

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES
DEPARTEMENT DE GENIE DES PROCEDES

THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences

Spécialité : GENIE DES PROCEDES

Par

BENCHEIKH Kamel

THÈME

CONTRIBUTION À LA VALORISATION DU POTENTIEL DE L'ÉNERGIE BIOMASSE EN ALGÉRIE

Soutenue publiquement le devant le jury :

CHENNOUF Nasreddine	Pr	Président	Université de Ouargla
SETTOU Noureddine	Pr	Rapporteur	Université de Ouargla
ZERROUKI Djamel	Pr	Examineur	Université de Ouargla
AOUES Kamel	MCA	Examineur	Université de Biskra
HAMRI Okba	MCA	Examineur	ENP El-Harrach, Alger.
KHELIFA Abdelkrim	MRA	Examineur	URAER Ghardaïa

Année universitaire 2020/2021

Remerciements

Tout d'abord, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail de recherche.

Ces travaux de recherche étaient réalisés avec le soutien et l'aide de nombreuses personnes :

Je tiens à remercier, premièrement, mon Directeur de thèse le Professeur SETTOU Noureddine pour avoir accepté de diriger cette thèse, pour sa supervision, ses aides, suggestions, remarques et orientations qui m'en étaient fructueuses et précieuses.

Je souhaite de plus, remercier, profondément le Professeur CHENNOUF Nasreddine de m'avoir honoré et présidé le Jury.

J'exprime également ma grande reconnaissance au Professeur ZERROUKI Djamel, Docteur HAMRI Okba, Docteur AOUES Kamel et Docteur KHELIFA AbdelKarim qui m'ont accordé leurs temps et m'ont fait l'honneur d'expertiser et être membre des Jury de ma de thèse.

J'aimerais aussi remercier tout particulièrement ma famille : ma mère, mon père, mes frères, mes sœurs, ma femme et aussi à ma défunte grande mère.

Sommaire

	Page	
Nomenclature	i	
Liste des figures	ii	
Listes des tableaux	iv	
Introduction Générale	1	
CHAPITRE I :		
CONTEXTE ENERGETIQUE		
1	Introduction	4
2	Situation énergétique mondiale	5
2.1	Ressources énergétique mondiale	5
2.2	Demande mondiale	7
2.3	Energies renouvelables au monde	14
2.3.1	Transition énergétique	14
2.3.2	Efficacité énergétique	14
2.3.3	Bouquet énergétique	14
2.3.4	Energies renouvelables	15
2.4	Impact environnementale	18
2.4.1	Gaz à effet de serre	20
2.5	Climat et développement durable ; lois et conventions	24
3	Contexte Algérien	26
3.1	Production nationale d'énergie	27
3.2	Consommation nationale d'énergie	28
3.3	Environnement en Algérie	30
3.3.1	Emission des gaz à effet de serre	31
3.3.2	Empreinte écologique	33
3.4	Energies renouvelables en Algérie	33
3.4.1	Energie solaire	33
3.4.2	Energie solaire photovoltaïque	35
3.4.3	Energie solaire thermique	35
3.4.4	Energie éolienne	38
3.4.5	Energie Géothermique	39
3.4.6	Hydroélectricité	40
3.4.7	Energie Biomasse	40
3.5	Plan national d'efficacité énergétique et des ER	41
3.6	Lois, règlements, programmes et plans	43
4	Conclusion	46
	Références	

CHAPITRE II :

LA BIOMASSE

1	Introduction	48
1.1	Définition de biomasse	48
2	Les procédés des conversions de biomasse	49
2.1	Les voies thermochimique	50
2.1.1	La combustion	51
2.1.2	La Pyrolyse	54
2.1.3	La Gazéification	56
2.2	Voies biochimiques	59
2.2.1	Fermentation alcoolique ou aérobique	60
2.2.2	Fermentation méthanique ou anaérobique	61
2.2.3	Autres voies biochimiques	63
3	Conclusion	64
	Références	

CHAPITRE III :

BIODIESEL–DIESEL–PROPANOL : CARACTERISATIONS, PERFORMANCE DU MOTEUR ET ANALYSE DES EMISSIONS

1	Introduction	65
1.1	Propanol comme additif dans les moteurs à Combustion interne	67
2	Matériaux et méthodes	69
2.1	Matériaux, équipements et analyses préliminaires des propriétés des déchets des Huiles de cuisson	69
2.2	Synthèse, purification et qualité du biodiesel	71
2.3	Détermination de FAC, DU, LCSF, KV à 40 ° C, CN, stabilité à l'oxydation (OS), pouvoir calorifique supérieur (HHV), indice d'iode (IV) et indice de saponification (SN) du MEDHC	73
	Mélange biodiesel-diesel, Propanol-diesel et biodiesel-diesel-Propanol	75
2.4	Analyses des carburants	75
	Analyses Thermogravimétrique TGA	75
	Calorimétrie différentielle à balayage DSC	76
	Analyses Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier FT–IR	76
	Analyses Résonance magnétique nucléaire NMR	76
2.5	Le banc d'essai moteur	77

3	Résultats et discussion	80
3.1	FAC, DU, LCSF, KV, CN, OS, HHV, IV and SN of WCOME	80
3.2	Propriétés des carburants	80
3.2.1	Effet des plages de température sur la densité	82
3.2.2	Analyse thermogravimétrique TGA	83
3.2.3	Analyses Calorimétrie différentielle à balayage DSC	84
3.2.4	Analyses FT – IR	86
3.2.5	Analyses Résonance magnétique nucléaire RMN	87
3.3	Performances du moteur et des émissions	91
3.3.1	Consommation d'énergie spécifique au freinage (Brake specific energy consumption) BSEC	91
3.3.2	Consommation de carburant spécifique au freinage (Brake specific fuel consumption) BSFC	92
3.3.3	Émissions de CO	93
3.3.4	Température des gaz d'échappement (Exhaust gas temperature) EGT	94
3.3.5	Emissions des NOx	95
4	Conclusion	97
	Références	

CHAPITRE IV :

BIOCARBURANTS, HYBRIDES ET ATTENUATION DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE : PERSPECTIVE ET SCENARIOS DU SECTEUR DES TRANSPORTS ALGERIEN A L'HORIZON 2050

1	Introduction	99
2	Contexte Algérien	103
3	Méthode et scénarios	108
4	Résultats et discussions	110
5	Conclusion	115
	Références	

CHAPITRE V :

BIOGAZ A PARTIR DES DECHETS MUNICIPAUX SOLIDES ; ESTIMATION DU POTENTIEL ALGERIEN : ETUDE SIG

1	Introduction	117
2	Méthode	123
2.1	Système d'information Géographique	123
2.2	Quantités de déchets ménagers en Algérie	125
3	Résultats et discussions	129
4	Conclusion	131
	Références	

Liste des tableaux

CHAPITRE I :

CONTEXTE ENERGETIQUE

Tableau 1. GES anthropique (Repère Chiffres Clés Du Climat France Et Monde 2015[14]	20
Tableau 2. Consommation nationale par agrégat (kTep) en 2019[19].	28
Tableau 3. Potentiel solaire en Algérie [23]	34
Tableau 4. Projets CSP cofinancés avec CIF [25]	36
Tableau 5. Capacités photovoltaïques installées jusqu'au fin 2020[24].	37
Tableau 6. Caractéristiques de quelques sources géothermiques [23]	39
Tableau 7. Parc de production hydroélectrique en Algérie[19]	40

CHAPITRE II :

LA BIOMASSE

Tableau 1. Tableau récapitulatif des conditions opératoires des différentes transformations thermochimiques [3]	50
Tableau 2. Présentation des biocarburants [27].	59
Tableau 3. Composition du mélange gazeux produit par la fermentation méthanique [31]	62
Tableau 4. Unités installées par payé [31]	63

CHAPITRE III :

BIODIESEL–DIESEL–PROPANOL : CARACTERISATIONS, PERFORMANCE DU MOTEUR ET ANALYSE DES EMISSIONS

Tableau 1. Comparaison des propriétés des alcools, biodiesel et diesel [3, 17, 25, 29, 30].	67
Tableau 2. Liste d'équipements	70
Tableau 3. Propriétés des déchets huiles de cuisson	70
Tableau 4. Propriétés de MEDHC	72
Tableau 5. Conditions opérationnelles du GC [25, 27]	73
Tableau 6. Méthodes TG et DSC.	76
Tableau 7. Spécifications du banc d'essais Moteur	77
Tableau 8 Spécification technique d'instrument d'analyse des gaz d'échappement Italo plus-spin	78
Tableau 9 DU,LCSF,KV,CN,OS,HHV,IV et SN pour MEHCU	81
Tableau 10 propriétés des carburants	82
Tableau 11 Analyses TG des échantillons des carburants	83
Tableau 12 Température de cristallisation	85
Tableau 13. Caractéristiques des pics des spectres FT–IR des échantillons	89

CHAPITRE IV :

BIOCARBURANTS, HYBRIDES ET ATTENUATION DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE : PERSPECTIVE ET SCENARIOS DU SECTEUR DES TRANSPORTS ALGERIEN A L'HORIZON 2050

Tableau 1. Facteurs d'émissions CO ₂ et NO _x pour chaque carburant	109
Tableau 2. Réduction des Emissions par moteurs bi-carburant GN-diesel (CNG 95% and 5% diesel) [53]	110

Tableau 3. Variations moyennes des émissions massiques des moteurs diesel utilisant le mélange de biodiesel par rapport au diesel conventionnel (%).	110
--	-----

CHAPITRE V :

BIOGAZ A PARTIR DES DECHETS MUNICIPAUX SOLIDES ; ESTIMATION DU POTENTIEL ALGERIEN :

ETUDE SIG

Tableau 1. Principaux procédés utilisés pour la méthanisation de déchets [6]	118
Tableau 2. Quantité journalière des déchets générée par habitant [22].	126

Liste des figures

CHAPITRE I : CONTEXTE ENERGETIQUE

Figure 1. Evolution des réserves mondiales prouvées en pétrole, dans les années 1999, 2009 et 2019 par régions [1]	5
Figure 2. Evolution des réserves mondiales prouvées en Gaz Naturel, dans les années 1999, 2009 et 2019 par régions [1].	6
Figure 3. Evolution des réserves mondiales prouvées en charbon, dans les années 1999, 2009 et 2019 par régions [1].	7
Figure 4. Consommation mondiale des énergies primaires par type d'énergie (Exajoule) [1].	8
Figure 5. Perspectives de la demande énergétique mondiale [4].	9
Figure 6. Croissance de la production du pétrole [4].	10
Figure 7. Demande mondiale du charbon [4].	11
Figure 8. Principales régions sources d'approvisionnement en GNL [4].	11
Figure 9. Capacités de l'énergie nucléaire retirée d'ici 2040[4].	13
Figure 10. Portions des pays des déchets nucléaires [4].	13
Figure 11. Parts des énergies primaires consommées mondialement en 2018 [11].	16
Figure 12. Energie renouvelable générée par sources en 2019[1].	17
Figure 13. Capacités des énergies renouvelables, en 2014, hors l'énergie hydroélectrique [4].	18
Figure 14. Corrélation de la concentration du CO2 et la variation température moyenne [13].	19
Figure 15. Corrélations consommation de carburants fossiles et concentration atmosphérique du CO2[13].	20
Figure 16. Répartition des émissions mondiales des GES par secteur en 2016[14]	21
Figure 17. Tendances des émissions du CO2, mondiale et par région (millions de tonnes) [15]	22
Figure 18. Investissements mondiaux nécessaire pour réduire les émissions du CO2 [4].	23
Figure 19. Capacités énergétiques remplacées et remplaçantes par sources à travers le monde [4].	23
Figure 20. Mécanismes du marché du protocole de Kyoto [18].	26
Figure 21. Synthèse des flux énergétique en Algérie, 2019 [19].	27
Figure 22. Structure de la production d'énergie primaire en 2019[19].	28
Figure 23. Structure de la production d'énergie dérivée [19]	28
Figure 24. Structure des pertes énergétiques en 2019 [19]	29
Figure 25. Structure de la consommation nationale par forme d'énergie en 2019[19].	30
Figure 26. Structure de la consommation finale par secteur[19]	30
Figure 27. Evolution du CO2 1995-2009, station Askrem Algérie [20].	31
Figure 28. Evolution GES entre 1994 et 2004[21].	32
Figure 29. Emission totales des GES par secteur en Algérie 2000[21]	32
Figure 30. Exposition Solaire journalière moyenne [23].	33
Figure 31. Gisement solaire à partir des images satellitaire 2002-2011(rayonnement global) [24]	34

Figure 32. Estimation de DLR et CDER pour la production électrique en Algérie [27]	37
Figure 33. Réseau de transport électrique reliant les pays MENA (Nord Africains Et Moyen-Orient) [27].	37
Figure 34. Carte du Vent Annuel Moyen à 50m (Période 2001-2010) [24]	39
Figure 35. Emissions évitées par le programme national d'efficacité énergétique [24]	42
Figure 36. Contribution des énergies renouvelables prévue dans la production d'électricité[24]	43

CHAPITRE II : LA BIOMASSE

Figure 1 Sources de la biomasse	49
Figure 2. Procédés de valorisation énergétique de la biomasse [3].	50
Figure 3 Procédés de combustion [10]	53
Figure 5. Produits issus de la pyrolyse de biomasse et leurs fins [2]	55
Figure 6 Schéma simplifié de la Gazéification de la biomasse [22]	57
Figure 7 Les étapes de la gazéification [23]	58
Figure 8 Production de biocarburants de 1ere génération et voies de valorisation parallèle (en pointillés) [28].	60
Figure 9 Procédé de production par voie thermochimique de biodiesel [30]	61
Figure 10 Méthanisation de la matière organique [31]	62

CHAPITRE III : BIODIESEL–DIESEL–PROPANOL : CARACTERISATIONS, PERFORMANCE DU MOTEUR ET ANALYSE DES EMISSIONS

Figure 1 Schéma du banc d'essai moteur et analyseur des gaz d'échappement.	79
Figure 2 La masse volumique fonction des températures	83
Figure 3 Analyses TG pour les échantillons des carburants	84
Figure 4 Pics spectraux FT – IR Nombre d'ondes d'échantillons des carburants	87
Figure 5. Spectres en RMN 1H et 13C d'échantillons des carburants	90
Figure 6. Consommation d'énergie spécifique au freinage BSEC	92
Figure 7 Consommation carburant spécifique au freinage BSFC	93
Figure 8. Émissions CO fonction de la charge du moteur	94
Figure 9. Température d'échappement fonction de la charge du moteur	95
Figure 10. Emissions des NOx fonction de charge de moteur	97

CHAPITRE IV : BIOCARBURANTS, HYBRIDES ET ATTENUATION DES EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE : PERSPECTIVE ET SCENARIOS DU SECTEUR DES TRANSPORTS ALGERIEN A L'HORIZON 2050

Figure 1. Répartition des énergies dans le programme national des énergies renouvelable PNDER 2015-2030[37]	104
Figure 2. Répartition du Parc national Algérien en 2018 [32]	106
Figure 3. Répartition des modes du transport du secteur étatique. (a) marchandise (b) Passagers [41]	106
Figure 4. (a) Consommation énergétique nationale par secteur en 2018, (b) la consommation du secteur routier par produits, (c) Produits énergétique importés [42]	107
Figure 5. Evolution de la Population et du parc automobile à l'horizon 2050	111

Figure 6. Gains en énergie pour différents scénarios : (a) Diesel, (b) essence.	113
Figure 7. Atténuations annuelle des GES pour différents scénarios à l'horizon de 2050 : (a) CO ₂ , (b) NO _x .	114

CHAPITRE V :

BIOGAZ A PARTIR DES DECHETS MUNICIPAUX SOLIDES ; ESTIMATION DU POTENTIEL ALGERIEN : ETUDE SIG

Figure 1. Fenêtre d'accès pour le programme ArcMap.	124
Figure 2. Fenêtre Sélectionner les éléments de dessin (feuille de dessin + image de la carte).	124
Figure 3. Interface du logiciel ArcMap.	125
Figure 4. La composition moyenne des déchets solides municipaux en Algérie 2019[21].	126
Figure 5. Organigramme de la méthodologie	128
Figure 6. Potentiel de biogaz reparté sur le territoire national (millions m ³ /an)	129
Figure 7. Couches informations	130
Figure 8. Zones de convenance pour la production du biogaz	131

Nomenclature

Unités physiques

°C	Degré Celsius
b/j	Baril par jour
bep	Baril équivalent pétrole
E	Exa
G	Giga
g	Gramme
h	Heure
ha	Hectare
J	Joule
k	kilo
M	Millions
m	Mètre
m ²	Mètre carré
m ³	Mètre cube
s	second
T	Téra
t	tonne
tep	tonne équivalent pétrole
teqCO2	tonne équivalent CO2
W	Watt
Wh	Watt- heure

Nomenclatures

EV	Véhicules tout électriques
BEV	Véhicules électriques à batterie
BSEC	Consommation spécifique d'énergie aux freins
BSFC	Consommation de carburant spécifique au frein
CET	Centres d'enfouissement technique
CI	Combustion interne
CN	Indice de cétane
CO,CO2	Oxydes du carbone
DA	Digestion anaérobique
DHC	Déchets des huiles de cuisson
DMA	Déchets ménagers et assimilés
DSC	Calorimétrie différentielle à balayage
DSC	Calorimétrie différentielle à balayage
DU	Degré d'instauration
EF	Facteur d'émissions
EGT	Température des gaz d'échappement °C

EMHV	Ester Méthylique d’Huile Végétale
EMDHC	Ester Méthylique des Déchets d’Huile de cuisson
EV	Véhicules électriques
FAC	Chaîne Acides gras
FAME	Esters méthyliques d'acides gras
FCEV	Véhicules électriques à pile à combustible
FCEV	Véhicules électriques à pile à combustible
FT-IR	Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier
GC	Méthode chromatographie de gaz interne optimisée
GNC	Gaz naturel comprimé
HHV	Pouvoir calorifique supérieur
IV	Valeur iodique
KV	Viscosité cinématique
LCSF	Facteur saturé à longue chaîne
LCSF	Facteur de chaîne longue saturée
LHV	Pouvoir calorifique inférieur
LHV	Pouvoir calorifique inférieur
MEDHC	Ester méthylique du déchets des huiles de cuisson
NO _x	Oxydes d'azote
OS	Stabilité d'oxydation
PHEV	Véhicules électriques hybrides rechargeables
RMN	Résonance magnétique nucléaire
SN	Nombre saponification
TGA	Analyse thermogravimétrique
VB	Potentiel du volume du biogaz

Acronymes nationale internationales

CEREFÉ	Commissariat national aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique
ANCC	Agence Nationale des Changements Climatiques
APRUE	Agence Nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie
CCNUCC	Convention Cadre des Nations Unies sur Les Changements Climatiques
CNC	Comité National Climat
COP	conférences des partis de la convention climat
DLR	Agence Aérospatiale allemande
GAW	Global Atmosphere Watch
GIEC	Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
GIZ	Agence de Coopération Allemande
IEA	Agence internationale d'énergie
MDP	Mécanisme pour un développement propre
ONS	Office National des Statistiques
ONU	Organisation des nation unies
OPEP	Organisation des pays exportateurs du pétrole

PADD	Plan d'action et de développement durable
PAPSE	Programme d'Appui à la Politique du Secteur de l'Environnement
PAT	Programmes d'Action Territoriaux
PNAE- DD	Plan National d'Actions pour l'Environnement et le Développement durable
PNC	Plan National Climat
PNDER	Programme national de développement des énergies renouvelable
SNAT	Schéma National d'Aménagement du territoire
SNGID	Stratégie Nationale de Gestion Intégrée des Déchets
SPANB	Stratégie et le Plans d'Action Nationaux pour la Biodiversité

INTRODUCTION GENERALE

Introduction Générale

A nos jours, L'énergie joue un rôle central dans l'économie et les politiques mondiales. Les fluctuations du marché du pétrole se répercutent de façon significative sur la croissance économique mondiale, notamment dans les pays en développement. L'accès aux ressources et leurs mises en valeurs demeurent l'enjeu majeur de la sécurité d'approvisionnement, et non pas la disponibilité des réserves. Aussi, L'investissement durable dans ce secteur et la réponse pertinente à la croissance de la demande sont les éléments clés de la stabilité des marchés et des prix de l'énergie. La dépendance aux hydrocarbures met la sécurité de L'approvisionnement en énergie en tête des questions des nations, malgré l'abondance des réserves prouvées de combustible fossile.

Actuellement, beaucoup de pays entament des politiques de transition énergétique vers des énergies nouvelles et renouvelables, pour faire face, la dépendance aux énergies fossiles et l'épuisement des ressources fossiles et la dégradation de l'environnement et le cadre de vie de la population.

La biomasse, et depuis le début de l'humanité, fut la première source d'énergie qu'a connue l'homme pour le chauffage et la cuisson. L'humanité dépendait essentiellement de cette ressource, à savoir les bois, les huiles végétales et les déjections animales ainsi que les produits de la pyrolyse.

La biomasse, actuellement, est une source d'énergie renouvelable, à empreint carbonique quasi-nulle, et une de ces énergies renouvelables qu'a connu une montée considérable dans les dernières décennies en terme de développement, d'application et de promotion. Comme d'autres énergies renouvelables, la biomasse contribue à réduire les émissions des gaz à effet de serre (GES) par unité de production énergétique, création de nouvelles secteurs d'activité économique et la création d'emploi, limitant la dépendance à l'égard des produits fossiles, à l'aide des combustibles de substitution[1]. Ces politiques de transition énergétique dépendent de l'efficacité du cadre décisionnel et institutionnel du pays. L'expansion de la production de la bioénergie pourrait aussi promouvoir un développement national et rural durable. En outre, un certain nombre de pays ont déjà élaboré des politiques visant à encourager la bioénergie. Cette dernière comprend une gamme de matières premières très variés et un grand nombre de processus. Traditionnellement, on connaît les combustibles ligneux, les sous-produits de l'agriculture et les déjections animales. Mais, le nombre des unités modernes de grandes tailles convertissent les déchets, les résidus ligneux et forestiers en électricité ou, à l'aide de

systemes de production combinée, en chaleur et électricité, ne cesse de croître, utilisant de nouvelles technologies[2].

En Algérie, cette forme d'énergie est prise en compte dans le plan des énergies renouvelables, vu son potentiel énorme[3]. Il est donc nécessaire d'estimer le potentiel de cette énergie, afin qu'elle prenne part dans la transition énergétique, faisant intervenir des sources d'énergies non-fossiles dans le bouquet énergétique national, notamment les énergies renouvelables.

L'introduction, l'insertion et la valorisation de cette source d'énergie nécessite des études statistiques ainsi qu'expérimentales dans le but d'acquiescer une prévision et une maîtrise globale de ce genre de projet. Dans ces dernières années l'Algérie subit la tendance mondiale de s'offrir des nouvelles solutions énergétiques et environnementales dont le but est d'assurer une meilleure rationalisation de la demande énergétique et de varier le bouquet énergétique, sous les contraintes de la haute consommation nationale et l'épuisement des ressources fossiles.

Dans le contexte de l'insertion des nouvelles ressources d'énergie renouvelable et durable et qui prend en considération les risques et les impacts environnementaux, que vient cette thèse, essayant de donner sa contribution à la valorisation du potentiel de la bioénergie en Algérie. L'énergie de source biologique dite l'énergie biomasse présente une portion importante dans la galette des énergies renouvelables dans plusieurs pays au monde, vu son effet environnemental nul dit « à zéro empreinte carbonique », son rôle important dans les politiques des transitions énergétiques et la création de la richesse de l'emploi et l'ancrage du concept de développement durable dans les politiques étatiques.

Le travail de thèse de doctorat vise, donc, la valorisation des potentiels en énergies biomasse que l'Algérie possède. Dans un cadre d'études expérimentales et statistiques dont le but est de contribuer à la valorisation et l'estimation du potentiel de cette forme d'énergie Algérie, et ses applications. La bioénergie en Algérie pourrait par la suite être une nouvelle source d'énergie dans des divers secteurs pour faire face à la demande intense d'énergie en Algérie, qui s'impose comme une préoccupation majeure de la société et surtout du gouvernement vu l'épuisement des ressources en hydrocarbures d'une part, et d'une autre part, faire face aussi aux enjeux des exigences environnementales nationales et internationales qui tracent un futur secteur énergétique de plus en plus vers et « *Eco-friend* », comme objectif.

Le travail de thèse est reparti, après une introduction générale, sur cinq chapitres, et finalisé par une conclusion générale.

Le premier chapitre est une présentation du contexte énergétique et environnemental à l'échelle mondiale ainsi que nationale, où on a effectué une collecte et analyse de la situation des secteurs énergétiques mondiale et nationale, afin de tracer une image générale et actuelle des systèmes énergétiques particulièrement en Algérie et au monde. En termes de ressources, production, consommation, et de leurs impacts environnementaux et le cadre législatif et institutionnel du secteur des énergies et énergies renouvelables.

Le deuxième chapitre est un état de l'art de la bioénergie, consacré à la définition des différentes formes, types et ressources de la bioénergie ainsi que leurs méthodes de production de conversion, en se basant sur des études décrites, des articles et rapports de qualité scientifique. Cette recherche bibliographique donne une vision claire et nette sur le principe de la production, développement et la conversion de la bioénergie.

Dans le troisième chapitre, une étude expérimentale est présentée dont le but est la valorisation des énormes quantités des huiles de cuisson et d'en produire du biodiesel. Ensuite tester sur un moteur, ce biodiesel est mélangé avec le diesel et de l'alcool, en différents rapports. Enfin les données des puissances, de consommation et d'environnement sont comparées. Des conclusions sont retirées.

Dans le quatrième chapitre, est réservée à une étude statistique de secteur des transports est abordée. L'étude démarre des données du secteur afin de tracer des scénarios de perspective pour ce secteur très gourmand, à l'horizon de 2050. Cette étude nous permet, et aux décideurs, d'imaginer et de prévoir les différentes situations possibles et d'adopter les meilleurs.

Le cinquième et dernier chapitre est une étude, avec l'arcGIS, du potentiel de la production du biogaz à partir des déchets municipaux solides en Algérie, ce qui permet de réduire les émissions des gaz à effet de serre et de la possibilité d'en profiter de cette ressource.

References

1. Okoko, A., et al., *The carbon footprints of alternative value chains for biomass energy for cooking in Kenya and Tanzania*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2017. **22**: p. 124-133.
2. Baasch, S., *Energy transition with biomass residues and waste: regional-scale potential and conflicts. A case study from North Hesse, Germany*. Journal of Environmental Policy & Planning, 2021. **23**(2): p. 243-255.
3. MINES, M.D.L.É.E.D. *PROGRAMME DE DEVELOPPEMENT DES ENERGIES RENOUVELABLES 2014* December 2020]; Available from: <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=energies-nouvelles-renouvelables-et-maitrise-de-lrenergie>.

CHAPITRE I :

CONTEXTE ENERGETIQUE

Contexte énergétique

1 Introduction

La croissance démographique, économique et l'amélioration du mode de vie, sont accompagnées des grands besoins énergétiques, engendrées par des émissions des gaz à effets de serres influant directement sur le changement climatique de la planète. Par conséquent, les gouvernements pensent que la question des enjeux énergétiques est cruciale ; elle est à la tête de leurs préoccupations.

Répondre à la demande énergétique impérieuse, assurer la sécurité d'approvisionnement, atténuer les effets d'émissions des gaz à effet de serre (GES) et la durabilité des systèmes énergétiques, devront être traités sous les contraintes des enjeux économiques, notamment la compétitivité de l'économie nationale et celle des entreprises locales, le développement durable.

La notion du développement durable et la transition énergétique, en remplaçant partiellement les énergies fossiles par des énergies renouvelables, afin de préserver l'environnement et les ressources naturelles, ouvrir des opportunités économiques.

Les énergies renouvelables viennent des sources renouvelables telles que : le soleil, le vent et l'eau. Contrairement aux énergies fossiles, les énergies renouvelables n'émettent pas GES. L'exploitation des technologies des énergies renouvelables sont à empreintes carboniques quasi-nuls, elles n'ont pas d'impact environnemental ou climatique.

L'introduction des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique national nécessite une estimation correcte de leurs potentiels afin d'assurer un bon approvisionnement énergétique. De plus, comprendre le contexte de la problématique énergétique est, constamment, primordial aux décideurs.

2 Situation énergétique mondiale

2.1 Ressources énergétique mondiale

L'enjeu majeur de la sécurité d'approvisionnement demeure des réserves accessibles et non pas des réserves disponibles. De plus, l'investissement durable dans ce secteur, et la réponse pertinente à la demande sont les éléments clés garantissant une offre stable des marchés et évitant la fluctuation des prix, tout en assurant une croissance des économies des pays exportateurs ainsi que celles des pays importateurs.

D'après *BP statistical review 2019*, les réserves prouvées de pétrole donnent plus de 40 ans de production actuelle. La croissance de la production écoulee est couverte par l'augmentation des réserves. Les réserves du gaz naturel sont aussi estimées de 60 ans de production actuelle, et 120 ans de production actuelle pour les réserves en charbon. Le développement des

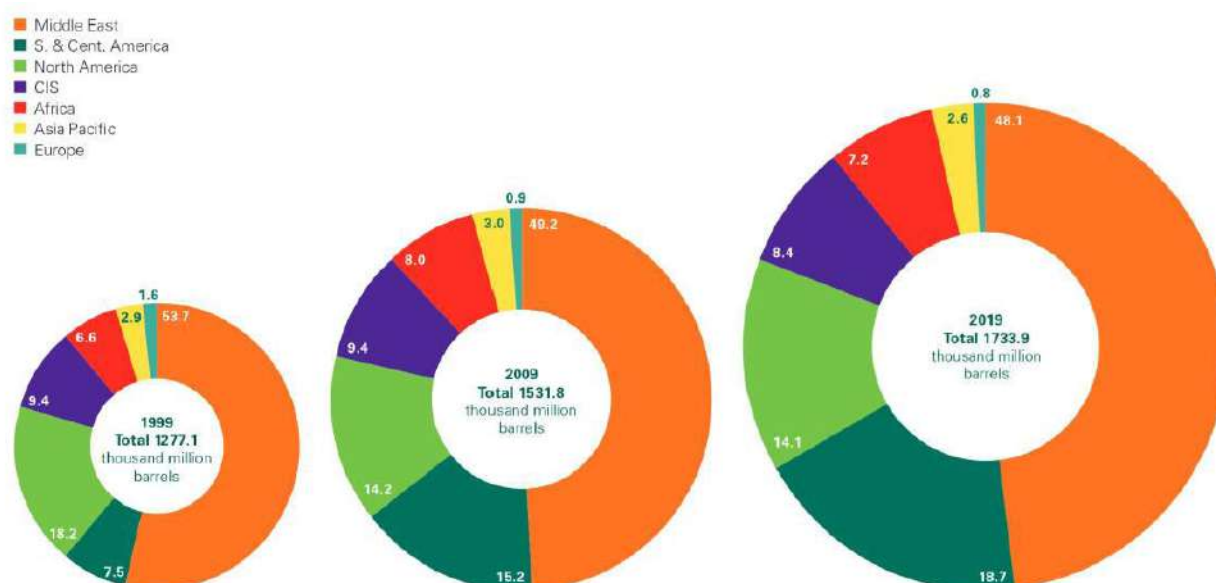


Figure 1. Evolution des réserves mondiales prouvées en pétrole, dans les années 1999, 2009 et 2019 par régions [1]

gaz non conventionnel pourrait augmenter très sensiblement les réserves en gaz naturel [1].

Les réserves pétrolières se limitent dans un petit nombre de pays mettant les gros importateurs en dépendance aigue. Les pays de l'OPEP possèdent trois quarts des réserves mondiales de pétrole, et assurent 40% du marché mondial. Les pays du golf arabe possèdent 30% des réserves mondiales prouvées, et assurent 24% du marché pétrolier [2].

De même, 47.6% des réserves mondiales prouvées en gaz conventionnel se situent dans trois pays, respectivement : la Russie 19.1%, l'Iran 16.1% et le Qatar 12.4% [1, 2].

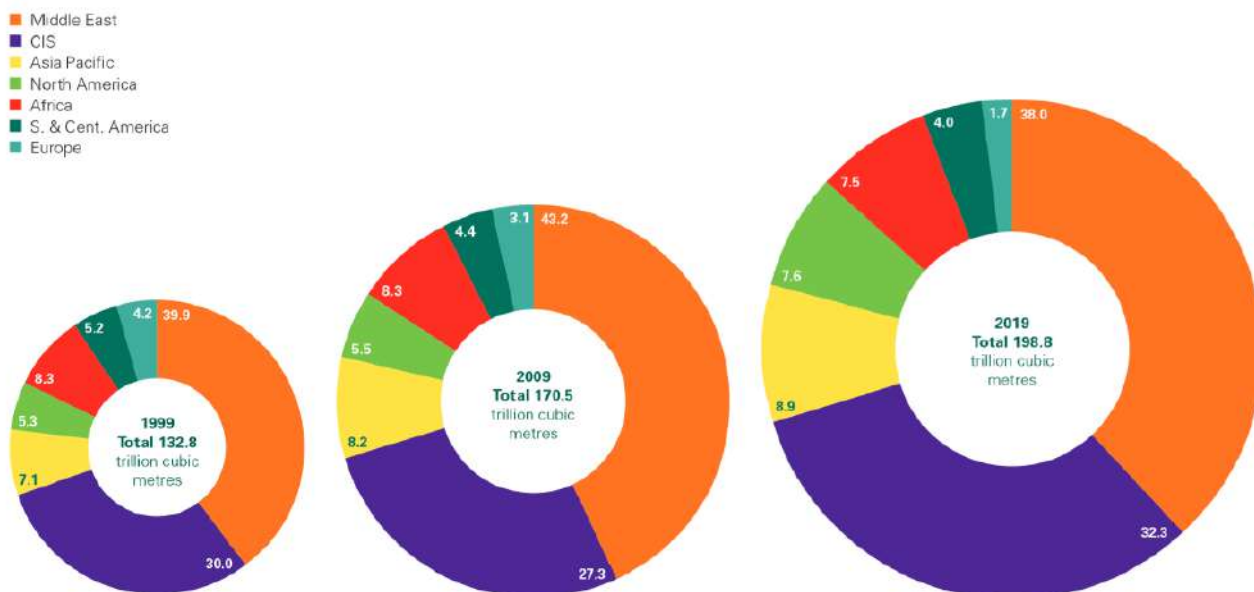


Figure 2. Evolution des réserves mondiales prouvées en Gaz Naturel, dans les années 1999, 2009 et 2019 par régions[1].

Les réserves mondiales prouvées de charbon en 2019 s'élevaient à 1070 milliards de tonnes et sont fortement concentrées dans quelques pays seulement : États-Unis (23.3 %), Russie (15.2 %), Australie (14 %) et Chine (13.3 %). La plupart des réserves sont anthracite et bitumineux (70%). Le rapport Réserves/Productions mondial actuel montre que les réserves de charbon en 2019 représentaient 132 ans de production actuelle, 367 ans en Amérique du Nord, et 338 ans pour CEI (Commonwealth des états indépendants, ex Union Soviétique), et ceux les régions avec les rapports les plus élevés [1]. Cependant, la croissance de la demande mondiale du charbon ralentit rapidement en raison des politiques environnementales plus strictes.

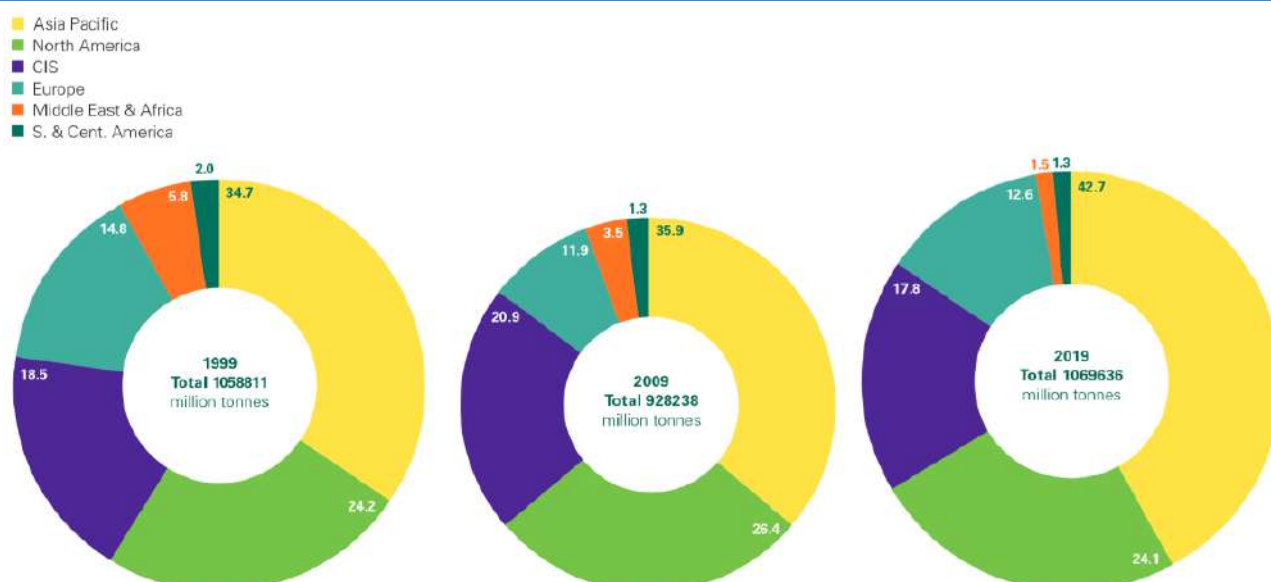


Figure 3. Evolution des réserves mondiales prouvées en charbon, dans les années 1999, 2009 et 2019 par régions [1].

2.2 Demande mondiale

La demande mondiale a connu une montée considérable, plus de 280% dans les 50 dernières années ; elle est passé de 5 000 Mtep, en 1970, à 14 000 Mtep, en 2019, avec un taux de croissance global annuel de 1.3%, dont les énergies renouvelables sont le premier contributeur avec 41%. Suivant ce rythme, la demande énergétique serait à l'horizon de 2050, le double de celle de l'an 2010. Le taux de croissance de la demande mondiale de l'an 2019 est inférieur à la moyenne de la dernière décade, et très inférieur à celui de 2018.

Le monde reste quasiment-dépendant des énergies fossiles ; elles couvrent plus de 84.3% de la demande aux énergies primaires mondiales, en 2019. Le pétrole assure 33.1% des besoins mondiaux suivi par le charbon 27%, et le gaz 24.1%. Les énergies renouvelables couvrent quant à elles 5% de la demande, 6.4% de source hydraulique. L'énergie nucléaire présente 4.3% [1].

Pétrole

La production mondiale de pétrole a chuté, en moyen, de 60 000 b/j, en 2019. La forte croissance de la production américaine (+1,7 million de b/j) ayant été plus que compensée par une baisse de la production de l'OPEP (-2 millions de b/j), avec de fortes baisses en Iran (-1,3 million de b/j) Venezuela (-560 000 b/j), et en Arabie saoudite (-430 000 b/j). La consommation de pétrole a augmenté de +0,9 million b/j, inférieur à la moyenne, soit 0,9 %. La croissance a été tirée par la Chine (680 000 b/j) et d'autres pays émergents, tandis que la demande a baissé dans

l'OCDE (*Organisation for Economic Cooperation and Development OECD*) de (-290 000 b/j) [1, 3].

En terme moyen, poussée par la croissance de la population et celle de l'économie et le changement du mode de vie, la demande mondiale devrait continuer son augmentation. La population mondiale atteindrait les 9 milliards en 2050. La croissance économique mondiale contribuera à augmenter les besoins énergétiques, tirée par les pays émergents et principalement : la Chine, l'Inde, la Russie, Brésil et l'Afrique du sud. La demande d'électricité croîtra aussi du fait de l'électrification des besoins et de l'urbanisation croissante [1, 3]. L'Agence Mondiale de l'énergie (IEA *International Energy Agency*) dans son rapport annuel *World Energy Outlook* (WEO2020) confirme ces tendances. Les pays des BRICS (Brésil, Russie, Inde, Chine, Sud-Afrique) conduisent, sans doute, la tendance de la demande énergétique du globe [3].

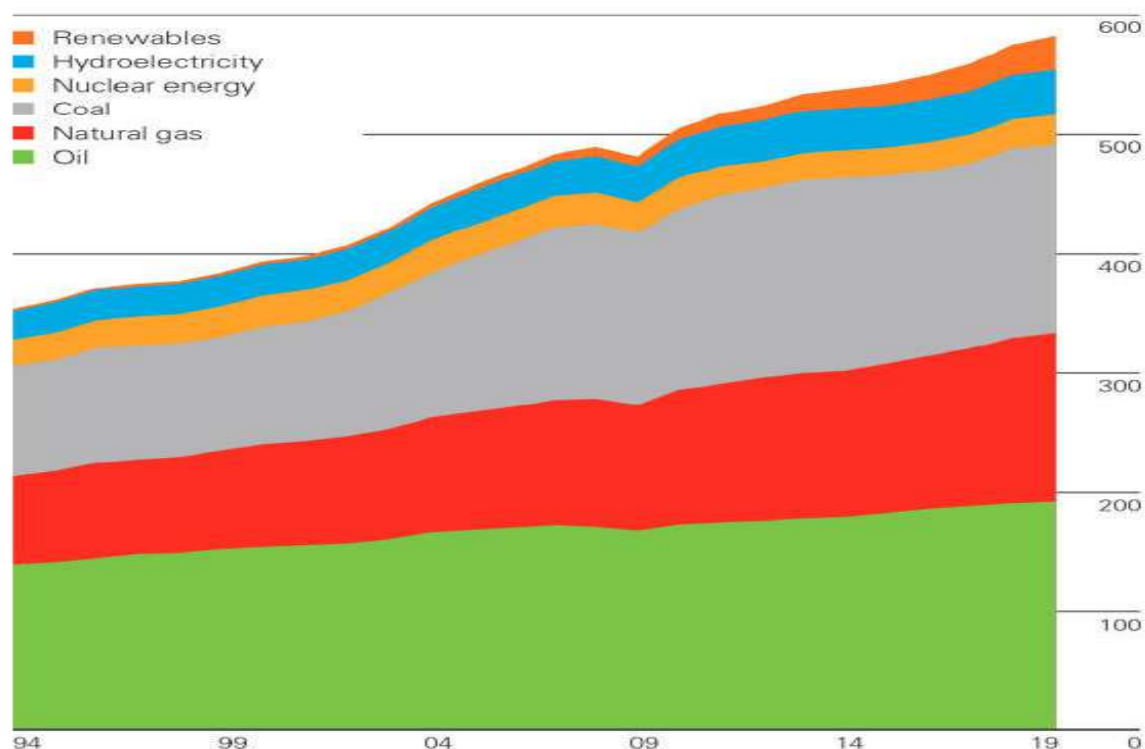


Figure 4. Consommation mondiale des énergies primaires par type d'énergie (Exajoule) [1].

La croissance économique des pays émergents représente 70% de la croissance économique mondiale, 90% de la croissance démographique et 90% de la croissance de la demande d'énergie d'ici 2035, selon L'agence internationale de l'énergie. La Chine, le premier consommateur mondial, a dépassé les 24.3 % suivi par les Etats unis 16.4% et l'Union Européenne 14.4% en 2019 [1]. La demande énergétique chinoise se stabiliserait après 2030. Les pays de BRICS deviendraient le moteur de la croissance de la demande énergétique mondiale. Les pays développés comme les Etats unis,

l'Union Européenne, le Japon, le Canada et l'Australie, les principaux membres de l'organisation de coopération et de développement économique OCDE, connaîtraient une stabilisation de la demande énergétique [3, 4].

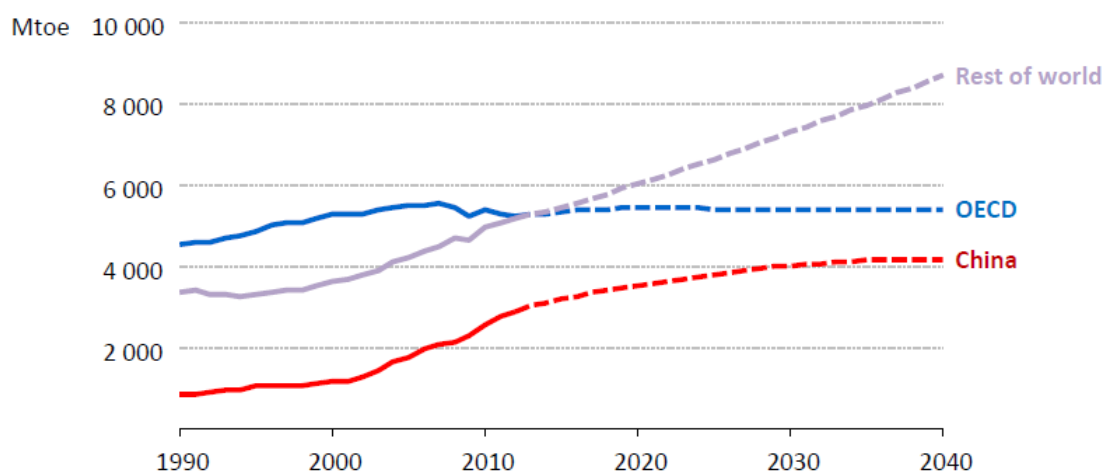


Figure 5. Perspectives de la demande énergétique mondiale [4].

En 2019, le système énergétique chinois dépend, essentiellement, des énergies fossiles : Charbon 57.6%, Pétrole 19.6%, et le Gaz Naturel 7.8%. Le gouvernement chinois adoptait des nouvelles politiques visant à réduire cette dépendance, par conséquent, à atténuer la pollution. Les choix technologiques sont constitués, principalement, de l'énergie hydraulique, le nucléaire et l'éolien. Le développement du gaz naturel non conventionnel est aussi pris en compte dans le bouquet énergétique chinois[1, 4].

Le pétrole demeure le produit le plus important du globe, en termes de taille de commerce. A court terme, l'approvisionnement pétrolier connaîtrait des perturbations par les événements naturels (tornades, tempêtes) au techniques (accident industriel) ou bien géopolitique (conflits militaire, embargo, terrorisme). L'image d'un marché bien approvisionné ne doit pas cacher la réalité que l'instabilité du Moyen-Orient a toujours perturbé, spectaculairement, les prix du marché international.

