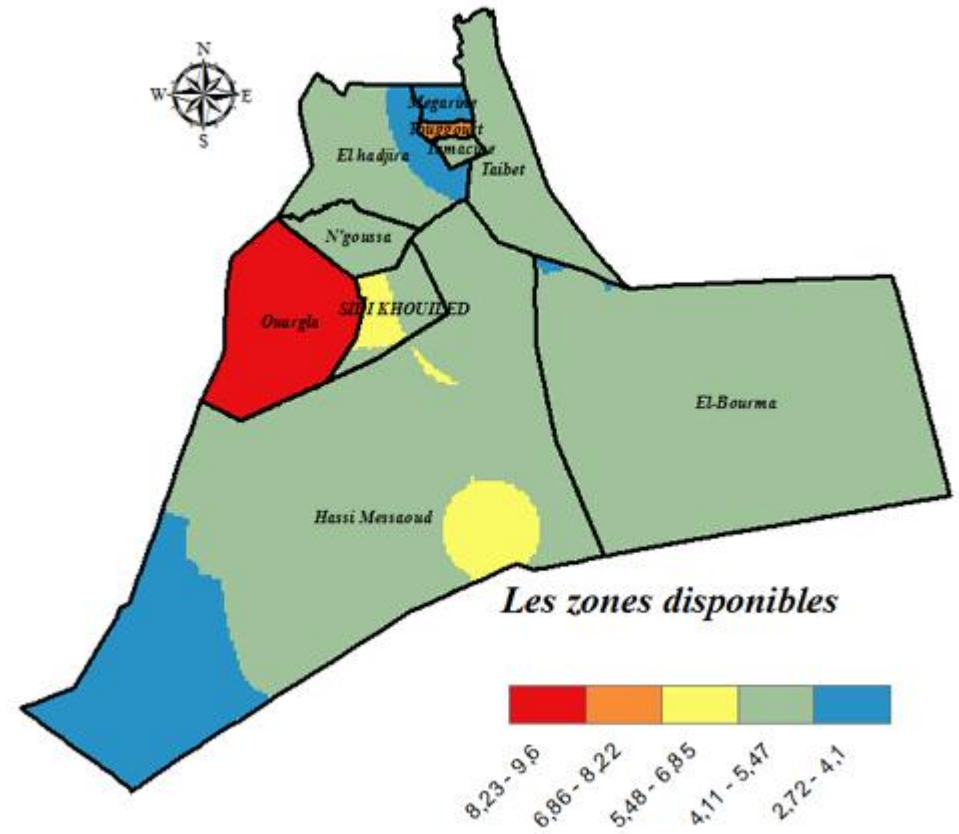


Figure (III.23): Résultat de scénario 1.



Figure(III.24) : Résultat de scénario 2.

Dans les deux scénarios nous remarquons que la zone la plus favorable est située dans la daïra de Ouargla (représentée dans la première classe, couleur rouge), où elle représente environ 7 % de la superficie totale de la région de Ouargla. C'est grâce à la disponibilité de réseau routier, des stations-services, plus la forte demande enregistrée dans la daïra de Ouargla.

En deuxième classe nous retrouvons, pour le scénario 1 (couleur orange), que les zones sont réparties entre la daïra de Hassi Messaoud, Sidi Khouiled, N'goussa, et Elbourma. Par contre dans le scénario 2 la zone en deuxième class est située dans la daïra de Touggourt seulement, et cela est justifié par le fait que la demande en hydrogène pour un taux de pénétration de 7.18% pour la daïra de Touggourt (684,74 tonne d'hydrogène) est supérieur à la somme de la demande des quatre daïras ensemble (Hassi Messaoud, Sidi Khouiled, N'goussa, Elbourma) est 468,06 tonne d'hydrogène.

En troisième classe (couleur jaune), nous trouvons des zones moins favorables par rapport aux deux premières. Pour le premier scénario la superficie occupée par cette classe représente 62.6% de la surface totale de la région de Ouargla, par contre pour le deuxième scénario, elle représente seulement 3.5%.