En 2019, le monde a produit 4484.5 millions de tonnes. Avec une croissance de -0.3%, par rapport à 2018, très inférieure à la moyenne de la dernière décennie 1.2%. La Russie et l'Arabie Saoudite demeurent les grands joueurs du marché énergétique mondial. En 2019, elles ont assuré 12.7% et 12.4% de la production mondiale du pétrole respectivement. Quotidiennement, chacun débite environ 11Mb/j au marché international. Mais les Etats-Unis ont repris la tête des producteurs avec 16.7%, bénéficiant de son monopole des nouvelles technologies des huiles et gaz de schiste [1, 3].

La Chine et l'Inde deviennent des consommateurs très gourmands, soumis à un taux de croissance de deux chiffres, depuis plus une décennie. De plus, elles acquièrent des réserves stratégiques. La consommation de la Chine, en 2019, a

été de 14.2 Mb/j, tandis que pour l'Inde a été de 5.3Mb/j. le plus grand consommateur reste les Etats-Unis avec 20.4Mb/j [1].

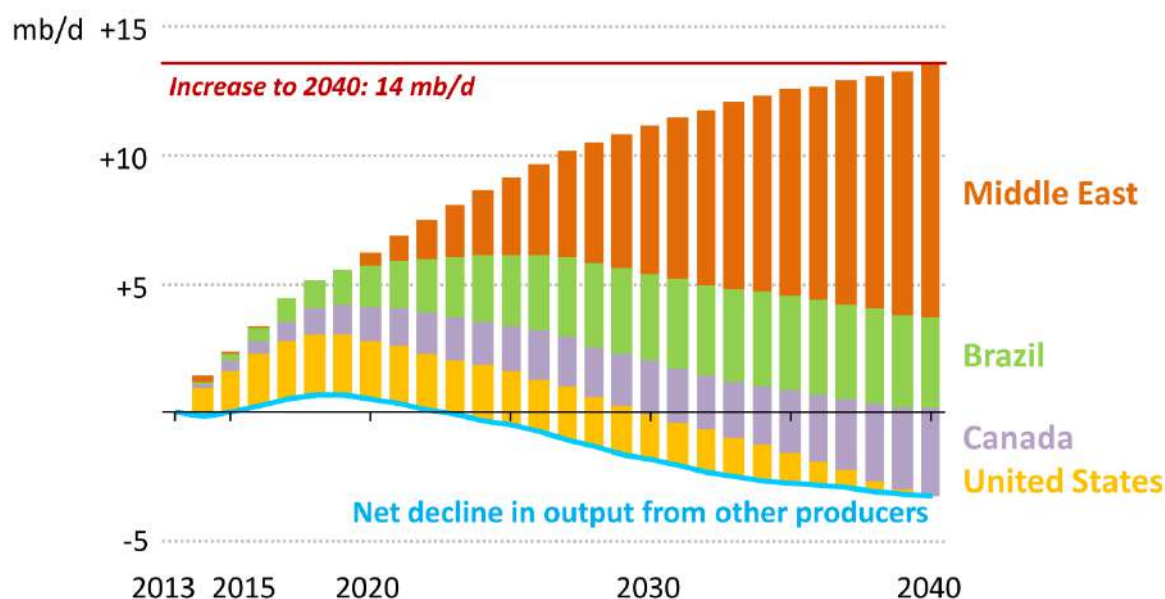


Figure 6. Croissance de la production du pétrole [4].

Gaz Naturel

La consommation de gaz naturel a augmenté de 78 milliards de mètres cubes (Gm^3), soit 2 %, bien en deçà de la forte croissance observée, en 2018 (5,3 %). La croissance a été tirée par les États-Unis (27 Gm^3) et la Chine (24 Gm^3), tandis que la Russie et le Japon ont enregistré les baisses les plus importantes (10 et 8 Gm^3 , respectivement). La production de gaz a augmenté de 132 Gm^3 (3,4 %), les États-Unis représentant près des deux tiers de cette augmentation (85 Gm^3). L'Australie (23 Gm^3) et la Chine (16 Gm^3) ont également été des contributeurs clés à la croissance [1].

Le monde a produit, en 2019, 3 989 Gm^3 . A la tête des producteurs, on trouve les États-Unis avec 920 Gm^3 , suivi par la Russie avec 679 Gm^3 , l'Iran avec 244 Gm^3 , le Qatar avec 178 Gm^3 , et la Chine avec 177 Gm^3 . La production mondiale a connu une augmentation de 3.4% supérieure à la moyenne de la dernière décennie, qui a été de 2.4% [1].

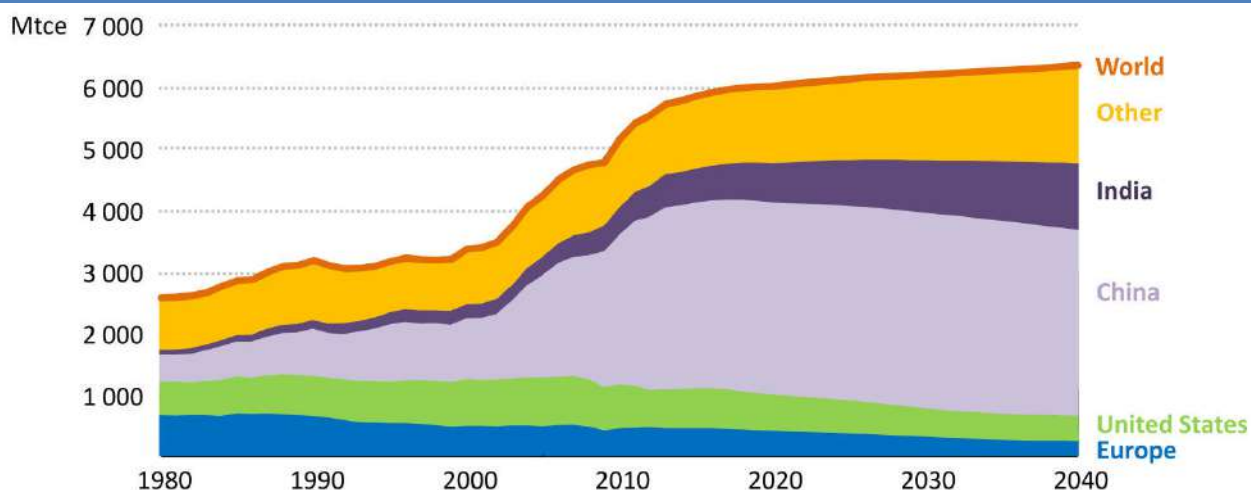


Figure 7. Demande mondiale du charbon [4].

Depuis plus d'une décennie, le GNL (Gaz Naturel Liquéfié) a connu aussi une hausse de la demande ainsi que de la production, poussé par l'augmentation des sites de liquéfaction et d'approvisionnement, quasiment triplement des capacités des sites grâce à des investissements colossaux des pays actuellement en monopole. Le GNL offre un marché intégré, très vif et sécurisé. Mais, le marché du GNL reste limité en question des prix [3, 4] (fig.8). Le Qatar et l'Australie monopolisent le marché des GNL, avec 107 Gm³ et 104 Gm³, respectivement, présentant des portions de 22.1% et 21.6% du marché. Suivis par : les Etats-Unis avec 47.5 Gm³, la Russie avec 39.9 Gm³ et la Malaisie avec 35.1 Gm³. La production mondiale du GNL est estimée à 485.1 Gm³, en 2019, avec un taux de croissance de 12.3%. Le Japon, la Chine et La Corée du Sud sont les plus grands importateurs du GNL, avec 105 Gm³, 84 Gm³ et 55 Gm³, respectivement [1].

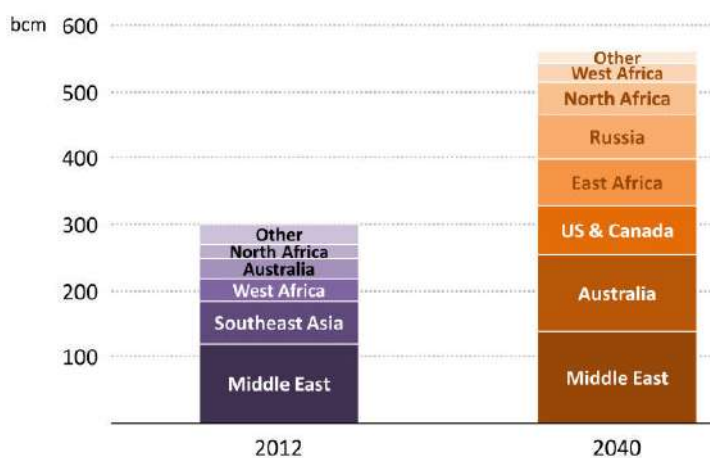


Figure 8. Principales régions sources d'approvisionnement en GNL [4].

Charbon

Le charbon, quant à lui, continue à occuper une place importante, malgré les restrictions environnementales, vue l'abondance des réserves et l'émergence des techniques de consommation et le coût des nouveaux investissements élevé pour le transfert à d'autres ressources énergétiques. Le monde a produit 167.58 Millions tonnes, en 2019. La Chine a assuré 47.6%, avec 79.8 Mt, suivi par les Etats Unis 14.3 Mt (8.5%), l'Indonésie avec 15.05 Mt (9%), l'Australie avec 13.15 Mt (7.8%), et l'Inde avec 12.73 M (7.6%). Dans la même période, la consommation mondiale atteignait 157.86 Mt, la portion de la Chine est de 51.2%(81.67 Mt), l'Inde de 11.8%(18.62 Mt), et les Etats Unis de 7.2%(11.34 Mt) [1, 3].

Nucléaire

Malgré son zéro-empreinte carbonique et son important rôle dans la réduction du recours aux hydrocarbures, dans la production d'électricité, l'énergie nucléaire était toujours critiquée. L'implantation des nouveaux investissements, soit de production ou bien de traitements des déchets nucléaires, connaît des grandes résistances populaire et politique de la part des partis verts en Europe et aux Etats Unis. Cette cause a connu une grande victoire après les événements de Fukushima Daiichi, en Japon. Plus du tiers des capacités actuelles sera retiré du service d'ici 2040. Le traitement des déchets nucléaires, près de 705 milles tonnes, entre 1971 et 2040, reste parmi les arguments durs des politiciens anti-nucléaires (fig.10). Car ces déchets possèdent des durées de vie très longues, et par conséquent, des mesures de sécurité importantes et des grands investissements sur les implantations de stockage des déchets nucléaires (fig.9). La nouvelle génération des réacteurs nucléaires dit de « 4^{eme} génération » ou « à proton rapide », et l'amélioration des conditions et les mesures de fonctionnement, apportent de l'espoir pour une énergie nucléaire propre et sûre, car cette technologie permet de se débarrasser entièrement des déchets nucléaires [4, 5].

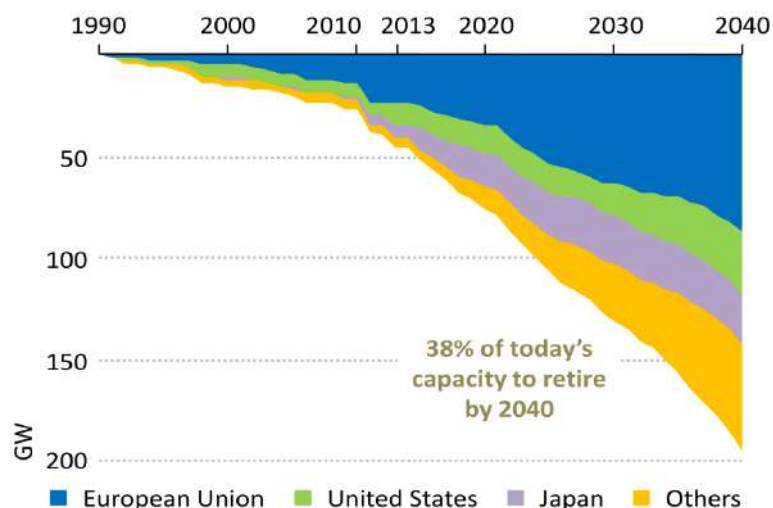


Figure 9. Capacités de l'énergie nucléaire retirée d'ici 2040[4].



Figure 10. Portions des pays des déchets nucléaires[4].

La consommation mondiale de l'énergie électrique nucléaire a connu une augmentation de 3%, en 2019, par rapport à la moyenne de croissance négative, enregistrée durant la décennie 2008-2018, estimée de -0.7% ; vue le changement des politiques de certains pays, spécialement l'Allemagne et l'Autriche, après le tsunami au Japon, et les événements de Fukushima Daiichi, en 2011. Cette consommation est répartie sur les Etats-Unis avec 30.5%(7.6 TWh), la France avec 14.3%(3.56 TWh), la Chine avec 12.5%(3.11 TWh) et la Russie avec 7.5%(1.86 TWh) [1]. La technologie nucléaire reste en possession des grandes puissances, même pour des fins civiles, elles en privent les pays en développement.

2.3 Energies renouvelables au monde

2.3.1 Transition énergétique

La transition énergétique est définie comme étant les changements apportés sur des activités économiques d'un pays, basées sur les énergies fossiles, ayant une économie partiellement basée sur les énergies renouvelables. Les technologies basées sur l'énergie fossile sont remplacées par les technologies propres. La transition vers les énergies renouvelables et durables ouvre des opportunités économiques pour les pays en développement, et leur permet d'améliorer le niveau de vie tout en préservant les ressources naturelles, l'environnement et la santé publique. Ce concept est développé par Lysen, E.H. [6]. Avec trois étapes principales : la rationalisation de la consommation énergétique, l'introduction de l'énergie renouvelable et l'efficacité de la consommation des énergies fossiles.

2.3.2 Efficacité énergétique

Les énergies renouvelables se développent en synergie avec le concept de l'efficacité énergétique, tant que dans les contextes politiques que dans les contextes techniques, et pour plusieurs secteurs : bâtiment, transport, électricité et l'industrie. En améliorant l'intensité énergétique (énergie primaire consommée par unité de production économique) augmente l'efficacité énergétique.

L'amélioration de l'efficacité énergétique permet de renforcer la sécurité énergétique, soutenir la croissance économique ainsi qu'atténuer les émissions des gaz à effet de serre, et le changement climatique. Dans les pays pauvres, une amélioration de l'efficacité énergétique permet la prestation des énergies aux régions privées d'énergie [7].

De nombreux pays adaptent des politiques concernant l'efficacité énergétique dans les secteurs : bâtiments (efficacités énergétiques des bâtiments, électroménagers), industriel (efficacités énergétiques des moteurs, appareils...), et le transport (efficacité des transports publique, électrification des moyens de transport, etc.). L'adoption du système d'étiquetage des bâtiments, d'appareils et des produits consommateurs d'énergie. Lier les taxes d'enivremments a l'efficacité énergétique du produit [7, 8].

2.3.3 Bouquet énergétique

Autrement appelé, le mix énergétique. Il désigne la répartition des différentes sources d'énergie primaire dans la consommation énergétique finale. Ces sources comprennent l'énergie fossile (charbon, pétrole, gaz naturel), les énergies renouvelables (solaire, biomasse, éolienne, hydraulique et géothermique).

La composition du mix énergétique dépend de la disponibilité des ressources exploitables, de la demande et des besoins énergétiques et essentiellement des choix politico-économiques[9].

2.3.4 Energies renouvelables

Le rôle des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique deviennent cruciaux dans la lutte contre les changements climatiques, et ouvrent des nouvelles opportunités économiques et améliorent l'accès aux énergies pour les populations isolées. La dernière décade a connu des avancées technologiques des énergies renouvelables, augmentation de ses productivités, une baisse des coûts d'investissement et de production et une grande volonté et des appuis politico-économiques locaux et internationaux. Le développement des énergies renouvelables se met dans le contexte de la forte croissance de la consommation énergétique mondiale et le déclin des réserves fossiles ainsi que les contraintes climatiques et législatives. Les énergies renouvelables ont progressé, en termes de capacités installées, l'énergie produite et les investissements. Le secteur électrique montre une forte croissance et une augmentation des capacités produites ; il se concentre dans trois technologies : l'énergie éolienne, l'énergie solaire et l'énergie hydraulique (fig.11). Le prix modeste des combustibles fossiles, l'amélioration de l'efficacité énergétique et la taille des investissements nécessaires dans des énergies renouvelables concourantes, restent un élément freinant la croissance du secteur des énergies renouvelables. Mais, La volonté des pouvoirs publics et la compétition mondiale pourraient élargir et croître le secteur des énergies renouvelables. Dans le secteur électrique de nombreux pays, les énergies renouvelables sont compétitives par rapport aux énergies conventionnelles. Les énergies renouvelables possèdent la particularité de la décentralisation des systèmes, qui offre aux pays en développement l'occasion d'élargir l'accès à l'énergie. Du fait que 15% de la population mondiale n'a encore pas d'accès à l'électricité, et 2.9 milliards de personnes n'ont aucun mode de cuisson propre. Les technologies de l'énergie renouvelable décentralisée vont servir à améliorer ces chiffres. Ces solutions technologiques (systèmes domestiques, les pico-centrales hydrauliques, les kits d'irrigation à électricité solaire....) sont capitales pour les zones rurales et les zones reculées [10].

L'année 2019 a connu une croissance de 12.2%, inférieure à la moyenne de la décennie 2008-2018 (13.7%)[1]. La portion des énergies renouvelables est 11% de la totalité de la consommation mondiale, supérieure au niveau de l'an 2013, estimé de 9.6%. (Fig.11). En 2018, les énergies renouvelables ont contribué à environ 10,1 % de la demande de chauffage, et de refroidissement dans les bâtiments, cette portion a, à peine, augmenté de

8%, en 2010. Les transports restent le secteur où la part des énergies renouvelables est la plus faible, seulement 3,3%. En termes de capacités installées, les énergies renouvelables attestent la plus forte augmentation. Elles ont augmenté de plus de 200 GW, en 2019 (principalement l'énergie solaire photovoltaïque). Dans l'ensemble, la capacité d'énergie renouvelable installée pourraient être suffisante pour fournir environ 27,3 % de la production mondiale d'électricité d'ici la fin de 2019 [11].

Les investissements d'électricité renouvelable dépassent nettement les investissements, dans l'électricité à basse fossile. Dans les pays en développement le taux de croissance est de 36%, soit 131.3 milliards de dollars contre 138.9 milliards de dollars, dans les pays développés, dans la même période. Les investissements dans l'électricité solaire ont augmenté de 25% à 149.5 milliards de dollars et ceux de l'électricité éolienne de 11% à 99.5 milliards de dollars [12].

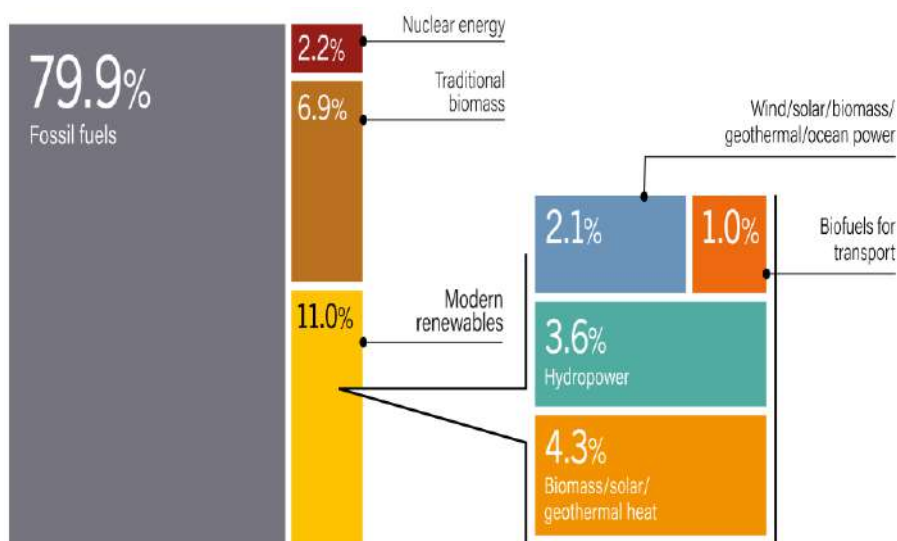


Figure 11. Parts des énergies primaires consommées mondialement en 2018 [11].

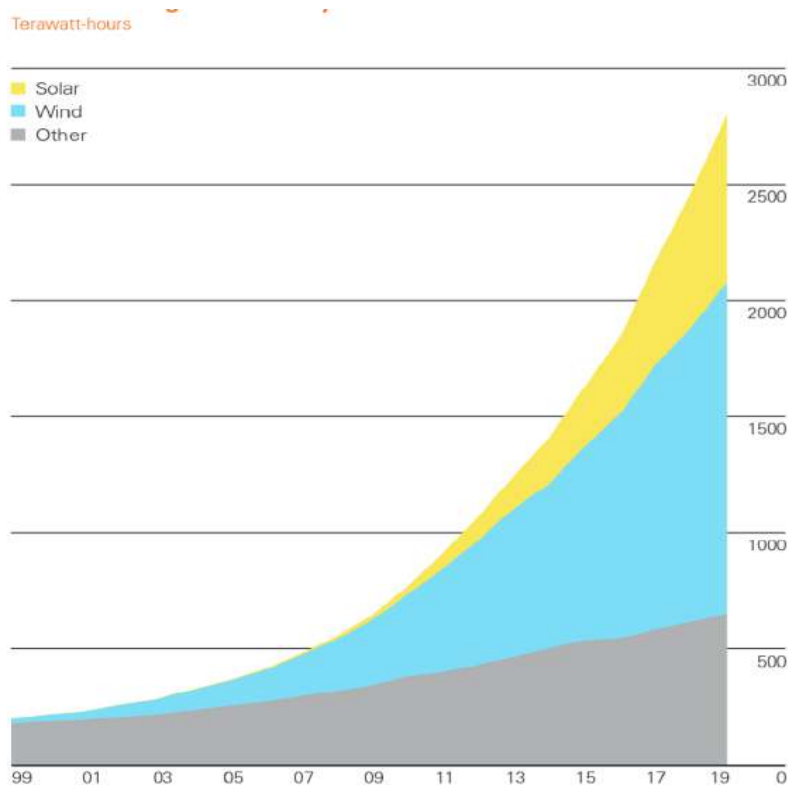


Figure 12. Energie renouvelable générée par sources en 2019[1].

La consommation en énergies renouvelables, en 2019, (y compris les biocarburants et sans tenir compte de l'énergie hydraulique) a augmenté de 12,1%, au-dessous de sa moyenne historique, bien que sa hausse en termes énergétiques (3,2 EJ). Par pays, la Chine a été le plus grand contributeur à la croissance des énergies renouvelables (0,8 EJ), suivie des États-Unis (0,3 EJ), et du Japon (0,2 EJ). L'éolien a contribué le plus à la croissance de la production d'électricité à partir d'énergies renouvelables (160 TWh), suivi de près par le solaire (140 TWh). Le solaire n'a cessé d'augmenter sa part de production renouvelable et représente désormais 26% contre seulement 14% cinq ans avant [1, 3] (fig.12,13).

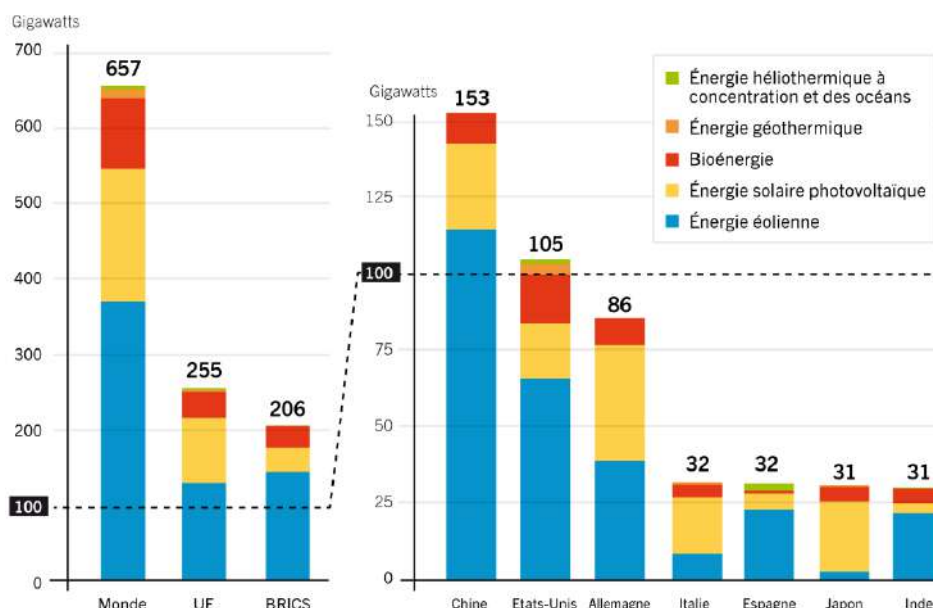


Figure 13. Capacités des énergies renouvelables, en 2014, hors l'énergie hydroélectrique [4].

On estime que le monde a produit, en 2019, environ 699000 barils équivalent pétrole par jour ou bep/j. La croissance de la production de biocarburants a été en moyenne de 3 % (54 000 bep/j), au-dessous de la moitié de la moyenne des derniers 10 ans. Le Brésil et l'Indonésie mènent la croissance (31 000 bep/j) et (32 000 bep/j), respectivement. Cependant, la production américaine a diminué de 19 000 bep/j. La croissance a été pondérée en faveur du biodiesel, qui a augmenté de 34 000 bep/j en grande partie grâce à l'Indonésie. Tandis que l'éthanol est le principal carburant en Amérique du Nord (86% du total), et le sud et le centre d'Amérique (74%).

2.4 Impact environnementale

L'humanité est face à des défis importants : un changement radical du mode de vie, l'épuisement des ressources naturelles, la fragilisation de l'équilibre des écosystèmes ainsi qu'à la violente pollution de l'environnement, dus au recours excessif aux ressources naturelles, massivement explorées, exploitées, extraites et consommées. Et dans la plupart des cas, sans la prise des mesures locales et globales de protection de l'environnement ainsi que la conservation de l'équilibre des écosystèmes.

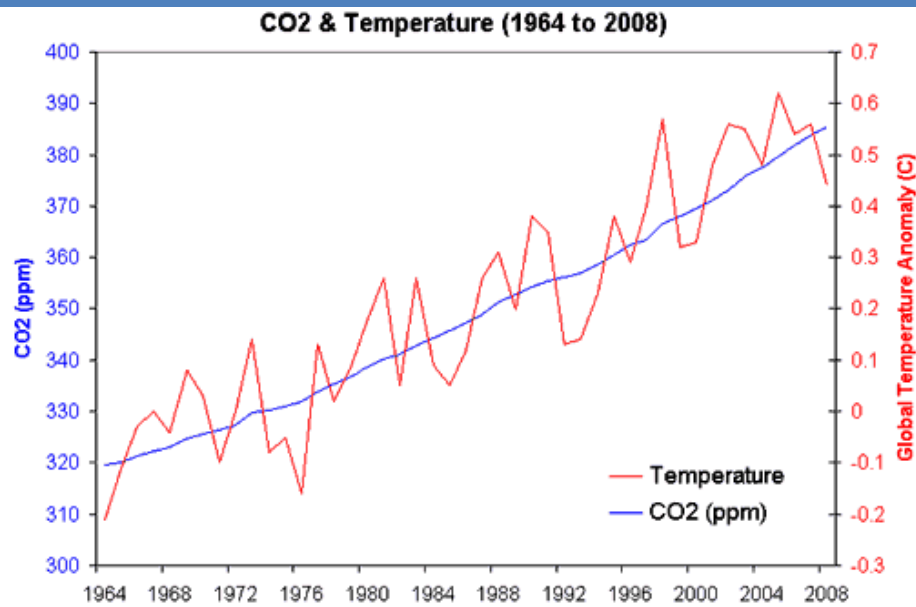


Figure 14. Corrélation de la concentration du CO₂ et la variation température moyenne [13].

La combustion génère 3.7 tonnes de CO₂ par une tonne combustibles fossiles. Il ne reste pas de doute sur le fait que la combustion massive est le responsable de l'augmentation des concentrations des gaz à effet de serre dans l'atmosphère et de la très sensible accroissement de la température moyenne du globe, ce qu'on appelle le phénomène de réchauffement climatique[13] (fig.14,15).

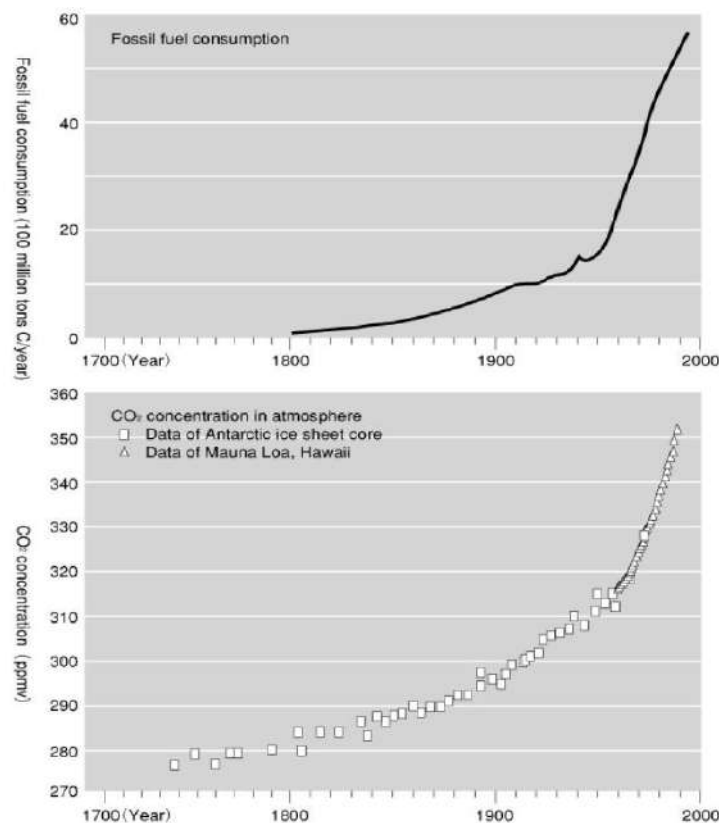


Figure 15. Corrélations consommation de carburants fossiles et concentration atmosphérique du CO₂[13].

2.4.1 Gaz à effet de serre

On mesure les rejets des gaz à effet de serre, GES (GHG green house gaz), par tonne équivalent CO₂. Les GES sont formés essentiellement de vapeur d'eau de 0.4 à 4% du volume de l'atmosphère, le reste des GES occupent 0.1% du volume de l'atmosphère : dioxyde de carbone (CO₂ gaz carbonique), de méthane(CH₄), protoxyde de l'azote(N₂O) et de l'ozone (O₃) et les réfrigérant (CFC, HCFC, HFC, PFC). Ces gaz retiennent une partie du rayonnement infrarouge émis vers l'espace par la terre, réchauffée par le soleil. Ce processus, appelé « effet de serre », a permis le développement et le maintien de la vie sur terre (Tab.1).

La révolution industrielle et l'utilisation massive des combustibles fossiles comme les hydrocarbures, le charbon, la déforestation, de plus, certaines pratiques agricoles et des procédés industriels ont contribué à l'amplification de l'effet de serre par les rejets des quantités importantes des GES [14].

Tableau 1. GES anthropique (Repère Chiffres Clés Du Climat France Et Monde 2015[14])

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	HCF	PFC	SF ₆	NF ₃
Concentration atmosphérique en 2011(en 2005)	390ppm (379)ppm	1803ppb (1774)ppb	324ppb (319ppb)	>119ppt (>67ppt)	>83ppt (>79ppt)	7.3ppt (5.6ppt)	<1ppt
Durée du séjour moyenne dans l'atmosphère		~9ans	131ans	Entre 0.1et 270ans	Entre2000 et 50000ans	3200ans	500 ans
Pouvoir de réchauffement global (cumulé pour 100ans)	1	28-30	265	[1.4 ; 14800]	[6630 ; 111000]	23500	16100
Origines des émissions anthropiques	Combustion d'énergie fossile et déforestation tropical	Décharges, agriculture, élevage et procédés industriels	Agriculture, procédés industriels, utilisation d'engrais.	Sprays, réfrigération, procédés industriels			Fabrication des composants électronique
Modification du Forçage radiatif en 2011 depuis 1750 par les émissions Anthropiques (W/m ²) (en 2005 entre parenthèses)	+ 1,88 (+ 1,66)	+ 0,50 (+ 0,48)	+ 0,18 (+ 0,16)	+ 0,02 (+ 0,01)	+ 0,05 (+ 0,05)	+ 0,004 (+ 0,003)	+ 0,0002 (+ 0,0001)

En 2018, le secteur du transport a présenté 14.1% des émissions totales plus de 6.9 GteqCO₂, dont 10.2% liées au transport routier. La dédieselisation progressive du parc roulant, la promotion de l'éco-conduite, l'usage et la promotion des biocarburants, la taxation sur des véhicules neufs et la taxe de carbone pourraient conduire à une baisse de portion des GES liés à ce secteur. La portion du secteur résidentiel et tertiaire est de 6.4% soit plus de 3.1Gt eqCO₂, et si on prend sa part indirecte liées à sa consommation électrique ce secteur présente 18.6% des émissions, c'est le premier émetteur indirect des GES. Des nouveaux règlements de l'efficacité thermique des bâtiments et l'amélioration de celle du parc existant, et l'utilisation de l'électricité et du gaz naturel, au lieu du charbon et de fioul, stabiliseraient les émissions des GES. Le secteur industriel, a, à son tour, émis 14.01 Gt eqCO₂ soit 28.6% des GES émis par l'humanité ; 37% de ses émissions sont indirectement liées à sa consommation électrique. Avec cette portion ce secteur est le premier pollueur mondial. Si on joint la part du secteur énergétique, les deux secteurs seraient les responsables du plus du tiers des GES émis. Le secteur de production d'électricité à 25% de la galette, avec le secteur industriel et énergétique 46.6% des émissions, soit presque 22.9Gt eqCO₂.

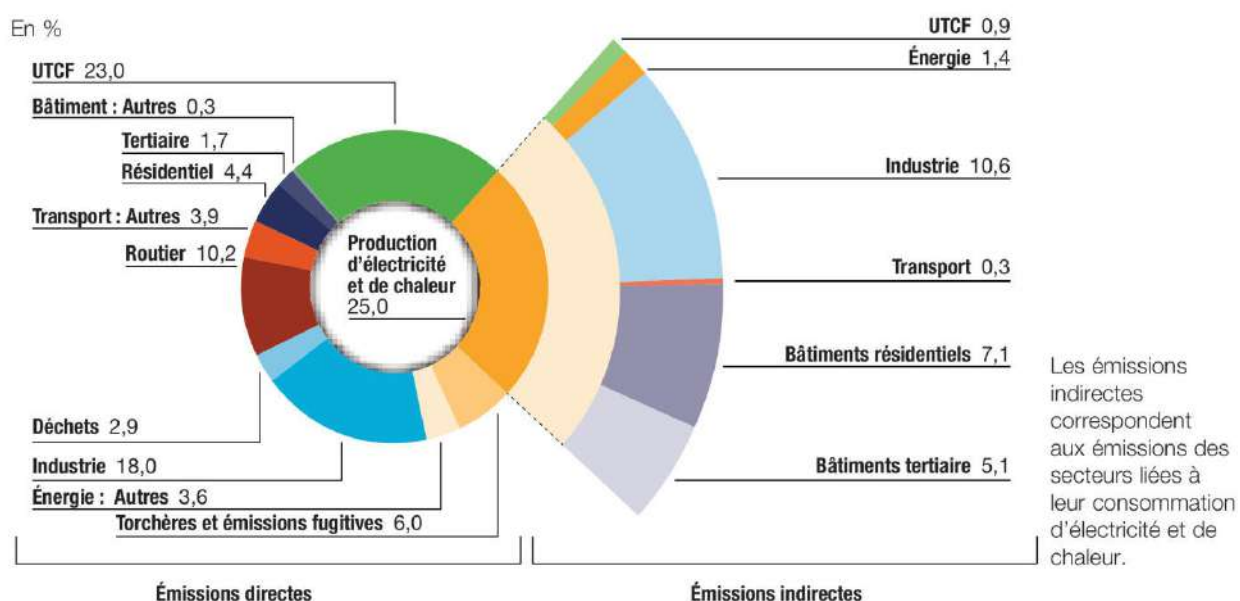


Figure 16. Répartition des émissions mondiales des GES par secteur en 2016[14]

Le secteur agricole est, lui aussi, responsable des émissions des GES. Sa portion aurait été estimée de 23.9% de la totalité des émissions. Le méthane (CH₄) et le protoxyde d'azote (N₂O) induites par les processus biologiques liés à la fertilisation azotée des sols agricoles, l'élevage intense ainsi que la fermentation des effluents d'élevage. Les émissions liées au traitement des déchets (hors valorisation énergétique) sont de presque 1.5Gt eqCO₂, soient de l'ordre de 2.9% des émissions mondiales des GES. Les

installations de stockage émettent principalement le méthane. Une politique de prévention et de recyclage des déchets à la source pourrait réduire les émissions associées à la mise en décharge. L'atténuation du phénomène de réchauffement climatique est, aussi, confrontée à la durée de vie des GES déjà présents dans l'atmosphère, les difficultés de réduire rigoureusement et rapidement les émissions des pays développés, et le risque d'augmenter celles des pays en voie de développement (Tab.1)[14].

Les GES pourraient, d'ici 2050, provoquer une hausse de température moyenne du globe entre 1°C et 4.5°C en 2100, et de 2 à 3°C dans les études les plus optimistes. Cela génère des fortes tempêtes, des pluies diluviennes et pourrait notamment être à l'origine d'inondation, l'augmentation de la vitesse des vents, problème d'érosion et la hausse du niveau des mers entre 15-95 cm[13, 15].

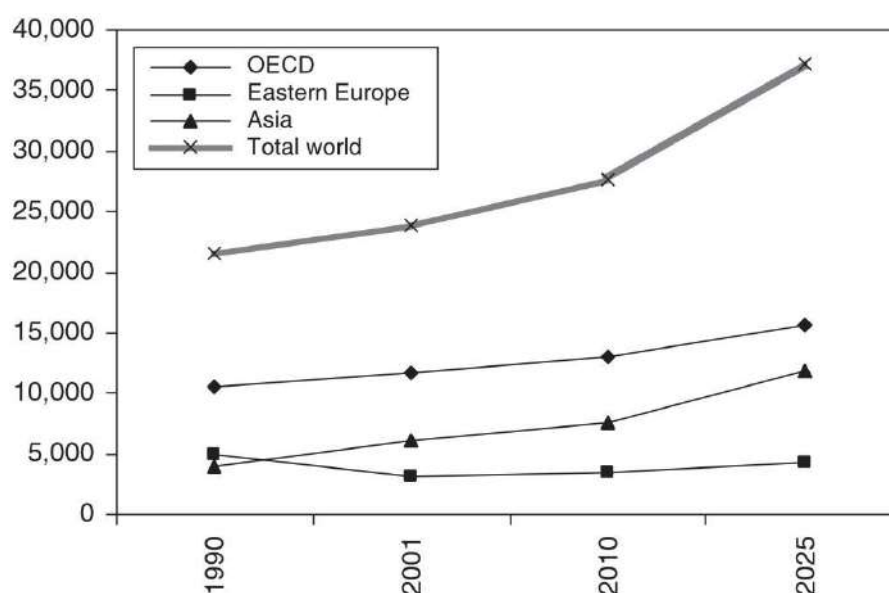


Figure 17. Tendances des émissions du CO₂, mondiale et par région (millions de tonnes) [15]

On estime que le CO₂ est responsable d'environ 50% de l'accroissement global d'effet de serre. L'humanité a émis, en 2015, plus de 24 Gt de CO₂, on arriverait à 37.1Gt en 2025. Les changements climatiques seraient le responsable des grands changements sur les écosystèmes, l'agriculture, les ressources en eau, la santé publique et les infrastructures humaines [15].

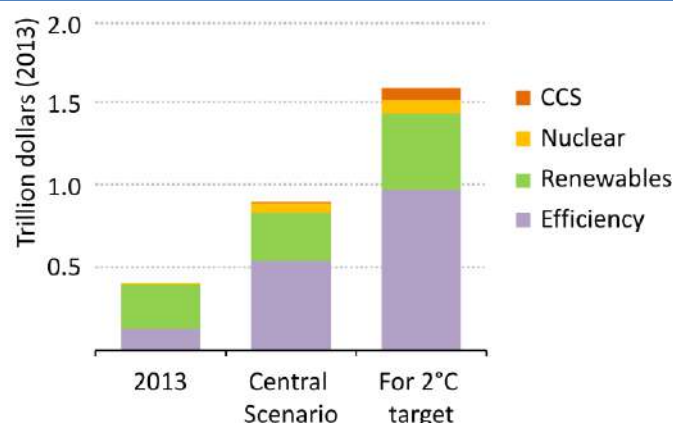


Figure 18. Investissements mondiaux nécessaire pour réduire les émissions du CO₂ [4].

Dans une étude des perspectives, publiée par *The World Energy Outlook 2014*, on estime que le scénario dont le but est de freiner le réchauffement à 2°C, en 2040, nécessiterait des investissements en énergie nucléaire, le développement et la promotion des énergies renouvelables, la dotation des implantions du charbon par des systèmes de captage du CO₂ (CCS Capture CO₂ System), et surtout l'amélioration de l'efficacité des systèmes énergétiques (fig18, 19)[4].

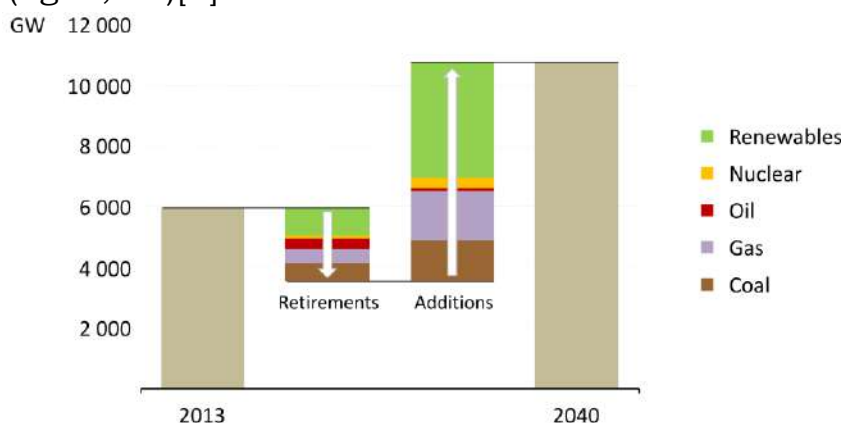


Figure 19. Capacités énergétiques remplacées et remplaçantes par sources à travers le monde [4].

Les systèmes énergétiques actuels ne pourraient faire face aux futurs besoins. Il est clair que Le remplacement des ressources fossiles épuisées et les systèmes énergétiques retirés du service, et l'augmentation des capacités énergétiques devraient être par des nouvelles capacités à faibles émission GES. Les énergies renouvelables ont les potentiels et les capacités inépuisables pour répondre aux futurs besoins énergétiques et avec presque une empreinte carbonique nulle. Afin d'éviter tout atteinte irréparable à l'environnement et des écosystèmes, qui, mettent en danger la vie des futures générations.

2.5 Climat et développement durable ; lois et conventions

L'humanité, dans notre ère actuelle, est appelée à répondre aux besoins fondamentaux tels que : l'alimentation, l'énergie, la santé. Et la fois, faire face aux problèmes environnementaux, liés aux émissions des GES et du réchauffement climatique ainsi que l'épuisement de ressources naturelles. D'où vient le concept du développement durable. En 1987, ce concept de la gestion et du développement et des ressources naturelles, défini par le rapport de la Commission de l'Environnement et le Développement de l'ONU, appelé rapport de Brundtland : « satisfaire les besoins actuels, sans compromettre la capacité des générations futures à satisfaire les leurs » [16].

Les conférences des parties COP connues, aussi, sous le nom des sommets de la terre et des changements climatiques, et à travers le travail réalisé dans les différents rapports du GIEC (Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat), marquaient la fin d'une étape et le début d'une autre en termes de la lutte contre les changements climatiques. En 1990, le premier rapport publié a permis l'adoption de la convention-cadre des Nations-Unies contre les changements climatiques, lors du premier sommet de la terre à Rio 1992. Le deuxième a abouti au protocole de Kyoto 1997, appelé « action 21 ». Le troisième, en 2000, suivi par le sommet du Johannesburg (2002), et le quatrième, en 2007, ont permis de fixer un but à 2°C la hausse de la température à ne pas dépasser dans un quasi-accord de Copenhague (2009), Cancún (2010), et celui de Paris (2015). Les COP se sont succédées, jusqu'à la tenue de la COP 21, qui s'est déroulée à Paris, en 2015. En effet, cette conférence a abouti à un accord historique, dénommé l' « accord de Paris sur le Climat », permettant de remplacer le prolongement du protocole de Kyoto, et ce dès 2020 [17].

Le protocole de Kyoto, signé en 1997, et entré en vigueur en 2005, était le premier pas vers un engagement réel dans le sujet des changements climatiques.

Selon le Protocole de Kyoto, six gaz sont associés à la portion anthropique des gaz à effet de serre (GES), mais trois sont responsables de 98% des effets : le CO₂ ou gaz carbonique (79%), le CH₄ ou méthane (14%) et le N₂O ou protoxyde d'azote (5%). Les trois autres gaz sont les HFC ou hydrofluorocarbures, les PFC ou hydrocarbures Perfluorés et enfin les SF₆ ou hexafluorure de soufre. Pour faciliter la comparaison, tous les GES sont ramenés à un même équivalent, le CO₂ en kilo tonne (kt), en fonction de leur « Potentiel de Réchauffement Planétaire », selon un multiplicateur établi par le GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) : 1 pour le CO₂, 25 pour le CH₄ et 298 pour le N₂O.

On adaptait une contrainte pour la réduction des émissions de 6 GES pour 38 pays ayant ratifié par protocole dans l'« Annexe B », qui regroupe l'ensemble des pays industrialisés et l'ex-bloc soviétique, sauf les Etats - Unis et le Canada. Le protocole a pour but la réduction des GES, tous secteurs confondus, de 5% sur la période 2008-2012 par rapport à 1990. Les objectifs étaient différenciés pour chaque pays, on attribuait des Unités de Quantité attribuée (UQA), aussi appelées « Quotas Kyoto », qui correspondait à une tonne de CO₂. Par exemple la France avait 2820 MUQA, soit 564 millions tonne CO₂ par an. En 2013, le protocole est entré dans la deuxième phase d'engagement KP-CP2, étalé sur la période 2013-2020, d'après le sommet de Copenhague (2009). Le but était d'arriver à une réduction de 18% des émissions GES par rapport à 1990. Les pays de l'annexe B est obligés de remettre, chaque année, un inventaire concernant les émissions des GES au secrétariat de la Convention Cadre des Nations Unies sur Les Changements Climatiques (CCNUCC), jusqu'à 2015. Lors des inventaires, en 2012, des actifs Carbone avaient été vérifiés, ceux-ci peuvent être des UQA, ou bien des crédits Kyoto issus de projet de compensation carbonés. Il en résulte trois moyens d'actions, pour que les pays soient en conformité :

- Réduire leurs émissions calculées pour chaque pays et soumettre les inventaires nationaux à la CCNUCC, chaque an.
- Acheter des quotas Kyoto des pays ayant des excès.
- Acheter des crédits Kyoto par les projets de compensation. Si le projet est dans un pays hors annexe B ; il doit générer des crédits comme des unités de réduction certifiées d'émission (URCE ou en Anglais Certified Emission Reduction CER), et labéliser par le mécanisme pour un développement propre (MDP). Dans le cas contraire, il générera des unités des réductions d'émission (URE ou en anglais ERU), et doit participer à la « mise en œuvre conjointe » (MOC) (fig.20) [18].

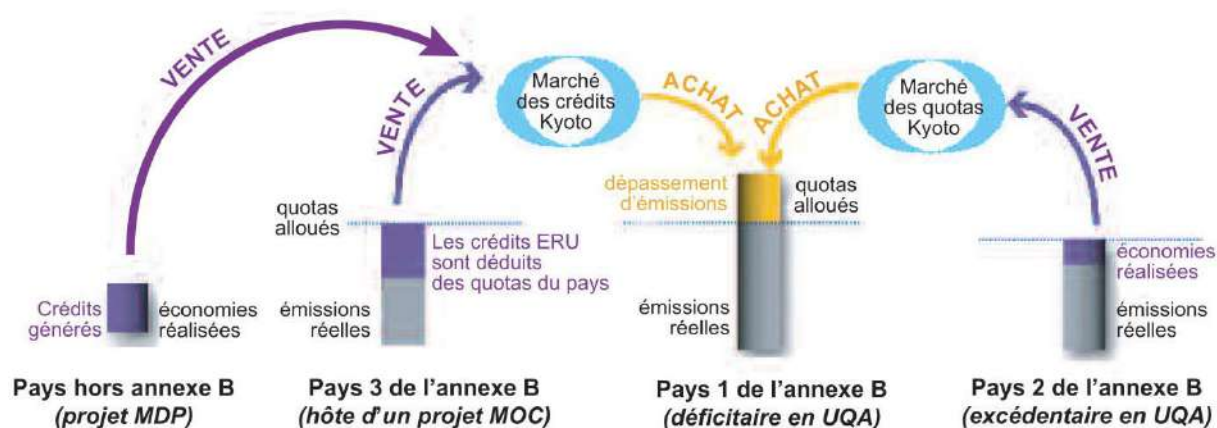


Figure 20. Mécanismes du marché du protocole de Kyoto [18].

Dans ce même cadre, et pour répondre aux conventions et protocoles des sommets de terre, les politiques des énergies renouvelables et d'environnement ont connu une propagation à travers la planète, en 2019, plus de 143 pays adoptaient des lois d'efficacité énergétique, 70 adoptaient des lois de régulation dans le secteur des transports et 43 pays adoptaient des régulations dans le secteur des bâtiments [11].

3 Contexte Algérien

Le contexte énergétique algérien, en 2019, peut être caractérisé par :

Les énergies primaires produites ont atteint 157,4 Millions de Tonne équivalent pétrole (Tep), ce qui représente une baisse de 4,8%, par rapport à 2018.

Les importations ont atteint 3,1 M Tep, presque le double des importations de 2018 avec 98,3%.

La somme importée des énergies primaires, des stocks et celle produite ont atteint 160,4 M Tep, une baisse de 3,7% par rapport à 2018.

L'Algérie a exporté 92,0 M Tep, une décroissance de 8.7% par rapport à 2018. Cela est due notamment à la chute des exportations de gaz naturel par gazoducs -31%.

Alors, la portion exportée est de 89 MTep, une décroissance de 10,4%, par rapport à l'année 2018.

D'autre côté, La consommation nationale totale d'énergie a augmenté de 3,0%, et a atteint 66,9 M Tep, en 2019. Autrement dit 43% de la production totale. La consommation finale d'énergie s'est accrue de (+4,6%) pour atteindre 50,4 M Tep, tirée essentiellement l'augmentation de la consommation du gaz naturel (+6,1%), du GPL (+9,6%), des produits pétroliers (+4,1%) et d'électricité (+2,7%).

La consommation finale des produits pétroliers (y compris GPL) a augmenté de (+4,9%), en 2019, pour s'établir à 19 M Tep [19].

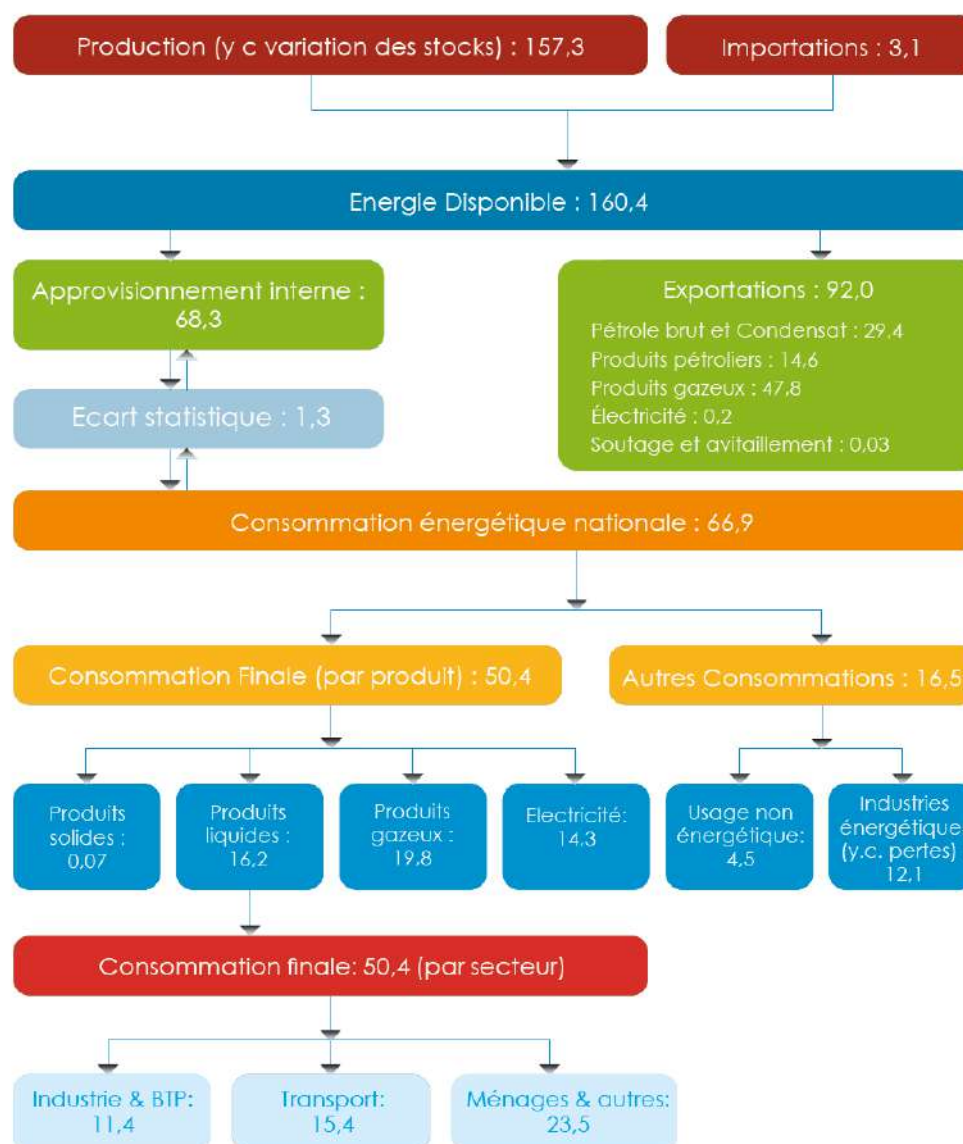


Figure 21. Synthèse des flux énergétique en Algérie, 2019 [19].

3.1 Production nationale d'énergie

La production d'énergie primaire a connu une baisse de 4.8%, passant de 165 241kTep, en 2018, à 148842ktep, en 2019. Ce déclin a touché l'ensemble des produits énergétiques, à l'exception de l'électricité qui présentait une évolution de 2.4%. La production du condensat et du gaz naturel est la plus touchée avec une baisse de -7.6% et 7.3%, respectivement. La production nationale s'est répartie, principalement, sur le gaz naturel, Pétrole brut, le condensat, le GPL respectivement (fig.22).

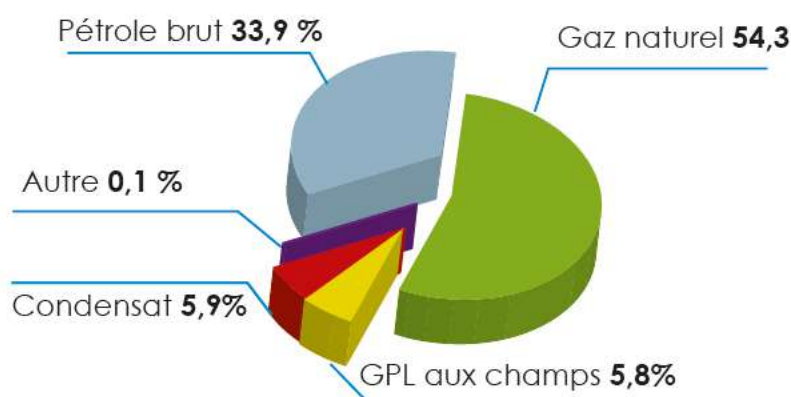


Figure 22. Structure de la production d'énergie primaire en 2019[19].

La production d'énergie dérivée est estimée de 66,1 M Tep, une croissance de 2,2%, par rapport à 2018, stimulée par celle de la production du gaz naturel liquéfié (GNL) 21,9%, et de l'électricité thermique 2,1%. La production d'énergie dérivée est dominée par les produits pétroliers avec 44%(fig.23).

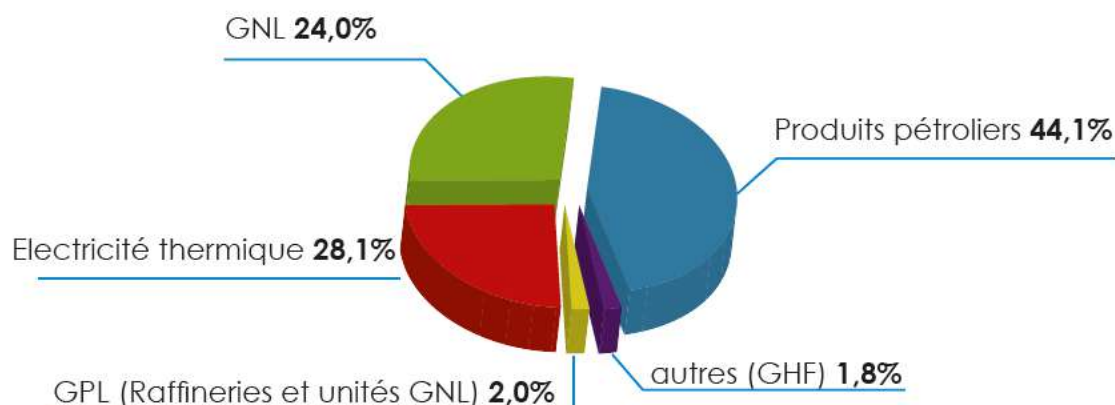


Figure 23. Structure de la production d'énergie dérivée[19]

3.2 Consommation nationale d'énergie

La consommation nationale d'énergie totale (y compris les pertes) a atteint 66,9 M Tep en 2019, avec une augmentation de 3,0% par rapport à 2018. Par contre, la consommation non énergétique a connu une baisse significative de 10,3%, due à la baisse des enlèvements en gaz naturel de la filière pétrochimique.

Tableau 2. Consommation nationale par agrégat (kTep) en 2019[19].

	2018	2019	Evolution	
			Quantités	(%)
Consommation nationale	48 146	50 359	2 213	4,6
Consommation non-énergétique	4 999	4 487	-512	-10,3
Consommation des industries	7 278	7 395	117	1,6

énergétiques				
Pertes	4 540	4 661	121	2,7
Consommation nationale	64 964	66 902	1 939	3,0

La consommation non énergétique, concerne l'utilisation des ressources énergétique à des fins non énergétiques et comme matières premières : pétrochimie, travaux publics (les bitumes), les lubrifiants. Ce secteur a la plus faible part dans la consommation nationale avec 6.9%, a connu un déclin important de 10.3%, et a atteint 4.48Mtep, en raison de la baisse de la demande de la branche pétrochimie. On observe, aussi, une baisse de la demande des produits pétroliers (2.7%), particulièrement les bitumes et les lubrifiants.

Les industries énergétiques, dans la nomenclature du ministère de l'énergie, regroupent les industries de la production, du transport, les raffineries, les centrales électriques, unités GNL..., sa portion est de 11.1% de la consommation nationale. En 2019, ces industries ont connu une hausse de 1.6 %, atteignant 7.39Mtep. La consommation nationale d'énergie était, principalement, constituée du gaz naturel 27,45Mtep (38,4%), suivie par l'électricité 16.73Mtep (28,3%), et les produits pétroliers 16.73Mtep (26,6%).

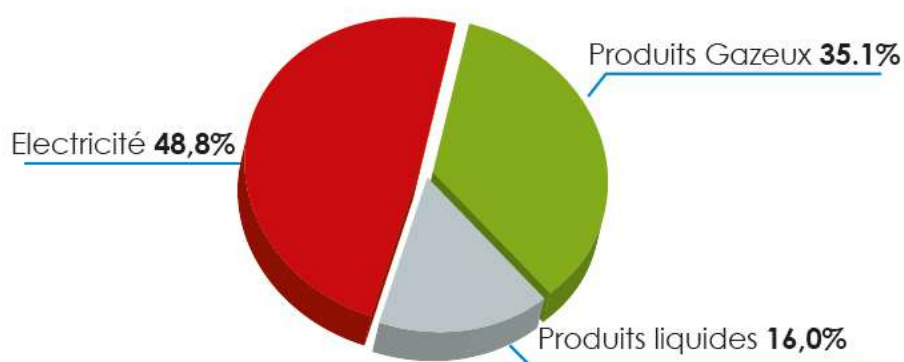


Figure 24. Structure des pertes énergétiques en 2019[19]

Les pertes énergétiques représentaient 7,0% pour atteindre 4,5Mtep, en 2019, réparties comme suit : 49% en électricité, 35% des produits gazeux, et 16% des produit liquides(fig.24). Pertes de distribution 77%, pertes techniques et le piratage du réseau électrique et pertes du transport 23%.

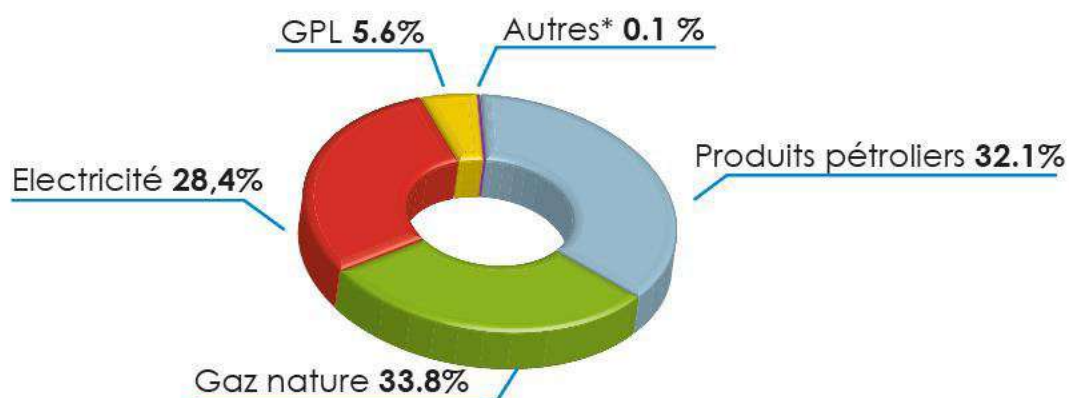


Figure 25. Structure de la consommation nationale par forme d'énergie en 2019[19].

La consommation finale, signifie la consommation de l'énergie à usage final, répartie sur trois principaux secteurs : « industrie », « le transport » et « ménages et autre ». En 2019, la consommation dans le secteur ménages est de 23.52Mtep, a augmenté 5%, suivi par le secteur des transports 15.4Mtep avec une évolution de 0.8%, et le secteur des industries avec 11.42Mtep et 9.3% comme taux de croissance(fig.26)[19].

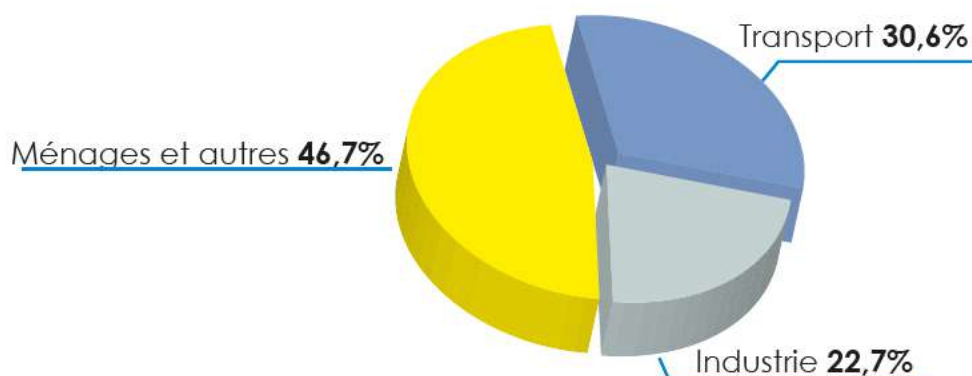


Figure 26. Structure de la consommation finale par secteur[19]

3.3 Environnement en Algérie

Les pays en développement ne sont pas inclus dans les engagements du protocole de Kyoto de limitation des émissions GES. Mais, ces pays peuvent bénéficier des mécanismes MDP « mécanisme pour un développement propre » adoptés à partir de la 7ème conférences des partis de la convention climat (COP7), Marrakech (2001).

Dans le mécanisme MDP, les pays développés payent des projets qui réduisent ou évitent des émissions des GES, et sont récompensés de crédits pouvant être utilisés pour atteindre leurs propres objectifs d'émission. Le pays receveur bénéficie des technologies avancées qui permettent à leurs usines et centrales électriques d'opérer plus efficacement. Pour y être autorisée, l'Algérie, comme d'autre pays hôte de

projet MDP, est partie à la CCNUCC (Convention Cadre des Nations Unies pour les Changements Climatiques), depuis 1993. Ensuite, elle fait partie du protocole Kyoto, en 17 Mai 2005.

En 2 juillet 2006, l'autorité nationale désignée (AND) est installée ; elle s'occupe de l'application du MDP, et depuis, l'Algérie a rempli les conditions nécessaires du protocole de Kyoto pour bénéficier du MDP, tout porteur de projet algérien peut accéder à ce mécanisme.

L'Algérie fait partie, aussi, du programme mondial de veille de l'atmosphère (OMM/PNUE), à travers la mise en place d'une station de surveillance des niveaux de GES appelé, Assekrem (Tamanrasset), installée en 1995. Pour le développement des moyens d'observation et de recherche scientifique.

3.3.1 Emission des gaz à effet de serre

A travers le programme de GAW (Global Atmosphere Watch), qui a un programme des Nations Unies, on mesure les concentrations des différents gaz, notamment, le CO₂. La station d'Askrem (Tamenrasset), 2710m d'altitude, est l'une de ces stations réparties entre les mers, océans et les continents.

La concentration du CO₂ était de l'ordre de 360ppm en 1995, en 2008, elle devenait 385ppm, ce qui représente une croissance de 2ppm/an.

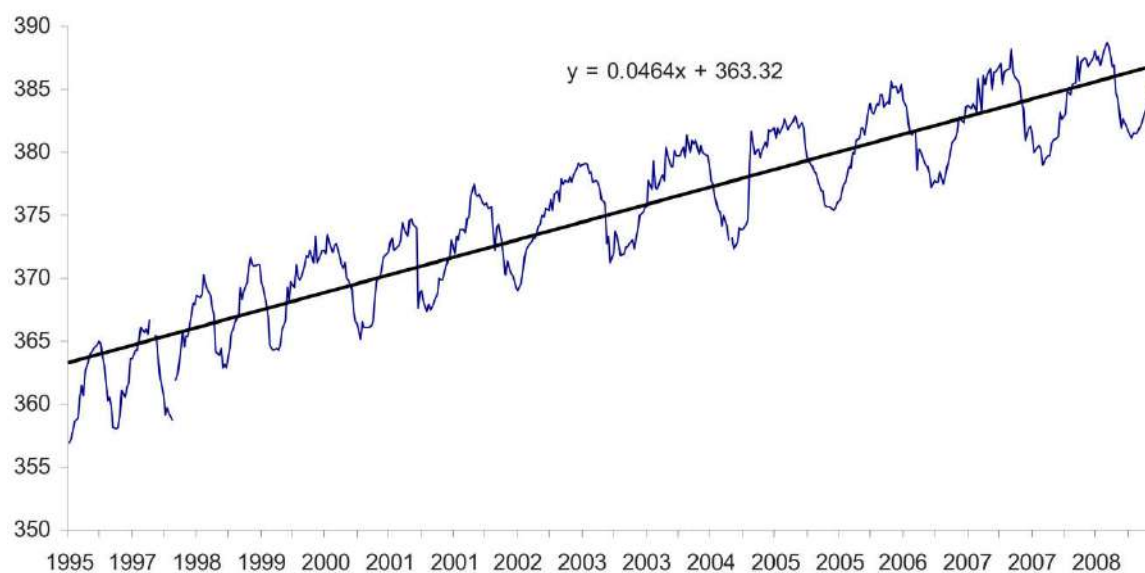


Figure 27. Evolution du CO₂ 1995-2009, station Askrem Algérie[20].

L'Algérie a effectué deux inventaires des GES, 1994 et 2000. Les inventaires couvraient six gaz à effet direct de serre (CO₂, CH₄, N₂O, SF₆ et les CFC), et les gaz à effet indirect (NO_x, CO, NMVOC et SO₂)[21].

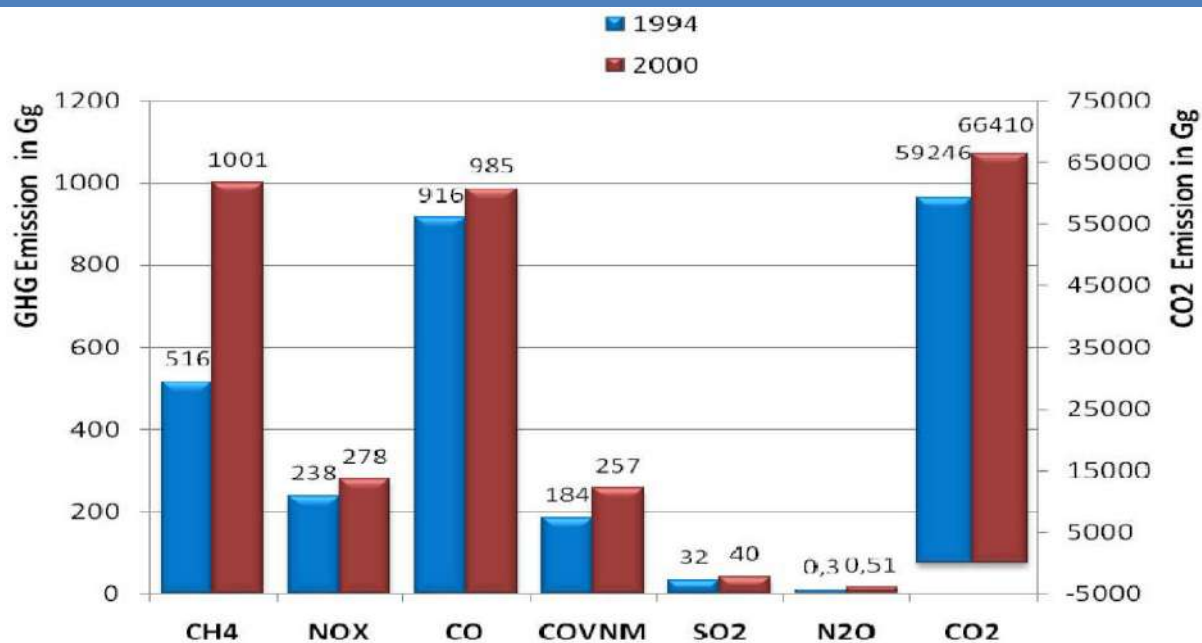


Figure 28. Evolution GES entre 1994 et 2004[21].

La quantité des GES émise, en 2000, par habitant est 4.1 TeqCO₂/habitant/an, alors qu'elle était 3.1, en 1994. L'Algérie se place parmi les grands émetteurs des GES dans les pays en développement. Par secteur d'activité le secteur des énergies est le premier pollueur en Algérie 74% des émissions des GES. L'augmentation de la consommation engendre une augmentation des émissions des GES, en 2020, elle pourrait atteindre une hausse de 40% par rapport à celles de l'année 2000[22].

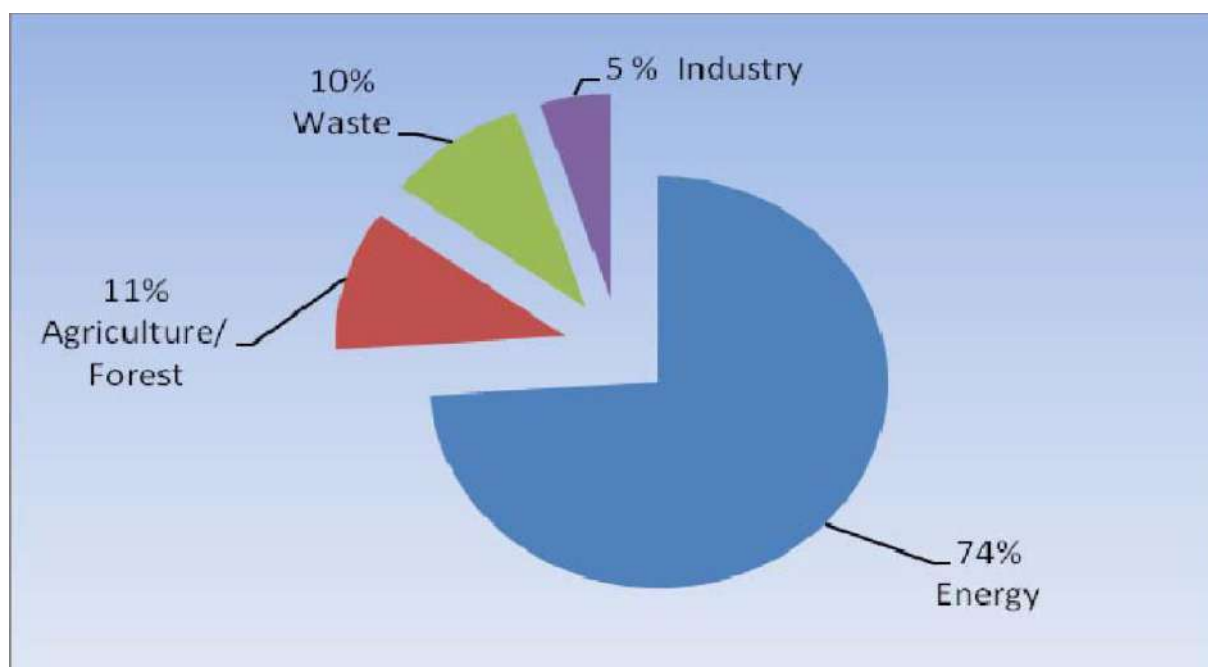


Figure 29. Emission totales des GES par secteur en Algérie 2000[21]

L'Algérie émet 0.41kgCO₂ pour chaque PIB, Alors que la France émet 0.2 pour chaque PIB, cela revient à la dépendance quasi-totale du secteur énergétique, notamment production d'électricité, aux hydrocarbures[22].

Avec le taux de croissance actuel, si aucune mesure ne serait prise afin d'atténuer des émissions des GES, de rationalisation de la consommation et de diversification de son bouquet énergétique, en 2030, les émissions des GES seront de l'ordre de 180MtCO₂/an[22].

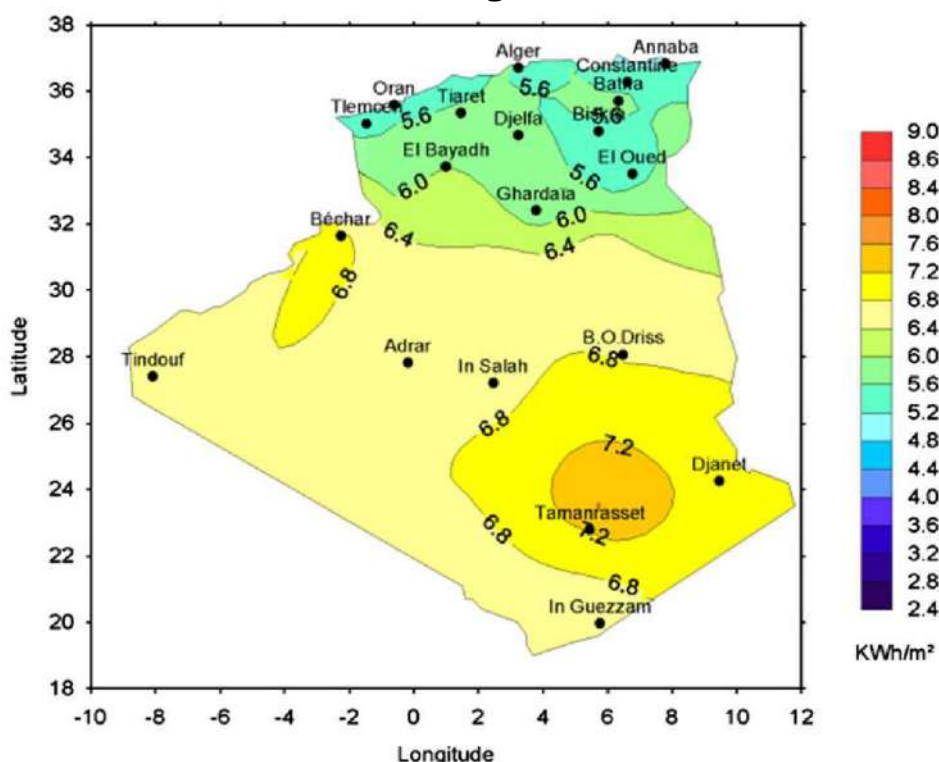
3.3.2 Empreinte écologique

La moyenne mondiale de l'empreinte écologique est de 1.8gha/ habitant, en 2011. On estime que l'empreinte écologique, en Algérie, est de 1.85gha, cela montre que l'Algérie n'a pas de déficit écologique la consommation et la capacité biologique sont en équilibre[22]. Les futures politiques énergétiques doivent prendre en considération les enjeux climatiques et environnementaux, afin de les préserver.

3.4 Energies renouvelables en Algérie

3.4.1 Energie solaire

L'Algérie contient un potentiel énorme pour les énergies solaires, avec sa grande superficie et le taux d'ensoleillement élevé, l'Agence internationale d'énergie (IEA) l'estime de 162TWh d'électricité. Les conditions climatiques de l'Algérie favorisent le développement des ER et en particulier l'énergie solaire, notamment la région du Sahara. En plus, d'énormes terrains plats et inutilisés, le climat est sec, la pluviométrie très faible et l'ensoleillement est abondant. La région du Sahara possède les meilleures conditions au monde pour les installations de l'énergie solaire.



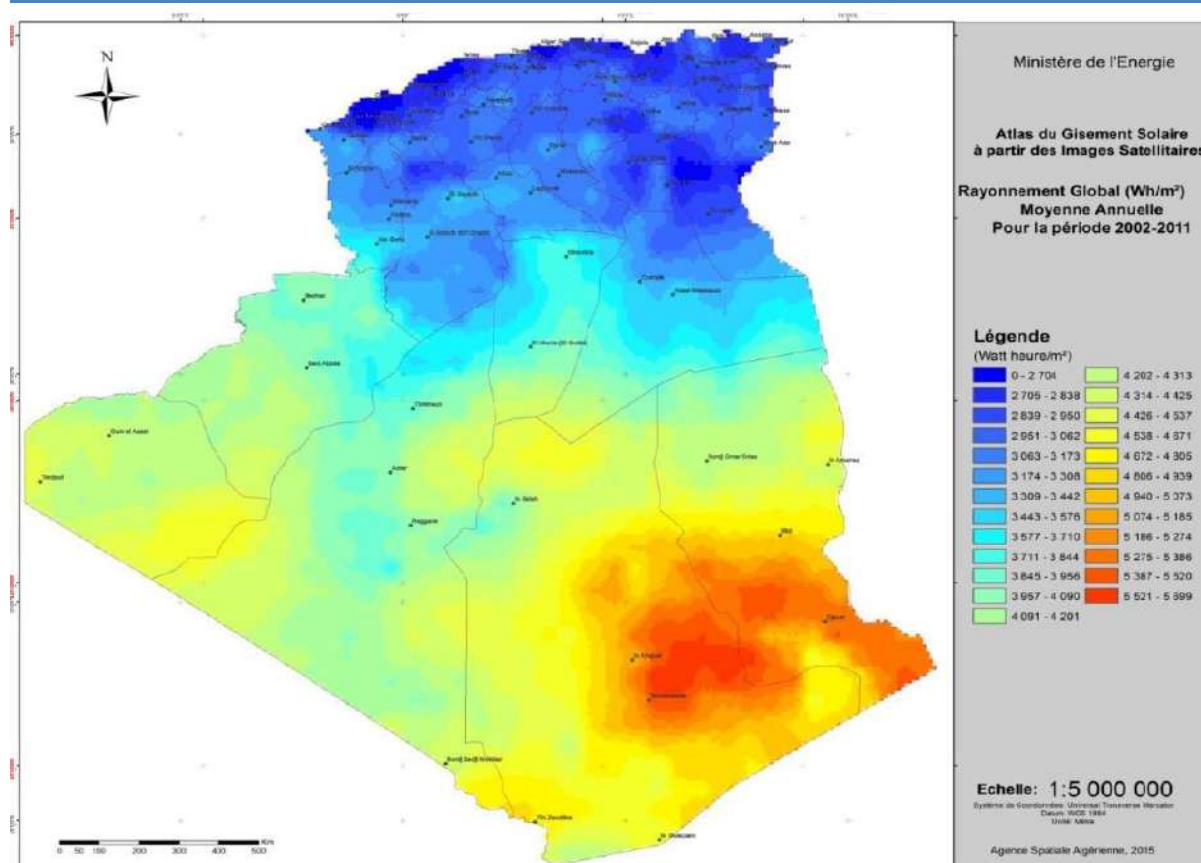


Figure 31. Gisement solaire à partir des images satellitaire 2002-2011(rayonnement global) [24]

Les heures d'ensoleillement dépassent les 3 000 heures annuellement, et peuvent atteindre 3 500 heures au Sahara. Cela met l'Algérie parmi les pays les plus ensoleillés au monde. Le potentiel solaire Algérie dépasse les 6 milliards GWh/an.[23, 24].

Tableau 3. Potentiel solaire en Algérie [23]

Région	Côtière	Haut Plateaux	Sahara	Total
(%)	4	10	86	100
Superficies (km ²)	95 270	23 8174	2 048 297	2 381 741
ensoleillement quotidienne moyenne(h)	7.26	8.22	9.59	
ensoleillement annuelle totale (h/an)	2 650	3000	3 500	
Energie solaire moyenne (kW/m ² /an)	1 700	1900	2 650	
Energie d'ensoleillement (kW/m ²)	4.66	5.21	7.26	
potentiel d'énergie quotidien	443	1 240	1 487 063	1 655 548

L'Algérie a fixé un objectif, en 2030, les ER représenteraient 40% du bouquet énergétique algérien. Le projet vise l'installation de 60 sites d'ici

2030. Il est prévu l'installation d'une puissance totale de près de 12 000 MW pour le marché national, avec une possibilité d'exportation de 10 000 MW. L'investissement pourrait atteindre les 20 milliards de dollars pour l'électricité de sources renouvelables [24].

La concrétisation de ce projet pourrait rendre l'Algérie une région très attractive des investissements en ER au monde, avec l'installation des sociétés de fabrication des équipements, les instituts de recherche et de développement, le transfert des technologies et du savoir-faire.

3.4.2 Energie solaire photovoltaïque

Cette forme d'énergie est la plus élégante, silencieuse et avec une faible maintenance. L'électricité est produite directement sur site sans impact environnemental. L'énergie photovoltaïque a la commodité des applications décentralisées et peut se dispenser du réseau électrique. Cette particularité est très importante pour les régions isolées, lointaines, et rurales de faible population, ou la demande consiste à satisfaire des petites puissances pour les besoins d'éclairage, réfrigération, pompage, etc.

Parmi les avantages de cette forme d'énergie :

- La conception par module qui lui permet d'être étendue selon les besoins.

- La création des petites entreprises pour les régions pauvres.

- Préserver l'environnement.

- L'utilisation innovante et esthétique en architecture.

- L'immobilité, la flexibilité et la décentralisation des investissements sur une longue période de temps.

En Algérie, on utilise cette forme d'énergie pour : l'usage domestique, réfrigération, pompage et irrigation, éclairage public, les télécommunications et l'électrification des villages loin du réseau ainsi pompage des puits de pâturage bédouin,

La stratégie de l'Algérie se base sur l'accélération du développement de l'énergie solaire, le gouvernement prévoit le lancement de plusieurs projets solaires photovoltaïques. Dans la période de 2020-2030, une capacité de 1000MW. serait installée, et 200 MW[24]

3.4.3 Energie solaire thermique

Les applications de l'énergie solaire thermique, de grande taille, se concentrent sur les CSP (*Concentrated Solar Power*). Les radiations directes du soleil sont concentrées par un collecteur sur un échangeur ou elles sont cédées à un fluide caloporteur. Cette chaleur est, par la suite, transférée à un générateur de vapeur et enfin un turboalternateur.

La première installation solaire thermique à cycle combiné (ISCC) fonctionne actuellement à Hassi R'mel. Ce projet a fourni une grande

expérience pour l'Algérie en matière de développement, construction et l'exploitation des ISCC.

Sur la période 2016-2020, l'Algérie aurait installé quatre centrales thermiques à cycle combiné d'une puissance totale de 1200MW. La phase entre 2021-2030, le programme prévoit l'installation de 500MW par an jusqu'en 2023, et 600MW par an jusqu'en 2030[24]. Avec ces objectifs, le programme national est parmi les programmes les plus ambitieux en CSP au monde.

D'autre part, l'Organisation des Nations Unis et la Banque Mondiale ont lancé, en 2009, le CIF (*Climat Investment Funds*), avec un plan d'investissements et de co-financement de 13 projet de l'énergie solaire thermique, de 5.5 milliards de dollars dans l'Égypte, le Maroc, la Tunisie, la Jordanie et l'Algérie. Pour l'Algérie, une capacité de 220MW aurait être envisagée, ce qui renforce le plan national ER.

La première installation prévue dans la région de Meghair, la deuxième et la troisième seraient identique à celle de Meghair, installées à Naama et à Hassi R'mel près de l'installation ISCC, l'actuel projet contient deux options :

Production de l'électricité d'une capacité de 400MW dont 70MW générée de CSP.

Electricité/dessalement d'une capacité globale de 480MW, dont 80MW est source CSP [25].

Tableau 4. Projets CSP cofinancés avec CIF [25]

Region	Puissance des CSP(MW)	Puissance Total(MW)	Cout estimé (MUSD)	Contribution du CTF (MUSD)
Megahir	80	400	322	58.4
Naama	70	400	285	51.1
Hassi R'mel	70	400	285	51.1
Total	220	1200	892	160.6

Les estimations, de l'agence Aérospatiale allemande DLR et CDER, du potentiel Algérien de la technologie CSP est de l'ordre de 170 000TWh/an [26, 27]. Ce qui pourrait satisfaire, facilement, les besoins énergétiques du pays seulement en ER. Dans le scénario proposé, 80% de la demande d'électricité est couverte par les ER, plus précisément des CSP. Le prix de l'électricité, en Algérie, avec la technologie des CSP serait de 0.08 euro/kWh.

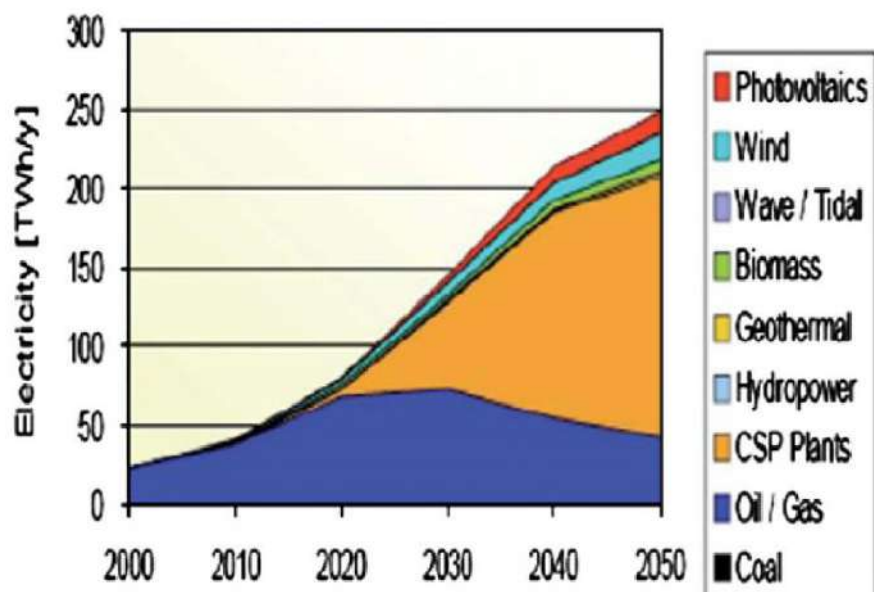


Figure 32. Estimation de DLR et CDER pour la production électrique en Algérie [27]

L'agence DLR proposait un réseau de transport électrique reliant les pays MEAN, pays nord africains et Moyen-Orient, et l'Europe (fig.32).

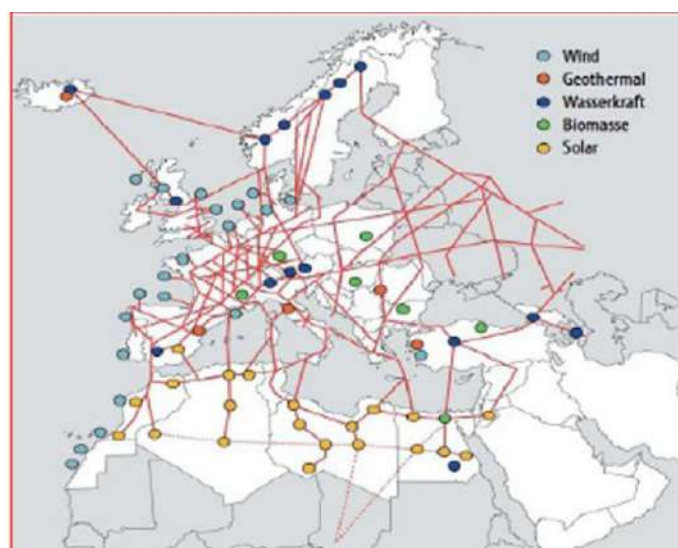


Figure 33. Réseau de transport électrique reliant les pays MENA (Nord Africains Et Moyen-Orient) [27].

Tableau 5. Capacités photovoltaïques installées jusqu'au fin 2020[24].

Wilaya	Localité	Capacité (MW)	Installée	Mise en Service
ILLIZI	Djanet	03		19/02/2015
ADRAR	Adrar	20		28/10/2015
ADRAR	Kabertene	03		13/10/2015
TAMANRASSET	Tamanrasset	13		03/11/2015
TINDOUF	Tindouf	09		14/12/2015

ADRAR	Zaouiet.Kounta	06	11/01/2016
ADRAR	Reggane	05	28/01/2016
ADRAR	Timimoun	09	07/02/2016
TAMANRASSET	In-Salah	05	11/02/2016
ADRAR	Aoulef	05	07/03/2016
LAGHOUAT	El Khnag (I)	20	08/04/2016
LAGHOUAT	El-Khnag (II)	40	26/04/2017
DJELFA	Ain-El-Ibel (I)	20	08/04/2016
DJELFA	Ain-El-Ibel (II)	33	06/04/2017
SOUK AHRAS	Oued El Keberit	15	24/04/2016
NAAMA	Sedrate Leghzal	20	03/05/2016
SAIDA	Ain-Skhouna	30	05/05/2016
SIDI-BEL- ABBES	Telagh	12	29/09/2016
EL BAYADH	Biodh Sidi Chikh	23	26/10/2016
M'SILA	Ain-El-Melh	20	26/01/2017
OUARGLA	El-Hdjira	30	16/02/2017
BATNA	Oued El-Ma	02	16/01/2018

3.4.4 Energie éolienne

L'énergie éolienne est une technologie propre pour son faible impact environnemental. Le potentiel de cette énergie Algérie dépend des gisements éoliens. Une connaissance détaillée du vent des implantations prévues mène à une bonne estimation des performances des projets, car l'énergie produite dépend essentiellement de la vitesse du vent, la surface de balayage des hélices et de la masse volumique de l'air, durant toute l'année.

Les mesures effectuées par CDER et MEM, sur 75 sites sur 5ans, montraient que le climat de l'Algérie est favorable pour les implantations éoliennes. 50% du pays est exposé à une vitesse moyenne considérables.

La carte représentée ci-dessous, il est clair que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-Est, avec des vitesses supérieures à 7 m/s, et qui dépassent la valeur de 8 m/s dans la région de Tamanrasset (Aïn Amguel).

Concernant La vitesse moyenne au Nord Algérien, on remarque globalement qu'elle est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tébessa, Biskra, M'sila et El Bayadh (6 à 7 m/s), et le Grand Sud (>8m/s).