La superficie de la zone occupée par la quatrième classe représente plus de trois quart (77.2%) de la surface totale de la région de Ouargla dans le deuxième scénario, dont cette grande surface est considérée comme défavorable, et c'est due principalement à cause de la grande influence de la demande, où elle est trop faible par rapport aux autres classes précédentes. Pour le premier scénario, la superficie de cette classe représente 11.2% de la surface totale.

La dernière classe contient la zone la plus défavorable (couleur bleu) est semblable dans les deux scénarios, où elle est située dans le sud-ouest de la région de Ouargla. Ce résultat est justifié par le manque des stations-services et l'éloignement du réseau routier.

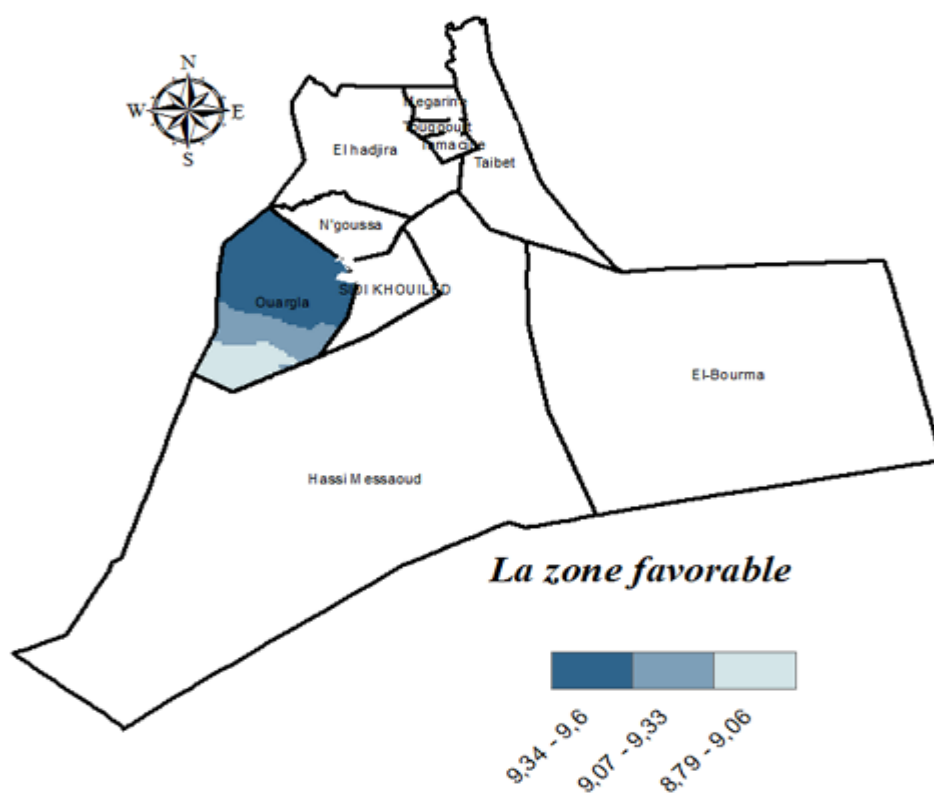
6.5. Le site de production d'hydrogène solaire

Nous avons remarqué que les résultats de deux scénarios, poids égaux et poids pondérés, nous ont amené à une même zone très favorable située dans la daïra de Ouargla.

A l'horizon 2050, où le taux de pénétration est égal à 80%, la superficie nécessaire pour satisfaire une demande annuelle de 81.8 ktonnes de la région de Ouargla (14 km², surface nécessaire pour produire 81.8 ktonnes d'hydrogène) représente environ 0.0085% de la surface totale de la wilaya (163 230 km²), et 0.13% de la superficie de la daïra de Ouargla (Voir Annexe3).

Dans notre étude et après l'analyse des deux scénarios, nous avons constaté que la Daïra de Ouargla peut satisfaire le besoin en hydrogène-carburant peu importe le taux de pénétration considéré, donc cette zone est commune dans les deux scénarios.