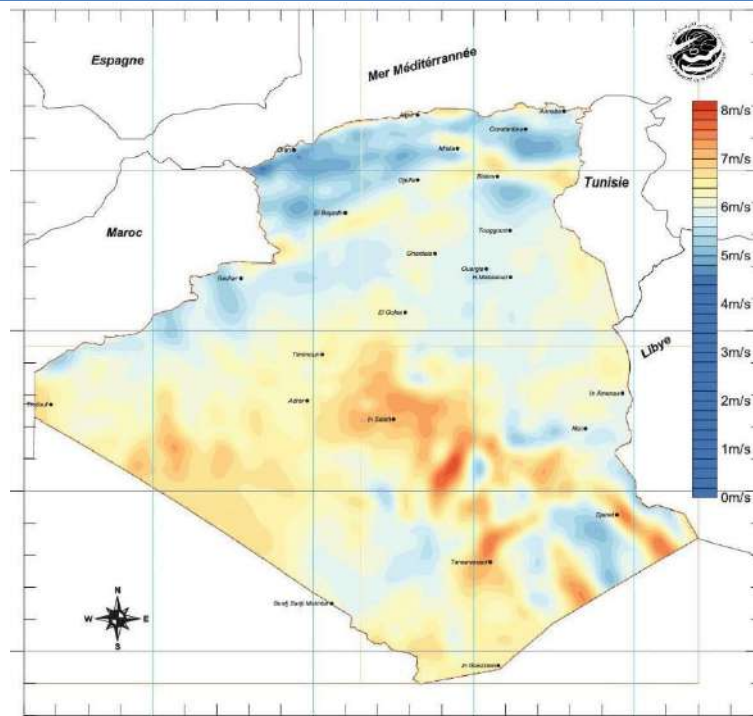


Figure 34. Carte du Vent Annuel Moyen à 50m (Période 2001-2010) [24]

Le programme des ER algérien prévoyait l'installation, dans la période de 2011-2013, de la première ferme éolienne d'une puissance de 10MW à Adrar. Deux fermes sont installées de 20MW chacune dans la période 2014-2015. Entre temps, des études seraient menées afin de choisir des emplacements favorables pour d'autres projets. Dans la période 2016-2030, on prévoit l'installation d'une puissance de 1 700 MW [24].

3.4.5 Energie Géothermique

L'Algérie contient un grand potentiel géothermique de basse température, concentré au nord-ouest et nord-est du pays. Plus de 200 sites inventoriés par le CDER. Le tiers de de ces sites ont une température supérieure à 45°C. Ces sources naturelles ont un débit jusqu'à 2m³/s d'eau chaude, ne représente qu'une faible part des possibilités de production. Au sud du pays, on trouve le grand réservoir Albien étalé sur des milliers de km², exploité par forage. Le débit dépasse les 4m³/s, et une température moyenne de 57°C.

D'après le CDER, la plus grande température des ressources géothermiques est enregistrée à Guelma, 98°C et 118°C à Biskra. Une puissance de 700MW pourrait être produite en Algérie[23, 24].

Tableau 6. Caractéristiques de quelques sources géothermiques[23]

Sources	Temperature (°C)	Debits (l/s)
Chellala, Guelma	98	100
El Biban, Sétif	80	1.2
Ben Hachani, Guelma	71.7	0.3

Essalehine, Khenchela	70	5
Guerfa, Sedrata	68	100
Sidi Ayad, Ain timouchent	68	1.2
Régha, Meliana	67	--
Bouhadjar, Ain timouchent	66.5	--
Bouhanifia, Mascara	66	--
Slahine, Guelma	55	5

3.4.6 Hydroélectricité

Malgré, la pluviométrie faible dans la plupart des régions du pays et l'absence des rivières, la quantité globale tombant sur le territoire algérien, estimées de 65 milliards m³ dont 25 milliards m³ renouvelable duquel deux tiers sont des ressources en surface. Le pays profite peu à cause de nombre réduit des jours de précipitation, la forte évaporation, la concentration des superficies limitées et l'évacuation rapide vers la mer. L'Algérie compte 103 barrages, plus d'une cinquantaine sont exploités[24].

Tableau 7. Parc de production hydroélectrique en Algérie[19]

Centrale	Puissance MW	Centrale	Puissance MW
Darguina	71.5	IghilEmda	24
Mansouria	100	Erraguene	16
Souk Eldjemaa	8.085	TiziMeden	4.458
Ighzernchebel	2.7	Ghrib	7
Gouriet	6.42	Bouhanifia	5.7
Oued Fodda	5.7	Beni Behde	3.5
Tessala	4.22		

3.4.7 Energie Biomasse

La biomasse est une solution efficace et écologique. Actuellement, les forêts couvrent 1,8Mha et les superficies forestières détériorées sont de 1.9Mha. Les pins maritimes et l'eucalyptus, qui sont très adéquats aux usages énergétiques, ne présente que 5% des forêts. Le potentiel forestier est estimé de 3.7Mtep, avec un taux de récupération de 10%. La biomasse est une solution, en Algérie, afin de se disposer des déchets publics. Environ 5Mt des déchets agricoles et urbains ne sont pas recyclés, soit un gisement de potentiel de 1.330Mtep[24].

Des travaux sont entamés sur la valorisation énergétique des déchets municipaux, les résidus de l'extraction des huiles (olives), les huiles de cuisson, l'exploitation des eaux usées et les déchets municipaux pour la production du biogaz.

3.5 Plan national d'efficacité énergétique et des RE

L'Algérie a lancé un programme ambitieux des ER et l'efficacité énergétique, s'appuyant sur le développement et l'exploitation et la diversification des ressources durables, notamment, de l'énergie solaire.

Le plan d'action concernant l'efficacité énergétique se focalise sur le secteur de l'habitat, qui est le plus grand consommateur d'énergie 42% de la consommation finale. D'ici 2030, on estime que plus de 30 MTep qui seront économisées, Il interprète :

- L'isolation thermique des bâtiments ;
- Développement du chauffe-eau solaire ;
- La généralisation de l'utilisation des lampes à base consommation d'énergie ;
- L'introduction de la performance de l'éclairage publique ;
- Introduction des principales techniques de climatisation solaire.

Le programme vise, aussi, pour le secteur des transports à promouvoir les carburants les plus disponibles et les moins polluants, notamment, le GPL et le GN. Afin, d'enrichir la structure de l'offre des carburants et de contribuer à la dé-dieselisation du secteur, et améliorer son impact écologique. Ceci se traduirait par une économie, d'ici 2030, de plus de 16 MTep.

Dans le secteur industriel, il est plus de 30 MTep qui seront économisées, le plan d'action, propose de :

- Généraliser et cofinancer les audits énergétiques et les études de faisabilité. Afin d'adapter des solutions techno-économiques énergétiquement efficaces.
- Encourager et cofinancer des surcoûts de l'introduction des solutions de l'efficacité énergétique.

Les résultats attendus par la réalisation du programme national d'efficacité énergétique à l'horizon de 2030 :

- Un gisement d'économie d'énergie de l'ordre de 63 Mtep (soit : près de 38 milliards USD valorisé à l'exportation) ;
- Une puissance évitée de plus de 1500 MW (soit près de 2 milliards de USD) ;
- Une réduction de plus de 193 millions de tonnes de CO₂ (soit : 1,1 milliards de USD) ;
- 500000 nouveaux postes d'emploi.

La concrétisation du programme national d'efficacité énergétique permettra de réduire graduellement la croissance de la demande énergétique en énergie fossile. Ainsi, les économies d'énergie cumulées engrangées seraient de l'ordre de 93 millions de TEP, dont 63 millions de TEP d'ici 2030, et le reste au-delà de cet horizon [24].

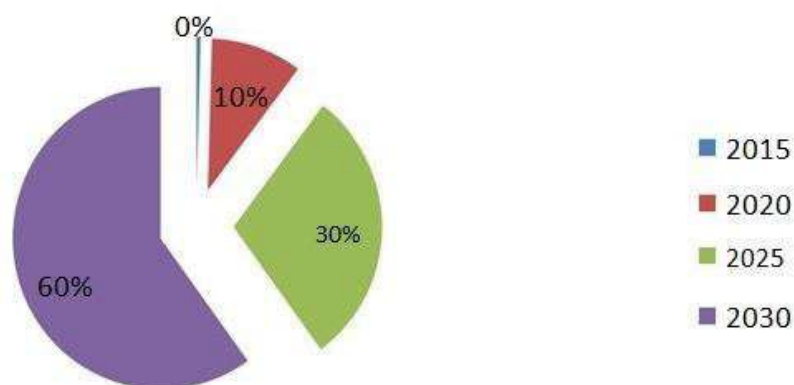


Figure 35. Emissions évitées par le programme national d'efficacité énergétique[24]

Le plan national des ER focalise à faire entrer l'Algérie dans l'aire du développement durable, en combinant l'initiative et l'acquisition du savoir-faire. Etendu sur la période entre 2011-2030, le plan a pour but l'augmentation de la production électrique du pays de 60% dans la première décennie. Une capacité en ER de 22000MW serait installée, dont 12000MW serait consacrée à la demande nationale, le reste est destiné à l'exportation. Le but, En 2030, est de produire 40% de l'électricité de source renouvelable.

L'énergie solaire prend la grande part du plan national. Les énergies solaire, thermique et photovoltaïque, assureraient 37% de la production électrique nationale. De sa part l'énergie éolienne aurait une part de 3% de la production électrique nationale.

Le programme national est reparti sur des phases principales :

- En 2013, l'installation d'une capacité de 110MW.
- En 2015, les capacités installées seraient de 650MW.
- En 2020, les capacités installées atteindraient les 2600MW, avec la possibilité d'exporter 2000MW.
- En 2030, une capacité supplémentaire de 12000MW serait installée, avec un but d'exporter 10000MW[24].

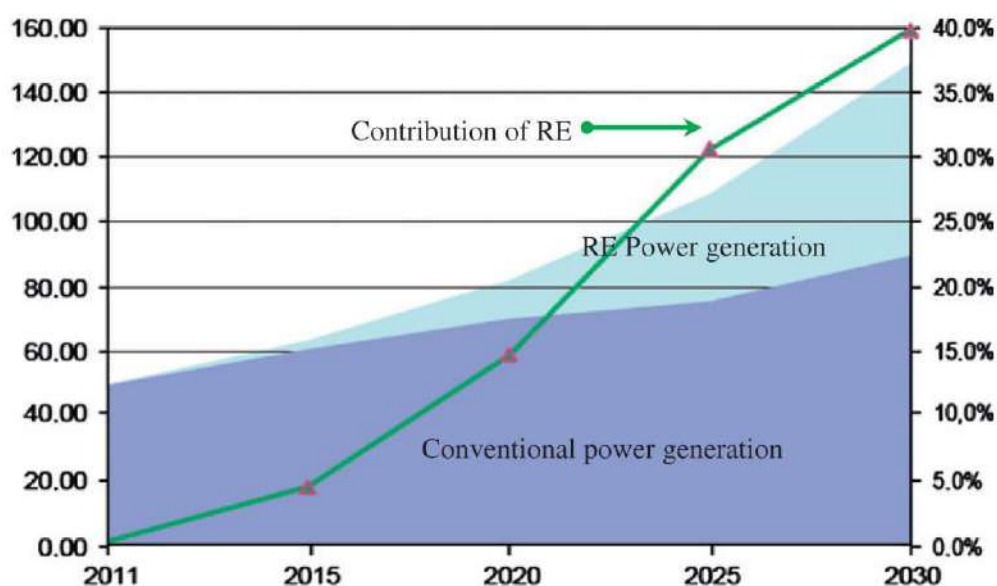


Figure 36. Contribution des énergies renouvelables prévue dans la production d'électricité[24]

3.6 Lois, règlements, programmes et plans

Un effort considérable de la part du gouvernement est fourni sur le plan juridique. La Constitution algérienne met la préservation de l'environnement à la tête de la mission et les priorités de l'Etat, en garantissant aux citoyens un environnement sain et prospère. Dans le même sens, le gouvernement renforce, pertinemment, le cadre législatif et réglementaire algérien par la promulgation de plusieurs dispositions et lois sectorielles, et la création d'un ensemble d'institutions spécialisées.

Parmi les lois qui ont été promulguées nous pouvons citer :

- Loi n° 99-09, du 28 Juillet 1999, relative à la maîtrise de l'énergie ;
- Loi n° 01-19, du 12 décembre 2001, relative à la gestion, au contrôle et à l'élimination des déchets.
- Loi n° 03-10, du 19 juillet 2003, relative à la protection de l'environnement dans le cadre du développement durable.
- Loi de 2001 portant sur l'aménagement et le développement durable.
- Loi n° 04-09, du 14 août 2004, relative à la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable.
- Loi n° 04-20 relative à la prévention des risques majeurs et à la gestion des catastrophes dans le cadre du développement durable.

En appliquant le principe « le pollueur payeur », des mesures fiscales, un ensemble de taxes et de dispositions motivante et dissuasive, ont été instituées dans le cadre des lois de finance, notamment, la taxe sur les

activités polluantes ou dangereuses pour l'environnement, la taxe sur les sacs en plastiques importés et/ou produits locaux, la taxe sur les carburants, la taxe sur les produits pétroliers (TPP) et la taxe d'efficacité énergétique (TEE).

Pour ce qui est des mesures d'incitation, réductions du taux de TVA (taxe sur la valeur ajoutée) au profit des équipements destinés au GPL/carburant, les climatiseurs fonctionnant par absorption du gaz naturel et du propane et les équipements et les accessoires destinés au GPL/Carburant et du GNC (Gaz naturel comprimé).

La loi de finances de 2017, Par ailleurs, a adopté la taxation des équipements énergivores, sur la base du programme d'étiquetage des appareils en fonction de leur de consommation énergétique. Pour promouvoir la politique de l'efficacité énergétique, avant la mise en place de seuils minimums de performance énergétique des équipements mis sur le marché algérien[28].

Dans le volet institutionnel, l'Algérie s'est dotée d'un organigramme institutionnel, en parallèle avec ses engagements au titre de la CCNUCC et de l'Accord de Paris 2015, dans les perspectives de la politique environnementale nationale.

Les institutions se présentent par :

- L'Agence Nationale des Changements Climatiques (ANCC), créée en 2005, a pour missions le traitement des aspects des changements climatiques, en intégrant cette question dans l'ensemble des plans de développement. Elle élabore, aussi, l'inventaire national des émissions des gaz à effet de serre[28].
- Le Comité National Climat (CNC), installé en 2015, sous la tutelle et la présidence du Ministère en charge de l'environnement. Il assure la coordination, le suivi et l'évaluation des politiques, des stratégies, des programmes et plans d'actions nationaux liés aux changements climatiques[28].
- L'installation, en 2016, de la direction du changements climatiques au niveau du Ministère de l'Environnement[28].
- La création, en 1985, de l'Agence Nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie (APRUE), sous la tutelle du Ministère de l'Energie et des Mines. Elle s'occupe de promouvoir de l'économie de l'énergies dans les secteurs d'activité, mobiliser les intervenants autour les enjeux et les défis de l'efficacité énergétique, favoriser les projets d'efficacité énergétique, émerger le concept du développement durable et de l'efficacité

énergétique ainsi qu'améliorer la performance des différents intervenants [29].

- La création en 2019, auprès du Premier-Ministre, du Commissariat national aux énergies renouvelables et à l'efficacité énergétique (CEREFÉ). Il a pour mission, principalement, l'évaluation de la politique nationale de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, les outils mobilisés pour sa mise en œuvre ainsi que leurs retombées [30].

Le gouvernement Algérien a mis en place une série de programmes, plans et stratégies nationales de lutte contre les changements climatiques et les énergies renouvelables. Il s'agit notamment de ce qui suit :

- Le plan National Climat (PNC), il a été validé par le conseil de gouvernement en date de 21 septembre 2019, entamé en 2012 avec la coopération de l'Agence de Coopération Allemande (GIZ). Le PNC répond aux défis majeurs de l'Algérie, liés aux changements climatiques et leurs effets adverses. Sa mission est de mettre en cohérence les programmes et les actions des différents secteurs avec les plans nationaux de développement économique et social et de définir les processus de mise en œuvre des activités identifiées [31].
- L'actualisation du Plan National d'Actions pour l'Environnement et le Développement durable (PNAE-DD), pour la période 2020-2024, lancée en partenariat avec l'Union Européenne dans le cadre du programme d'Appui à la Politique du Secteur de l'Environnement (PAPSE). Le PNAE-DD se fixe comme objectif la mise en place d'un nouveau cadre stratégique de la politique environnementale. Le but étant de réduire considérablement le rythme de dégradation de l'environnement [32].
- Le Schéma National d'Aménagement du territoire (SNAT 2030) mis en place en 2010. Il s'articule autour de 20 Programmes d'Action Territoriaux (PAT), parmi lesquels, le quatrième PAT, consacré à la prévention des risques et à la gestion des catastrophes dans le cadre de la première ligne directrice du SNAT relative au développement durable [33].
- S'inscrivant dans le SNAT, la Stratégie et le Plans d'Action Nationaux pour la Biodiversité (SPANB -2016/2030) est adopté, ils se focalisent, principalement, sur les besoins sociaux, économiques et environnementaux de l'Algérie. Cette stratégie a pour vocation d'aider à orienter et à coordonner les actions de développement économique, social, environnemental et culturel de

l'Algérie. La conservation, la protection, la restauration et la valorisation des écosystèmes naturels algériens ont donc une importance du premier plan pour bâtir une économie verte et durable en Algérie, et seront des moteurs d'innovation et de création d'emplois [34].

- La mise en place de la Stratégie Nationale de Gestion Intégrée des Déchets (SNGID) à l'horizon 2035. Cette stratégie s'inscrit dans le Schéma National d'Aménagement du territoire (SNAT 2030), ainsi que dans le Plan national d'actions environnementales et du développement durable (PNAE-DD). Cette stratégie repose sur les objectifs, à savoir la limitation de la génération des déchets ménagers et assimilés (DMA) à 1,1 kg par habitant, et la favorisation de la prévention des déchets des autres flux, l'encouragement du tri sélectif à la source, de manière à recycler ou composter 30% des DMA, 30% des déchets spéciaux (DS) et 50% des déchets inertes, en plus de l'éradication des décharges sauvages, la gestion des risques post-fermetures pour tout type de décharges et l'élimination des déchets ultimes à travers les centres d'enfouissement technique (CET), conformes aux standards internationaux [28].
- La révision et mise à jour du programme national du développement des énergies renouvelables (2015-2030) et l'intégration de la transition énergétique comme priorité dans le plan d'action du gouvernement de 2020. Le but est d'intégrer des énergies renouvelables dans le bouquet énergétique national. Ce qui présente un enjeu majeur dans la perspective de préservation des ressources fossiles, de diversification des filières de production de l'électricité et de contribution au développement durable [24].

4 Conclusion

La satisfaction de la flambée de la demande mondiale en hydrocarbures nécessite des investissements colossaux et immédiats dans l'amont pétrolier et gazier, pour garder l'équilibre du marché en moyen terme. Le problème ne se pose pas, seulement, au niveau de la disponibilité des réserves mais dans le temps nécessaire des investissements et de la mise en production de ces réserves. De nouveaux gisements sont difficiles à exploiter, loin des réseaux de transport, nécessitent des nouvelles technologies, cela augmente le coût marginal du baril. Le recours aux énergies renouvelables au monde entier est en tête des préoccupations des gouvernements, à l'échelle locale, nationale et intergouvernementale. Le

souci est de résoudre l'équation du développement durable, et répondre, à la fois, à la demande énergétique, tout en préservant l'environnement et la qualité de vie, le climat et les microclimats, et lutter contre le réchauffement climatique.

L'Algérie subissait l'écart entre la production nationale et la consommation qui ne cesse de se rétrécir, ce qui limite, de plus en plus, les capacités du pays à exporter les hydrocarbures et le prive de la ressource la plus importante de financement des trésors publics, pour un pays où les hydrocarbures représentent 96% de ses exportations. La situation énergétique en Algérie est, plus que jamais, à cours terme, la production interne ne satisfait que la demande interne. L'introduction des nouvelles politiques de diversification du bouquet énergétique, d'amélioration de l'efficacité énergétique ainsi que de rationalisation de la consommation interne est un objectif primordial pour toute initiative de développement économique et social. C'est l'élément clé dans les stratégies des politiques énergétiques et ses dérivées, pratiqué par le plan du travail du gouvernement par un ensemble de lois, règlements, institutions que l'Algérie a adoptées volontairement pour la promotion des énergies renouvelables, améliorer l'efficacité énergétique, conserver l'environnement et lutter contre les changements climatiques.

Références

1. Petroleum, B.B., *Statistical Review of World Energy 2020*, B.p.l.c. Statistical Review of World Energy, Editor. 2020.
2. OPEC. *organisation of petroleum exporting countries*. 2020 [June 2020]; Available from: https://www.opec.org/opec_web/en/.
3. Agency, I.E., *World Energy Outlook 2019*, I.E.A. IEA, Editor. 2019, International Energy Agency.
4. Agency, I.E., *World Energy Outlook 2014*, I.E.A. IEA, Editor. 2014, International Energy Agency.
5. Petroleum, B.B., *Statistical Review of World Energy 2014*, B.p.l.c. Statistical Review of World Energy, Editor. 2014.
6. Lysen, E.H., *Solar energy strategies for developing countries*, in *The Trias Energica*. 1996: Germany. p. 20-24.
7. Collard, F., *La politique énergétique en Europe*. Courrier hebdomadaire du CRISP, 2018. **2403-2404**(38-39): p. 5-66.
8. Cucchiella, F., et al., *A comparison of environmental and energetic performance of European countries: A sustainability index*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **78**: p. 401-413.
9. Jamai Mouhtadi, M., *A sustainable energy mix : An approach based on portfolio theory, Choix d'un bouquet énergétique durable : Une approche par la théorie de portefeuille*. 2020, Université Montpellier.
10. Unies, N., *Rapport sur les objectifs de développement durable 2019*. 2019, Nations Unies: Nations Unies, New York, 2019.
11. *RENEWABLES 2020 GLOBAL STATUS REPORT*. 2020: Paris, France.
12. *RENEWABLES 2015 GLOBAL STATUS REPORT*. 2015: Paris, France.
13. Science, S. *Climate Graphics by Skeptical Science*. 2020 [cited 2020; Available from: <https://skepticalscience.com>].
14. Energétique, M.d.l.T. *Données et études statistiques, Pour le changement climatique, l'énergie, l'environnement, le logement, et les transports*. 2021 [June 2021]; Available from: <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/>.
15. Asif, M. and T. Muneer, *Energy supply, its demand and security issues for developed and emerging economies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2007. **11**(7): p. 1388-1413.
16. unies, C.m.s.l.e.e.l.d.d.l.O.d.N., *Our Common Future*. 1987, Organisation des Nations unies.
17. UNIES, O.D.N. *Groupe Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat*. 2020; Available from: UN.org.
18. Economics, I.f.C., *Climate Report 2018*. 2020, Institute for Climate Economics: Fance.
19. Energie, M.d.l., *Bilan Energétique National 2019*. 2020: Alger, Algérie.
20. office national de la métrologie ONM (ONM, N.W.o., internal report,2009, Algiers, *Rapport interne*. 2009.

21. MATE, M.d.l.A.d.T.e.d.l.e., *Seconde communication nationale de l'Algérie sur les changements climatiques à la CCNUCC, projet GEF –PNUD 00039149, 2010, Algiers.* 2010: Alger, Algérie.
22. Sahnoune, F., et al., *Climate Change in Algeria: Vulnerability and Strategy of Mitigation and Adaptation.* Energy Procedia, 2013. **36**: p. 1286-1294.
23. Renouvelables, C.C.d.D.e.E. 2017; Available from: <http://www.cder.dz>.
24. Energie, M.d.l. 2020 December 2020]; Available from: www.energy.gov.dz.
25. CIF, C.I.F. *Clean Technology Fund investment plan for CPS in MENA region, Inter sessional meeting of CTF trust Fund committee of World bank. Washington, DC; December1-2, 2009.* December1-2, 2009 [cited 2020 December 2020]; Available from: <https://www.climateinvestmentfunds.org>.
26. Gaz, C.C.d.R.d.l.E.e.d. *Programme indicatif des besoins en moyens de production d'électricité 2008–2017.* 2018 [cited 2020; Available from: www.creg.gov.dz.
27. Centre, D.G.A. *Characterisation of solar electricity import corridors from MENA to Europe.* 2009 [cited 2020; Available from: https://www.dlr.de/EN/Home/home_node.html.
28. L'Environnement, M.d. *strategie nationale de l'environnement.* 2018 [cited 2020 December 2020]; Available from: <https://www.me.gov.dz/>.
29. APRUE, A.p.l.P.e.l.R.d.L.U.d.L.E. 2020 December 2020]; Available from: <http://www.aprue.org.dz/>.
30. (CEREFÉ), C.n.a.é.r.e.à.l.e.é. December 2020]; Available from: <http://www.cerefe.gov.dz/>.
31. RENOUEVABLES, M.D.L.E.E.D.E., *Plan national du climat.* 2019, MINISTÈRE DE L'ENVIRONNEMENT ET DES ENERGIES RENOUEVABLES, AGENCE DE COOPERATION ALLEMANDE GIZ
32. L'Environnement, M.d.l.A.d.T.e.d., *Plan National d'Actions pour l'Environnement et le Développement Durable (PNAE-DD).* 2002.
33. L'ENVIRONNEMENT, M.D.L.A.D.T.E.D., *SNAT Schéma National d'Aménagement du Territoire.* 2010, MINISTERE DE L'AMÉNAGEMENT DU TERRITOIRE ET DE L'ENVIRONNEMENT
34. RENOUEVABLES, M.D.L.E.E.D.E. *Stratégies et plans d'action nationaux pour la biodiversité (SPANB).* 2016 [cited 2021 January 2021]; Available from: https://www.dz.undp.org/content/algeria/fr/home/library/environment_energy/strategie-et-plan-d-action-nationale-pour-la-biodiversite-2016--.html.

CHAPITRE II :

LA BIOMASSE

La Biomasse

1 Introduction

Le monde d'aujourd'hui est face à une dégradation, sans précédent, de l'environnement, et un épuisement des ressources naturelles. La substitution des énergies fossiles par des énergies nouvelles et renouvelables, qui sont peu ou non polluantes, est en tête de la question énergétique. Il s'agit, alors, d'anticiper la pénurie des ressources fossiles, de réduire les émissions de GES et de contribuer au développement durable.

Dans ce contexte, la valorisation énergétiques de la biomasse semble une alternative attractive aux énergies fossiles, tant pour produire de la chaleur, l'électricité ou bien les carburants solides, liquides ou gazeux.

La valorisation énergétique de la biomasse se fait essentiellement par combustion. Une partie de la chaleur produite peut être transformée en un travail mécanique (production d'électricité). Pour les fins énergétiques, la biomasse est conditionnée sous la forme d'un combustible solide (bûches, plaquettes, granulés, charbon de bois, biomasse torréfiée), d'un carburant gazeux soit par la biométhanisation (biogaz, biométhane), soit par gazéification (gaz de synthèse) ou d'un carburant liquide (biocarburant).

1.1 Définition de biomasse

La biomasse, signifie dans le sens large l'ensemble de la matière vivante. Ce terme est utilisé après le choc pétrolier pour désigner les produits organiques végétaux et animaux utilisés à des fins énergétiques.

La biomasse est définie comme « *la fraction biodégradable des produits, des déchets et résidus d'origine biologique provenant de l'agriculture (y compris les substances végétales et animales), de la sylviculture et des industries connexes, y compris la pêche et l'aquaculture, ainsi que la fraction biodégradable des déchets industriels et municipaux* » [1].

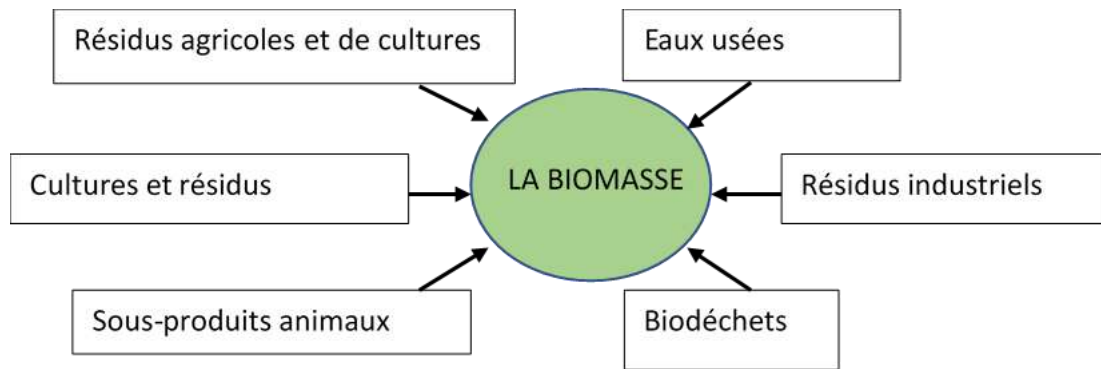


Figure 1 Sources de la biomasse

Les ressources en biomasse peuvent être classées en plusieurs catégories :

- Le bois, produit par le déboisement (entretien des forêts) sous forme de bûches, granulés et plaquettes.
- Les produits issus de l'agriculture traditionnelle (céréales, etc.), des résidus tels que la paille ou la bagasse (résidus ligneux de la canne à sucre), et les nouvelles plantations à vocation énergétique tels que les taillis à courte rotation (saules, miscanthus, etc.).
- Les déchets organiques tels que les déchets urbains comprenant les boues d'épuration, les ordures ménagères, et les déchets en provenance de l'agriculture tels que les effluents agricoles.
- L'aquaculture des algues.

Le choix du processus de conversion dépend des propriétés de la biomasse. La forme d'énergie demandée détermine aussi le choix de la biomasse. Les propriétés importantes sont :

- Les propriétés thermiques.
- Le pouvoir calorifique.
- La composition chimique : la proportion de carbone, les matières volatiles, les matériaux alcalins ainsi que le rapport cellulose/lignine.
- La teneur en eau (humidité intrinsèque extrinsèque).
- La teneur en cendres et en résidus[2].

2 Les procédés des conversions de biomasse

Le choix du procédé dépend de la disponibilité et du type de la biomasse, la forme d'énergie finale, les conditions économiques, les contraintes environnementales et écologiques.

Le but des procédés est le conditionnement de la biomasse à une forme utilisable dans l'industrie, l'agriculture et l'usage domestique.

Les méthodes de conversion de la biomasse sont multiples qui produisent à la fin les formes suivantes

- La forme solide : les pellets, les plaquettes, charbon de bois, etc.
- La forme liquide comme l'éthanol, le biodiesel, les huiles pyrolytiques.
- La forme gazeuse comme les gaz de décharge, le biogaz, le gaz de bois ou d'autres résidus utilisables dans des moteurs, chaudières ou turbines.

Ces procédés se regroupent dans deux familles thermochimique et biochimique.

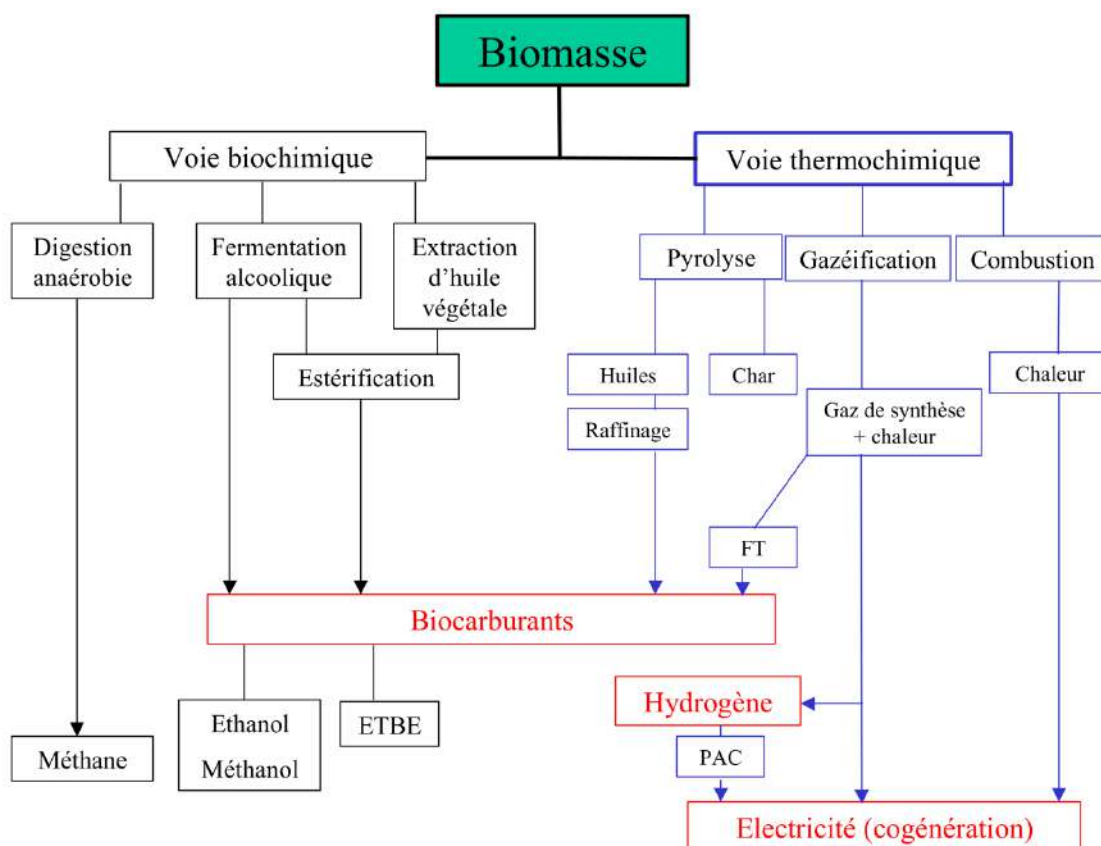


Figure 2. Procédés de valorisation énergétique de la biomasse [3].
 FT : Fischer Tropsch, PAC : Pile à combustible, ETBE : Ethyle Tertio Butyle Ether

2.1 Les voies thermochimiques

La conversion thermochimique représente la majorité de la conversion énergétique de la biomasse. Elle regroupe trois voies faisant changer la nature chimique du produit d'origine sous l'effet de la chaleur.

Le tableau suivant précise pour chaque transformation les conditions en température et atmosphère ainsi que les produits obtenus.

Tableau 1. Tableau récapitulatif des conditions opératoires des différentes transformations thermochimiques [3]

Transformation Thermochimique	Températures	Atmosphère	Produit
Combustion	800-1300°C	CO ₂ , O ₂ (air)	CO ₂ +H ₂
Pyrolyse	400-700°C	Inerte (absence d'O ₂)	Solide carbone (charbon) + liquide (goudron) + gaz
Gazéification	700-900°C	Gaz réactif air, CO ₂ , H ₂ O, air, O ₂	Essentiellement mélange gazeux H ₂ , CO ₂ , CH ₄

2.1.1 La combustion

La combustion est la manière de valorisation énergétique la plus connue et la plus utilisée. La combustion de la matière organique contenue dans la biomasse est une méthode de valorisation énergétique. Pour qu'elle soit possible, on réunit la matière combustible et le comburant (oxygène, air) et une étincelle pour démarrer la réaction chimique. Selon Xu[4], la combustion de la biomasse comprend le processus de séchage, le processus de pyrolyse ou dé-volatilisation s'il y a la présence d'oxygène, et le processus de combustion du charbon. Ces processus couvrent des transformations physiques et chimiques complexes, qui impliquent la combustion homogène de substances volatiles, la combustion hétérogène de charbon, le transfert de chaleur, le transfert de masse ainsi que la fusion des cendres.

La combustion se déroule sous l'influence d'une température de plus de 900°C, en présence d'air dans une chaudière ou générateur d'air chaud ou four. Ses produits sont CO + CO₂ + H₂O + goudron (=benzène) + hydrocarbures (=méthane), et la chaleur, celle-ci est exploitée directement pour le chauffage ou indirectement à la production du travail mécanique ou/et d'électricité. La plupart des matériaux de la biomasse sont chimiquement et physiquement hétérogènes, et leurs composants ont des réactivités différentes et donnent des produits différents[4-6].

Plusieurs travaux scientifiques s'intéresseraient à la compréhension de la complexité du phénomène qui prend lieu au cours de la combustion de la biomasse, et expliquaient ces différents mécanismes, les décortiquaient plus simplement possible en :

- *Séchage* : la température élevée de l'environnement évapore l'eau contenue à la surface des particules de la biomasse, simultanément avec le processus de séchage, on arrive progressivement à la valeur de sorption maximale (plus d'eau liquide)[5, 7]. Le temps de ce processus

est le temps nécessaire d'atténuer 95% de l'humidité de la biomasse[8].

- *Pyrolyse* : La biomasse se décompose, progressivement, en résidus de charbon et en gaz volatils. Au cours du processus de pyrolyse, les pores du solide sont élargis ce qui favorise leur interaction avec le solide chaud ; et la particule solide devient simplement plus poreuse « la biomasse se transforme en gaz »[5].

Dans le processus de combustion, on exploite principalement du bois, mais il existe des matériaux plus efficaces et faciles à cultiver comme le foin, céréales de paille, saule cultivé spécifiquement pour la combustion, ainsi que couper du bois augmente la valeur calorifique [2].

Le but de la combustion est d'extraire, par voie thermo-chimique, la totalité de l'énergie contenue dans la biomasse par oxydation. Le bois se décompose sous l'effet de la chaleur, au cours de la combustion. En présence du comburant (air), les gaz chauds s'oxydent, le charbon se gazéifie et on perd 80 à 90% du poids de la phase solide par gazéification. Cette conversion thermo-chimique produit le monoxyde de Carbone CO, Hydrogène H₂, et aussi les hydrocarbures C_nH_m qui doivent être brûlés dans la chambre de combustion [9].

La combustion de la biomasse, notamment du bois, est un ensemble de processus chimiques et physiques hétérogènes : la gazéification de la phase solide La combustion des matières solides ainsi qu'homogènes : l'oxydation. Elle comprend des réactions de dé-volatilisation, des réactions incomplètes, combustion de la phase gazeuse ainsi celle de la phase solide[2].

La combustion du bois se fait en quatre sous-étapes : séchage, pyrolyse-gazéification, oxydation des gaz et combustion des résidus carbonneux[10]. On définit la durée totale du processus de la combustion de la biomasse, par le temps qui s'écoule entre le début du séchage et la fin de la combustion du charbon. Le temps de la combustion est directement proportionnel à la densité des particules [11].

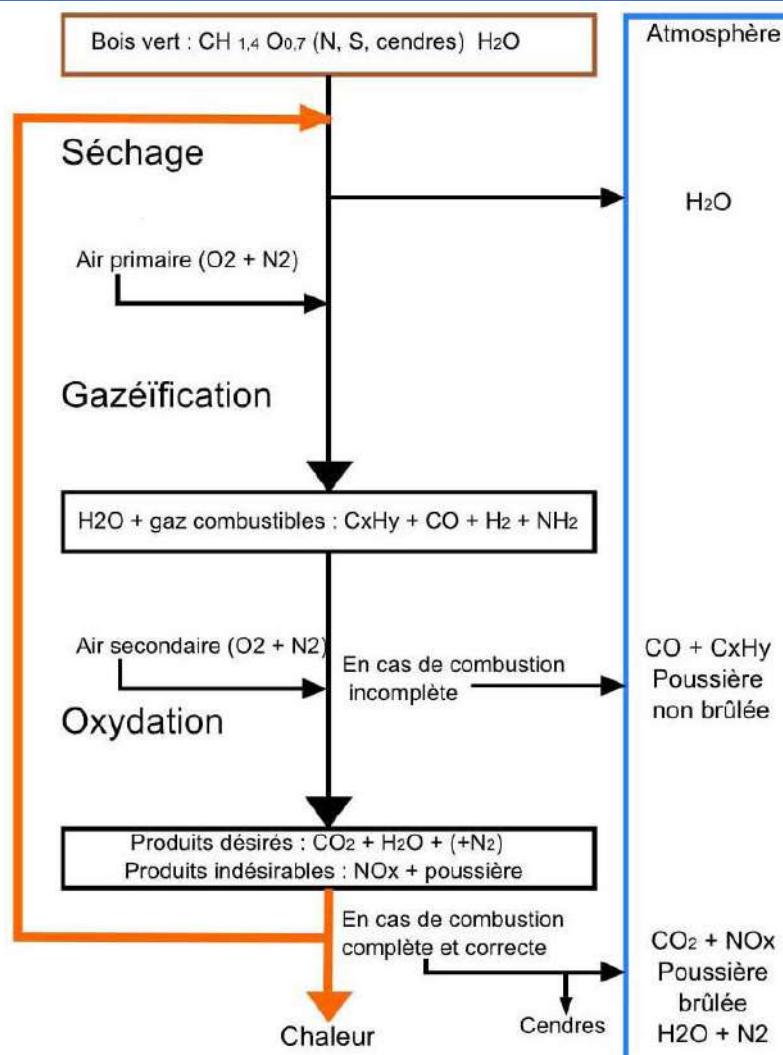


Figure 3 Procédés de combustion [10]

Types de combustion

- Combustion complète

La combustion complète ou idéale est difficilement réalisable en pratique. Les conditions de mise en œuvre du foyer (conception, réglage, excès d'air, faible humidité...) doivent être favorables. Les fumées libérées sont seulement le dioxyde de carbone CO_2 , vapeur d'eau H_2O et dioxygène O_2 , le diazote N_2 de l'air initialement introduits. La combustion complète est inévitablement accompagnée d'oxyde d'azote NO_x et de particules minérales [12].

- Combustion incomplète

La combustion incomplète est généralement due au mauvais réglage du foyer et/ou l'utilisation du bois trop humide. Cela produit des émissions importantes de polluants gazeux et particulaires. Le monoxyde de carbone

CO est le plus abondant dans ce cas, accompagné par d'autres polluants gazeux tels que le méthane CH_4 , des composants organiques volatils non méthanique, des hydrocarbures aromatiques polycycliques...etc. ainsi que la formation du protoxyde d'azote N_2O . Ces gaz polluants émis sont associés par des particules fines et ultrafines [12].

2.1.2 La Pyrolyse

Le mot pyrolyse est pris dans le sens étymologique de pyro (feu) et lyse (coupure). La pyrolyse est un procédé permettant de transformer le bois en gaz combustible, produit condensables (eau, goudrons) et du charbon de bois. Il s'agit de la décomposition thermo-chimique du composé organique, par augmentation importante de la température, sous vide ou en présence d'un gaz inerte. La température de pyrolyse du bois est toujours comprise entre 425 et 475°C. La matière organique solide est soumise à de hautes températures allant de 300 °C à 1 000 °C dans un environnement dépourvu d'oxygène [13]. On observe quatre grandes étapes dépendantes de la température.

- En dessous de 120°C : l'élimination de l'eau, le bois est séché.
- Entre 120 et 250°C : la dégradation du bois et la décomposition des hémicelluloses.
- Entre 250 et 500°C : la décomposition de la cellulose et la lignine et la formation des produit légers (H_2 , CO, CH_4 ...), et des produits lourds qu'on appelle goudrons.
- Au-delà de 500°C : la dégradation des goudrons et la formation du charbon

La pyrolyse est nettement plus rapide sous vide qu'en présence d'un gaz inerte. Les procédés traditionnels travaillent dans des températures entre 300 et 600°C pour produire le charbon du bois. Ce charbon a une faible masse volumique et un pouvoir calorifique élevé, mais il perd 50 à 70% de son énergie initiale dans les produits volatils lors de la carbonisation [14].

La température et le temps d'atteinte (le temps au bout duquel on atteint la température désirée) sont les facteurs principaux qui modifient les proportions du gaz, goudrons et du charbon. Le temps d'atteinte dépend de nombreux paramètres : le transport thermique, le rapport surface/volume et autres [14].

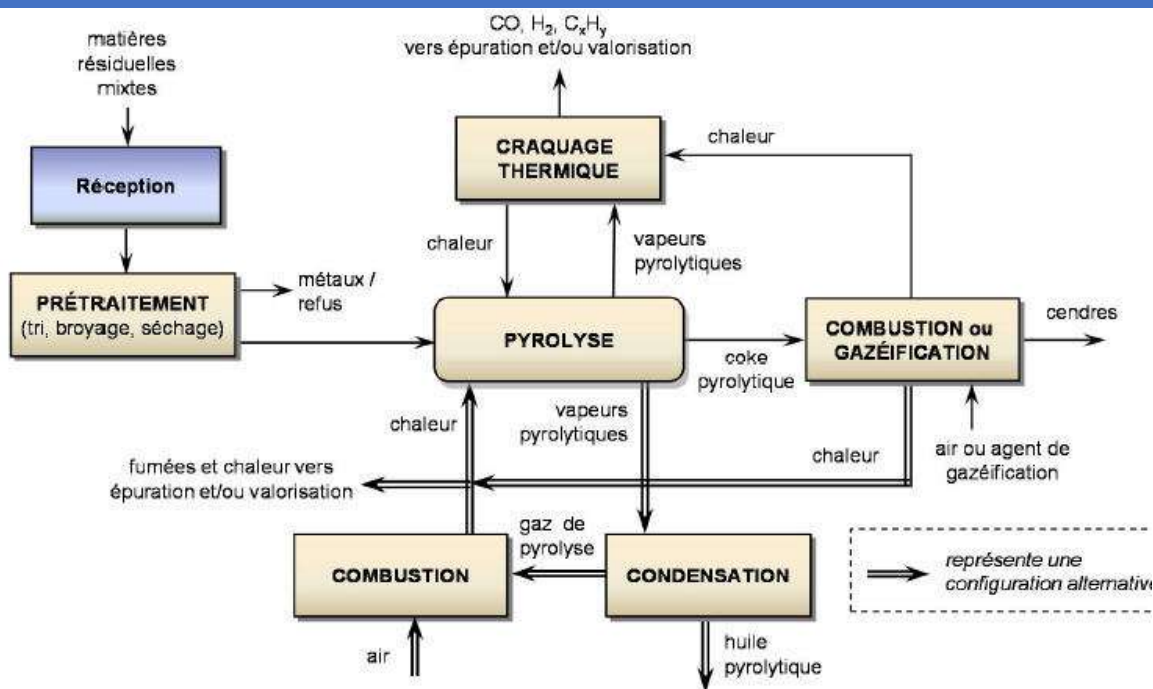


Figure 4. Schéma simplifié de la Pyrolyse [15]

Types de pyrolyse

Suivant la vitesse de chauffage des particules de la biomasse (transfert thermique lent ou rapide), on distingue deux types de pyrolyse. Les ruptures des liaisons complexes et les processus de réarrangement dans les polymères, constituant le bois et les conditions des réactions, conduisent à une vaste gamme de produits.

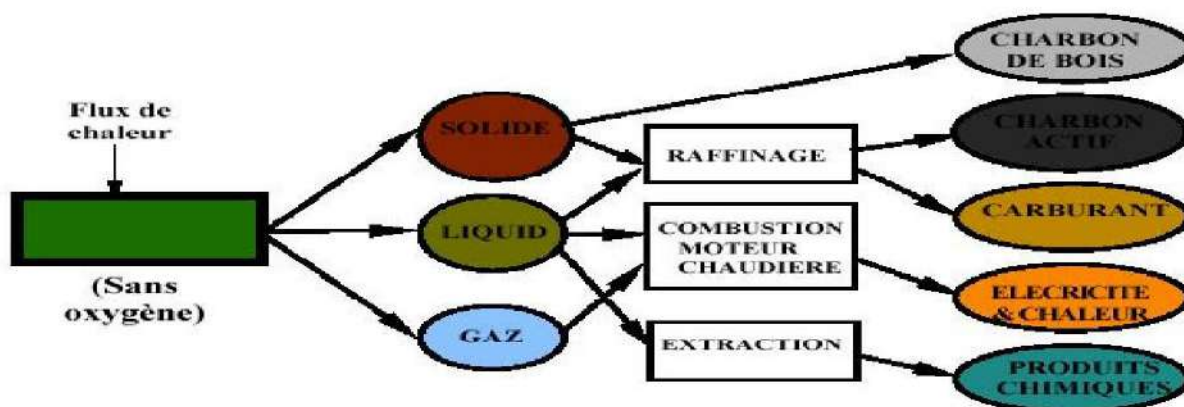


Figure 4. Produits issus de la pyrolyse de biomasse et leurs fins [2]

- *Pyrolyse lente*

La pyrolyse lente s'opère pour des températures comprises entre 300 et 500°C pour des densités de flux de chaleur faibles (<10kW/m2) [16]. C'est une technique classique et très ancienne, utilisée pour la production de

charbon de bois. Elle a pour objectif ultime la production du charbon, d'où son appellation de procédé de carbonisation. Le charbon, produit lors de cette conversion, est utilisé pour des fins domestiques et industrielles (Charbons actifs, métallurgie, chimie, chauffage...).

Lorsqu'on chauffe le bois lentement et avec un faible gradient de chaleur (<50°C/min), on observe la séquence de réactions comme suit :

- Déshydratation du bois, pour des températures proches de 100°C.
 - Dégagement de CO₂, H₂ et acide acétique, entre 100 à 250 °C.
 - Dégagement gazeux rapide (CO, H₂, CH₄) et formation de goudrons entre 250 à 500 °C
 - Formation de charbon de bois pour des températures supérieures à 500°C [17].
- *Pyrolyse rapide (flash)*

Récemment, on utilise un procédé de pyrolyse dite rapide ou flash, qui produit des liquides énergétiquement ou chimiquement valorisables, appelés huiles de pyrolyse. Les particules de la biomasse sont soumises à des forts gradients de température dans un temps extrêmement court. Les vapeurs formées sont, ensuite, refroidies rapidement. La pyrolyse rapide produit peu de charbon et un mélange liquide et /ou gazeux. Les produits et la composition sont en fonction de la nature de la biomasse, les conditions de la pyrolyse, et du temps de séjours dans le réacteur [17].

2.1.3 La Gazéification

La gazéification est un procédé thermo-chimique, dans lequel le combustible solide hétérogène se transforme en un combustible gazeux plus homogène, facile à utiliser. L'oxydation partielle (charbon, bois autre biomasse), sous une température de 800°C et en présence d'un gaz réactif air, O₂, CO₂, H₂O...etc., produit un mélange gazeux H₂, CO₂, CH₄, CO etc. C'est une réaction d'oxydoréduction à haute température, favorisée par la présence de la vapeur d'eau et/ou CO₂[18]. Le mécanisme global de réaction est très complexe. Des réactions thermo-chimiques de pyrolyse, oxydation et réduction se sont fortement couplées. Le but de cette transformation est d'obtenir un mélange gazeux combustible, démunie de tous goudrons ou autre matières solide, à partir de la biomasse solide. Le gaz produit est utilisé pour alimenter des moteurs thermiques ou bien des chaudières. La gazéification se décompose en une pyrolyse suivie par une oxydation du carbone. Le CO₂ peut être obtenu lors de la pyrolyse, ou lors d'une

oxydation partielle, en introduisant un minimum d'oxygène pour brûler les gaz volatils et une partie des goudrons [19-21].

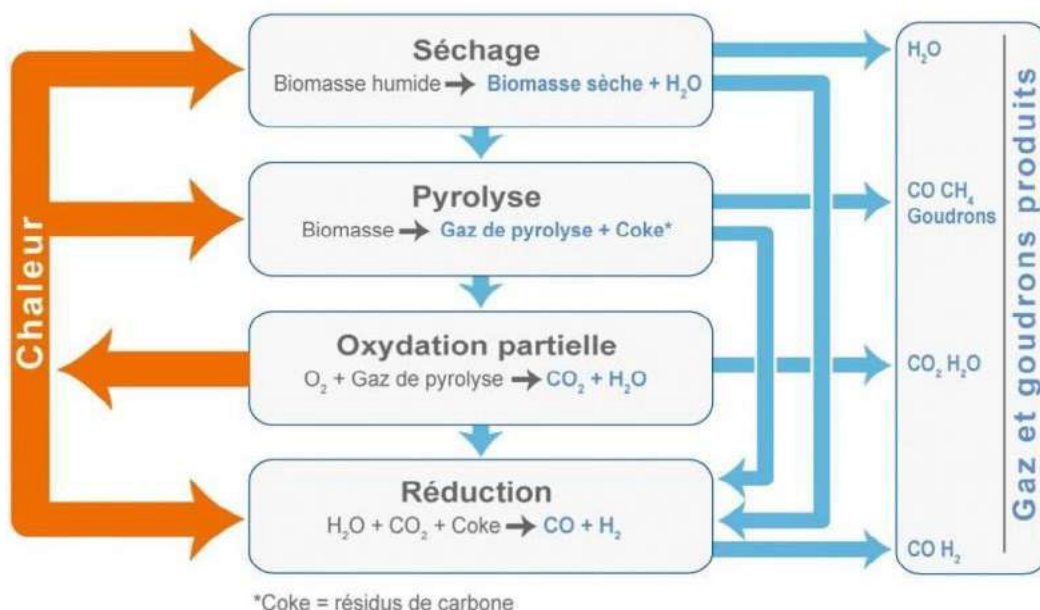


Figure 5 Schéma simplifié de la Gazéification de la biomasse [22]

Le procédé de gazéification permet d'utiliser des moteurs et turbines pour la cogénération d'électricité et de chaleur nettement plus efficace que celle des anciens systèmes à vapeur. Le rendement électrique augmente même pour des faibles puissances. Avec leur rendement élevé, les installations de gazéification peuvent être élargies sans accroître les superficies d'approvisionnement, ce qui diminue le coût d'investissement et d'approvisionnement. Les émissions des GES et les quantités des gaz mis en réactions de gazéification sont aussi réduites par rapport au procédé de la combustion. Cette technique est très intéressante en termes écologique et environnemental [2]

Les étapes de gazéification (fig.7) :

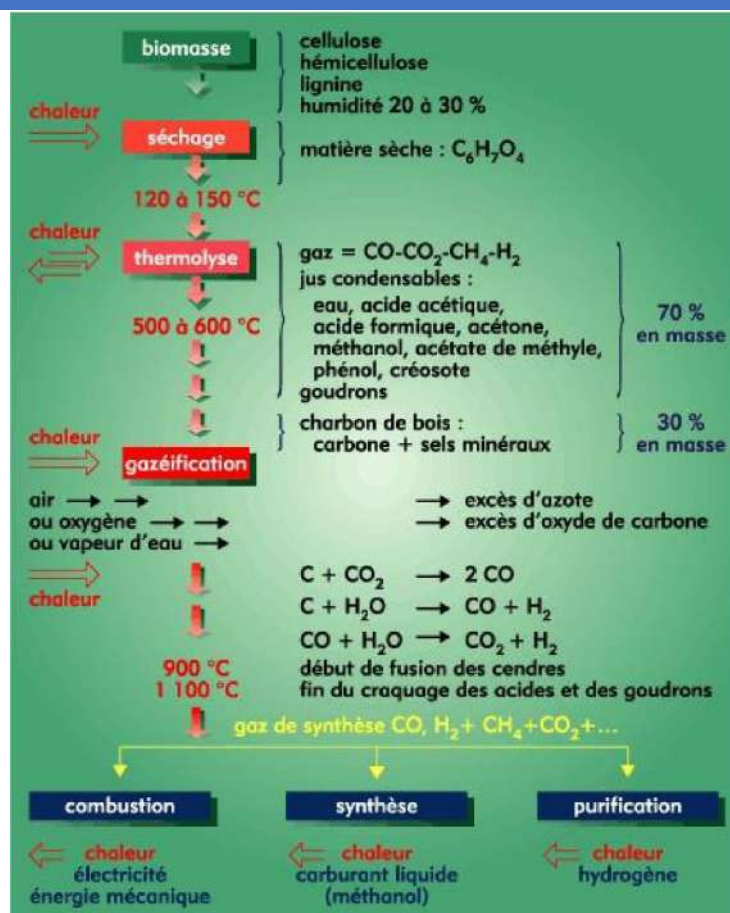
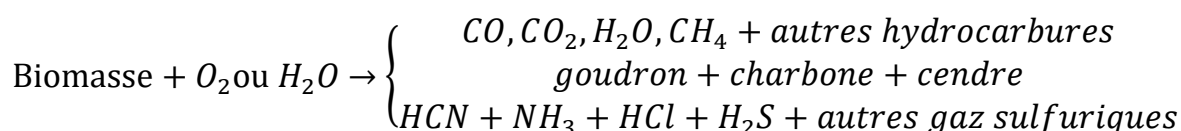


Figure 6 Les étapes de la gazéification[23]

Les propriétés du solide (granulométrie, densité, porosité...etc.) influent sur la conduite des procédés de gazéification (gazéification, pyrolyse, oxydation homogène et hétérogène). Le transfert thermique et massique, les gaz de pyrolyse diffusés, les fumées de l'oxydation, la quantité de l'air admise dans la chambre de combustion, contrôlent les réactions [23, 24].

Produits de gazéification et leurs traitements

La gazéification transforme la biomasse en monoxyde CO de carbone et en hydrogène H_2 avec des faibles quantités de méthane CH_4 . La portion du dioxyde de carbone CO_2 varie en fonction du procédé et de la matière première. Le mélange gazeux produit contient aussi la vapeur d'eau H_2O , l'Azote N_2 ainsi que des traces de divers composés. D'autres hydrocarbures, goudrons en fonction de la qualité de la matière première, le procédé utilisé ainsi que du type de réacteurs [25, 26]:



Les gaz produits, lors de la gazéification, sont accompagnés par des éléments indésirables comme : les poussières, les cendres goudrons, etc.

Les particules de poussières sont du charbon et d'une faible portion de cendres. Le dépoussiérage des gaz se fait par cyclone, filtres, les laveurs, etc. La taille et la concentration des poussières dépendent de la nature de la biomasse et du procédé de gazéification.

Les techniques d'élimination ou d'épuration des goudrons varient selon la nature de la matière première, le procédé de gazéification et la concentration des goudrons : traitement thermique, le craquage catalytique, le lavage humide la condensation forcée..etc. [2, 26].

2.2 Voies biochimiques

La conversion biochimique de la biomasse est un moyen naturel de décomposition de la masse biologique sous l'action bactériale. Les procédures technologiques de la valorisation biochimique ont pour but l'obtention un combustible facile à exploiter, par le biais de ces actions naturelles.

Les combustibles produites dites biocarburants sont deux familles

- Biocarburants liquides : l'éthanol (ou les alcools), biodiesel, biofuel. Incorporés en fraction dans les hydrocarbures.
- Biocarburants gazeux : le biométhane utilisé comme un gaz naturel.

Tableau 2. Présentation des biocarburants [27].

	1 ^{er} génération	2 ^{eme} génération	3 ^{eme} génération
Origine des substrats	Betteraves, céréales, canne à sucre pour éthanol Colza, tournesol, soja, palme pour le biodiesel	Déchets organiques, partie ligno-cellulosique des végétaux, bois	Microalgues
Procédés mis en œuvre	Fermentation, transestérification	Gazéification, hydrolyse enzymatique	Méthanisation Gazéification
Produit final	Bioéthanol, biodiesel	Biométhane, biodiesel, biohydrogène	Biométhane, bioéthanol, biodiesel
Rendement énergétique Mtep/ha/an	1à4	3.5 à 5	20 à 40
Stade de maturité technologique	Industriel	Industriel à court terme	Recherche/pilote

2.2.1 Fermentation alcoolique ou aérobie

La fermentation est un procédé aérobie. Pour certaines conditions de température et de concentration, la matière organique se dégrade sous l'action des levures. Il existe plusieurs sortes de matières premières alcooligènes, on peut en avoir deux types de biocarburants :

Bioéthanol (ou plus globalement les bio-alcools), produit à partir de la canne à sucre, maïs, blé, betteraves, il est incorporé en fraction de volume dans les supercarburants sous forme d'Ethyl Tertio Butyl Ether(ETBE).

Les esters d'huiles végétales (huile de colza, tournesol, Soja palme d'huile, etc.) qui produisent le biodiesel pour une incorporation dans le gasoil ; et le biofuel pour une incorporation dans le kérosène.

Le bioéthanol de première génération est produit à partir de la transformation des sucres issus des plantes sucrières (canne à sucre, betteraves), et des plantes amylacées (blé, maïs, sorgho). Les coproduits des cannes à sucre sont les plus valorisée, les coproduits de blé, betteraves sont destinés aux aliments de bétails.

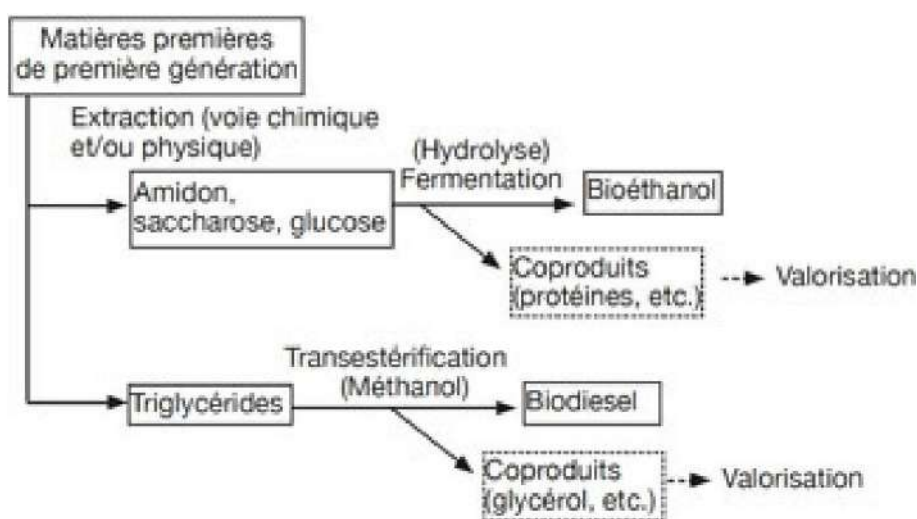


Figure 7 Production de biocarburants de 1^{ere} génération et voies de valorisation parallèle (en pointillés) [28].

Le bioéthanol de 2^{eme} génération est extrait de la biomasse lignocellulosique abondante et renouvelable, sans concurrence aux besoins alimentaires : paille de céréales, miscanthus, résidus de l'industrie forestière et des cultures dédiées. La deuxième génération offre l'avantage considérable d'utiliser d'autres constituants végétaux différents, et elle ne présente pas une concurrence aux besoins alimentaires.

Le biodiesel de 1^{ère} génération, appelé EMHV (Ester Méthylique d'Huile Végétale), est produit des huiles végétales issues de plantes oléagineuses. Les huiles extraites du broyage des graines, sont soumises à une transestérification avec un alcool pour donner L'EMHV. On utilise principalement : Soja (*Glysinemax*), canola (*Brassianapus*), tournesol (*Helianthus annuus*), etc. [29].

La 2^{ème} génération du biodiesel utilise les mêmes ressources végétales utilisées pour la production du bioéthanol, mais avec un procédé différent appeler BtL (Biomasse to liquide). On utilise la voie thermochimique pour transformer la biomasse lignocellulosique en huile par la pyrolyse contrôlée, suivie par la gazéification qui donne l'hydrogène et le monoxyde du carbone. Le procédé permet de fabriquer de méthanol et de DME (Diméthyléther) [30].

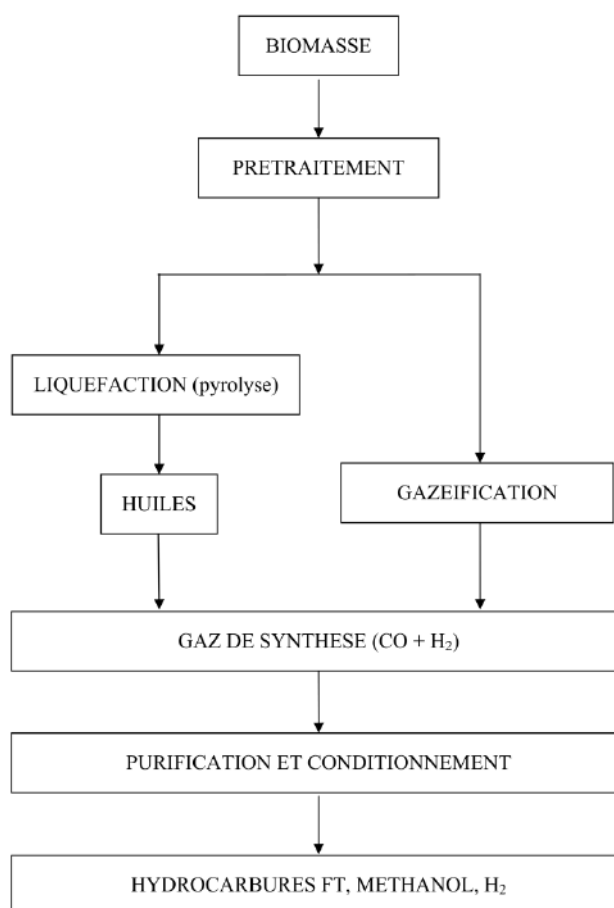


Figure 8 Procédé de production par voie thermochimique de biodiesel[30]

2.2.2 Fermentation méthanique ou anaérobique

La décomposition microbologique de la masse biologique, en méthane, est une chaîne de processus d'anaérobies très complexes en présence de plusieurs espèces de micro-organisme.

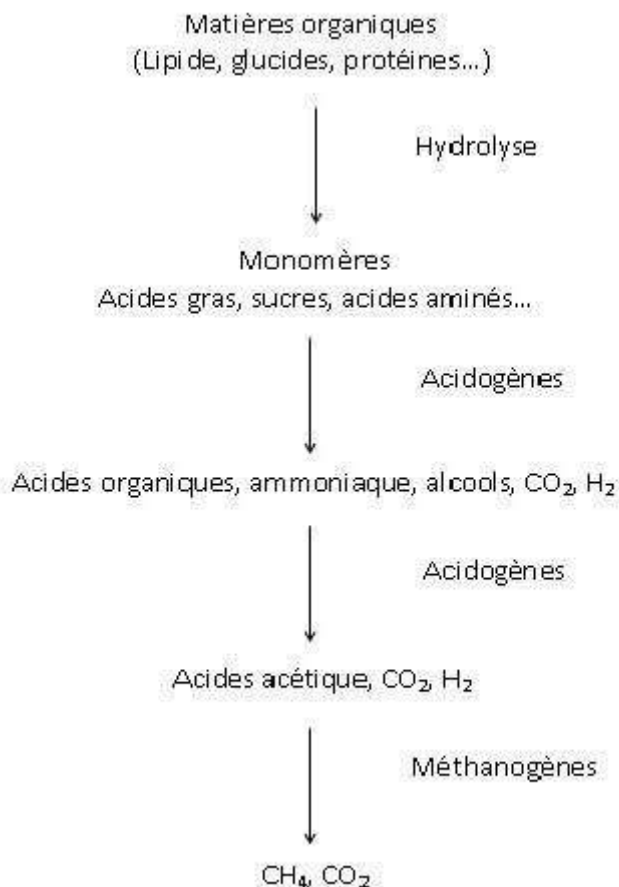


Figure 9 Méthanisation de la matière organique [31]

La température, l'acidité de milieu, l'agitation mécanique ou par circulation des gaz et le temps du séjour sont les principaux paramètres de fonctionnement de ce processus. La constitution du mélange gazeux est :

Tableau 3. Composition du mélange gazeux produit par la fermentation méthanique [31]

Constituants	% Volume
CH ₄	55-75
CO ₂	25-45
H ₂ S	0-1.5
NH ₃	0.05

Un effort considérable à travers le monde est fourni pour la valorisation énergétique de la portion organique dans les déchets urbain et para-urbain. Due à ses intérêts écologiques, la méthanisation a, donc, pour mérite d'être simultanément une filière de traitement des déchets organiques, une filière de production d'énergie renouvelable et de fertilisant d'origine non-chimique.

On note, toutefois, que la méthanisation peut toujours être optimisée et contrôlée même dans les décharges urbaines. Le tableau suivant donne le

nombre des unités installées, utilisant les procédés de la fermentation méthanique et ayant des capacités supérieures à 2500t/an, en Europe :

Tableau 4. Unités installées par pays [31]

Pays	Nombre d'unités	Capacités (tonnes déchets /an)
Autriche	15	2500-160 000
Allemagne	46	2500-120 000
Danemark	25	10 000-190 000
Suède	9	3 000-105 000
Pays-Bas	5	10 000-85 000
Italie	4	2 500-300 000
France	1	85 000

2.2.3 Autres voies biochimiques

Les microalgues

Les algues sont des organismes microscopiques et eucaryotes à croissance rapide qui peuvent effectuer la photosynthèse, et simultanément fixer le CO₂ atmosphérique. Les cellules d'algues contiennent une grande quantité de précurseurs de biocarburants tels que l'amidon et les lipides. Au cours des dernières décennies, les microalgues sont devenues une matière première potentielle pour la production de bioénergie, explorées pour produire des liquides (bioéthanol, biodiesel) et gazeux carburants (biométhane, bio-hydrogène). Cette technologie comporte quatre aspects importants dont la sélection de la souche et ses cultures, les techniques de récolte, les voies de conversion et le prétraitement de la biomasse. La qualité et la quantité de la biomasse, la source de média disponible, le système de culture ainsi que les conditions environnementales contribuent collectivement à la sélection de la souche algale spécifique. Plusieurs tentatives approfondies sont entamées, mais, la technologie est face de divers obstacles et limitations, pour améliorer sa faisabilité opérationnelle et rendre le biocarburant à base d'algues techniquement et économiquement viable. Leurs cultures sont réalisables dans des bassins ouverts ou fermés, avec un apport nutritionnel et soutirage continu des algues produites. Il existe plusieurs groupes d'algues : *Dinophytes*, *Chrysophytes*, *Prymnesiophyta*, *Raphidophytes*, *Diatommées*, etc. L'extraction des huiles et des lipides, et les transformer en biocarburants par des voies classiques, est l'étape qui suit la culture des algues, stabilisée dans le temps et en concentration [31, 32].

La production d'hydrogène

Considérée comme une future source d'énergie renouvelable. Elle est obtenue par plusieurs procédés : gazéification de charbon, reformage du gaz naturel, l'électrolyse de l'eau et de la biomasse, les algues. Beaucoup de travaux sont réalisés sur la synthèse de l'hydrogène par voie biologique. On la produit par :

- La fermentation anaérobie des composés organiques à travers des micro-organismes comme source de carbone.
- Les Procédés photo-biologiques résultant de la transformation de la matière organique et de l'eau avec la lumière comme source d'énergie.
- La combinaison de ces voies [31].

3 Conclusion

Au long de ce chapitre, nous avons récapitulé les transformations et les conversions énergétiques possibles de la biomasse. La biomasse, qui est une forme reconnue d'énergie renouvelable, est considérée comme un moyen efficace de la préservation de l'environnement et la lutte contre les impacts climatiques de la civilisation, notamment, le réchauffement climatique, le traitement des déchets, en substituant l'utilisation de l'énergie fossiles. La bonne classification des matières premières organiques permet d'opter une conversion énergétique adéquate. Plusieurs transformations et conversions de la masse organique existent, regroupées sous de grandes familles thermochimiques, biochimiques.

Nous avons pu regrouper les conversions thermochimiques de la biomasse comme suit : la combustion, la pyrolyse et la gazéification, et les conversions biochimiques : la fermentation alcoolique (aérobie) et méthanique (anaérobie), les algues, la production d'Hydrogène et d'autres.

Outre, ces conversions ont des enjeux environnementaux importants contribuant à la valorisation énergétique des déchets (urbain, ménager, industriel, agricole, etc.), la limitation des quantités des ordures, la production des agrès bio destinés à l'agriculture, les réductions des émissions des gaz à effet de serre, l'amélioration du cadre de vie et la création de la richesse et de l'emploi.

Références

1. Européenne, l.U., *DIRECTIVE 2009/28/CE DU PARLEMENT EUROPÉEN ET DU CONSEIL*. Journal officiel de l'Union européenne, 2009. **5.6.2009**: p. L 140/16-L 140/62.
2. Djamila, K., *Contribution à la valorisation énergétique de la biomasse*, in *Physique* 2011, abou Baker Belkaid Telemcen.
3. Diedhiou, A., *Étude hydrodynamique et valorisation énergétique pour transformation thermochimique de déchets de biomasse pour l'alimentation d'une briqueterie*. 2017.
4. Xue, A., et al., *Pyrolysis model of single biomass pellet in downdraft gasifier*. Transactions of Tianjin University, 2016. **22**(2): p. 174-181.
5. Babu, B.V. and A.S. Chaurasia, *Modeling for pyrolysis of solid particle: kinetics and heat transfer effects*. Energy Conversion and Management, 2003. **44**(14): p. 2251-2275.
6. Normandie, I.R., *Projet Physique : Modélisation de la combustion de la biomasse*. 2020/2021. p. 1-36.
7. Haseli, Y., *Modeling combustion of single biomass particle*, in *Technische Universiteit Eindhoven*. 2012, Universiteit Eindhoven: Eindhoven.
8. Porteiro, J., et al., *A Model for the Combustion of Large Particles of Densified Wood*. Energy & Fuels, 2007. **21**(6): p. 3151-3159.
9. Yuntewi, E.A.T., et al., *Laboratory study of the effects of moisture content on heat transfer and combustion efficiency of three biomass cook stoves*. Energy for Sustainable Development, 2008. **12**(2): p. 66-77.
10. Chafai Azri, A.T., Mohamed Moncef Serbaji et Khaled Medhioub *Etude des résidus de combustion des fuels liquide et solide et de traitement chimique du phosphate brut dans la ville de Sfax (Tunisie)*. Pollution atmosphérique [En ligne], (174).
11. Xu, Y., et al., *Numerical simulation of high-temperature fusion combustion characteristics for a single biomass particle*. Fuel Processing Technology, 2019. **183**: p. 27-34.
12. Chevrier, F., *Chauffage au bois et qualité de l'air en Vallée de l'Arve : définition d'un système de surveillance et impact d'une politique de rénovation du parc des appareils anciens*, in *Océan, Atmosphère*. 2016, Université Grenoble Alpes.
13. Numazawa, S., *Contribution à l'étude de la pyrolyse lente sous pression du bois. Détermination des paramètres optima du procédé et caractéristiques des produits obtenus*. 2000. p. 229 f.
14. Descoins, N., *Outils de simulation des fours tournants dédiés à la pyrolyse de déchets : modélisation dynamique du couplage transport de la charge-transferts de chaleur-réactions chimiques*. 2003. p. 278 p.
15. EFFICACE., M.M. *EFFICACITE ENERGETIQUE ET GES EN PYROLYSE*. 2021 [cited 2012 JUNE 2021]; Available from: <https://www.mamunicipaliteefficace.ca>.
16. Le Brech, Y., *Analysis of primary chemical mechanisms of biomass pyrolysis*

- Analyse des mécanismes primaires de pyrolyse de la biomasse*. 2015, Université de Lorraine.
17. EIBNER, S., *Pyrolyse flash de biomasse lignocellulosique : comment catalyser la désoxygénation au cours des mécanismes primaires et secondaires ?*, in *Institut International de l'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement (2iE, Ouagadougou)*. 2015, Ecole Nationale Supérieure de Chimie de Montpellier.
 18. Matsumura, Y., et al., *Biomass gasification in near- and super-critical water: Status and prospects*. *Biomass and Bioenergy*, 2005. **29**(4): p. 269-292.
 19. P. Girard, L.V.d.S., *Valorisation thermochimique de la biomasse : la Gazéification*. 2007, CIRAD.
 20. Ahmad, A.A., et al., *Assessing the gasification performance of biomass: A review on biomass gasification process conditions, optimization and economic evaluation*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016. **53**: p. 1333-1347.
 21. G. Vuillier, J.L.C., A. Ilinca, *La Filière Biomasse : Etat Des Lieux Et Valorisation Energétique*. Mai 2009, laboratoire de recherche en énergies éolienne, Université du Québec à Rimouski.
 22. ENERGIES, C.D. *Gazéification*. 2020 [cited 2021 JANUARY 2021]; Available from: <https://www.connaissancedesenergies.org>.
 23. Wilson, L., et al., *Thermal characterization of tropical biomass feedstocks*. *Energy Conversion and Management*, 2011. **52**(1): p. 191-198.
 24. McKendry, P., *Energy production from biomass (part 3): gasification technologies*. *Bioresource Technology*, 2002. **83**(1): p. 55-63.
 25. Santos, R.G.d. and A.C. Alencar, *Biomass-derived syngas production via gasification process and its catalytic conversion into fuels by Fischer Tropsch synthesis: A review*. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2020. **45**(36): p. 18114-18132.
 26. Li, C. and K. Suzuki, *Tar property, analysis, reforming mechanism and model for biomass gasification—An overview*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009. **13**(3): p. 594-604.
 27. Scarwell, H.J., *biocarburant : chronique d'un éternel retour annoncé*. *Pollution atmosphérique [en ligne]*, 2013. **217**.
 28. Nicolas Jacquet, L.D., Bastien Jadot, Thierry Kenne, Nicolas Villani, Guillaume Maniet, Pierre-Louis Bombeck, Sébastien Gillet & Aurore Richel, *les initiatives commerciales de bioraffinage en région Wallonne(Belgique) : production de biocarburants en voies de valorisation connexes (synthèse bibliographique)*. *Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement*, 2015. **19**.
 29. Yuan, J.S., et al., *Plants to power: bioenergy to fuel the future*. *Trends in Plant Science*, 2008. **13**(8): p. 421-429.
 30. D. Ballerini, J.-L.L., *le plein de biocarburants ? Enjeux et réalités*. 2007: Editions Orphy.
 31. Bellirini, D., *les biocarburants : Répondre aux défis énergétiques et environnementaux des transports*. 2011: Edition TECHNIP.
 32. Bhushan, S., et al., *Current trends and prospects in microalgae-based bioenergy production*. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2020. **8**(5): p. 104025.

CHAPITRE III :
BIODIESEL–DIESEL–PROPANOL :
CARACTERISATIONS,
PERFORMANCE DU MOTEUR ET
ANALYSE DES EMISSIONS

Biodiesel–Diesel–Propanol :

Caractérisations, performance du moteur et analyse des émissions

1 Introduction

La sécurité énergétique est un problème mondial important. Le débat continu sur la réserve en baisse de combustibles fossiles tels que le diesel, incite les chercheurs à trouver une source d'énergie) alternative qui peut réduire la demande de combustibles fossiles et ainsi les préserver plus longtemps.

Les décideurs politiques, en particulier dans les pays développés, ne cessent de promouvoir cette direction. Au cours de la dernière décennie, les émissions globales annulées de CO₂ ont augmenté de 2,5% entraînant une augmentation de 2 ° C de la température mondiale[1]. Le biodiesel est l'un des biocarburants les plus accrédités au monde car ses propriétés de carburant sont analogues au diesel fossile en plus de son impact environnemental positif. De plus, la large gamme de matières premières disponibles pour la production de biodiesel dans le monde, y compris les plantes indigènes non comestibles, tels que les algues, les déchets et les huiles comestibles représentent l'un des facteurs les plus prometteurs pour le produire [1-4]. De grandes quantités de déchets tels que les huiles de cuisson usagées, les graisses de poulet et d'animaux, les déchets d'abattoirs, les déchets industriels ainsi que l'huile de marc de café usée qui ne conviennent plus à l'usage humain sont déversées illégalement dans les rivières ou les décharges, provoquant pollution de l'environnement et divers problèmes de santé[2, 5, 6]. Recycler les déchets des huiles de cuisson DHC comme carburant réduirait cette dégradation de l'environnement [7]. La production de biodiesel des DHC se traduit par des avantages illimités pour l'environnement et l'économie de l'industrie du biodiesel [6, 8]. L'application de mélanges biodiesel-diesel dans moteur à allumage par compression a été largement étudié dans la littérature[7, 9-11]. Avec une certaine forme de mélanges tels que le B20 ont déjà été commercialisés. Cela a motivé le chercheur à augmenter le pourcentage de

biodiesel dans les moteurs Combustion interne. Cependant, les émissions croissantes d'oxydes d'azote (NO_x) du biodiesel ; les mélanges diesel ont incité les chercheurs à introduire d'autres types de biocarburants dans les moteurs. Récemment, l'application d'alcools dans Les moteurs ont attiré beaucoup d'attention. Cela est dû à certains avantages des propriétés des alcools telles que une viscosité cinématique faible, de densité et propriétés d'écoulement à froid par rapport au biodiesel [12-14]. L'application d'alcools supérieurs tels que le Propanol (C₃H₈O)[15-17], Butanol (C₄H₁₀O)[15, 18, 19], et Pentanol (C₅H₁₂O)[19-22] a été signalé récemment. Les avantages de ces alcools par rapport aux alcools inférieurs (méthanol et éthanol) ont été prouvés et se sont traduits par une amélioration de certaines propriétés telles qu'une viscosité cinématique plus élevé, un pouvoir calorifique, un point d'éclair, un indice de cétane (CN) (autrement dit la qualité d'allumage) et une vitesse de flamme avec chaleur latente de vaporisation inférieure et risques de corrosion afin d'obtenir une meilleure miscibilité avec le biodiesel et le diesel sur une large plage de températures pour former des mélanges ternaires, et donc, de meilleures performances du moteur[14, 23]. Par ailleurs, il a été rapporté que ces alcools ont de faible lien à l'eau[17]. Cependant, les alcools présentent des propriétés différentes. Ces différences sont attribuées à la structure moléculaire variante de chaque alcool[23]. Par conséquent, plus d'analyses sont nécessaires pour caractériser les mélanges de biodiesel-diesel avec des alcools supérieurs.

Comme l'examen du Propanol dans les moteurs CI est encore limité, la plupart des travaux publiés traitant de l'utilisation du Propanol uniquement comme solvant dans les mélanges diesel pour former des mélanges ternaires[23]. Ainsi, ce travail vise à analyser expérimentalement les mélanges de carburants ternaires de diesel-biodiesel-Propanol en termes de propriétés du carburant et de performances du moteur et des émissions lorsque le biodiesel est dérivé de l'DHC, en tant que matière première à faible cout et avec des avantages environnementaux. La composition en acides gras (FAC) de l'ester méthylique d'huile de cuisson usagée MEDHC, le facteur saturé à longue chaîne (LCSF) et le degré d'instauration (DU) ont été analysés et comparés à la littérature existante. Deuxièmement, plusieurs propriétés ont été mesurées expérimentalement. De plus, diverses techniques de caractérisation importantes telles que la spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FT-IR), l'analyse thermogravimétrique (TGA), la calorimétrie différentielle à balayage (DSC) et la résonance magnétique nucléaire (RMN) des mélanges ont été analysées et discutées. Ces techniques peuvent également être adaptés à l'avenir car ils sont bon marché, fiables, précises, à détection facile et rapide. Elles

peuvent donc remplacer certains équipements coûteux utilisés pour évaluer la qualité et vérifier les composants de tous les carburants, en particulier pour la dégradation thermique, les propriétés d'écoulement à froid et l'identification des carburants [24]. Un tel travail pour les mélanges biodiesel-diesel-Propanol n'a pas encore été rapporté dans la littérature alors qu'il a été rapporté pour les mélanges biodiesel-diesel-bioéthanol [24], biodiesel-diesel-butanol [25, 26], et biodiesel-diesel-éther diéthylique [27]. Enfin, quelques performances moteur et émissions importantes les paramètres des mélanges sélectionnés ont été mesurés expérimentalement dans un moteur diesel monocylindre et comparé à ceux d'Euro diesel (D100). D'après les objectifs, il est évident que les résultats obtenus peuvent enrichir le corpus de connaissances sur l'application des mélanges diesel-biodiesel-alcools supérieurs dans les moteurs.

1.1 Propanol comme additif dans les moteurs à Combustion interne

Le Propanol est un alcool à trois carbones de formule (C_3H_8O) et poids moléculaire de 32,04. Il est incolore et inflammable. Le Propanol existe en deux isomères à savoir le 1-Propanol (également appelé n-Propanol), et 2-Propanol (également connu sous le nom d'isopropanol / alcool isopropylique). La production de Propanol à partir de produits pétrochimiques par oxo-synthèse est actuellement la plus économique [23]. Cependant, le Propanol peut également être produit via la fermentation de sucres dérivés de la biomasse cellulosique ou du maïs [16]. Il peut également être produit à partir de biomasse ou de déchets municipaux avec plusieurs parcours développés durables [28]. Les coûts de production élevés du Propanol ont été identifiés comme la principale raison pour empêcher l'utilisation du Propanol dans les moteurs à combustion interne. Cependant, les propriétés de carburant supérieures du Propanol par rapport à l'éthanol et au méthanol, telles qu'une densité plus élevée, CN, v , un point d'éclair ainsi qu'une température d'auto-inflammation plus basse et une chaleur latente d'évaporation ont favorisé l'étude du Propanol dans les moteurs Combustion interne [23]. Le tableau 1 présente une comparaison de certaines propriétés importantes des alcools, du biodiesel et du diesel [3, 17, 25, 29, 30].

Tableau 1. Comparaison des propriétés des alcools, biodiesel et diesel [3, 17, 25, 29, 30].

Propriétés	Méthanol	Ethanol	Propanol	Butanol	Biodiesel	Diesel
Masse moléculaire	32.04	46.07	60.1	74.12	*	142
CN nombre de	2	11	12	1	56	52

cétane						
Pouvoir calorifique inférieur LHV	20	26.8	30.6	338	37.52	42.6
Chaleur latente de vaporisation kJ/kg	1162	918	727.9	626	300	260
Carbone (par masse %)	37.5	52.2	60	64.82	77.1	84-87
Hydrogène (par masse %)	12.6	13.1	13.4	13.49	12.1	13-16
Oxygène (par masse %)	46.9	34.7	26.	21.59	10.8	0
Densité a 15°C	0796	0.794	0.804	-	0.832	0.81-0.89
Température d'Auto-allumage	658	698	573	616	534	200-220
Point de feu (°C)	11	13	22	37	*	74

*la masse moléculaire et le point de feu(combustion) du biodiesel dépend du type de matière première et des compositions d'acides gras.

Balamurugan and Nalini[15], ont étudié expérimentalement l'effet de l'ajout de n-Propanol au diesel à différents pourcentages (2 à 10% en volume) sur les paramètres d'émissions du moteur et des gaz d'échappement. À la suite de ce plan de mélange, une augmentation de l'efficacité thermique des freins (BTE) de (3,907 à 11784%) et une diminution de la consommation d'énergie spécifique des freins de (3,763 à 10,543%) ont été observées. Les auteurs ont attribué l'augmentation du BTE à une combustion pré-mélangée plus élevée de carburants mélangés à l'alcool, car le faible CN entraîne le pourcentage plus élevé de combustion à volume constant. Une

réduction de la température des gaz d'échappement (EGT), du monoxyde de carbone (CO) et des oxydes d'azote et des émissions de NOx a également été observée.

Vijayakumar and Kumar [31], ont évalué l'effet de l'ajout de 5% et 10% (en volume) de n-Propanol et de 1-butanol à des mélanges biodiesel-diesel à différentes charges sur les performances du moteur et des émissions. Les échantillons de carburant testés étaient le diesel, le D55 (55% de diesel, 25% de biodiesel, 10% de n-Propanol et 10% de 1-butanol) et le D65 (65% de diesel, 25% de biodiesel, 5% de n-Propanol et 5% de 1-butanol). Les résultats ont révélé que le D65 atteignait un BTE maximal avec une consommation de carburant spécifique au frein (BSFC), des émissions de CO et d'hydrocarbures (HC) minimales.

Muthaiyan et Gomathinayagam[17], ont examiné l'effet des mélanges Propanol-diesel sur les paramètres de performance du moteur, de la combustion et des émissions à différentes charges (0 à 100%). Quatre mélanges contenant 10, 15, 20 et 25% de Propanol en volume ont été testés. Les mélanges ont montré un délai d'allumage plus long (11 à 30% par rapport au diesel), des taux plus élevés de dégagement de chaleur maximal (34 à 59% par rapport au diesel), une durée de combustion plus faible (8 à 15% par rapport au diesel), un BTE plus faible (23,89 –25,4% contre 26,2 pour le diesel). De plus, les mélanges réduisent la fumée (51 à 74% par rapport au diesel) et les NOx (51 à 74% par rapport au diesel). Une tendance similaire a été observée dans les émissions de CO, qui ont considérablement diminué.

Yusri et al.[23], ont passé en revue diverses études sur l'application du Propanol dans les moteurs diesel CI. On a remarqué que les émissions de NOx ont signalé une diminution dans la littérature tandis qu'une augmentation dans certains autres. Une tendance similaire a été observée pour le BTE. BSFC aurait augmenté.

2 Matériaux et méthodes

2.1 Matériaux, équipements et analyses préliminaires des propriétés des déchets des Huiles de cuisson

L'huile de cuisson a été récupérée dans un restaurant local. Les produits chimiques nécessaires ont été achetés auprès d'un fournisseur local. Le D100 a été acheté dans une station-service locale (Euro-Diesel). Le tableau 2 présente l'équipement utilisé pour déterminer les propriétés physiques et chimiques des mélanges DHC, D100,ME-DHC et biodiesel-diesel-Propanol[27]. Le tableau 3 montre les propriétés de base de l'OMD en plus

d'une comparaison avec les résultats de [6] et d'autres matières premières[25, 26, 32]des travaux récemment publiés.

Tableau 2. Liste d'équipements

Propriété	modèle	fabricant	origine	Méthode ASTM	Tolérance
Masse volumique	DS7800	Kruss optic GmbH	Hambourg, Germany	D1298	$\pm 0.0001 \text{ g/cm}^3$
Point de trouble (cloud point)	NTE450	Normlab	Valliquerville, France	D2500	$\pm 0.1^\circ\text{C}$
Point d'écoulement (Pour point)	NTE450	Normlab	Valliquerville, France	D97	$\pm 0.1^\circ\text{C}$
Température limite de filtrabilité (Cold filter plugging point (CFPP))	NTE450	Normlab	Valliquerville, France	D6371	$\pm 0.1^\circ\text{C}$

Tableau 3. Propriétés des déchets huiles de cuisson

Propriété	Huile de cuisson usagée	Huile de cuisson usagée[6]	CAMO[26]	CHO[27]	CSO[25]
Point de trouble($^\circ\text{C}$)	8	14	-13	-11	-14
Point d'écoulement($^\circ\text{C}$)	8	4	-17	-22	-22
La masse	916.2	915.9	924.9	927.9	925

volumique(kg/m ³)					
Viscosité cinématique a 40°C (mm ² /s)	60.8	-	26.906	27.28	29.79
CAMO crude <i>Aleurites moluccanus</i> oil, CHO : crude hemp oil, CSO, crude Safflower oil					

2.2 Synthèse, purification et qualité du biodiesel

La synthèse et la purification du biodiesel à partir des déchets d'huile de cuisson raffinée ont été effectuées selon la méthode décrite [25, 32] où l'DHC a réagi avec 25% (v / v d'huile) de méthanol (rapport 6: 1M) et 1% (m / m d'huile) d'hydroxyde de sodium (NaOH). La température, la durée et la vitesse de réaction étaient respectivement de 60 ° C, 1 h et 400 tr / min. Le rendement de la conversion du MEDHC était de 97% et la couleur du produit final était jaune vive. Le tableau 4 montre les résultats des propriétés de l'huile de MEDHC, en plus d'une comparaison avec la littérature récemment publiées[6, 25, 26, 32] et ceux de[33, 34]. Ces propriétés comprennent le Point de trouble (CP), le Point d'écoulement (PP), la masse volumique à 15 ° C et la Température limite de filtrabilité (CFPP).

Tableau 4. Propriétés de MEDHC

Propriétés	MED HC	MEDHC[33]	MEDHC[6]	AMME[2 6]	HME[27]	SME[25]	OIWME[34]
Point de trouble (CP)	10	-1	9	-6	3	-2	-5.1±0.1
le Point d'écoulement (PP)	12	-16	9	-5	-4	-7	-8.91±0.001
la masse volumique à 15 ° C	881.4	870	883.1	889.6	891.5	886.5	894±0.002
La Température limite de filtrabilité (CFPP).	4	-	3	-8	-10	-12	-

AMME : *Aleurites moluccanus* methyl ester, HME :Hemp methyl ester, SME : Safflower methyl ester,
OIWME :oil industry waste methyl ester.

2.3 Détermination de FAC, DU, LCSF, KV à 40 ° C, CN, stabilité à l'oxydation (OS), pouvoir calorifique supérieur (HHV), indice d'iode (IV) et indice de saponification (SN) du MEDHC

Les propriétés hydrophobes de la composition en acides gras représentent l'une des propriétés les plus importantes des lipides et de l'ester méthylique. Une telle composition affecte les propriétés physiques et chimiques du biodiesel à savoir CN, IV, SN, OS, HHV, la densité, le KV et les propriétés d'écoulement à froid. Cela pourrait être dû à ces propriétés, qui dépendent à la fois de la longueur de la chaîne et du Degré d'insaturation. Ainsi, la détermination des compositions d'acides gras est nécessaire pour prédire ces propriétés. Les acides gras sont des chaînes hydrocarbonées dont les longueurs de chaîne et les degrés de saturation et d'insaturation se terminent par des groupes acides carboxyliques. Les acides gras peuvent être globalement classés en acides gras saturés et insaturés, où les acides gras insaturés comprennent les acides gras mono-insaturés (C: 1) et polyinsaturés (C: 2,3, etc.) [35].