Afin d'avoir un meilleur résultat, nous devons faire une exclusion pour quelques zones ; telles que, les zones habitantes, les zones protégées, autres zones ...etc.), dont nous ne pourrons pas implanter des installations de production d'hydrogène. Le site de production final est présenté dans la figure suivante :



Figure(III.25) : Le site de production d'hydrogène solaire.

Nous remarquons que la zone favorable (la daïra de Ouargla) est considéré comme une zone adapté pour une installation de production d'hydrogène selon les critères que nous

avons proposé. La daïra de Ouargla est répartie en trois zones, dont ces trois zones sont favorables et acceptables pour ce projet. Aussi, afin de distinguer entre les trois classes de la daïra de Ouargla, nous serons besoin de considérer d'autres critères de choix communales.

7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'impact de l'intégration de l'hydrogène comme carburant alternatif avec différents taux de pénétration au marché sur l'ensemble l'horizon a été étudié :

La demande dans la daïra de Ouargla est environ de 27500 tonne et dans la daïra de Touggourt est environ de 21500 tonne d'hydrogène pour un taux de pénétration égal à 80 % par contre pour un taux égal à 43.54% la demande dans la daïra de Ouargla est environ de 9000 tonne d'hydrogène et la demande dans la daïra de Touggourt est environ de 7000 tonne.

La demande en hydrogène dans les daïras de Hassi messaoud, Taïbet, Temacine et Sidi Khouiled est environ 6000 tonne pour un taux de pénétration égal à 80% ,par contre pour un taux égal à 43.54 % la demande est environ de 2000 tonne .

La Demande en hydrogène dans la daïra d'El-bourma est faible à cause de faible nombre de véhicule dans cette daïra.

Le potentiel de la production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire photovoltaïque pour les différentes Daïras a une valeur maximale égale à 5400 tonnes/km²/an et une valeur minimale égale à 5200 tonnes/km²/an, ces valeurs sont importantes en raison du potentiel énorme de l'irradiation solaire enregistré dans la région de Ouargla .

La sélection de la zone favorable pour la production d'hydrogène solaire, nous avons considéré plusieurs critères (La proximité de routes principales, des stations-service, le potentiel de l'énergie solaire... etc.). Les résultats sont discutés selon deux scénarios, Nous avons remarqué que les résultats de deux scénarios, poids égaux et poids pondérés, nous ont amené à une même zone très favorable située dans la daïra de Ouargla.

Après l'analyse des résultats, nous avons constaté que la Daïra de Ouargla peut satisfaire le besoin en hydrogène-carburant peu importe le taux de pénétration considéré.

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre avenir énergétique doit être basé sur des énergies non polluantes ayant des ressources importantes. Il faut trouver des solutions énergétiques alternatives et durables répondant à la diminution de la consommation des énergies fossiles, ne participant pas à l'effet de serre. Compte tenu des perspectives vers lesquelles nos sociétés se dirigent, pour la satisfaction de ses besoins énergétiques, l'hydrogène est une des alternatives fréquemment évoquées, avec la capacité de jouer un rôle de premier ordre dans les prochaines décennies.

L'objectif de ce travail était d'étudier les différents éléments techniques nécessaires pour l'intégration de l'hydrogène comme un carburant vert dans le secteur de transport routier dans la région de Ouargla à l'horizon 2050 et un choix d'un ou plusieurs sites de production d'hydrogène 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).

L'élaboration d'un système d'information géographique nous a permis de présenter des sites d'implantation du système de production d'hydrogène solaire dans la région de Ouargla, on note que la combinaison des différentes couches d'information avec le traitement nécessaire nous ont permis d'identifier des zones favorables donc le système d'information géographique est un excellent outil d'aide à la décision.

Les résultats obtenus peuvent être résumés comme suit :

La demande dans la daïra de Ouargla est environ de 27500 tonne et dans la daïra de Touggourt est environ de 21500 tonne d'hydrogène pour un taux de pénétration égal à 80 % par contre pour un taux égal à 43.54% la demande dans la daïra de Ouargla est environ de 9000 tonne d'hydrogène et la demande dans la daïra de Touggourt est environ de 7000 tonne.