Dans cette étude, l'analyse FAC a été effectuée conformément à la norme des dérivés de graisse et d'huile (TS EN 14103 : 2011). La détermination du FAC a été faite avec l'aide de Shimadzu, Japon et en suivant la méthode décrite dans des publications précédentes en utilisant une méthode chromatographie de gaz interne optimisée (GC) [25, 27]. Le tableau 5 présente le résumé des conditions de fonctionnement du CPG [25, 27].

Tableau 5. Conditions opérationnelles du GC [25, 27]

Propriétés	Spécification	unité
Gaz	Hélium	
Vitesse linéaire	19.10	Cm/sec
Débit	1.03(débit de colonne)	mL/min
Température de détecteur	260	°C
Pression de la colonne	264.4	kPa
Dimension de la colonne	RT2560	100.0mm*0.25mm*0.3mm
Four à colonne d'injecteur	240	°C
Température de la	140°C (maintenue	

rampe	2min) 4°C/min à165°C 2°C/min à192°C 4°C/min à240°C Maintenue 5min	
-------	---	--

Le degré instauration DU, a été calculé à partir de la proportion de mono-insaturés et acides gras polyinsaturés en utilisant l'équation suivante[25, 27, 32, 36]:

$$DU = (\text{monosaturate } C_n: 1, \text{wt}\%) + 2(\text{polunsaturated } C_n: 2, \text{wt}\%) + 3(\text{polunsaturated } C_n: 3, \text{wt}\%) \quad (1)$$

Les proportions d'acides gras saturés (*wt%*) et leurs points de fusion correspondants (MP_n) ont été utilisées pour calculer le facteur de chaîne longue saturée LCSF comme suit[25-27, 36] :

$$LCSF = \sum \frac{(MP_n * C_n \text{wt}\%)}{100} \quad (2)$$

KV à 40 ° C, CN, OS, HHV, IV et SN du MEDHC ont été calculés empiriquement en utilisant les formules suivantes :[10, 26, 36] :

$$\ln(\eta_i) = -12.503 + [2.496 \times \ln(MW_i)] - (0.178 \times N) \quad (3)$$

$$CN = -0.1268(Du) - 10.805 \quad (4)$$

$$OS = -0.0518(DU) + 11.121 \quad (5)$$

$$HHV = 46.19 - \left(\frac{179}{MW_i}\right) - (0.21 \times N) \quad (6)$$

$$IV = 1.0617(DU) - 10.805 \quad (7)$$

$$SN = \sum \left(\frac{560 \times A_i}{MW_i}\right) \quad (8)$$

Où η_i représente la v de chaque acide gras à 40 ° C, MW_i représente le poids moléculaire de chaque acide gras et N représente le nombre de doubles liaisons dans les acides gras mono-insaturés et polyinsaturés.

Mélange biodiesel-diesel, Propanol-diesel et biodiesel-diesel-Propanol

Les propriétés de densité, KV, point d'écoulement, point de trouble et point de colmatage du filtre à froid ont été examinées, suivies d'un mélange de MEDHC avec Propanol (Pro) et D100. Dans cette étude, cinq mélanges ternaires ont été préparés comme suit : (D80B20), (D80B15Pro05), (D80B10Pro10), (D80B05Pro15) et (D80Pro20). Les mélanges préparés présentent une bonne miscibilité et stabilité sur une longue période. Tous les mélanges ont été stockés, à température ambiante, dans un flacon de réactif avec un bouchon à vis. Les viscosités cinématiques et les densités des mélanges biodiesel-diesel-Propanol sont prédites mathématiquement, dans cette étude avec une méthode d'ajustement de courbe polynomiale, un polynôme d'ordre k en X est exprimé sous la forme suivante [37] :

$$Y = C_0 + C_1X + C_2X^2 \dots + C_kX^k \quad (9)$$

2.4 Analyses des carburants

Analyses Thermogravimétrique TGA

La TGA est une technique permettant de caractériser la stabilité thermique d'un échantillon (composé ou mélange) en fonction de la température [27]. C'est une technique rapide et relativement peu coûteuse qui peut être utilisée pour déterminer le point d'ébullition des esters et surveiller les changements du produit chimique, c'est-à-dire réaction de transestérification. Former l'analyse TGA, générant la première dérivée des courbes TG montrent la perte de poids en différentes températures qui fournissent des informations sur le carburant composition des matériaux, décomposition et composés intermédiaires formé et les courbes thermogravimétriques dérivées (DTG) montrent le (la) perte de poids par rapport aux courbes de température [25, 27] qui fournissent plus précisément le début et la fin du processus de réaction ainsi que l'OS des matériaux [38]. Les thermogrammes (courbes TGA) de MEDHC et de ses mélanges avec Pro et D100 ont été enregistrés dans un analyseur thermogravimétrique Shimadzu DTG 60H en suivant les méthodes prescrites dans nos publications précédentes [25, 27] et également résumées dans le tableau 6. Les courbes TGA ont été utilisées pour analyser la température de début et également tous les échantillons ont été analysés en trois répétitions.

Calorimétrie différentielle à balayage DSC

L'analyse DSC est, une technique d'analyse thermique, utilisée pour caractériser, surveiller et fournir des données sur les propriétés

d'écoulement à froid ou la richesse des informations sur les matériaux combustibles en tant que fonction de la température et du temps. Les études DSC montrent que le phénomène de cristallisation de tout échantillon de carburant dépend du type de carburant utilisé (diesel, alcool ou ester méthylique), de la longueur de la chaîne carbonée d'acide gras (C-C / C=C), d'une interaction des molécules et configuration structurelle des échantillons de matériaux. Dans cette étude, les courbes DSC ont été obtenues dans un calorimètre modèle DSC Q20, suivant le méthode standard prescrite dans des publications précédentes et résumée dans le tableau 6 [25-27].

Tableau 6. Méthodes TG et DSC.

Instruments	Shimadzu DTG 60H TG	TA Q-2000 DSC
Quantité de l'échantillon	1±0.5mg	3±0.5mg
Gaz atmosphérique	Air sec	Nitrogen
Débit	100mL/min	550mL/min
Température de travail	25°C à 700°C	-80°C à 20°C
Taux de Rompe	10°C/min	10°C/min

Analyses Spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier FT-IR

FT-IR est une analyse de détection précise, rapide, facile et non destructive qui est largement utilisé pour identifier, quantifier et vérifier les composants du carburant [39, 40], c'est-à-dire la structure de molécules de nature fonctionnelle ou groupes actifs présents dans les échantillons. Dans cette étude, MEDHC, D100 et leurs mélanges avec Propanol ont été caractérisés par des spectres FT-IR sur disques de potassium de bromure (KBr), utilisant le spectromètre Bruker Tensor 27 dans la gamme 400–4500 cm^{-1} et traités avec un logiciel informatique, OPUS 7.2.139.1294. La résolution était de 4 cm^{-1} avec 32 numérisations.

Analyses Résonance magnétique nucléaire NMR

Des analyses RMN de MEDHC, D100 et de leurs mélanges avec Propanol ont été effectuées en utilisant un spectromètre Bruker AVANCE III 400 MHz, équipé de sondes appropriées pour les cœurs de RMN ^1H et ^{13}C . Le Chloroforme a été utilisé comme solvant et étalon interne respectivement. Les spectres ^1H et ^{13}C ont été enregistrés de 2,00 ppm à 10,00 ppm à 500 MHz.

2.5 Le banc d'essai moteur

Des séries d'essais expérimentaux ont été réalisés sur un moteur diesel monocylindre à injection directe, quatre temps et à admission naturelle (Katana Km 178 FE). Un moteur est couplé à un générateur (Katana KD 4500 E) pour régler la charge. Les données de performance sont affichées et stockées dans une commande électronique et un appareil de mesure. Les paramètres de performance du moteur de consommation spécifique d'énergie aux freins (BSEC) et de consommation de carburant spécifique aux freins (BSFC) en plus des paramètres d'émission d'échappement sélectionnés de CO, EGT, NOx et opacité des fumées ont été étudiés en détail. La figure 1 montre la mise en place de l'expérience.

Tableau 7. Spécifications du banc d'essais Moteur

Spécification du Moteur		Spécification du Générateur	
Fabricant	Katana	Fabricant	Katana
modèle	Km178FE	modèle	KD4500E
Nombre de cylindre	1	Puissance maximale (kVA)	4.2
Nombre de cycle	4	Puissance (kVA)	3.6
Cylindrée cm ³	296	phase	1
Puissance continue (hp)	6	voltage	230
Puissance maximale (hp)	6.7	fréquence	50
Vitesse de rotation (rpm)	3000		
Rapport de compression	18 :1		
Système d'injection du carburant	injection direct		
Système de refroidissement	Refroidi à Air		
Admission d'air	admission naturelle		

Le tableau 7 présente les spécifications détaillées d'un moteur utilisé. Les paramètres de performance et les valeurs d'émissions de gaz

d'échappement rapportés dans cette étude sont moyennés. Les spécifications de l'analyseur d'émissions sont données dans le tableau 8.

Tableau 8 Spécification technique d'instrument d'analyse des gaz d'échappement Italo plus-spin

Paramètre	Unité	Intervalle	Tolérance
CO	%	0-9.99	±0.06
Température des gaz d'échappement EGT	°C	0-750	±1
NOx	Ppm	0-2000	±5
opacité des fumées	%	0-99	±2
Température du travail	°C	5-40	
Température du stockage	°C	-20 à+60	
Voltage d'alimentation	V (DC)	1	

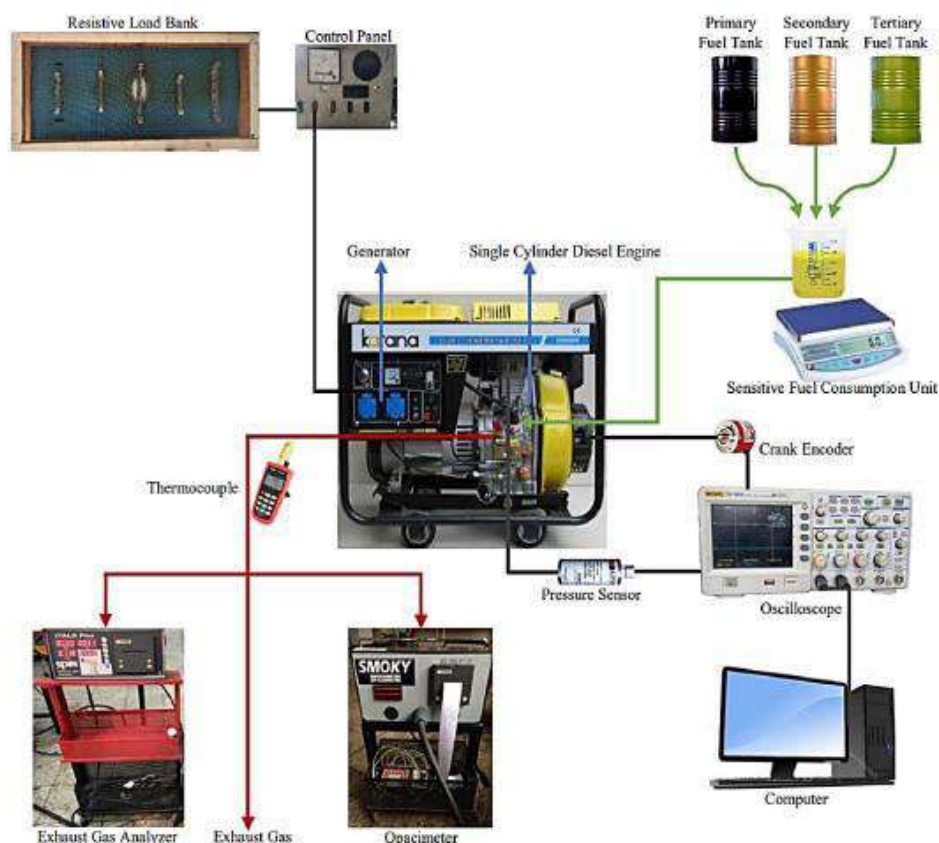


Figure 1 Schéma du banc d'essai moteur et analyseur des gaz d'échappement.

Dans cette étude, l'essai expérimental a été réalisé avec D100, D80Pro20, D80B5Pro15, D80B10Pro10 et D80B15Pro5. Avant que chaque mélange ne

soit testé, un moteur est réchauffé avec du D100 pendant 15 min à 3 000 tr/min sans charge moteur. Après chaque épreuve de mélange, le moteur est réopéré avec D100 pour restaurer ses conditions d'origine. Les essais de performances et d'émissions du moteur sont effectués à régime moteur constant de 3000 tr / min avec différentes charges moteur (500, 750, 1000 et 1250 W). Ensuite, en utilisant une unité de charge résistive, la charge est augmentée. La consommation massique de carburant est estimée avec une comparaison de masse de carburant pour chaque carburant à chaque charge, avant et après chaque 15 minute des périodes d'essai, sans aucune modification du moteur. Pour l'opacité du CO, des NOx et des fumées, un analyseur d'émissions portable (type Italo plus-spin) est utilisé. Pour l'EGT, un thermocouple de type K connecté à une unité d'affichage numérique a été utilisés. Les valeurs de performance du moteur et les émissions d'échappement ont été mesurées en régime permanent du moteur. Pour augmenter la crédibilité des mesures, les expériences sur les moteurs ont été répétées trois fois.

3 Résultats et discussion

3.1 FAC, DU, LCSF, KV, CN, OS, HHV, IV and SN of MEDHC

Le tableau 9 présente les résultats de FAC, DU et LCSF de MEDHC. Ce Le profil est similaire à [41] où les acides palmitique et oléique dominant la structure des acides gras. Il a été observé que les acides gras saturés, mono-insaturés et polyinsaturés représentent respectivement 41,87, 44,96 et 13,18% du MEDHC. Basé sur les équations. (1) et (2), l'UA et le LCSF étaient respectivement de 71,32 et 26,64, comparés à d'autres esters méthyliques tels que SME (163,404 et 5,822 [25]), HME (128,549 et 22,346 [27]), (AMME 180,38 et 6,312 [26]), ester méthylique des decehts d'huiles cuisson / huile de marc de café usé (MEDHC/ SCGOME) (41,25 et 49,27 [6]) et ester méthylique d'huile de marc de café usé (MESCGO) (13,9 et 61,76 [2]) respectivement.

Cet excellent profil de compositions d'acides gras est responsable d'obtenir un excellent résultat de KV de 3,93 mm² / s par rapport à (5,03 mm² / s [33], 4,0167 mm² / s [25], 3,8676 mm² / s [27], 4,91 ± 0,001 mm²/s [34] et 3,85 mm²/s [26]), CN de 58,88 (comparé à 47,21 [25], 51,63 [32], 58,36 [24], 57,24 ± 0,002 [34] et 45,05 [26]), OS de 7,43 h (comparé à 2,66 h [25], 3,7 h [34], 4,46 h[27], 7,21 h [24] et 1,8 h[26]), HHV de 39,45 MJ / kg (contre 39,38 MJ / kg [26], 39,52 MJ / kg [24]et 44,7 ± 0,002 MJ / kg [34]), IV de 64,92 g d'iode / 100 g (contre 162,68 g d'iode / 100 g [25]), 125,68 g d'iode/100 g [27], 69,27 [24] g d'iode / 100 g et 180,7 [26]) et SN

de 205,9 (par rapport à 200,78 [25], 194,99 [27], 197,08 [24] et 200,81 [26]) respectivement.

3.2 Propriétés des carburants

Le tableau 10 présente les propriétés des mélanges de carburants. Amélioration de la densité à 15 ° C, point de trouble, point d'écoulement et point de colmatage de filtre à froid ont été observés à la suite de l'ajout de D100 et Propanol au MEDHC (B100).

Tableau 9 DU,LCSF,KV,CN,OS,HHV,IV et SN pour MEDHC

Acid gras(Fatty acid)	FAC			Analyses							
	MW _i	structure	N	Nom systematique	formule	MEDHC	DU	MP _n	LCS F	SN	HHv
Myristic	228.37	14 :00	0	Tetradecanoic	C ₁₄ H ₂₆ O ₂	0.63		5.4	0.34	1.54	0.241
Palmitic	256.4	16 :00	0	Hexadenoic	C ₁₆ H ₃₂ O ₂	36.18		62.9	22.5	79.02	14.18
Stearic	284.48	18 :00	0	Octadecanoic	C ₁₈ H ₃₆ O ₂	4.6		69.3	3.18	906	1.835
Oleic	282.47	18 :01	1	Cis-9- octadecenoic	C ₁₈ H ₃₄ O ₂	44.6				89.13	17.82
Linoleic	280.75	18 :02	2	Cis-9-cis-12- octadecenoic	C ₁₈ H ₃₂ O ₂	13.18	44.96			26.32	5.19
Arachidic	312.53	20 :00	0	Eicosanoic	C ₂₀ H ₄₀ O ₂	0.46	2636	75.5		0.82	0.186
saturé	41.86			DU,LCSF,KV,CN,OS,HHV,IV et SN							
Mono-insaturé	44.96					MEDHC	[6]				
Polyinsaturé	13.18			DU		71.32	98.02				
totale	100			LCSF		26.64	26.42				
				KV à 40°C(mm ² /s)		3.93	3.88				
				CN		58.88	5664				
				OS(h)		7.43	6.51				
				HHV(MJ/kg)		39.45	39.44				
				IV(g iodine/100g)		64.92	83.71				
				SN		205.9	204.8				

Tableau 10 propriétés des carburants

Propriété	MED	D80B20	D80Pro20	D80B15	D80B10	D80B5	D100
	HC			Pro5	Pro10	Pro15	
Point de trouble CP	10	-7	-7	-8	-8	-8	-7
Point d'écoulement (PP)	12	-9	-9	-12	-18	-24	-22
Masse volumique à 15°C(kg/m ³)	881.4	845.8	831.3	842	837.8	834.5	840.6
Température limite de filtrabilité CFPP(°C)	4	-17	<-36	-21	-29.	-33	-34

3.2.1 Effet des plages de température sur la densité

L'efficacité de l'atomisation du carburant est affectée par la densité du carburant. Il est considéré comme un paramètre primordial pour l'optimisation du diesel fonctionnement du moteur [42], en plus d'autres paramètres importants tels que pouvoir calorifique, KV et CN [1]. La densité de MEDHC a montré un comportement décrétementé en comparaison avec le DHC pur. Pour un meilleur moteur fonctionnement, les mélanges MEDHC avec du Propanol et du diesel ont montré une amélioration significative de la densité par rapport aux températures variables. La densité de carburant plus élevée peut fournir une masse plus importante au système d'injection de carburant. Ce phénomène affecte l'efficacité de fonctionnement de l'ensemble du système. Par conséquent, les mélanges MEDHC ont un examen approfondi en termes de densité. Dans cette étude, les densités de MEDHC, D100, Pro et DHC ont été mesurées à différentes plages de température (15–40 ° C) et présentées à la figure 2. Il est évident que la densité est fonction de la température et a diminué linéairement avec l'augmentation de la température [41].

3.2.2 Analyse thermogravimétrique TGA

Les courbes TGA (Fig.3) montrent que la décomposition thermique s'est produite en une seule étape continue dans la plage de température de 30 à 300 ° C, pour tous les échantillons. La tendance MEDHC ne représentait

aucune déclinaison avant 150 ° C, ce qui confirme sa stabilité thermique affirmative. Dans ces plages de température, les pertes de masse se produisent à des niveaux de 99,0% pour MEDHC (B100) à 150 ° C. Le rapide décliné dans le graphique est attribué au taux de perte de masse par rapport à la température, qui est dû à phénomènes d'évaporation et de craquage. La température de dégradation de début (T_{onset}) peut donner l'idée du point d'ébullition initial des échantillons en plus de la stabilité thermique.

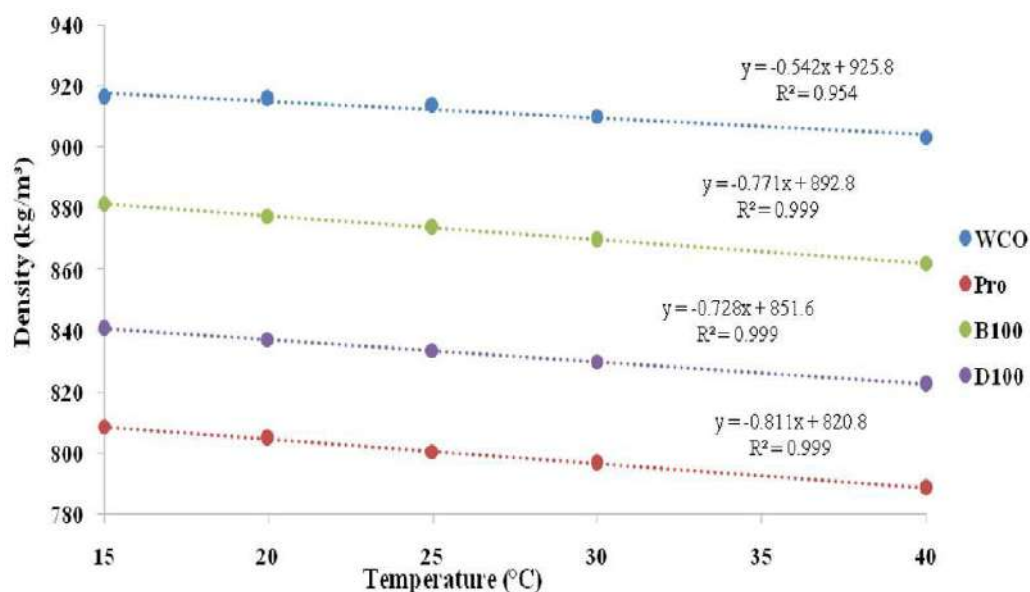


Figure 2 Masse volumique fonction des températures

Tableau 11 Analyses TG des échantillons des carburants

Echantillon	Taux d'échauffement (°C/min)	Intervalle de température (°C)	de T_{onset}	Pertes massiques sous air sec
B100	10	30-300	15.0	99.00
D100	10	30-220	50.0	99.00
D80B5Pro15	10	30-240	55.0	99.00
D80B10Pro10	10	30-240	60.0	99.00
D80B15Pro5	10	30-240	85.0	99.00
D80B20	10	30-265	65.0	99.00
D80Pro20	10	30-230	55.0	99.00

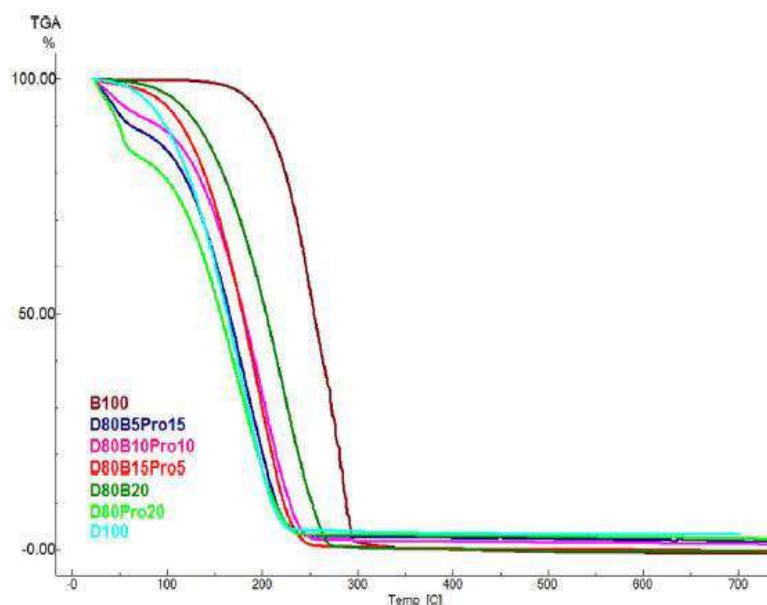


Figure 3 Analyses TG pour les échantillons des carburants

3.2.3 Analyses Calorimétrie différentielle à balayage DSC

Le tableau 12 montre les températures de début de cristallisation du MEDHC, D100 et leurs mélanges avec Pro. Les températures de début de cristallisation du MEDHC étaient de $4,76^{\circ}\text{C}$, comparées à $-7,42^{\circ}\text{C}$ de SME [25], $-5,27^{\circ}\text{C}$ de HME[27] et $-9,96^{\circ}\text{C}$ d'AMME[26]. La température de début des cristallisations pour D100 était de $-10,15^{\circ}\text{C}$. Par conséquent, le biodiesel cristallise plus rapidement que l'Euro diesel [25-27]. Ces résultats sont réalistes puisque le comportement de cristallisation des huiles, des graisses et du biodiesel est directement lié à des détails structurels tels que la longueur des chaînes acyle, l'UA et la conformation des groupes glycérol. La disposition spatiale des molécules peut perturber la capacité de remplissage; ainsi, l'insaturation produit de basses températures de cristallisation en empêchant le tassement moléculaire[43]. Les températures de début de cristallisation relativement élevées du MEDHC par rapport à d'autres études sont attribuées à la faible teneur en DU ($71,32$ contre $163,404$ [25] de SME, $128,549$ [27] de HME et $180,38$ [26]d'AMME). Les températures de début de cristallisation de l'huile D80B5Pro15, D80B10Pro10, D80B15Pro5, D80B20 et D80Pro20 sont respectivement de $-17,61^{\circ}\text{C}$, $-16,99^{\circ}\text{C}$, $-15,44^{\circ}\text{C}$, $-10,78^{\circ}\text{C}$ et $-11,40^{\circ}\text{C}$. D'après le tableau 12, il a été remarqué que l'ajout de Pro aux mélanges biodiesel-diesel réduit d'avantage la température de début des cristallisations par rapport au D80B20 ($-10,78^{\circ}\text{C}$). Ces résultats sont en accord avec les travaux précédents [25-27] et cela est dû au fait que Pro est responsable d'une telle réduction.

Tableau 12 Température de cristallisation

Échantillon	Température de cristallisation (°C)
B100	4.76
D100	-10.16
D80B5Pro15	-17.61
D80B10Pro10	-16.99
D80B5Pro15	-15.44
D80B20	-10.78
D80Pro20	-11.40

La faible poly-insaturation et la stabilité à l'oxydation accrue des échantillons présentent une valeur T_{onset} plus élevée. La décomposition thermique s'est produite à 50 ° C pour D100 et le niveau de perte de masse était de 99,0%. Pour les mélanges, les pertes de masse se produisent à des niveaux de 99,0% à des températures comprises entre 55 et 85 ° C. Les détails de T_{onset} ont été représentés dans le tableau 11. Il est évident que T_{onset} de MEDHC est supérieur à D100. La température de dégradation augmente à mesure que le rapport MEDHC dans les mélanges augmente [25-27]. Une grande similitude, avec de petites variations de T_{onset} pour tous les mélanges, a également été observée.

3.2.4 Analyses FT – IR

La figure 4 affiche les spectres infrarouges avec des nombres d'onde (pastilles KBr, cm^{-1}) de MEDHC, D100 et leurs mélanges avec Pro (Tableau 13). Une bande forte apparaît à 1741 cm^{-1} pour chaque spectre FT-IR (sauf D100) qui est attribué à la vibration d'étirement de l'ester carbonyle $\nu(\text{C}=\text{O})$ et qui sert à surveiller la progression de la réaction. C'est plus loin soutenu par certains pics supplémentaires, ceux apparaissant dans la région des empreintes digitales dans la plage de $1215,01$ à $1032,12 \text{ (cm}^{-1})$. L'onde estérique $\nu(-\text{COC})$ s'est presque produite entre 1169 et 1017 cm^{-1} ce qui révèle la présence de bandes d'intensité moyenne. La bande de 1169 cm^{-1} représente la présence d'ester méthylique à proximité des groupes carbonyle. De plus, une autre bande d'onde est vue à près de 722 cm^{-1} qui est responsable des fonctionnelles $\nu(\text{CH}_2)_n$. Les absorptions aux nœuds d'étirement de $\nu(\text{CH}_2)_n$ sont dues aux caractéristiques des oléfines. Le pic à près de 1377 cm^{-1} correspond à l'étirement asymétrique $\nu(-\text{CH}_3)$ [1, 26]. Le large pic fort à 3312 cm^{-1} indique un étirement $\nu(-\text{OH})$ dans Pro.

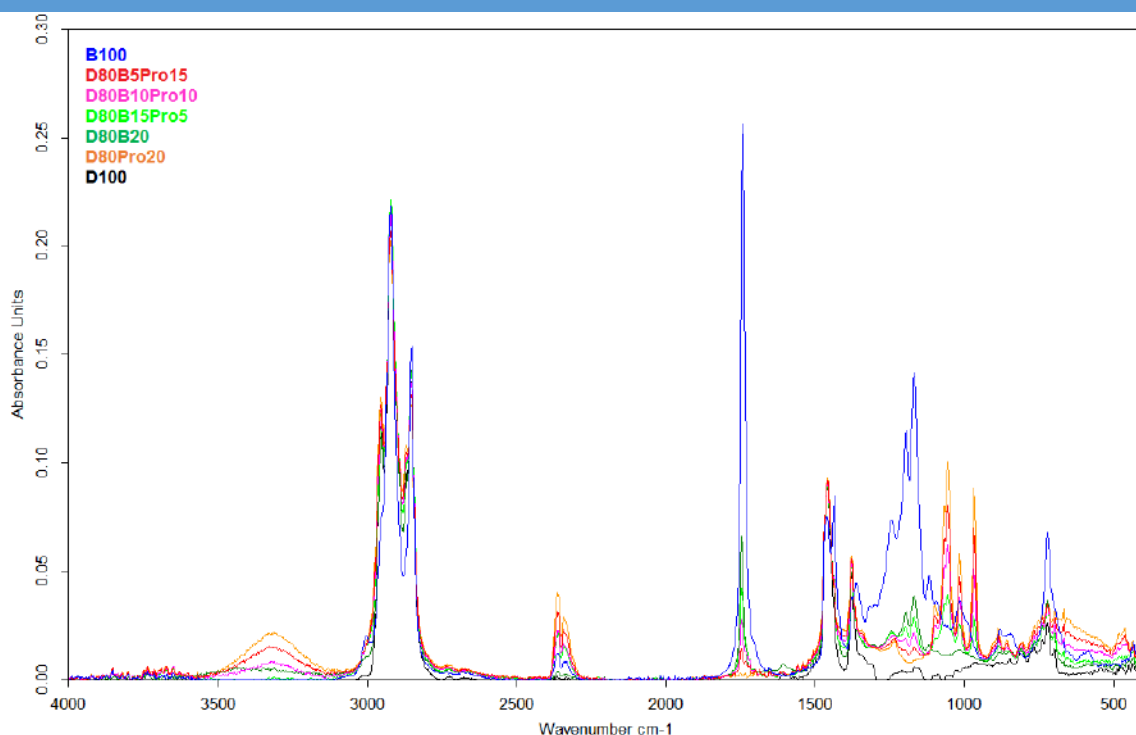


Figure 4 Pics spectraux FT – IR Nombre d'ondes d'échantillons des carburants

3.2.5 Analyses Résonance magnétique nucléaire RMN

RMN ^1H . La caractérisation des mélanges biodiesel-diesel-Propanol par La spectroscopie RMN ^1H et ses spectres respectifs sont représentés sur la figure 5. Le plus petit pic à 0,91 ppm est confirmé la présence de linoléate de méthyle dans MEDHC. En outre, les protons oléfiniques présents dans les chaînes d'ester méthylique insaturé sont référencés à 5,24 ppm. Le plus petit pic de 0,20-0,35 ppm confirme la présence d'acides gras cycliques. Un pic spectral RMN ^1H caractéristique (δ en ppm) apparaît comme un singlet à 3,62 ppm et 3,45 ppm correspondent au méthoxy δ (-O-CH₃) les protons de l'ester et du Pro δ (-C (H) -OH) méthyl-hydrogène se déplacent respectivement. Un triplet de protons α -CH₂ de l'ester δ (-CH₂-CO₂-CH₃) apparaît à environ 2,50 ppm et les protons α -méthylène à la double liaison de l'ester δ (-CH₂-C] Ce) apparaissent sous la forme d'un multiplet à 1,92–2,08 ppm qui confirme la présence d'esters méthyliques dans le biodiesel. Un signal très faible apparaît entre 4,06 et 4,21 ppm, correspond à l'ester δ (-CH₂-CO-O-CH₂-) et éther δ (-O-CH-) déplacement de l'hydrogène et aussi un signal RMN ^1H singlet apparaît dans la région de 4,65–5,32 ppm est responsable des esters méthyliques δ (-C=O-O-CH-) en tant que composition majeure présente dans le biodiesel et ses mélanges. Tous les protons sont établis pour être dans leurs régions prévues [44]. De plus, le squelette méthylène des signaux protons à longue chaîne carbonée d'acide

gras apparaissent à 1,22-1,33 ppm sous forme de singlets et les groupes saturés δ (CH₂) n montrent les signaux multiples à 0,72-0,90 ppm, correspondant aux protons méthyl δ (C-CH₃) terminaux [44].

RMN ¹³C. Un spectre représentatif de ¹³C NMR pour MEDHC (B100), Le D100 et ses mélanges avec Pro sont représentés sur la figure 5. Le pic observé à 174 ppm est considéré comme faible. Les pics à 129 et 128 sont qualifiés de très faibles. Il montre les pics caractéristiques à 174 et 51 ppm, représente la présence de carbone carbonyle de la fonctionnelle -C(=O)-O- et du méthoxy carbone δ (-O-CH₃) des groupements ester dans les biodiesels respectivement ce qui renforce également les conclusions tirées d'autres études spectrales (¹H RMN et FT - IR). Des pics autour de 131 et 127 ppm ont indiqué l'insaturation dans les esters méthyliques. Il montre la présence de chaînes d'ester méthylique d'acide gras oléique et linoléique. Le méthylène et les carbones méthyliques à longue chaîne carbonée dans les esters méthyliques d'acides gras (FAME) sont apparus dans la région, variant entre 14,02 et 34,08 ppm. Le pic à 14,02 ppm est apparu par la présence d'un groupe CH₃ terminal. Le pic à 22 ppm a confirmé la présence de CH₃ terminal adjacent au groupe CH₂ [44]. Le pic 51,3 montre l'origine du carbone à partir du groupe ester.

Tableau 13. Caractéristiques des pics des spectres FT-IR des échantillons

Ondes (cm ⁻¹)	Type de bande	Groupe fonctionnel	Références
3401.05- 3315.24(s)	Elongation	v(-OH) de Propanol	[1, 36, 45-47]
3206.2-3085(b)	Elongation asymétrique	v(=C-H) de Alcalènes	
2924.32(sh)	Elongation asymétrique	v(C-H) de Alcalènes	
2847.81(s)	Elongation symétrique	v(C-H) de groupe méthylène	
1741.89(s)	Elongation	v(C=O) du groupe ester carbonyle	
1604.21(w)	courbée	v(C=O) Groupe alcalène et aromatique	
1463.75- 1372.64(s)	Courbée et oscillante	v(=C-H), v(-CH ₂) et v(-CH ₃) des groupes méthyl	[1, 26]
1232.01- 1032.12(m)	Elongation	v(C-O) et v(C-O-C) des groupes alkoxy ester et carbonyle et éthers	[1, 36, 45-47]
962.05- 849.27(w)	hors plan des courbures	v(=C-H) des alcènes	
722.38(w)	oscillation des alcènes et des vibrations qui se chevauchent à bascule de méthylène	v(=C-H) et v(-CH ₂) groupes méthylène	
677.64(sh)	hors plan des courbures	v(=C-H) et v(-CH ₂) alcène et aromatiques	

b: large; s: forte; sh: épaule; m: moyen; w: faible.

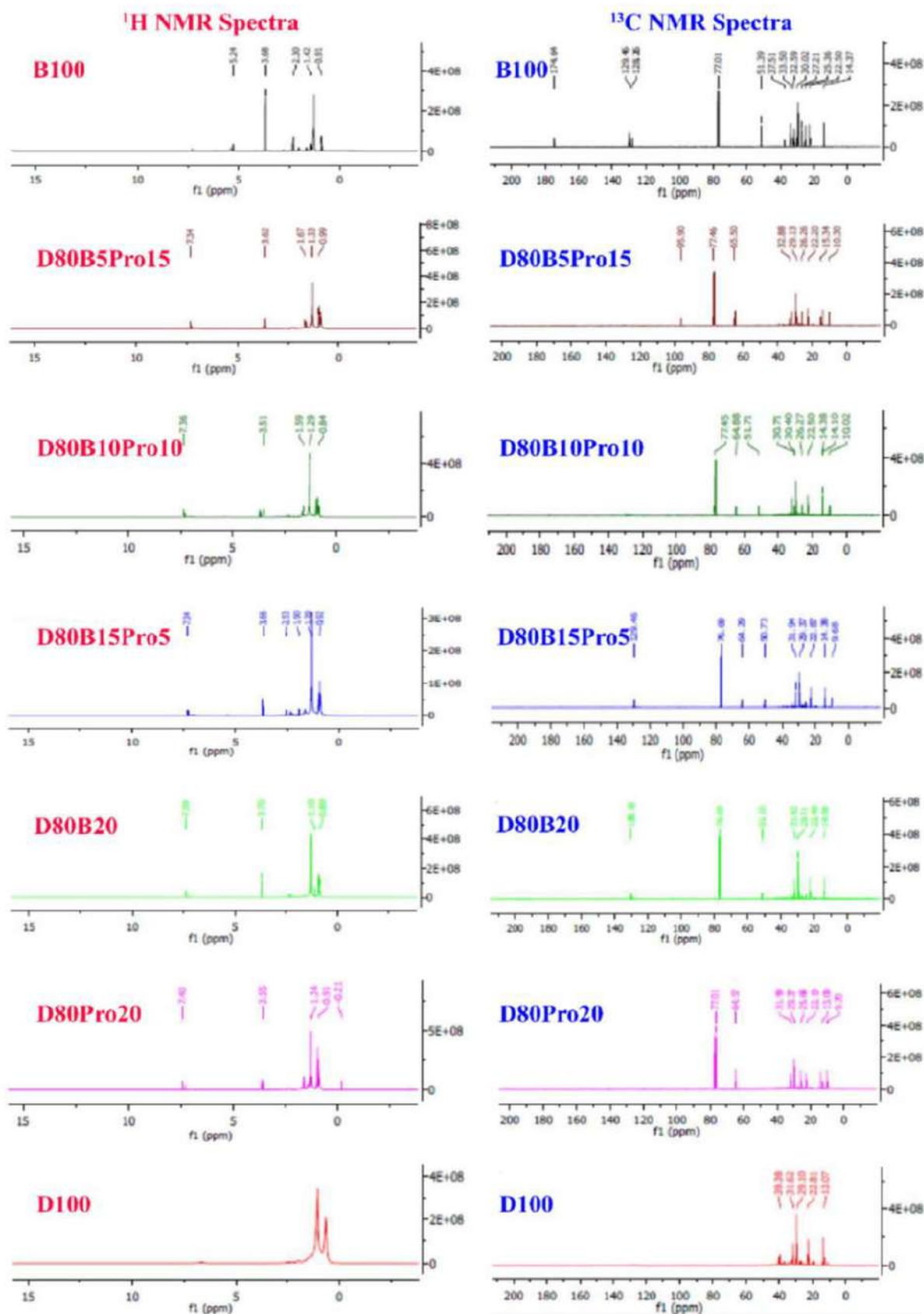


Figure 5. Spectres en RMN ¹H et ¹³C d'échantillons des carburants

3.3 Performances du moteur et des émissions

Dans ce travail, les paramètres de performance du moteur de BSEC et BSFC outre les paramètres d'émission de CO, HC, NO_x, EGT et l'opacité de la fumée pour D100, D80Pro20, D80B5Pro15, D80B10Pro10 et D80B15Pro5 ont été examinés et présentés avec quelques discussions. Tous les résultats étaient moyens et le pourcentage d'augmentation / diminution par rapport au D100 a également été mesuré pour avoir une compréhension générale des effets de ces mélanges sur le moteur. Ce qui suit décrit chaque paramètre en détail.

3.3.1 Consommation d'énergie spécifique au freinage (Brake *specific energy consumption*) BSEC

Les résultats du BSEC par rapport aux charges du moteur (500, 750, 1000 et 1250 W) à 3 000 tr/min pour les carburants sélectionnés (D100, D80Pro20, D80B5Pro15, D80B10Pro10 et D80B15Pro5) sont présentés dans la (Figure 6). Le BSEC le plus élevé de 44,80 MJ / kWh a eu lieu pour D80Pro20 à 500W tandis que le BSEC le plus bas était enregistré pour D100 à 750W (31,83 MJ / kWh). La BSEC moyenne pour tous les carburants testés était comme suit 36,68 (D100), 38,64 (D80Pro20), 37,82 (D80B5Pro15), 38,20 (D80B10Pro10) et 37,47 MJ / kWh (D80B15Pro5) respectivement. Par rapport à D100, les augmentations moyennes de la BSEC étaient les suivantes : 5,36% (D80Pro20), 3,10% (D80B5Pro15), 4,16% (D80B10Pro10) et 2,16% (D80B15Pro5). De toute évidence, le D100 a le BSEC le plus bas en raison de son chaleur latente de vaporisation élevée (42,6 MJ / kg) par rapport à la fois au MEDHC et au Pro (37,52 et 30,6 MJ / kg) (tableau 1) et donc, l'ajout de biodiesel augmente le BSEC, tandis que l'ajout de Pro l'augmente encore. Ceci est attribué à l'effet combiné d'une viscosité cinématique plus élevée ainsi que de la masse volumique et d'un pouvoir calorifique inférieur du biodiesel (3,93 mm² / s, 881,4 kg / m³ et 39,45 MJ / kg / tableaux 9 et 10) et d'une mauvaise atomisation du biodiesel dans l'injecteur, chaleur latente de vaporisation du Pro (30,6 MJ / kg / tableau 1) en raison de la forte teneur en oxygène. Une tendance similaire a été observée dans [30] lors de l'utilisation de mélanges biodiesel-diesel et une augmentation supplémentaire lors de l'utilisation de mélanges biodiesel-diesel-butanol. L'augmentation supplémentaire de BSEC lors de l'utilisation de propanol que le butanol est également observée dans cette étude par rapport à [30]. Cependant, on peut conclure que les mélanges ternaires donnent des résultats BSEC acceptables et comparables à ceux du D100 pour une application dans les moteurs CI.

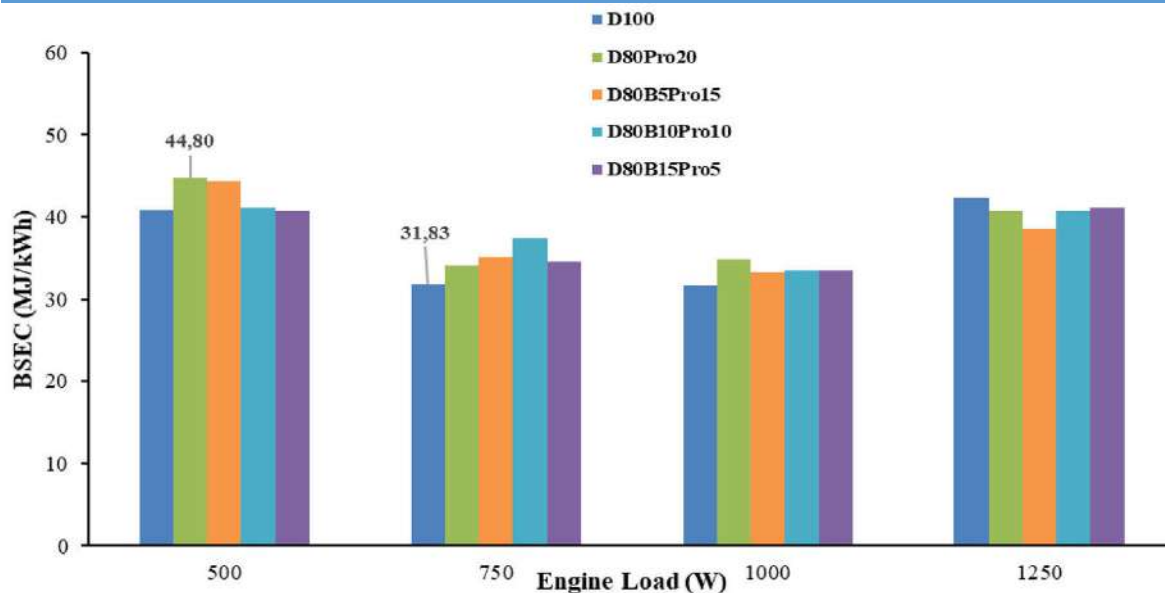


Figure 6. Consommation d'énergie spécifique au freinage BSEC

3.3.2 Consommation de carburant spécifique au freinage (Brake specific fuel consumption) BSFC

Les résultats du BSFC par rapport aux régimes moteurs pour les carburants sélectionnés (D100, D80Pro20, D80B5Pro15, D80B10Pro10 et D80B15Pro5) sont présentés à la Fig. 7. Le BSFC le plus élevé de 1147,37 g / kWh a eu lieu pour D80Pro20 à 500W tandis que le BSFC le plus bas était enregistré pour D100 à 750 W (747,14 g / kWh). Les BSFC moyens pour tous les carburants testés étaient les suivants : 861 (D100), 961,28 (D80Pro20), 932,69 (D80B5Pro15), 9342,28 (D80B10Pro10) et 908,06 g/kWh (D80B15Pro5) respectivement. Par rapport à D100, les augmentations moyennes de BSFC étaient les suivantes ; 11,65% (D80Pro20), 8,33% (D80B5Pro15), 8,07% (D80B10Pro10) et 4,95% (D80B15Pro5). Ces résultats sont tout à fait logiques et acceptables couplés à la tendance observée dans la BSEC. Ces résultats sont justifiés par le fait que le B100 a un pouvoir calorifique inférieur valeur, densité plus élevée et KV par rapport au D100, ce qui cause mauvaise atomisation du carburant dans une chambre de combustion qui se reproduit avec de grandes diamètre des gouttelettes et vaporisation lente, conduisant à un BSFC élevé [22, 25]. De plus, il est évident que le pourcentage croissant de Pro dans les mélanges biodiesel-diesel augmente encore le BSFC. Ceci est principalement attribué au LHV de Pro, comparé au D100 et au B100 causé par sa teneur plus élevée en oxygène [20,35]. Cependant, on peut supposer que le un pouvoir calorifique inférieur est la principale raison de la consommation de carburant plus élevée pour la même puissance [30]. Ces résultats sont en général en bon accord avec Yildizhan [42], Atmanli [14] et Balamurugan et Nalini [15] qui rapportent la même tendance lors de

l'utilisation de Pro et également en accord avec Yilmaz[48], Yilmaz *et al.*[49], Altun *et al.*[18] et Sridhar *et al.*[22] qui ont rapporté que l'ajout d'autres alcools tels que le méthanol, l'éthanol, le butanol et le pentanol augmente le BSFC dans les moteurs. Cependant, on peut conclure que les mélanges ternaires donnent des résultats BSFC acceptables et comparables à ceux du D100 pour une application dans les moteurs à combustion interne.

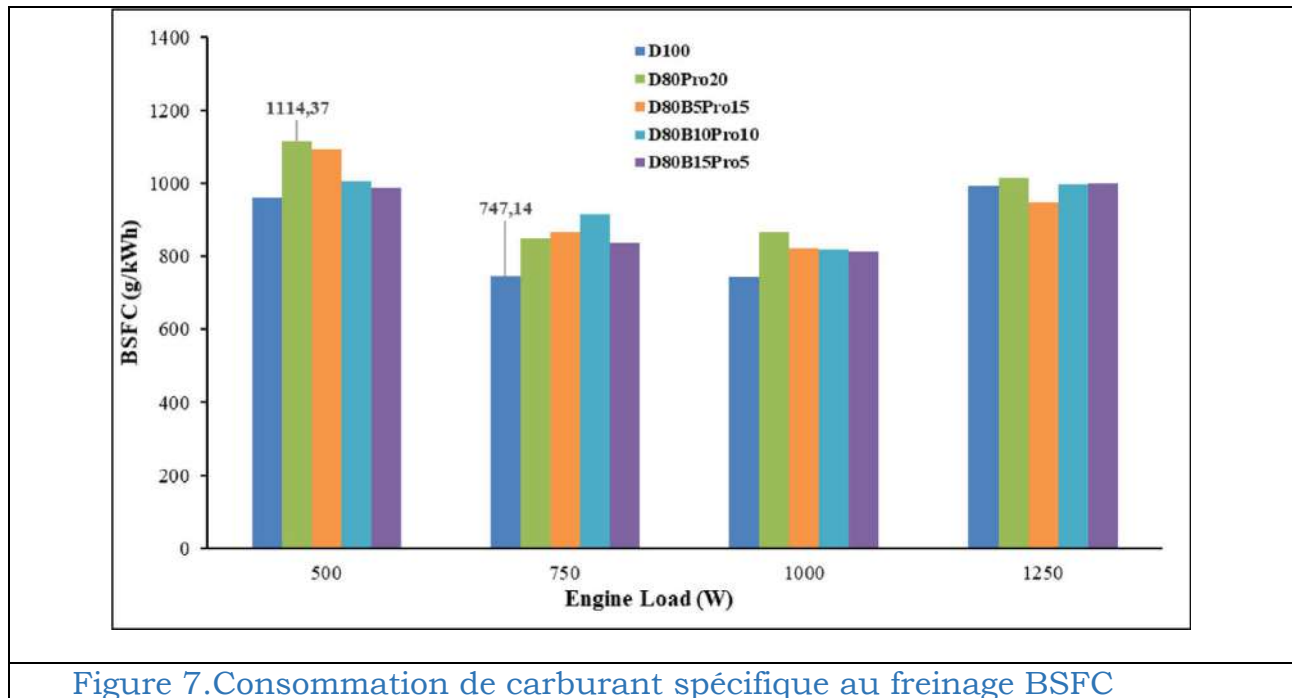


Figure 7. Consommation de carburant spécifique au freinage BSFC

3.3.3 Émissions de CO

Les émissions de CO représentent une perte d'énergie dans le moteur due à une combustion incomplète. La production de CO augmente avec un rapport carburant-air élevé ou une faible concentration d'oxygène [14, 16]. Les résultats des émissions de CO par rapport aux charges du moteur (500, 750, 1 000 et 1 250 W) à 3 000 tr/min pour les carburants sélectionnés (D100, D80Pro20, D80B5Pro15, D80B10Pro10 et D80B15Pro5) sont présentés sur la figure 8. Les émissions de CO les plus élevées de 1,39% s'est produit pour D100 à 1250W tandis que le CO le plus bas a été enregistré pour D80Pro20 à 750W (0,125%). Les émissions moyennes de CO pour tous les carburants testés étaient les suivantes : 0,53% (D100), 0,28% (D80Pro20), 0,44% (D80B5Pro15), 0,52% (D80B10Pro10) et 0,45% (D80B15Pro5) respectivement. L'émission moyenne de CO la plus faible a été observée avec le D80Pro20 tandis que la moyenne la plus élevée a été observée avec le D100. Par rapport au D100, les réductions moyennes des émissions de CO étaient de : 47,17% (D80Pro20), 16,98% (D80B5Pro15), 1,42% (D80B10Pro10) et 15,09% (D80B15Pro5). L'augmentation des émissions de CO avec l'augmentation de la charge pour tous les mélanges de carburants était évidente dans cette

étude. L'effet positif de l'ajout de MEDHC et Pro au D100 était perceptible dans cette étude. L'ajout de MEDHC et Pro réduit considérablement les émissions de CO. Ces résultats sont attendus car le biodiesel et le Propanol ont une teneur en oxygène de 10,8% et 26,6% respectivement (tableau 1) et assurent ainsi une combustion complète. Les émissions de CO sont considérablement réduites avec le mélange diesel-Propanol, mais moins pour les mélanges diesel-biodiesel-Propanol. Ces résultats sont en bon accord avec Barabás et al.,[34], Anand et al., [50], Yilmaz et al.,[16] et Mathimani et al.,[4] qui ont rapporté le même effet positif de ajout d'éthanol, de méthanol et de Propanol sur les émissions de CO lorsqu'ils sont ajoutés au mélange diesel-biodiesel et Balamurugan et Nalini [15] et Muthaiyan et Gomathinayagam [17] lorsque le propanol est mélangé avec D100.

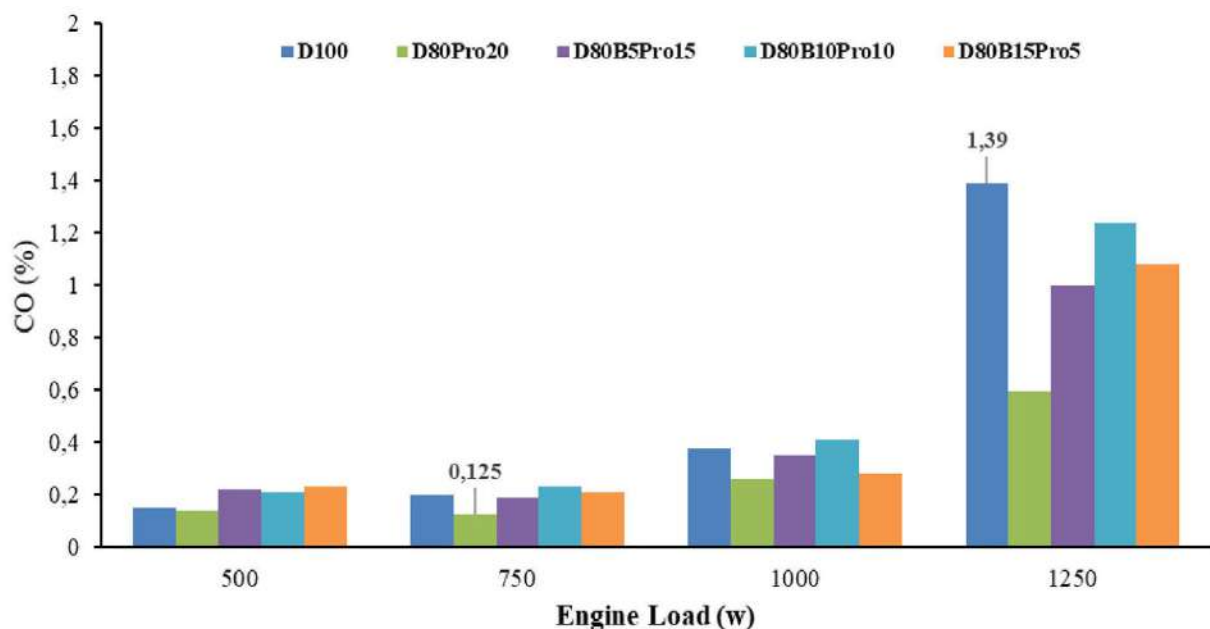


Figure 8. émissions CO fonction de la charge du moteur

3.3.4 Température des gaz d'échappement (Exhaust gas temperature) EGT

EGT est la température à la fin du processus de combustion qui est libéré de la chambre de combustion dans l'environnement. Il fournit des informations qualitatives sur la progression de la combustion dans le moteur et constitue donc un paramètre important pour la formation de polluants pendant le processus d'échappement [30, 50]. Les résultats obtenus de l'EGT en fonction des charges du moteur (500, 750, 1000 et 1250 W) à 3000 tr / min pour les carburants sélectionnés (D100, D80Pro20, D80B5Pro15, D80B10Pro10 et D80B15Pro5) sont présentés sur

la figure 9. On peut voir que l'EGT augmente avec l'augmentation de la charge du moteur pour tous les carburants testés, ce qui est dû à des quantités élevées de carburant brûlé à un régime moteur élevé, conduisant à une température élevée dans le cylindre qui affecte positivement l'EGT [16, 18]. L'EGT le plus élevé de 360,0 ° C s'est produit pour D80B5Pro15 à 1250 tr / min tandis que l'EGT le plus bas a été enregistré pour D80Pro20 à 500 tr / min (100,0 ° C). Les EGT moyens pour tous les carburants testés étaient les suivants respectivement 257,75 (D100), 118,75 (D80Pro20), 259,75 (D80B5Pro15), 223,25 (D80B10Pro10) et 207,50 ° C (D80B15Pro5). L'EGT moyen le plus bas a été observé avec D80Pro20 tandis que l'EGT moyen le plus élevé a été observé avec D80B5Pro15. Par rapport au D100, les réductions moyennes d'EGT étaient les suivantes ; 53,93% (D80Pro20), 0,78% (D80B5Pro15), 13,39% (D80B10Pro10) et 19,5% (D80B15Pro5). Ces réductions peuvent être principalement attribuées à l'augmentation de la teneur en oxygène de tous les mélanges [38]. Comme on peut le voir d'après le tableau 1, Pro et B100 ont des teneurs en oxygène de 26,6% et 10,8%. De plus, la chaleur latente de vaporisation du Pro plus élevée 727,9 kJ/kg (Tableau 1) pourrait réduire la température de combustion et donc diminuer l'EGT. Cela a été beaucoup observé avec D80Pro20 où la réduction la plus faible d'EGT a été enregistrée (53,93%). Ces résultats sont en accord avec Balamurugan et Nalini[15] qui rapportent les mêmes phénomènes lors de l'utilisation de Pro, Anand et al.,[50] et Cheung et al.,[51] lors de l'utilisation du méthanol et Örs et al., [30] lors de l'utilisation du butanol et des alcools dans les moteur à combustion interne.

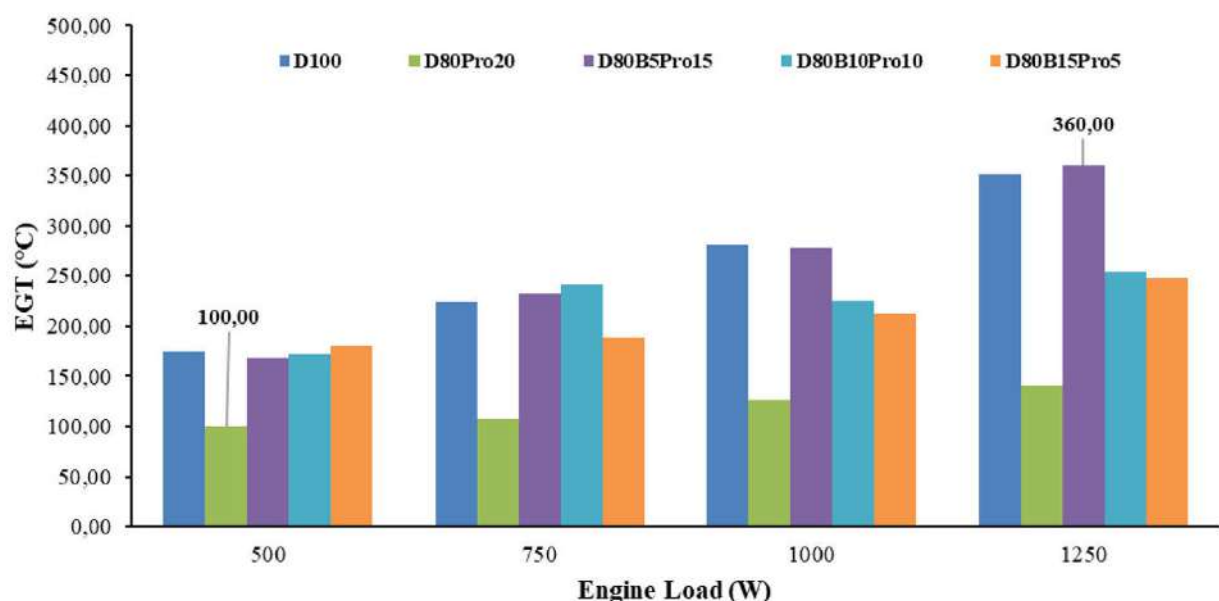


Figure 9 Température d'échappement fonction de la charge du moteur

3.3.5 Emissions des NOx

La formation des émissions de NOx dépend essentiellement de la température de la flamme de combustion [38]. Les résultats des NOx par rapport aux charges du moteur (500, 750, 1000 et 1250 W) à 3000 tr / min pour les carburants sélectionnés (D100, D80Pro20, D80B5Pro15, D80B10Pro10 et D80B15Pro5) sont présentés sur la figure 10. Le NOx le plus élevé de 4,41 ppm a été pour D100 à 1250W tandis que le NOx le plus bas a été enregistré pour D80Pro20 à 500W (0,84 ppm). Les NOx moyens pour tous les carburants testés étaient les suivants : 3,77 ppm (D100), 1,94 ppm (D80Pro20), 3,56 ppm (D80B5Pro15), 3,08 ppm (D80B10Pro10) et 2,85 ppm (D80B15Pro5) respectivement. Par rapport au D100, les diminutions moyennes des NOx étaient les suivantes : 48,69% (D80Pro20), 5,60% (D80B5Pro15), 18,52% (D80B10Pro10) et 24,58% (D80B15Pro5). Ces résultats indiquent que l'ajout de Pro réduit considérablement les émissions de NOx tandis que l'ajout de biodiesel les augmente, cependant, toujours en dessous du niveau de D100 en raison de l'existence de Pro dans les mélanges ternaires. Ces résultats peuvent être principalement attribués à l'effet combiné de la chaleur latente élevée de vaporisation de Pro (727,9 kJ/kg) par rapport à 300 kJ/kg de B100 et 260 kJ / kg de D100 et un indice de cétane élevé de MEDHC 58,88 (tableau 9) par rapport à 12 de Pro et 52 de D100. La chaleur latente élevée de vaporisation de Pro provoque un effet de refroidissement dans le chapitre de combustion conduisant à réduire la température de la flamme adiabatique et donc à réduire la formation de NOx [15, 16]. Contrairement à cela, l'indice de cétane élevé du biodiesel améliore l'achèvement de la combustion et augmente ainsi la température de la flamme adiabatique et donc la formation de NOx [2]. Ces résultats sont en bon accord avec Muthaiyan et Gomathinayagam [17] (mélanges diesel-Pro) et Yildizhan et Yasar [16] (mélanges diesel-biodiesel-Pro) dans lesquels les effets positifs de Pro dans la réduction des émissions de NOx ont été rapportés par les deux études. . La même tendance a été rapportée par Örs et al.,[30] lors de l'utilisation du butanol.

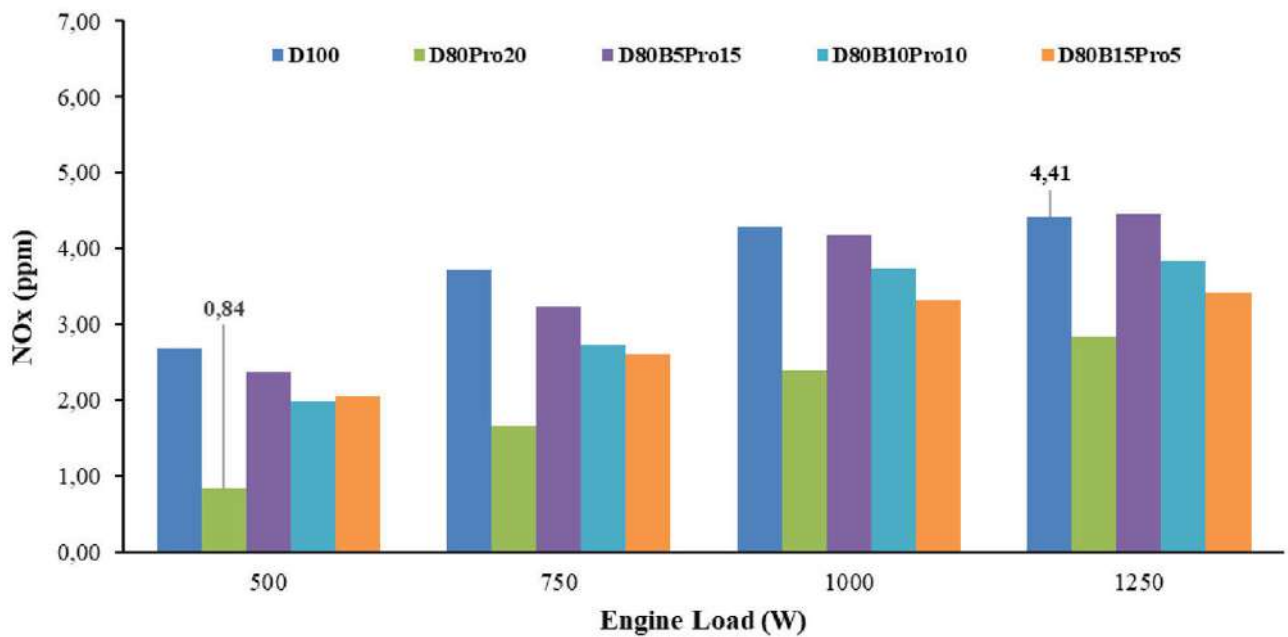


Figure 10 émissions des NOx fonction de charge de moteur

4 Conclusion

L'application de biodiesel synthétisé à partir de matières premières à base des déchets avec de nombreux solvants (alcools à chaîne supérieure) dans les moteurs diesel est un sujet de grand intérêt. Cet article l'examine avec des mélanges ternaires biodiesel–diesel–propanol. Les propriétés physico-chimiques, composition en acides gras (FAC), FT – IR, TGA, DSC, RMN ainsi que certains paramètres de performance des moteurs et des émissions ont été examinés. Le biodiesel était produit à partir de déchets huile de cuisson et présente un FAC de bonne viscosité cinématique, un indice de cétane, une stabilité à l'oxydation, plus pouvoir calorifique et indice d'iode de 3,93 mm² / s, 58,88, 7,43 h, 39,45 MJ / kg et 64,92 g / 100 respectivement. Le mélange de propanol le biodiesel a représenté une amélioration positive des propriétés d'écoulement à froid et une diminution de la masse volumique. Les analyse de FT-IR et RMN les résultats confirment l'existence du biodiesel–diesel–propanol et prouvent leurs qualités en tant que méthodes fiables. Les résultats de DSC et de TGA confirment que le propanol réduit les températures de début et de cristallisation des mélanges. Les performances du moteur en matière d'émissions ont révélé que l'ajout de propanol augmentait encore la consommation d'énergie spécifique aux freins (BSEC) et la consommation de carburant spécifique aux freins (BSFC) et réduit les émissions du monoxyde de carbone (CO), température des gaz d'échappement (EGT), oxydes d'azote (NOx) et fumée. Cette étude a prouvé la faisabilité des

mélanges ternaires avec des avantages en termes de propriétés d'écoulement à froid et de la masse volumique, en plus des performances acceptables du moteur et des émissions résultats.

Ce travail est une étude expérimentale axée sur la caractérisation mis au point des mélanges ternaires biodiesel-diesel-propanol dans lesquels le biodiesel était synthétisé à partir des déchets d'huile de cuisson. Le biodiesel produit a présenté un excellent profil de composition en acides gras avec un degré d'insaturation de 71,32 et un facteur de saturation à longue chaîne de 26,64. Cela a abouti à des propriétés de carburant supérieures telles que la viscosité cinématique à 40 °C 3,93 mm²/s, l'indice de cétane 58,88, la stabilité à l'oxydation 7,43 h, l'indice d'iode 64,92 g d'iode/100 g, un pouvoir calorifique plus élevé de 39,45 MJ/kg et une masse volumique à 15 °C 881,4 kg/m³ respectivement. L'ajout de propanol et d'Euro diesel améliore les propriétés d'écoulement à froid, la masse volumique et la viscosité cinématique du biodiesel tout en maintenant un niveau raisonnable d'indice de cétane et un pouvoir calorifique plus élevé. Les résultats des caractéristiques FT-IR et RMN confirment l'existence des carburants proposés et ont prouvé leurs qualités en tant que méthodes de détection des composants de carburant dans l'industrie des biocarburants. Les analyses DSC et TGA ont indiqué l'effet du propanol et de l'Euro diesel sur la réduction à la fois des températures de cristallisation et de début du biodiesel. Enfin, les tests de performance des moteurs et des émissions ont révélé que l'ajout de propanol au mélange biodiesel-diesel augmente encore ses BSFC et BSEC et réduit le CO, les NOx, la fumée et l'EGT.

En perspective, des recherches supplémentaires sur l'application des mélanges ternaires biodiesel-diesel-propanol peuvent être examinées. Les caractéristiques de combustion telles que le taux de dégagement de chaleur, la pression dans le cylindre, le délai d'allumage et le taux de montée en pression sont recommandées pour les études futures.

Références

1. Saravanan, A.P., et al., *Biofuel policy in India: A review of policy barriers in sustainable marketing of biofuel*. Journal of Cleaner Production, 2018. **193**: p. 734-747.
2. Atabani, A.E., et al., *Valorization of spent coffee grounds into biofuels and value-added products: Pathway towards integrated bio-refinery*. Fuel, 2019. **254**: p. 115640.
3. Mathimani, T. and A. Pugazhendhi, *Utilization of algae for biofuel, bio-products and bio-remediation*. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2019. **17**: p. 326-330.
4. Mathimani, T., et al., *Review on cultivation and thermochemical conversion of microalgae to fuels and chemicals: Process evaluation and knowledge gaps*. Journal of Cleaner Production, 2019. **208**: p. 1053-1064.
5. Prabakar, D., et al., *Pretreatment technologies for industrial effluents: Critical review on bioenergy production and environmental concerns*. Journal of Environmental Management, 2018. **218**: p. 165-180.
6. Atabani, A.E., et al., *Integrated valorization of waste cooking oil and spent coffee grounds for biodiesel production: Blending with higher alcohols, FT-IR, TGA, DSC and NMR characterizations*. Fuel, 2019. **244**: p. 419-430.
7. Yang, H.-H., et al., *Effects of biodiesel on emissions of regulated air pollutants and polycyclic aromatic hydrocarbons under engine durability testing*. Atmospheric Environment, 2007. **41**(34): p. 7232-7240.
8. Kulkarni, M.G. and A.K. Dalai, *Waste Cooking Oil An Economical Source for Biodiesel: A Review*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2006. **45**(9): p. 2901-2913.
9. Kanakraj, S., A. Rehman, and S. Dixit, *CI engine performance characteristics and exhaust emissions with enzymatic degummed linseed methyl esters and their diesel blends*. Biofuels, 2017. **8**(3): p. 347-357.
10. Mofijur, M., et al., *Comparative evaluation of performance and emission characteristics of Moringa oleifera and Palm oil based biodiesel in a diesel engine*. Industrial Crops and Products, 2014. **53**: p. 78-84.
11. Mofijur, M., et al., *Properties and use of Moringa oleifera biodiesel and diesel fuel blends in a multi-cylinder diesel engine*. Energy Conversion and Management, 2014. **82**: p. 169-176.
12. Kumar, S., et al., *Advances in diesel-alcohol blends and their effects on the performance and emissions of diesel engines*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **22**: p. 46-72.
13. Zaharin, M.S.M., et al., *Effects of physicochemical properties of biodiesel fuel blends with alcohol on diesel engine performance and exhaust emissions: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **79**: p. 475-493.
14. Atmanli, A., *Comparative analyses of diesel-waste oil biodiesel and propanol, n-butanol or 1-pentanol blends in a diesel engine*. Fuel, 2016. **176**: p. 209-215.
15. Balamurugan, T. and R. Nalini, *Experimental investigation on performance, combustion and emission characteristics of four stroke diesel engine using diesel blended with alcohol as fuel*. Energy, 2014. **78**: p. 356-363.
16. Yilmaz, N., E. Ileri, and A. Atmanli, *Performance of biodiesel/higher alcohols blends in a diesel engine*. International Journal of Energy Research, 2016. **40**(8): p. 1134-1143.
17. Muthaiyan, P. and S. Gomathinayagam, *Combustion Characteristics of a Diesel Engine Using Propanol Diesel Fuel Blends*. Journal of The Institution of Engineers (India): Series C, 2016. **97**(3): p. 323-329.
18. Altun, Ş., et al., *Effect of n-Butanol Blending with a Blend of Diesel and Biodiesel on Performance and Exhaust Emissions of a Diesel Engine*. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2011. **50**(15): p. 9425-9430.
19. Campos-Fernández, J., et al., *A comparison of performance of higher alcohols/diesel fuel blends in a diesel engine*. Applied Energy, 2012. **95**: p. 267-275.
20. Li, L., et al., *Combustion and emission characteristics of diesel engine fueled with diesel/biodiesel/pentanol fuel blends*. Fuel, 2015. **156**: p. 211-218.
21. Ma, Y., et al., *Experimental investigation on the effect of n-pentanol blending on spray, ignition and combustion characteristics of waste cooking oil biodiesel*. Energy Conversion and Management, 2017. **148**: p. 440-455.

22. Sridhar, R., J. Jeevahan, and M. Chandrasekaran, *Effect of the addition of 1-pentanol on engine performance and emission characteristics of diesel and biodiesel fuelled single cylinder diesel engine*. International Journal of Ambient Energy, 2020. **41**(1): p. 58-63.
23. Yusri, I.M., et al., *Alcohol based automotive fuels from first four alcohol family in compression and spark ignition engine: A review on engine performance and exhaust emissions*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017. **77**: p. 169-181.
24. Boulal, A., et al., *Integrated valorization of Moringa oleifera and waste Phoenix dactylifera L. dates as potential feedstocks for biofuels production from Algerian Sahara: An experimental perspective*. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2019. **20**: p. 101234.
25. Al-Samaraae, R.R., et al., *Perspective of safflower (Carthamus tinctorius) as a potential biodiesel feedstock in Turkey: characterization, engine performance and emissions analyses of butanol–biodiesel–diesel blends*. Biofuels, 2020. **11**(6): p. 715-731.
26. Atabani, A.E., et al., *Evaluation, characterization, and engine performance of complementary fuel blends of butanol–biodiesel–diesel from Aleurites moluccanus as potential alternative fuels for CI engines*. Energy & Environment, 2018. **31**(5): p. 755-784.
27. Mohammed, M.N., et al., *Characterization of Hemp (Cannabis sativa L.) Biodiesel Blends with Euro Diesel, Butanol and Diethyl Ether Using FT-IR, UV–Vis, TGA and DSC Techniques*. Waste and Biomass Valorization, 2020. **11**(3): p. 1097-1113.
28. Liu, K., et al., *Continuous syngas fermentation for the production of ethanol, n-propanol and n-butanol*. Bioresource Technology, 2014. **151**: p. 69-77.
29. Tutak, W., A. Jamrozik, and M. Pyrc, *Co-combustion of biodiesel with oxygenated fuels in direct injection diesel engine*. E3S Web Conf., 2017. **14**.
30. Örs, İ., et al., *Experimental investigation of effects on performance, emissions and combustion parameters of biodiesel–diesel–butanol blends in a direct-injection CI engine*. Biofuels, 2020. **11**(2): p. 121-134.
31. Vijayakumar M, K.P., *Performance enhancement and emissions analysis of diesel engine with biodiesel, N-propanol and 1-butanol blend*. J Appl Fluid Mech, 2017. **10**((Special Issue)): p. pp. 79-84.
32. Panhwar, T., et al., *Synthesis of biodiesel via pre-blending of feedstocks: an optimization by the polynomial curve fitting method*. Biofuels, 2018: p. 1-10.
33. Chhetri, A.B., K.C. Watts, and M.R. Islam, *Waste Cooking Oil as an Alternate Feedstock for Biodiesel Production*. Energies, 2008. **1**(1).
34. Barabás, I., A. Todoruț, and D. Băldean, *Performance and emission characteristics of an CI engine fueled with diesel–biodiesel–bioethanol blends*. Fuel, 2010. **89**(12): p. 3827-3832.
35. Oyerinde, A.Y., & Bello, E. I. , *Use of Fourier Transformation Infrared (FTIR) Spectroscopy for Analysis of Functional Groups in Peanut Oil Biodiesel and Its Blends*. Current Journal of Applied Science and Technology, 2015. **13**(3): p. 1-14.
36. Chuah, L.F., et al., *Influence of fatty acids content in non-edible oil for biodiesel properties*. Clean Technologies and Environmental Policy, 2016. **18**(2): p. 473-482.
37. Atabani, A.E., et al., *A comparative evaluation of physical and chemical properties of biodiesel synthesized from edible and non-edible oils and study on the effect of biodiesel blending*. Energy, 2013. **58**: p. 296-304.
38. Zahoor Ullah, M.A.B., and Zakaria Man, *Characterization of Waste Palm Cooking Oil for Biodiesel Production*. International Journal of Chemical Engineering and Applications, 2014. **5**(2): p. 134-137.
39. Mahamuni, N.N. and Y.G. Adewuyi, *Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR) Method To Monitor Soy Biodiesel and Soybean Oil in Transesterification Reactions, Petrodiesel–Biodiesel Blends, and Blend Adulteration with Soy Oil*. Energy & Fuels, 2009. **23**(7): p. 3773-3782.
40. O'Donnell S, D.I., Yahaya M, Nwadike I, Okoro L. , *A review on the spectroscopic analyses of biodiesel*. Eur Int J Sci Technol, 2013. **2**(7): p. 137-46.
41. NguyenThi, T.X.B., J.-P.; Bessières, D., *Density Measurements of Waste Cooking Oil Biodiesel and Diesel Blends Over Extended Pressure and Temperature Ranges*. Energies, 2018. **11**(5): p. 1212.
42. Y1ld1zhan, afak, and A. Ya_ar, *Performance and Emission Characteristics of Diesel Engine Operating on Biodiesel and Biodiesel Blended with Methanol and Propanol*. International Journal of Scientific and Technological Research, 2015. **1**: p. 270-278.

43. Mohanan, A., et al., *Mitigating crystallization of saturated FAMES (fatty acid methyl esters) in biodiesel. 3. The binary phase behavior of 1,3-dioleoyl-2-palmitoyl glycerol – Methyl palmitate – A multi-length scale structural elucidation of mechanism responsible for inhibiting FAME crystallization*. *Energy*, 2015. **86**: p. 500-513.
44. Tariq, M., et al., *Identification, FT-IR, NMR (1H and 13C) and GC/MS studies of fatty acid methyl esters in biodiesel from rocket seed oil*. *Fuel Processing Technology*, 2011. **92**(3): p. 336-341.
45. O'Donnell S, D.I., Yahaya M, Nwadike I, Okoro L. , *A review on the spectroscopic analyses of biodiesel*. *Eur Int J Sci Technol*, 2013. **2**(7): p. 137-146.
46. Rohman, A. and Y.B.C. Man, *Fourier transform infrared (FTIR) spectroscopy for analysis of extra virgin olive oil adulterated with palm oil*. *Food Research International*, 2010. **43**(3): p. 886-892.
47. *Interpretation of Infrared Spectra, A Practical Approach*, in *Encyclopedia of Analytical Chemistry*.
48. Yilmaz, N., *Comparative analysis of biodiesel–ethanol–diesel and biodiesel–methanol–diesel blends in a diesel engine*. *Energy*, 2012. **40**(1): p. 210-213.
49. Yilmaz, N., et al., *Effect of biodiesel–butanol fuel blends on emissions and performance characteristics of a diesel engine*. *Fuel*, 2014. **135**: p. 46-50.
50. Anand, K., R.P. Sharma, and P.S. Mehta, *Experimental investigations on combustion, performance and emissions characteristics of neat karanja biodiesel and its methanol blend in a diesel engine*. *Biomass and Bioenergy*, 2011. **35**(1): p. 533-541.
51. Cheung, C.S., L. Zhu, and Z. Huang, *Regulated and unregulated emissions from a diesel engine fueled with biodiesel and biodiesel blended with methanol*. *Atmospheric Environment*, 2009. **43**(32): p. 4865-4872.

CHAPITRE IV :

BIOCARBURANTS, HYBRIDES ET
ATTENUATION DES EMISSIONS DE GAZ A
EFFET DE SERRE : PERSPECTIVE ET
SCENARIOS DU SECTEUR DES
TRANSPORTS ALGERIEN A L'HORIZON
2050

Biocarburants, hybrides et atténuation des émissions de gaz à effet de serre : perspective et scénarios du secteur des transports Algérien à l'horizon 2050

1 Introduction

L'humanité est confrontée, actuellement, à trois défis interdépendants : la sécurité alimentaire, le changement climatique et la sécurité énergétique. Nonobstant, le monde continue de dépendre des combustibles fossiles : en 2018, plus de 84% de l'énergie primaire provenait de combustibles fossiles qui ont des impacts destructeurs sur l'environnement, produisant des gaz à effet de serre (GES). La croissance annuelle de la consommation de carburant a été de 2,9%, passant de 13474,6 Mtep, en 2017, et à 13864,9 Mtep, en 2018[1]. Selon, l'Agence internationale de l'énergie (AIE), les besoins énergétiques mondiaux augmentent plus lentement que par le passé, et continuent d'augmenter de 30% entre aujourd'hui et 2040[2]. D'autre part, les gaz à effet de serre générés par les combustibles fossiles s'accumulent continuellement dans l'atmosphère. Ces émissions sont le principal contributeur de la pollution atmosphérique et du changement climatique mondial. À terme, comme les combustibles fossiles ne sont pas renouvelables et s'épuisent dans un proche avenir, le gouvernement doit se charger d'assurer la transition énergétique. De nombreux pays mettent en place des politiques énergétiques pour soutenir et réguler le secteur énergétique. Les principaux objectifs de ces politiques sont d'augmenter le ratio des énergies renouvelables, de diminuer la dépendance aux énergies fossiles et de limiter les émissions de gaz à effet de serre. Pour faire face aux défis évoqués ci-dessus, des alternatives plus respectueuses de l'environnement et plus adaptées aux énergies renouvelables apparaissent progressivement [3-5].

Les carburants de remplacement sont au centre des préoccupations, depuis plusieurs années, en raison des défis liés à l'atténuation des GES dans le secteur des transports. Selon les directives du plan des énergies renouvelables (ER), les politiques vertes encouragent l'utilisation accrue

des sources d'énergie verte et renouvelable pour réduire la dépendance aux énergies fossiles. L'intérêt croissant pour les biocarburants dans de nombreux pays est évident. En 2017, le monde a produit plus de 140 milliards de litres de différents liquides de biocarburant; le bioéthanol représentait plus de 72% de cette production, et 28% du biodiesel, préparé à partir de technologies de première, deuxième et troisième génération[6]. En 2019, les biocarburants liquides étaient principalement produits dans trois régions : les États-Unis (37,9%), le Brésil (24,1%), et l'Union européenne (15,8%)[1]. D'ici 2021, la production mondiale devrait atteindre 222 milliards de litres, 81% de bioéthanol, et 19% de biodiesel. Actuellement, environ 3% du transport routier de carburant, dans le monde, est constitué de biocarburants [6,7]. D'ici 2050, les biocarburants pourront fournir jusqu'à 27% des carburants de transport mondiaux et atténuer 2,1 Gt d'équivalent CO₂ d'émissions[7]. Le secteur des biocarburants présente de nombreux avantages tels que: l'amélioration de l'utilisation efficace des sources renouvelables, le renforcement de la sécurité et de la diversification énergétiques, le développement de l'agriculture rurale et les investissements dans les zones isolées; l'atténuation des émissions de gaz à effet de serre, et l'augmentation des emplois et des modes de vie[6].

Le bioéthanol peut être mélangé avec de l'essence avec n'importe quel rapport de volume. Néanmoins, E10 et E85 sont les mélanges les plus courants, qui contiennent respectivement 10% et 85% d'éthanol. Aujourd'hui, le Brésil est le deuxième producteur et consommateur d'éthanol. L'essence brésilienne est mélangée à 27% de bioéthanol[8]. Le biodiesel est défini comme un ester monoalkylique de gras à longue chaîne, dérivé d'huiles végétales ou de graisses animales. Actuellement, quatre concentrations principales de biodiesel sont utilisées sur le marché des carburants : pur (B100), mélangé (B20-B30), additif (B2-B5). Aucune modification du moteur n'est requise avec B5. Lorsque le biodiesel est mélangé a des propriétés physiques et chimiques similaires au diesel minéral et parfaitement miscible [9, 10].

En 2015, le mandat de biodiesel domestique brésilien est passé de 5% à 7%[8, 11]. D'autres pays ont sérieusement envisagé la vaste utilisation des biocarburants à l'avenir comme la Chine [12], l'Allemagne [13], le Royaume-Uni [13], la Turquie [14]and l'Australie[15].

Le biogaz est obtenu à partir de la décomposition de matières organiques, principalement le méthane qui a un potentiel énergétique, pour le processus de combustion dans les moteurs à combustion interne, notamment. Ce potentiel de biogaz est produit à partir de la digestion anaérobie des eaux usées municipales, et des décharges sanitaires, afin d'être substitué aux garanties minérales diesel, la minimisation des

impacts environnementaux, assurant une atténuation significative des émissions de GES[16, 17].

Le gaz naturel est l'une des plus importantes ressources énergétiques, représentant 23% de la consommation mondiale d'énergie primaire. Le GN dans le secteur des véhicules est similaire au gaz naturel dans le secteur domestique. Principalement méthane (CH₄)[18], le GNC est un gaz naturel comprimé, stocké et distribué dans des conteneurs cylindriques rigides, à 200-248 bars. Le GNC est un carburant automobile prometteur depuis la flambée des prix du pétrole dans les années 1970, 1980 et, encore une fois, dans les années 2000. Les véhicules au GNC font leurs preuves dans de nombreux pays avec de nouvelles technologies de pointe comme carburant bon marché et stable. En fait, la population de véhicules au gaz naturel augmente rapidement, bien qu'il n'y ait pas de sources d'information cohérentes et fiables. L'Iran et la Chine sont les leaders mondiaux avec respectivement 4,07% et 3,99%. La population mondiale de VGN a augmenté à un taux annuel de 2,4% et continuera avec 3,7% jusqu'en 2030[19]. Actuellement, il existe plus de 22,44 millions de véhicules au gaz naturel et 26677 stations-service dans 86 pays. Les véhicules au GNC sont principalement des véhicules légers et utilitaires 93%[20]. Le GNC, reconnu comme un carburant écologique, a été identifié comme l'une des meilleures alternatives aux carburants fossiles en raison de sa nature inhérente [18, 21-23]. Ses caractéristiques sont très intéressantes : grande disponibilité, respectueux de l'environnement, compatible au moteur CI et moteur SI, de plus, il est d'un coût faible. Il peut être fourni de trois manières: moteur dédié au GNC, moteur à essence bi-carburant rééquipé et moteur diesel bi-carburant [19, 23].

GPL possède des avantages par rapport à l'essence pour ses réductions d'émissions nocives et ses prix bas. En fait, dans le monde, plus de 25 millions de véhicules GPL circulent, concentrés en Asie, en particulier en Corée du Sud, avec un taux de croissance mondial de 10% par an[24]. Les principaux avantages environnementaux de GPL sont la réduction de plus de 50% de CO, 35% NO₂ et 40% HC par rapport à l'essence [25, 26]. Le GPL est également un carburant sans particules par rapport aux véhicules GDI diesel et essence à injection directe [27, 28]. En revanche, l'Algérie est le troisième grand exportateur de GPL [20] et peut répondre à toute demande supplémentaire de GPL grâce à la mise en place de nouvelles politiques énergétiques. En effet, l'Algérie dispose d'une flotte de véhicules essence, estimée à 3,2 millions d'unités ; le nombre de véhicules kit-GPL équipés est de 325 000, et un taux de conversion essence est de 10%. Un programme de conversion au GPL a été lancé dans la perspective de 2030. Pour les véhicules électriques EV, il existe une diversité de technologies. Il peut être regroupé en deux types de véhicules électriques de base : les

véhicules tout électriques (AEV) et les véhicules électriques hybrides rechargeables (PHEV). Les AEV comprennent les véhicules électriques à batterie (BEV) et les véhicules électriques à pile à combustible (FCEV); les deux types sont partiellement rechargés par freinage régénératif. Les véhicules électriques ont une caractéristique majeure qui les distingue des véhicules électriques hybrides, c'est que les conducteurs peuvent les brancher en charge à partir d'une source d'alimentation électrique externe. [29]. Les véhicules tout électriques (AEV) fonctionnent uniquement à l'électricité. Ils peuvent avoir une autonomie allant jusqu'à 160 km, et 400 km pour quelques modèles de luxe, avec un temps de recharge maximal de 30 minutes (avec charge rapide) selon le type de chargeur et de batterie. Les PHEV fonctionnent à l'électricité pour des gammes plus petites et une fois la batterie épuisée, passe au moteur SI. L'introduction des VE, dans le système énergétique, réduit la consommation de carburant et réduit les émissions de GES par rapport aux véhicules conventionnels.[30]. La part du marché mondial des véhicules électriques est passée à 1,8% en mars 2019, contre 1,6% en mars 2018, les ventes mondiales de véhicules électriques étaient d'environ 2,1 millions d'unités en 2018, soit une augmentation de 64% par rapport à 2017[31].

Le secteur des transports, en tant que l'un des secteurs les plus propulsifs, est un contributeur important au bilan énergétique en Algérie. Au cours de la dernière décennie, la consommation finale d'énergie de ce secteur a augmenté, annuellement, de plus de 6%, ce qui peut s'expliquer par l'expansion rapide du nombre de véhicules et la forte croissance économique[32]. Une autre raison est la croissance des immobilisations, en particulier des autoroutes modernes. Par conséquent, l'estimation des besoins énergétiques futurs semble importante pour les perspectives du système énergétique. Le secteur des transports, en tant que secteur influent dans le bilan énergétique algérien, est l'un des plus intéressants à analyser.

Le gouvernement algérien a récemment mis en place des plans pour réduire la consommation de produits à base du pétrole dans le pays [33]. Dans ce contexte, les véhicules essence et diesel peuvent être bicarburant (Biocarburants, GNC) ou bicarburant (LGP) ou progressivement remplacés par des voitures électriques. Cependant, il manque encore peu d'informations ou une feuille de route à suivre, à l'exception de la promotion LGP. Par conséquent, cet article vise à fournir, d'ici 2050, des informations cruciales, ainsi que des prévisions de la demande et des possibilités d'atténuation des GES, pour les carburants de transport routier à base du pétrole et l'introduction de biocarburants, de GNC, de véhicules électriques EV et de LGP, dans le système énergétique algérien.

Le secteur des transports algérien en expansion et très gourmand est totalement dépendant des pétro-produits, en raison de l'augmentation du nombre de flottes automobiles et de la dépendance excessive au transport routier. Les GES irrécupérables émis par ce secteur sont en constante augmentation. En conséquence, la consommation de diesel et d'essence a atteint des nouveaux records. Par conséquent, il existe un fort besoin de carburants alternatifs plus propres, respectueux de l'environnement et économiquement viables. Les biocarburants, les véhicules électriques, au GNC et GPL devraient jouer un rôle crucial dans la réalisation des objectifs des politiques énergétiques et environnementales. Dans cet article, les perspectives du secteur algérien des transports, et les mesures d'atténuation des GES, dans différentes formes de scénarios basés sur des modèles semi-empiriques, sont analysées et discutées. Pour une politique adéquate façonnée dans un scénario, en 2050, la consommation annuelle algérienne pourrait baisser jusqu'à 35%, 43% des émissions de CO₂ et 73% des émissions de NO_x pourraient être atténuées par rapport au scénario BAU. Ces résultats prometteurs indiquent l'énorme potentiel de la diversification des ressources dans le secteur des transports. Par conséquent, la mise en œuvre de telles politiques est fondamentale pour une politique de transition durable du secteur des transports en Algérie.

2 Contexte Algérien

L'Algérie, en tant que troisième économie africaine, joue un rôle central dans le secteur énergétique africain. Ses importantes réserves de pétrole et de gaz ainsi que sa superficie s'étendent sur 2 381 741 km² avec 43,7 millions d'habitants (16,8 habitants / km²), et 1200 km de mer Méditerranée, font du pays une pierre angulaire de son espace géopolitique. De plus, l'Algérie est un exportateur de gaz et de pétrole depuis les années cinquante du siècle dernier. La nationalisation du secteur des hydrocarbures, en 1971, avait profondément affecté les politiques du gouvernement car ce secteur prenait une part de plus en plus importante de l'économie nationale. Actuellement, les hydrocarbures représentent 97% des exportations nationales, 35,9% du PIB national et plus des deux tiers des impôts et des revenus de l'État[4].

Par ailleurs, l'Algérie compte respectivement 12,2 milliards de barils et 4504 Gcm de réserves de pétrole brut et de gaz, soit le 7^e pays [34]. La compagnie pétrolière nationale algérienne (SONATRACH) collabore avec plusieurs grandes multinationales pétrolières (BP, ANADARKO Petroleum, TOTAL et ENI). En tant que pays producteur de gaz, l'Algérie prévoyait de construire un grand réseau de gaz naturel dans les villes et de fournir les bouteilles de gaz dans les zones rurales. Cependant, les productions pétrolières et gazières diminuent continuellement en raison de la

diminution de leurs réserves et d'une demande intérieure croissante due à l'urbanisme et aux changements dans le mode de vie des citoyens.[34]. Tout cela rend la situation énergétique critique en l'Algérie.