La demande en hydrogène dans les daïras de Hassi messaoud, Taïbet, Temacine et Sidi Khouiled est environ 6000 tonne pour un taux de pénétration égal à 80% ,par contre pour un taux égal à 43.54 % la demande est environ de 2000 tonne .

La Demande en hydrogène dans la daïra d'El-bourma est faible à cause de faible nombre de véhicule dans cette daïra et reste faible pour le taux de pénétration égale à 80 %.

Le potentiel de la production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire photovoltaïque pour les différentes Dairas a une valeur maximale égale à 5400 tonnes/km²/an et une valeur minimale égale à 5200 tonnes/km²/an, ces valeurs sont importantes en raison du potentiel énorme de l'irradiation solaire enregistré dans la région de Ouargla .

La sélection de la zone favorable pour la production d'hydrogène solaire, nous avons considéré plusieurs critères (La proximité de routes principales, des stations-service, le potentiel de l'énergie solaire... etc.). Les résultats sont discutés selon deux scénarios, Nous avons remarqué que les résultats de deux scénarios, poids égaux et poids pondérés, nous ont amené à une même zone très favorable située dans la daïra de Ouargla.

Après l'analyse des résultats, nous avons constaté que la Daïra de Ouargla peut satisfaire le besoin en hydrogène-carburant peu importe le taux de pénétration considéré.

En terme de perspective, nous avons proposé une étude sur:

- Le coût nécessaire pour transporté 1kg d'H₂ d'un point de production à un foyer de distribution(c€/km) pour déterminer quel est le meilleur moyen de transport (par pipeline ou par camion).
- L'analyse des risques (environnemental et sécuritaire).

Bibliographie

- [1] Ministère de l'énergie (Ex. MEM). Bilan énergétique 2015.
- [2] MOHAMMEDI Lazhar. Etude ab-initio des propriétés structurales et électroniques des hydrures métalliques TiFe-H : Restitution totale et partielle de l'hydrogène. Thèse de doctorat. Université Kasdi Merbah Ouargla, 2015 ,8p.
- [3] Sylvestre,Baufume., Fabian, Gruger., Thomas, Grube., Dennis, Krieg., Jochen,Linsen., Michael,Weber., Jurgen-Friedrich, Hake.,et Detlef,Stolten. GIS-based scenario calculations for a nationwide German hydrogen pipeline infrastructure. International journal of hydrogen energy, 2013, n°38, P 3813-3829.
- [4] Zheng, Li., Dan, Gao., Le, Chang., Pei, Liu., Efstratios,N.,et Pistikopoulos. Hydrogen infrastructure design and optimization: a case study of China. International journal of hydrogen energy, 2008, n°33, P 5275-5286.
- [5] Joan M, Ogden. Developing an infrastructure for hydrogen vehicles: a Southern California case study. International Journal of Hydrogen Energy,1999,n°24, P 698-629.
- [6] AFH2. Les données de base physico-chimiques sur l'hydrogène. Mémento de l'hydrogène, fiche 1.2, Avril 2011, 3p.
- [7] AFH2.Production d'hydrogène à partir des combustibles fossiles. Mémento de l'Hydrogène, Fiche 3.1.1, septembre 2014.
- [8] CEA Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives. Hydrogène.[en ligne]. Disponible sur:<http://www.cea.fr/comprendre/Pages/_energies/r_enouvelables/hydrogene.aspx?Type=Chapitre&numero=6 > (Consulté le : 19/03/2017)
- [9] TIGREAT, Delphine. Les techniques de production de l'hydrogène et les risques associés. Rapport d'étude DRA-08-95313-07833B.INERIS 2008.
- [10] Bouziane Khadidja. Étude d'une installation photovoltaïque de production d'hydrogène par électrolyse de l'eau .Mémoire de Magister. Université Kasdi Merbah Ouargla, 2011, p22.
- [11] Noureddine Hajjaji. Analyse de cycle de vie exégétique de systèmes de production d'hydrogène. Thèse de doctorat. École nationale d'ingénieurs de Gabès,Tunisie,2011.
- [12] VISEUR Mathieu. Etude de faisabilité de l'utilisation de l'hydrogène comme vecteur alternatif d'énergie. Mémoire de master. Université Libre de Bruxelles, 2008.
- [13] Rahmouni Soumia .Optimisation technico-économique de la production d'hydrogène à partir de différentes sources renouvelables dans le sud Algérien. Mémoire de magistère, Université de Kasdi Merbah, 2013.

- [14] Malki Ismail, Moumni Abd Elmadjid , Estimates of Hydrogen Production Potential from Renewable Resources in Algeria, Mémoire de master, Université de Kasdi Merbah , 2015 ,p31.
- [15] P. Hollmuller, J.-M. Joubert, B. Lachal et K Yvon. Etude d'une installation de production et stockage d'hydrogène photovoltaïque. Exemple d'atelier scientifique sur l'hydrogène comme vecteur d'énergie, maison friedli a zollbrück, Suisse.7-8p.
- [16] H. Dagdougui. Système d'aide à la décision pour la durabilité des systèmes énergétiques renouvelables et des infrastructures d'hydrogène : modélisation, contrôle et analyse des risques. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure de Mines de Paris, 2011.
- [17] Michel Latroche, J.-M. Joubert, F. Cuevas, V. Paul-Boncour et A. Percheron-Guégan Article, L'hydrogène dans tous ses états : du solide au gaz en passant par le liquide.
- [18] Maha bhouri. Optimisation des transferts de chaleur dans un système de stockage d'hydrogène à base d'alanate de sodium , Thèse de doctorat Université Du Québec, avril 2012,4p.
- [19] BASSEM OURANE, Recherche exploratoire de nouveaux intermétalliques ternaires à base de magnésium. Application au stockage d'hydrogène, Thèse de doctorat, L'université de Bordeaux et de L'université de Sefax, Tunisie, 2014, 8p.
- [20] AFH2.Le transport d'hydrogène. Mémento de l'hydrogène. Fiche 4.1, mai 2016.
- [21] Mustafa tasaltin. Economic and Environmental Supply of Hydrogen Fuels in Comparison with Conventional Fuels. Master thesis. Hamburg university. march2008, 18-19p.
- [22] Gauthier Winé Ingénieur ALPHEA HYDROGENE, L'HYDROGÈNE de A à Z, France 2009.
- [23] Air Liquide. Ses applications. [enligne].Disponible sur : < <http://www.planete-hydrogene.com/fr/lhydrogene/ses-applications-4.html> > (Consulté le 23-03-2017)
- [24] Hydrogène dans les transports. [enligne].Disponible sur :< <http://www.connaissancesenergies.org/fiche-pedagogique/hydrogene-dans-les-transports>> (Consulté le 23-03-2017)
- [25] Mounir Sahli. Etude de la production d'hydrogène par électrolyse et pile à combustible. Mémoire de Magistère .Université de Mentouri de Constantine, 2010, p43-44.
- [26] Farid RAHAL. Les systèmes d'information géographique appliqués à l'Architecture et à l'Urbanisme sous le logiciel MapInfo. Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf. Polycopié, Année universitaire 2014 – 2015,65p.

- [27] GOUAREH Abderrahmane. Maîtrise et optimisation de la gestion énergétique en Algérie. Thèse de doctorat. Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès, 2017.
- [28] M. Vendé-Leclerc. Les systèmes d'information géographique : SIG. Université de Nouvelle Calédonie.2014.
- [29] Abourida A. Approche hydrogéologique de la nappe du Haouz (Maroc). par télédétection isotopie SIG et modélisation. Thèse de doctorat. Université Cadi Ayyad. Maroc, 2007.
- [30] Esri. **[enligne]**. Disponible sur : < <http://www.esri.com> > (Consulté le 19/03/2017).
- [31] Documentation de qgis. Analyse Spatiale. **[enligne]**. Disponible sur : < https://docs.qgis.org/2.6/fr/docs/gentle_gis_introduction/spatial_analysis_interpolation.html > (Consulté le 07-04-2017).
- [32] Mohammed Said Benazzouz. Étude comparative entre la géostatistique et les méthodes déterministes pour la cartographie des types de sols. Thèse de maîtrise présentée pour la F.E.S.P. Université d'Ottawa, Canada, 2011.p23.
- [33] ArcGIS Desktop. Vue d'ensemble de la boîte à outils Spatial Analyst. **[enligne]**.Disponible sur : < <http://desktop.arcgis.com/fr/arcmap/10.4/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-of-the-spatial-analyst-toolbox.htm> > (Consulté le 12-04-2017)
- [34] Wilaya de Ouargla. Annuaire Statistique de la Wilaya de Ouargla, 2004-2015.
- [35] Nils,Johnson., Joan M,Ogden.,Christopher, Yang.,et Joshua, Johnson.Estimating Hydrogen Demand Distribution Using Geographic Information Systems (GIS). University of California, 2005.
- [36] S, Rahmouni., N, Settou., B, Negrou.,et A, Gouareh. GIS-based method for future prospect of hydrogen demand in the Algerian road transport sector, international journal of hydrogen energy, 2016, n°41, p 2128-2143.
- [37] Office National des Statistique. Parc automobile, 1996-2013.
- [38] Toyota. **[en ligne]**. Disponible sur :< <http://www.toyota.com/mirai> >
- [39] Bouziane Ahmed Sefyane, Ouled Haddar Djilali. Modélisation prospective sur la durabilité des systèmes énergétiques hydrogène. Mémoire de Master. Université Kasdi Merbah Ouargla. 2016, P41.
- [40] Solar-Med-Atlas. **[en ligne]**. Disponible sur : < <http://www.solar-med-atlas.org> > (Consulté le 20-03-2017)
- [41] Naftal. [en ligne]. Disponible sur :< <http://www.naftal.dz/fr/> > (Consulté le 23-03-2017)

Annexe 1 :**Tableau :** La distribution spatio-temporelle de la demande en hydrogène dans les Daïra de Ouargla.

Année Daïra	Demande en hydrogène annuelle (tonne d'H ₂)										
	2020	2023	2026	2029	2032	2035	2038	2041	2044	2047	2050
Ouargla	876	1955,21	3259,36	4826,34	6694,44	8912,55	11534,79	14625,44	18250,15	22491,45	27475,03
Tougourt	684,73	1528,32	2547,72	3772,57	5232,79	6966,61	9016,31	11432,16	14265,46	17580,72	21476,20
Hassi messaoud	194,75	434,68	724,62	1072,99	1488,30	1981,43	2564,41	3251,52	4057,36	5000,29	6108,24
Taibet	215,5	480,98	801,79	1187,27	1646,81	2192,46	2837,53	3597,82	4489,49	5532,84	6758,79
Temacine	160,94	359,22	598,83	886,72	1229,94	1637,47	2119,24	2687,07	3353,03	4132,26	5047,88
Sidi khouiled	171,52	382,83	638,18	945,00	1310,77	1745,08	2258,51	2863,66	3573,38	4403,82	5379,61
El hadjira	104,7	233,67	389,53	576,80	800,06	1065,15	1378,54	1747,91	2181,10	2687,99	3283,58
Meggarine	100,72	224,81	374,75	554,92	769,71	1024,74	1326,24	1681,60	2098,36	2586,01	3159,01
N'goussa	77,15	172,21	287,08	425,10	589,64	785,01	1015,98	1288,20	1607,46	1981,03	2419,98
El bourma	24,62	54,96	91,63	135,68	188,19	250,55	324,26	411,14	513,04	632,27	772,36

Annexe 2 :

Google Earth est un logiciel, propriété de la société Google, permettant une visualisation de la Terre avec un assemblage de photographies aériennes ou satellitaires. Anciennement produit par Keyhole inc., alors d'accès payant, ce logiciel permet à tout utilisateur de survoler la Terre et de zoomer sur un lieu de son choix.

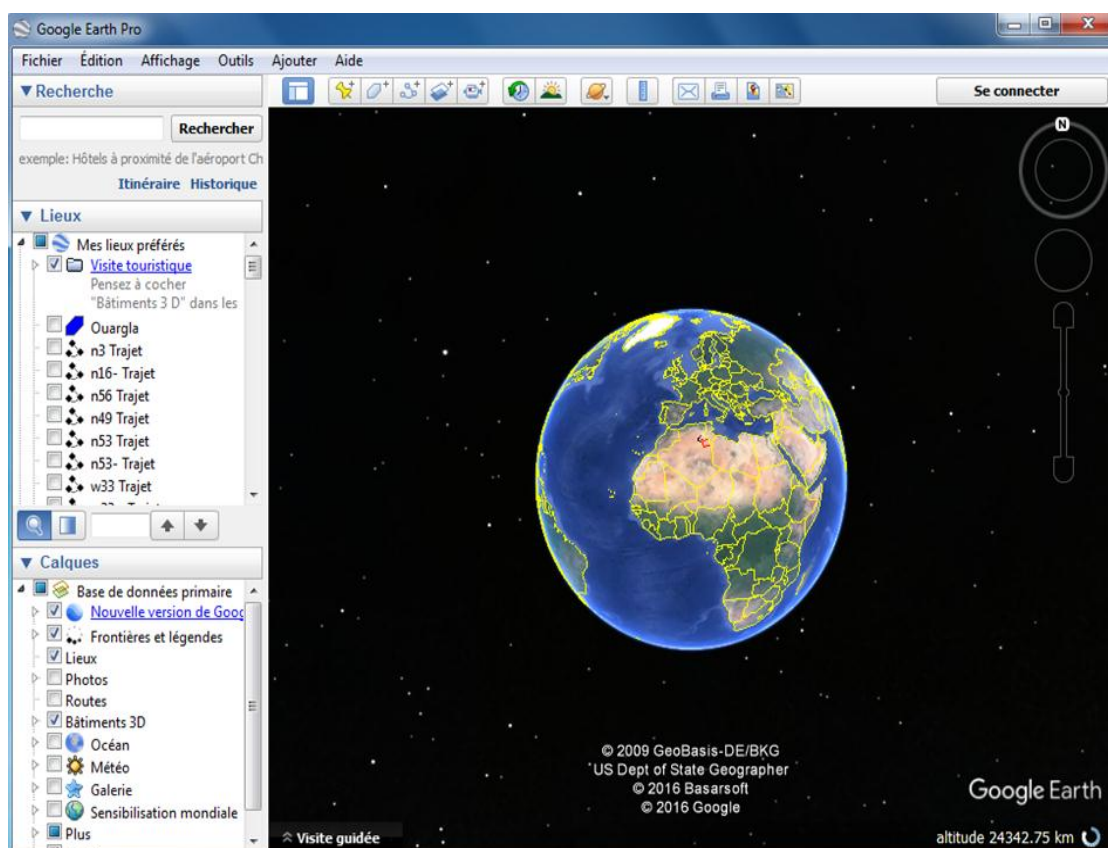


Figure: Interface Google Earth.

Annexe3 : Dimensionnement des panneaux photovoltaïques :**Tableau :** La surface nécessaire pour produire l'hydrogène dans les Daïra de Ouargla.

Daïra	Superficie de Daïra (km²)	G (kWh/m²/an)	Demande (2017-2020)	Superficie (m²)	Superficie (km²)	Rapport (%)	Demande (2047-2050)	Superficie (m²)	Superficie (km²)	Rapport (%)
Ouargla	10218	2057	876	146153,24	0,15	0,0014	27475,03	4583985,82	4,58	0,04
Touggourt	404	1964	684,74	119652,16	0,12	0,029	21476,20	3752799,48	3,75	0,93
Hassi messaoud	71237	2059	194,75	32461,16	0,03	4,55678E-05	6108,24	1018119,67	1,01	0,001
Taïbet	15551	1973	215,5	37484,03	0,04	0,00024	6758,79	1175658,09	1,17	0,007
Temacine	550	1964	160,94	28123,67	0,03	0,005	5047,88	882077,70	0,88	0,16
Sidi khouïled	5164	2049	171,52	28728,52	0,03	0,0005	5379,61	901048,38	0,90	0,017
El hadjira	9018	2011	104,69	17866,55	0,02	0,0002	3283,58	560370,73	0,56	0,006
Meggarine	920	1964	100,72	17600,07	0,02	0,0019	3159,01	552013,02	0,55	0,06
N'goussa	2907	2039	77,16	12986,73	0,013	0,00045	2419,98	407319,02	0,40	0,014
El bourma	47261	2041	24,63	4140,8	0,004	8,76155E-06	772,36	129872,98	0,13	0,0002

Choix de site optimal pour la production d'hydrogène solaire par approche SIG basée sur l'analyse multicritères : Application région de Ouargla

Résumé

L'utilisation de l'hydrogène-carburant dans le secteur des transports nécessite un changement dans la chaîne d'approvisionnement énergétique actuelle. Ces dernières années, l'Algérie a intensifié ses efforts pour diversifier ses ressources et assurer un environnement durable par la mise en œuvre des politiques et stratégies énergétiques et économiques. L'intégration de l'hydrogène dans le secteur du transport routier comme carburant peut aider le pays à atteindre ses objectifs stratégiques. L'objectif de ce travail est de développer une méthodologie permettant d'aider à choisir une ou plusieurs zones favorables considérées comme un site de production d'hydrogène afin de le distribuer vers le consommateur final, reposant sur le couplage de la simulation et le Système d'Information Géographique (SIG). Cette étude présente une estimation de la demande en hydrogène pour la région de Ouargla, à l'horizon 2050. Les données statistiques décrivant la situation actuelle du parc automobile, et de la population par Daïra sont collectées de différentes sources bibliographiques. La répartition géographique de la demande d'hydrogène en se basant sur plusieurs taux de pénétration au marché des véhicules à hydrogène est présentée. Le potentiel de la production d'hydrogène à partir de l'énergie solaire photovoltaïque est estimé pour les différentes Daïras. Ensuite, afin de sélectionner la zone favorable pour la production d'hydrogène solaire, nous avons considéré plusieurs critères (La proximité de routes principales, des stations-service, le potentiel de l'énergie solaire... etc.). Les résultats sont discutés selon deux scénarios.

Mots-clés : Transport routier, Demande en hydrogène, Zone favorable, Hydrogène-carburant, Système d'Information Géographique (SIG).

ملخص

يتطلب استخدام الهيدروجين في المستقبل كبديل للطاقة في قطاع النقل تحولا في سلسلة إمدادات الطاقة الحالية . في السنوات الأخيرة، كثفت الجزائر جهودها لتنويع مواردها وضمان الاستدامة البيئية من خلال تنفيذ سياسات واستراتيجيات حيوية واقتصادية. إن إدماج الهيدروجين في قطاع النقل البري كوقود يمكن أن يساعد البلد على تحقيق أهدافه. والهدف من هذا العمل هو وضع منهجية للمساعدة في اختيار المنطقة أو أكثر المناطق مواتية التي ستعتبر منشأة لإنتاج الهيدروجين لتوزيعها على المستهلك النهائي، استنادا إلى المحاكاة ونظم المعلومات الجغرافية (SIG). تقدم هذه الدراسة تقدير الطلب على الهيدروجين لمنطقة ورقلة إلى غاية 2050. ويتم جمع البيانات الإحصائية التي تصف الوضع الحالي لعدد المركبات، والسكان في كل دائرة. ويرد التوزيع الجغرافي للطلب على الهيدروجين بناء على الافتراضات المتعلقة باختراق السوق للمركبات التي تعمل بالهيدروجين. ويقدر إمكانات لإنتاج الهيدروجين من الطاقة الشمسية لمختلف الدوائر، لتحديد المنطقة الملائمة لإنتاج الهيدروجين الشمسي، تم اختيارها وفقا لمعايير مختلفة (القرب من الطرق الرئيسية ومحطات البنزين، وإمكانات الطاقة الشمسية ... الخ). وتناقش النتائج في إطار سيناريوهين.

الكلمات المفتاحية : النقل البري، الطلب على الهيدروجين، المنطقة الأنسب، الهيدروجين كوقود، نظم المعلومات الجغرافية.