Bénéficiant d'un énorme potentiel de ressources énergétiques renouvelables : le solaire, l'éolien, la géothermie et la biomasse. L'Algérie prévoit d'augmenter ses parts d'énergies renouvelables d'ici 2020, en produisant autant d'électricité à partir de ressources renouvelables qu'elle produisait à partir de ses centrales au gaz naturel. Peu d'initiatives pour promouvoir l'énergie durable ont été créées afin d'être un fournisseur d'énergie sur le marché européen. Ce potentiel place l'Algérie dans une position idéale pour jouer un rôle du premier plan en tant que futur fournisseur d'énergie verte[35].

En 2002, le gouvernement algérien a adopté un plan national de développement environnemental durable, PADD (Plan d'action et de développement durable) [36], en plus d'un vaste programme national ambitieux de développement des énergies renouvelables (ER) (Programme national de développement des énergies renouvelables). (PNDER, 2011)[35](Fig.1). Le premier plan d'action se concentre sur la réduction de la pollution et du bruit, la préservation de la biodiversité et des espaces naturels, la formation et la sensibilisation du public aux enjeux environnementaux, tandis que le second vise la promotion des sources d'énergie renouvelables, en particulier les systèmes photovoltaïques et éoliens. D'ici à 2030, 40% de la production nationale d'électricité devrait provenir de sources renouvelables, soit 22 GW d'installations différentes. Il est prévu que 37% de la production nationale d'électricité soit générée par l'énergie solaire et 3% par l'énergie éolienne)[36].

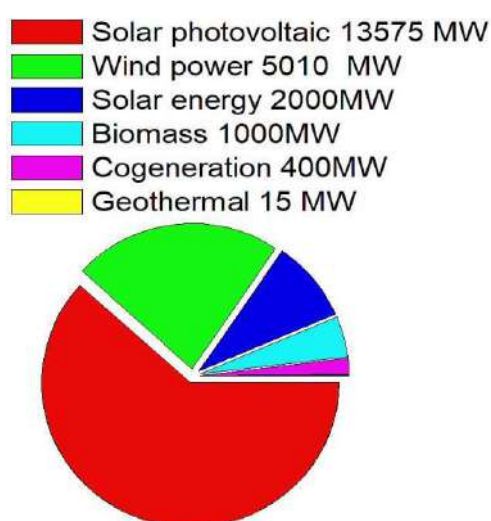


Figure 1. Répartition des énergies dans le programme national des énergies renouvelable PNDER 2015-2030[37]

Un autre plan a été adopté en 2010, pour combler les inégalités territoriales en Algérie, et pour créer une atmosphère de développement durable et assurer une croissance harmonieuse dans tout le pays. SNAT, (Schéma National d'Aménagement du Territoire), met en œuvre la vision 2025 et se concentre sur la réduction des inégalités régionales, renforce l'attractivité des zones en retard de développement [38].

Profitant de l'augmentation des revenus pétroliers, le gouvernement algérien a lancé des projets majeurs, au cours des deux dernières décennies, visant le développement des infrastructures, notamment les ports maritimes, les aéroports, les chemins de fer, les tramways, le métro, les routes et les autoroutes. Actuellement, la côte algérienne compte 51 infrastructures maritimes: 11 ports de commerce, 2 ports pétroliers, 41 ports de pêche et marina[39]. Le réseau ferroviaire algérien a récemment subi une électrification sur certains tronçons, ce qui devrait conduire à l'installation de trains à grande vitesse qui relieront les villes les plus importantes du pays. Ce réseau compte plus de 200 gares. Les projets ferroviaires en cours comprennent l'électrification de 1 000 km de voies ferrées et la construction de 3 000 km de voies ferrées. La longueur de ce réseau ferroviaire était de 12 000 kilomètres en 2018. L'Algérie compte 35 aéroports, dont 13 aéroports internationaux. L'aéroport d'Alger (capitale) est l'aéroport le plus important et le plus grand avec une capacité de plus de 6 millions de passagers par an. De plus, Alger disposait d'un nouveau terminal international en 2018, avec une capacité de 10 millions de passagers par an. Le métro d'Alger, d'une longueur de 9 km, a été inauguré en 2011, d'autres extensions sont prévues à Alger et Oran. Les tramways prennent également une part importante des projets du transport urbain dans plus de 8 villes[39].

Malgré la grande taille du pays, l'Algérie possède l'un des réseaux routiers les plus denses du continent africain, avec 112 696 km de routes, dont 29 567 km d'autoroutes et plus de 4 910 ouvrages de génie civil y compris la construction de la route Est-Ouest totalisant 1216 km, entre le Maroc et la Tunisie, reliant les principales régions littorales algériennes. De nombreux projets ont été réalisés ou sont en cours de construction pour bâtir un secteur efficient et efficace, pour participer au développement économique du pays. L'autoroute des Haut-Plateaux de 1020 km, traversant plus au sud, tracera horizontalement le pays. L'autoroute des Haut-Plateaux et l'autoroute Est-Ouest seront également reliées par 12 routes auxiliaires. Une autre autoroute, le nord-sud est en cours de construction et devrait faire partie de l'autoroute transsaharienne, reliant Alger à Lagos au Nigeria. La partie algérienne s'étend sur 3000 km[40]. Cependant, à la fin de 2018, les flottes de véhicules ont atteint 6418212 véhicules, avec, 255538 nouveaux véhicules ont été enregistrés. 71% du parc de véhicules sont des

véhicules légers. Le véhicule GPL présentant environ 3%, l'essence 26% et le diesel 65%. La flotte nationale souffre du vieillissement, plus de la moitié des véhicules algériens ont plus de 20 ans[32] (Fig.2). Le taux de croissance annuel moyen de la demande énergétique entre 2008 et 2018 était de 6,3%, la croissance était dominée par le diesel avec 7,7%, l'essence 3,5% et le GPL 1,6%.

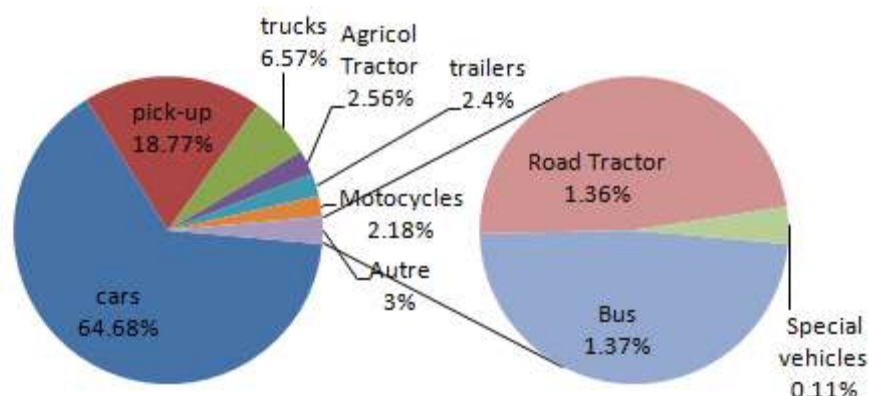


Figure 2. Répartition du Parc national Algérien en 2018 [32]

Ces statistiques ne sont disponibles que pour le secteur public. Pour le secteur privé, qui est le principal opérateur dont l'absence de données statistiques a été constatée. Le transport routier est le principal mode de transport, environ 95% des opérations de transport en Algérie sont effectuées par route (figure 3). Les véhicules importés représentent 93% du parc routier, notamment en provenance d'Europe et d'Asie. La production nationale de véhicules est limitée aux véhicules utilitaires (tracteurs agricoles, camions, bus).

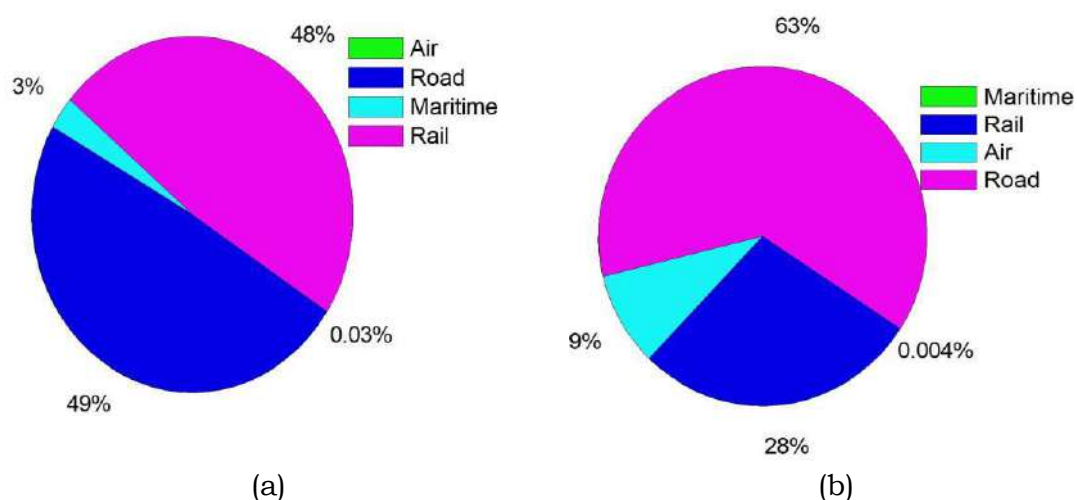


Figure 3. Répartition des modes du transport du secteur étatique. (a) marchandise (b) Passagers [41]

L'économie algérienne a connu une croissance sans précédent entre (2001-2017). En raison de cette croissance, le transport routier a augmenté et donc la consommation de carburant a augmenté. L'Algérie a l'un des prix du carburant les plus bas au monde, ce qui entraîne une surestimation de la consommation nationale due à l'extravagance. Le secteur des transports est l'un des plus gros consommateurs d'énergie. Il contribue directement et indirectement au développement économique en reliant les sites de production aux marchés de consommation et en assurant la circulation des passagers et des marchandises. Cependant, il est associé à une consommation excessive de combustibles fossiles et à des émissions de GES. En 2018, le sous-produit de la consommation d'énergie nationale a atteint 42,5Mtep, le secteur des transports en possédait 36,5%, en tant que deuxième consommateur d'énergie. Avec 14,4 Mtep, sa consommation a augmenté annuellement de 6,5%, en 2018. En raison de la croissance du parc de véhicules, plus de 255 538 véhicules neufs ont été achetés. Tout cela a poussé l'Algérie à importer 4,4Mtep de différents produits pétroliers dont 80% étaient dédiés au secteur des transports (figure 4). La proportion de carburants renouvelables tels que le bioéthanol, le biodiesel, le biogaz, l'hydrogène et l'électricité est nulle. Le transport routier dépend totalement des combustibles fossiles, de l'essence, du GPL et du diesel, détient une part importante du secteur des transports, avec 14,435Mtep [42].

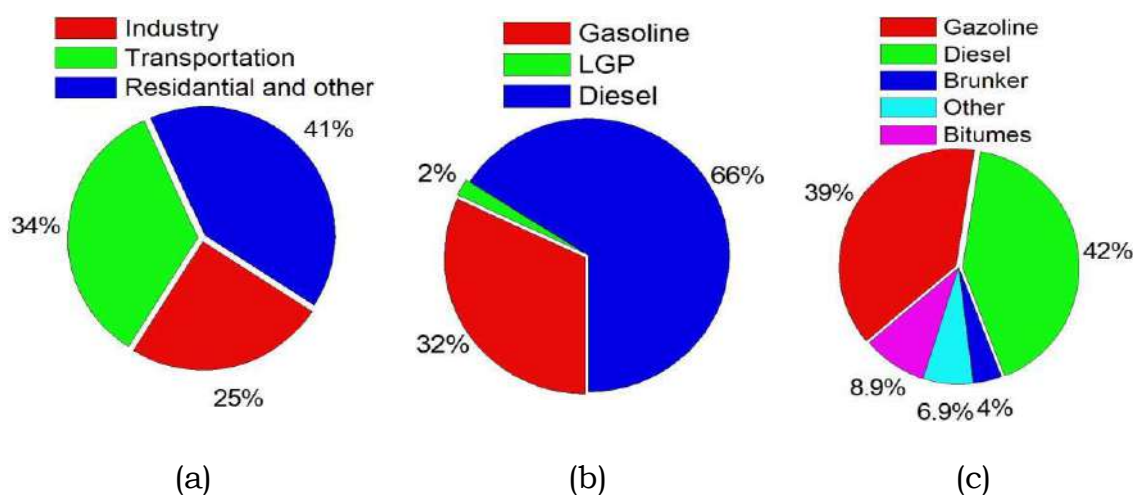


Figure 4. (a) Consommation énergétique nationale par secteur en 2018, (b) la consommation du secteur routier par produits, (c) Produits énergétique importés [42]

Par conséquent, pour l'équilibre énergétique algérien, la mise en œuvre des politiques des biocarburants dans le secteur des transports apportera de nombreuses opportunités ; elle permettra l'exploitation de grandes terres, contribuera au développement de zones isolées ; et créera de nouveaux emplois et permettra au gouvernement de faire face aux besoins énergétiques croissants, participant également à l'atténuation des gaz à effet de serre.

3 Méthode et scénarios

Cinq scénarios sont proposés, de 2018 (années de référence) à 2050. Dans cette étude, le BAU est un scénario de référence.

- Scénario BAU : *Business As Usual* représente une stratégie de non-intervention comme son nom l'indique.
- Scénario BIO : La politique énergétique invite, progressivement, les biocarburants jusqu'en 2050, date à laquelle tous les véhicules seront alimentés en bio-essence (E15) et en biodiesel (B20).
- Scénario HYB1 : Les technologies hybrides sont vulgarisées, progressivement, dans tous les sous-secteurs de transport. En 2050, la part des véhicules hybrides passera à: 20% des voitures électriques, 20% des voitures diesel seront bicarbure (gaz naturel comprimé GNC-diesel) et 40% des voitures essence seront bicarbure (GPL- de l'essence).
- Scénario HYB2 : Dans ce scénario, l'objectif 2050 est le suivant : La part des voitures électriques est de 35%, 40% des moteurs diesel sont bicarbure (GNC-diesel) et 60% des voitures à essence sont bicarbure (LGP-essence).
- Scénario MIXT : En plus du scénario HYB2, qui favorise également les biocarburants, ce qui reste des pièces diesel et essence est mélangé (E15 et B20).

Pour un grand producteur de gaz naturel et de GPL comme l'Algérie, la promotion des technologies gazières est essentielle ; surtout pour un secteur gourmand comme le transport, pour faire face à la facture annuelle excessive des importations de produits pétroliers raffinés. Le gaz naturel, comme alternative, est un carburant à combustion propre avec un grand potentiel de réduction des émissions de GES et des émissions nocives, comme les particules cancérigènes des véhicules PM. Pour les voitures diesel bicarbure (GNC-diesel), qui offre un rendement plus élevé avec 25% de réduction de la consommation de carburant [19, 43]. Cependant, les technologies des voitures à essence GPL sont bi-alimentées [43]. Dans cette étude, nous les considérons comme des voitures alimentées principalement par LGP. L'énergie électrique qui alimente le secteur des transports est censée être solaire et sans émissions de GES [44]. Presque tous les équipements diesel peuvent utiliser des mélanges Jusqu'à 20% du biodiesel, les équipements de stockage et de distribution sont compatibles [45].

Dans une perspective macro, le produit intérieur brut, la population, les carburants, le parc automobile, les émissions de GES sont des variables indépendants courants utilisés dans la modélisation économique de la

demande nationale de carburants pour le secteur des transports [14],[46], [47] et [48]. Les valeurs futures sont calculées en analysant la base de données de la dernière décennie.

$$\chi_t = \chi_0(1 + \lambda)^n \quad (1)$$

χ_t est la valeur prévue à l'année t et au taux de croissance moyen, alors que χ_0 est la valeur initiale. Le taux de croissance moyenne sur la base de données de l'année, comme indiqué dans l'équation (2), est un indicateur utilisé pour mesurer la croissance moyenne annuelle d'un paramètre économique donné par la relation suivante.

$$\lambda = \frac{1}{T} \sum_0^T \left| \frac{\chi_t - \chi_{t-1}}{\chi_{t-1}} \right| \quad (2)$$

Il existe une relation directe entre le secteur des transports et la pollution. Le secteur des transports continue d'être l'un des plus importants consommateurs de combustibles fossiles et source d'émissions de GES. En termes d'émissions de gaz à effet de serre, cette étude s'est concentrée uniquement sur les émissions de CO₂ et de NO_x en raison de leurs effets dominants sur les émissions de gaz à effet de serre [49]:

$$\text{Emission} = \sum_i [\text{fuel}_i \cdot \text{EF}_i] \quad (3)$$

Où E sont les émissions de GES (kg) de l'année t , EF_i est le facteur d'émission du carburant i , fuel_i est la consommation de carburant pour un scénario donné. Les facteurs d'émission sont déterminés à partir de la composition chimique, en particulier du rapport C / H, du carburant consommé et de son pouvoir calorifique. Les taux d'émission de GES pour chaque type de carburant sont énumérés dans le tableau 1.

Tableau 1. Facteurs d'émissions CO₂ et NO_x pour chaque carburant

Fuel type	Densité d'énergie (kWh/kg fuel valeur calorifique)[50]	Taux de Carbon par masse %[51]	Facteur d'émission (kgCO ₂ /toe)[50]	Facteur d'émission (kgNO _x /toe)[52]
Diesel	13.9	86.5	3150	1.10
Essence	12.7	84.6	3066	2.47

Les avantages en matière d'émissions de bicarburant des moteurs diesel conventionnels avec 95% de GNC, et 5% de diesel, sont énumérés dans le tableau 2.

Table 2.

Tableau 2. Réduction des Emissions par moteurs bi-carburant GN-diesel (GNC 95% and 5% diesel) [53]

Emission	Réduction des émissions %
CO ₂	10
PM	85
NO _x	72
Sox	91

Par rapport à l'essence, les moteurs à allumage commandé alimentés au GPL réduiront 99% des émissions d'oxydes d'azote NO_x, 74% de la concentration de PM et 6-20% des émissions de monoxyde de carbone CO₂ [54].

Le B20 est l'un des mélanges de biodiesel les plus courants. Il contient 20% en volume de biodiesel et 80% en volume de diesel. C'est également le mélange diesel-biodiesel le plus avantageux pour l'environnement [55]. Les variations moyennes des émissions massiques des moteurs diesel, utilisant le mélange de biodiesel par rapport au diesel conventionnel, sont représentées par le tableau 3.

Tableau 3. Variations moyennes des émissions massiques des moteurs diesel utilisant le mélange de biodiesel par rapport au diesel conventionnel (%).

Mixte	CO ₂ [55]	NO _x [45]
B20	-2.6	+2.4

La teneur plus élevée en éthanol du carburant réduit l'ampleur des émissions de NO_x. Les recherches montrent que l'ajout d'éthanol jusqu'à 15% réduit les émissions de NO_x d'environ 83%. En revanche, il est clair que l'essence mixte contient plus d'oxygène alors que les émissions de CO₂ diminueront, les moteurs émettent moins de CO₂ que dans d'autres conditions. Les émissions de CO₂ sont réduites d'environ 6,3%, pour chaque 5% d'éthanol dans les mélanges d'essence [56, 57].

4 Résultats et discussions

Les paramètres prévus sont calculés en analysant les statistiques de la base de données selon l'Office National des Statistiques (ONS)[32]. La croissance démographique moyenne annuelle est de 1,53%. En 2050, la population algérienne devrait atteindre 64,5 millions d'habitants. Le parc national de véhicules devrait atteindre 25 millions, soit un véhicule pour

2,5 habitants. Cela signifie, en moyenne, 2 véhicules pour chaque famille (Fig.5).

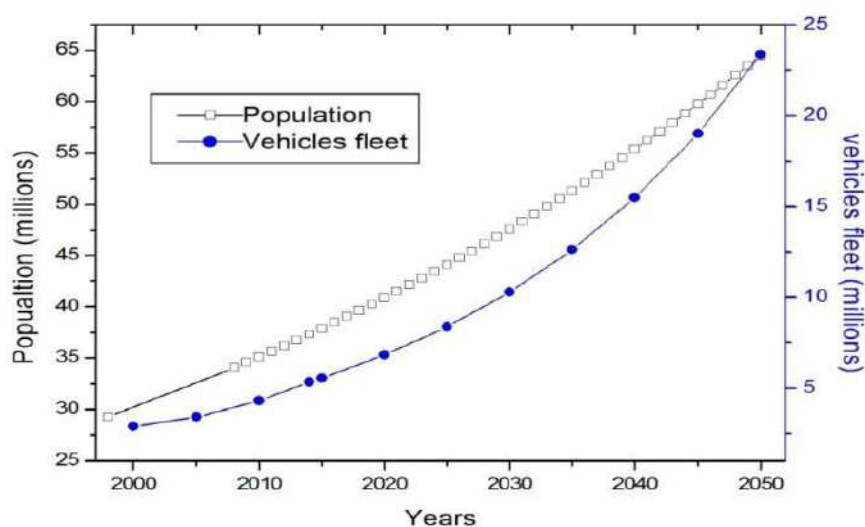
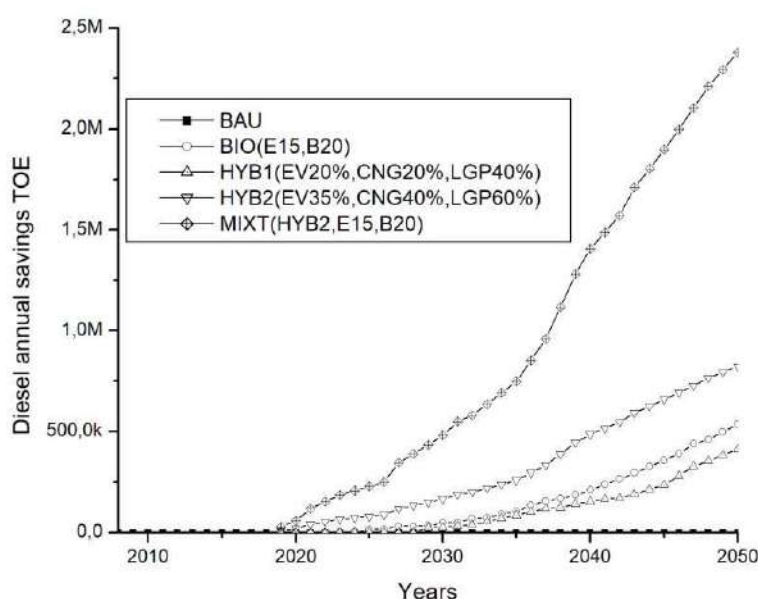


Figure 5. Evolution de la Population et du parc automobile à l'horizon 2050

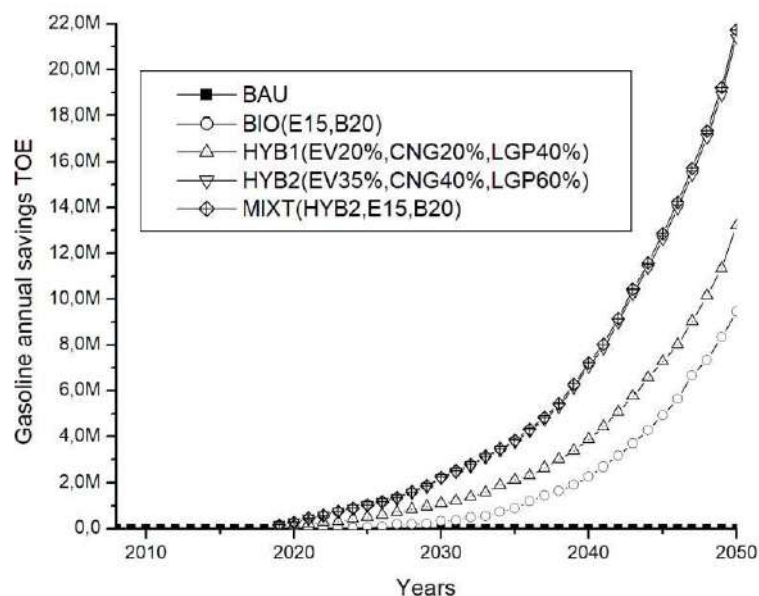
En Algérie, le taux de croissance annuel de la consommation d'essence est de près de 7,51%, par rapport aux pays développés et en développement qui est de 1% [58] et environ 2,41% pour le taux de croissance annuel de la consommation de diesel. D'ici 2050, la consommation nationale d'essence atteindra environ 50 Mtep et 20,57 Mtep de diesel, s'il n'y a pas de changement de politique énergétique (scénario BAU). L'Algérie a l'un des prix de l'énergie les plus bas au monde, en raison de la faiblesse des taxes exercées et de la politique de subvention directe de l'État, adaptée de l'ancien modèle économique socialiste, cela conduit à une contrebande intense de produits pétrochimiques au-delà des frontières, et à une consommation abusive locale.

Selon les résultats de l'atténuation de l'énergie et des émissions, dans différents scénarios par rapport au scénario BAU, la diversification des ressources du système énergétique national en introduisant des biocarburants et en promouvant les voitures hybrides peut économiser de l'énergie et réduire les émissions de GES. Malgré la promotion des biocarburants, le scénario BIO, en mélangeant le bioéthanol et le biodiesel avec de l'essence et du diesel (E15, B20) pourrait permettre de couvrir une partie de la consommation et de réduire les émissions. Le développement de ce secteur est confronté à sa concurrence avec le transformateur de produits alimentaires dans des pays semi-arides comme l'Algérie, qui limite son potentiel de réponse aux demandes énergétiques nationales à l'utilisation de divers déchets pour produire des biocarburants.

Le taux de vulgarisation des véhicules hybrides, dans les scénarios HYB1 et HYB2, indique que l'économie d'énergie augmente et les émissions de GES diminuent. Il sera plus écologiquement bénéfique que les bornes de recharge pour véhicules électriques soient équipées de panneaux solaires, donc l'empreinte carbone sera acceptable. La généralisation de l'électrification des lignes ferroviaires joue un rôle clé dans la politique énergétique en raison de l'énorme demande d'énergie dans ce sous-secteur en termes de diesel. Ceci s'accompagne de l'augmentation de la capacité algérienne en termes d'énergie électrique plus propre (gaz et solaire). Une autre solution, qui peut s'avérer pratique, est la bicarburation des moteurs diesel avec du gaz naturel comprimé ou du biogaz dans les transports municipaux / urbains. Cela peut également être le cas pour le sous-secteur du transport maritime. Le GPL en Algérie a un grand potentiel dans le pays pour réduire les factures d'importation des produits pétro, en particulier de l'essence. Le tarif du parc national en véhicules équipés en kit- GPL doit être massivement encouragé, du fait de la capacité de production locale et de son prix très bas, comparé à l'essence, et à son impact environnemental positif. Cela en fait un bon choix pour l'utilisateur.



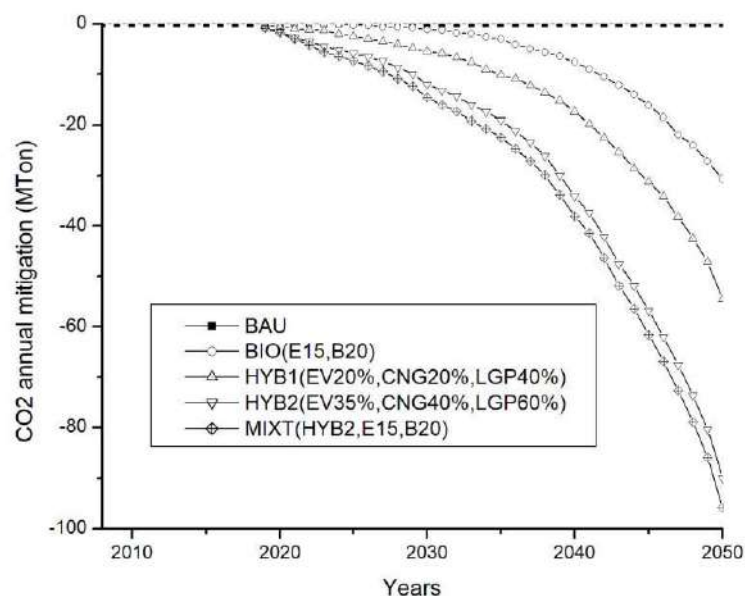
(a)



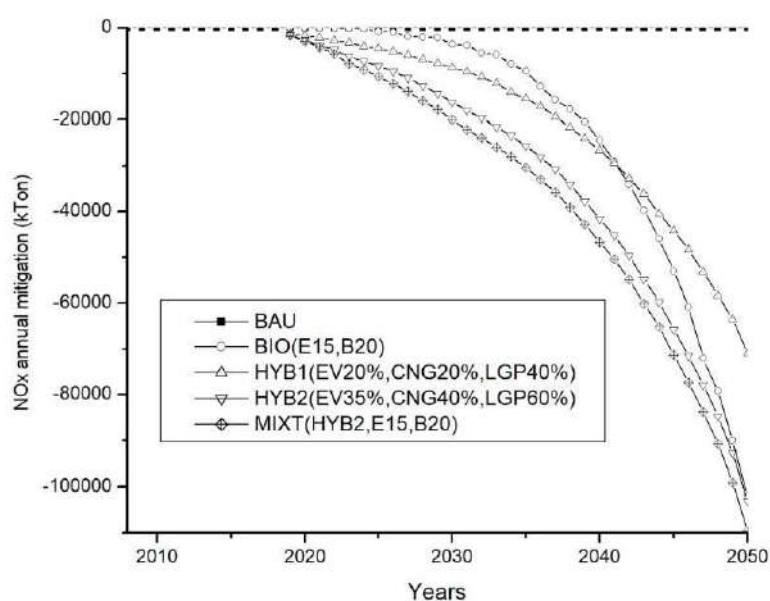
(b)

Figure 6. Gains en énergie pour différents scénarios : (a) Diesel, (b) essence.

Il a été constaté que les biocarburants hybrides du scénario MIXT sont efficaces pour atteindre les objectifs politiques. Les hybrides et les biocarburants surclassent les différents sous-secteurs en matière d'économie d'énergie, et d'atténuation des GES (figures 6, 7). Il suggère l'hybride plutôt que les biocarburants dans certains sous-secteurs qui devraient être renforcés pour atteindre les objectifs politiques. Dans certains sous-secteurs, la promotion de l'hybride est plus difficile que celle des biocarburants, en raison de la nécessité d'investissements nouveaux et énormes tels que les poids lourds et les bus. Mais le gouvernement a le pouvoir de forcer la vulgarisation des voitures hybrides dans ces sous-secteurs.



(a)



(b)

Figure 7. Atténuations annuelle des GES pour différents scénarios à l'horizon de 2050: (a) CO₂, (b) NO_x.

Trois types de mesures d'atténuation des émissions de GES pour le secteur des transports algérien ; minimiser les émissions par unité de transport fourni ; cela peut être réalisé en passant des véhicules personnels aux bus, aux rails, aux rails électrifiés ou aux métros, en améliorant l'efficacité opérationnelle et le trafic pour améliorer l'atténuation des émissions dans les parcs routiers existants et futurs, ainsi que par des technologies de

véhicules plus efficaces, maximisant l'accès aux maisons, des emplois et des services sans rouler sur de longues distances, rationalisant la demande locale en réduisant la subvention de l'Etat sur les pétro-produits.

5 Conclusion

Le secteur des transports algérien est en expansion, totalement dépendant des pétro-produits, en raison de l'augmentation du nombre de flottes automobiles et de la dépendance excessive au transport routier. Les GES irrécupérables émis par ce secteur sont en constante augmentation. En conséquence, la consommation de diesel et d'essence a atteint des niveaux record. Par conséquent, il existe un fort besoin de carburants alternatifs plus propres, respectueux de l'environnement et économiquement viables. Les biocarburants, les véhicules électriques, au GNC et GPL devraient jouer un rôle crucial dans la réalisation des objectifs des politiques énergétiques et environnementales. A ce propos, les perspectives du secteur des transports algériens et les mesures d'atténuation des GES, dans différentes formes de scénarios basés sur des modèles semi-empiriques, sont analysés et discutés. Pour une politique adéquate façonnée dans un scénario, en 2050, la consommation annuelle algérienne pourrait baisser jusqu'à 35%, 43% des émissions de CO₂ et 73% des émissions de NO_x pourraient être atténuées par rapport au scénario BAU. Ces résultats prometteurs indiquent l'énorme potentiel de diversification des ressources dans le secteur des transports. Par conséquent, la mise en œuvre de telles politiques est fondamentale pour une politique de transition durable du secteur des transports en Algérie.

Dans cette étude, par rapport au scénario BAU, nous avons vu avec les scénarios façonnés que, seulement 14% des demandes nationales peuvent être satisfaites par les biocarburants dans le scénario BIO, 19% dans le scénario HYB1, 31% dans le scénario HYB2 et environ 66% dans le scénario MIXT. Il est clair que ni les biocarburants ni les hybrides ne suffisent pas pour atteindre les objectifs de toute politique, ainsi, nous suggérons que les biocarburants et les hybrides (LGP, électrique, GNC, etc.) devraient être vulgarisés et promus. Ainsi, certaines politiques énergétiques rigoureuses visent à diversifier les ressources énergétiques plus propres (biocarburants, LGP, électricité, hydrogène, etc.), et à réduire nécessairement les émissions de GES. Ces politiques pourraient conduire à un système écologique plus sain par l'exploitation des terres, et la création de nouveaux emplois et d'un développement durable. Cela peut être réalisé avec un marché de l'énergie ouvert avec des prix réels. Cependant, l'annulation progressive des aides publiques aux produits énergétiques est un défi majeur pour le gouvernement, dans la future conception des politiques. Les prochaines années seront fondamentales pour la politique

de transition énergétique de l'Algérie, et favoriseront le potentiel des ressources énergétiques renouvelables, vers un modèle politique durable et respectueux de l'environnement. Finalement, des études sous-sectorielles plus détaillées seront essentielles à réalisées, une fois que des données rigoureuses seront disponibles.

References

1. *BP Statistical Review of World Energy 2019, 68th edition 2019*, BP p.l.c. 2019.
2. *World Energy Outlook 2017*, in *World Energy Outlook 2017* 2017, international energy agency IEA.
3. Okyere, S., et al., *Review of Sustainable Multimodal Freight Transportation System in African Developing Countries: Evidence from Ghana*. International Journal of Engineering Research in Africa, 2019. **41**: p. 155-174.
4. Recioui, B., et al., *Valorization of carbon dioxide by conversion into fuel using renewable energy in Algeria*. Transportation Research Part D: Transport and Environment, 2016. **43**: p. 145-157.
5. Rahmouni, S., et al., *Prospects of hydrogen production potential from renewable resources in Algeria*. International Journal of Hydrogen Energy, 2017. **42**(2): p. 1383-1395.
6. CropEnergies. *Bioethanol as a growth market 2017*; Available from: http://www.cropenergies.com/en/Bioethanol/Markt/Dynamisches_Wachstum/.
7. Agency, I.E., *Technology roadmap: biofuels for transport*, 2011.
8. US-EIA, E.I.A. *Biofuels Issues and Trends*. 2012 [cited 2017; Available from: www.eia.gov/beta/international]
9. Escobar, J.C., et al., *Biofuels: Environment, technology and food security*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2009. **13**(6–7): p. 1275-1287.
10. Bencheikh, K., et al., *Fuels properties, characterizations and engine and emission performance analyses of ternary waste cooking oil biodiesel–diesel–propanol blends*. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2019. **35**: p. 321-334.
11. Agency, I.E. *Medium-Term Oil Market Report*. 2015 [cited 2017; Available from: <http://www.iea.org>].
12. Li, S.-Z. and C. Chan-Halbrendt, *Ethanol production in (the) People's Republic of China: Potential and technologies*. Applied Energy, 2009. **86**, **Supplement 1**: p. S162-S169.
13. Bomb, C., et al., *Biofuels for transport in Europe: Lessons from Germany and the UK*. Energy Policy, 2007. **35**(4): p. 2256-2267.
14. Melikoglu, M., *Demand forecast for road transportation fuels including gasoline, diesel, LPG, bioethanol and biodiesel for Turkey between 2013 and 2023*. Renewable Energy, 2014. **64**: p. 164-171.
15. Azad, A.K., et al., *Prospect of biofuels as an alternative transport fuel in Australia*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. **43**: p. 331-351.
16. Nadaletti, W.C., et al., *Potential use of landfill biogas in urban bus fleet in the Brazilian states: A review*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. **41**: p. 277-283.
17. Nadaletti, W.C., et al., *Methane–hydrogen fuel blends for SI engines in Brazilian public transport: Potential supply and environmental issues*. International Journal of Hydrogen Energy, 2017. **42**(17): p. 12615-12628.
18. Kakaee, A.-H., A. Paykani, and M. Ghajar, *The influence of fuel composition on the combustion and emission characteristics of natural gas fueled engines*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014. **38**: p. 64-78.

19. Khan, M.I., T. Yasmin, and A. Shakoor, *Technical overview of compressed natural gas (CNG) as a transportation fuel*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. **51**: p. 785-797.
20. *Worldwide NGV Statistics*. 2019 [cited 2019 october 25,2019]; Available from: <http://www.ngvjournals.com/worldwide-ngv-statistics/>.
21. Aslam, M.U., et al., *An experimental investigation of CNG as an alternative fuel for a retrofitted gasoline vehicle*. Fuel, 2006. **85**(5): p. 717-724.
22. Kakaee, A.-H. and A. Paykani, *Research and development of natural-gas fueled engines in Iran*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **26**: p. 805-821.
23. Mustafi, N.N. and A.K. Agarwal, *Combustion and Emission Characteristics, and Emission Control of CNG Fueled Vehicles*, in *Alternative Fuels and Their Utilization Strategies in Internal Combustion Engines*, A.P. Singh, et al., Editors. 2020, Springer Singapore: Singapore. p. 201-228.
24. Manufacturers, I.O.o.M.V. *LGP*. 2019 [cited 2019 December,2019]; Available from: <http://www.oica.net/category/auto-and-fuels/alternative-fuels/lpg/>.
25. Adam, T.W., et al., *Chemical analysis and ozone formation potential of exhaust from dual-fuel (liquefied petroleum gas/gasoline) light duty vehicles*. Atmospheric Environment, 2011. **45**(17): p. 2842-2848.
26. Kivevele, T., T. Raja, V. Pirouzfar, B. Waluyo, and M. Setiyo, *LPG-Fueled Vehicles: An Overview of Technology and Market Trend*. Automotive Experiences, Apr. 2020. **3**(1): p. 6-19; DOI: 10.31603/ae.v3i1.3334.
27. Kim, K., et al., *Lower particulate matter emissions with a stoichiometric LPG direct injection engine*. Fuel, 2017. **187**: p. 197-210.
28. Jang, W., et al., *Study of regulated emissions and nanoparticle characteristics of light-duty direct-injection vehicles fuelled with gasoline and liquefied petroleum gas in the New European Driving Cycle and the Federal Test Procedure 75 driving cycle*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 2014. **229**(1): p. 25-37.
29. Khaligh, A. and M.D. Antonio, *Global Trends in High-Power On-Board Chargers for Electric Vehicles*. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2019. **68**(4): p. 3306-3324.
30. energy, o.o.e.a.r. *Electric Vehicle Basics*. 2019 [cited 2019 December, 2019]; Available from: <https://www.energy.gov/eere/office-energy-efficiency-renewable-energy>.
31. Institute, E.E. *ELECTRIC VEHICLE SALES: FACTS & FIGURES*. USA April2019 [cited 2019 December]; Edison Electric Institute:[Available from: www.eei.org.
32. (ONS), O.N.d.S. *Parc national d'automobile*. [cited 2017; Available from: www.ons.dz.
33. Boukli Hacene, M.e.A., et al., *Renewable Energy in Algeria: Desire and Possibilities*. Journal of Asian and African Studies, 2020: p. 0021909619900202.
34. OPEC, *Annual Statistical Bulletin 2015*
Organization of the Petroleum Exporting Countries.
35. MEM. *Mines and Energy ministry*. Available from: <http://www.energy.gov.dz>.
36. SONELGAZ Group, N.S.o.E.a.G. *Renewable energy and energy efficiency program*. 2011; Available from: <http://www.sonelgaz.dz>.
37. CDER. *Renewable Energy Development Center. Algeria*. Available from: www.cder.dz.

38. MATTA. *Schéma National d'Aménagement du territoire(SNAT) 2010* Available from: <http://www.matta.gov.dz>.
39. Transport, M.o.P.W.a. 2017 [cited 2017; Available from: <http://www.mtp.gov.dz/>].
40. Bank, W. *World Bank: Algeria indicators*. 2014 [cited 2017; Available from: www.databank.worldbank.org].
41. (ONS), O.N.d.S. [cited 2017; Available from: www.ons.dz].
42. MEM. *Bilan Energetique National 2015*. Available from: <http://www.energy.gov.dz>.
43. Bank, W., *International Experience with CNG Vehicles*.
44. Settou, B., et al., *GIS-Based Method for Future Prospect of Energy Supply in Algerian Road Transport Sector Using Solar Roads Technology*. Energy Procedia, 2019. **162**: p. 221-230.
45. Demirbas, A., *Importance of biodiesel as transportation fuel*. Energy Policy, 2007. **35**(9): p. 4661-4670.
46. Cremonez, P.A., et al., *Current scenario and prospects of use of liquid biofuels in South America*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. **43**: p. 352-362.
47. André Cremonez, P., et al., *Biodiesel production in Brazil: Current scenario and perspectives*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2015. **42**: p. 415-428.
48. Rahmouni, S., et al., *GIS-based method for future prospect of hydrogen demand in the Algerian road transport sector*. International Journal of Hydrogen Energy, 2016. **41**(4): p. 2128-2143.
49. quot, et al., *Benefits of creating a cross-country data framework for energy efficiency*: United States.
50. l'Énergie, A.d.l.E.e.d.l.M.d. and é. *Changement climatique - transition écologique. ADEM Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie 2019* [cited 2019 october]; Available from: <https://www.ademe.fr/>.
51. Ou, X., X. Zhang, and S. Chang, *Scenario analysis on alternative fuel/vehicle for China's future road transport: Life-cycle energy demand and GHG emissions*. Energy Policy, 2010. **38**(8): p. 3943-3956.
52. He, L.-Y., et al., *Biofuels or hybrid vehicles? A scenario perspective in China*. Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy, 2016. **11**(5): p. 443-449.
53. Banawan, A.A., M.M. El Gohary, and I.S. Sadek, *Environmental and economical benefits of changing from marine diesel oil to natural-gas fuel for short-voyage high-power passenger ships*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part M: Journal of Engineering for the Maritime Environment, 2009. **224**(2): p. 103-113.
54. Myung, C.-L., et al., *Comparative study of regulated and unregulated toxic emissions characteristics from a spark ignition direct injection light-duty vehicle fueled with gasoline and liquid phase LPG (liquefied petroleum gas)*. Energy, 2012. **44**(1): p. 189-196.
55. Shirneshan, A., *HC, CO, CO2 and NOx Emission Evaluation of a Diesel Engine Fueled with Waste Frying Oil Methyl Ester*. Procedia - Social and Behavioral Sciences, 2013. **75**: p. 292-297.
56. Ghazikhani, M., et al., *Experimental investigation of performance improving and emissions reducing in a two stroke SI engine by using ethanol additives*. Propulsion and Power Research, 2013. **2**(4): p. 276-283.
57. Chansauria, P. and R.K. Mandloi, *Effects of Ethanol Blends on Performance of Spark Ignition Engine-A Review*. Materials Today: Proceedings, 2018. **5**(2, Part 1): p. 4066-4077.

58. Azadeh, A., R. Arab, and S. Behfard, *An adaptive intelligent algorithm for forecasting long term gasoline demand estimation: The cases of USA, Canada, Japan, Kuwait and Iran*. *Expert Systems with Applications*, 2010. **37**(12): p. 7427-7437.

CHAPITRE V:
BIOGAZ A PARTIR DES DECHETS
MUNICIPAUX SOLIDES ; ESTIMATION DU
POTENTIEL ALGERIEN : ETUDE SIG

Biogaz à partir des déchets municipaux solides ; estimation du potentiel Algérien : Etude SIG

1 Introduction

Le monde de nos jours connaît des taux de consommation très élevés d'énergie et des biens, associés à une forte croissance démographique et à une amélioration du niveau de vie, ce qui entraînent des niveaux élevés de production de déchets solides municipaux. Ce qui présente de graves impacts environnementaux, s'ils ne sont pas efficacement éliminés ou recyclés. Les déchets solides municipaux sont un mélange qui est jeté quotidiennement par la population urbaine et rurale sous forme d'ordures. Actuellement, le monde génère environ 2.1 milliards de tonnes de déchets solides municipaux, dont près de 33% ne sont pas collectés par les municipalités. Environ 0,74 kg de déchets sont générés en moyenne par habitant et par jour. Selon la Banque mondiale, cela devrait atteindre 3,4 milliards de tonnes d'ici 2050. Environ 70 % des déchets solides municipaux collectés par les municipalités, finissent dans des décharges, 19 % sont recyclés et 11 % sont utilisés pour la récupération d'énergie. Sur la population mondiale actuelle de 7,6 milliards, près de 3,5 milliards de personnes sont privées d'installations de base de gestion des déchets. Le nombre de personnes sans accès adéquat aux services élémentaires de gestion des déchets pourrait atteindre 5,6 milliards d'ici 2050. Les déchets solides municipaux collectés auprès des ménages, des bureaux, des petites institutions et des entreprises commerciales, varient considérablement dans leur composition et leur classification. Les déchets solides municipaux se composent à la fois de fractions biodégradables et non biodégradables de matières organiques et inorganiques, respectivement. Néanmoins, ils comprennent généralement les déchets de cuisine, les déchets de jardin, le papier et le carton, le plastique et le caoutchouc, le métal, le verre, les déchets électroniques, les matériaux inertes et divers déchets [1].

Le monde aussi connaît, aussi, une quasi-dépendance énergétique aux énergies fossiles (le pétrole, le gaz naturel et le charbon). Il est temps de réaliser le potentiel de la valorisation énergétique des déchets, comme une

option pour la gestion durable des déchets solides et une future source d'énergie renouvelables importante, économique, fiable décentralisé et écologiquement durable, spécialement pour les ays envoie de développement [2]. Baran et al [3] ont notés que l'incinération est une méthode de valorisation énergétique des déchets municipaux et peut faire partie intégrante de la stratégie de gestion des déchets écologiquement durable. On remarque, à partir des résultats précédents que les pays, qui possède un taux élevé de récupération d'énergie à partir des déchets avaient des taux de recyclage importants, alors que, pour les pays en développement où la mise en décharge est l'option de gestion des déchets la plus répandue, les taux de recyclage étaient faibles [4].

La méthanisation, appelée aussi la digestion anaérobique, est un procédé inclus dans les systèmes de gestion des déchets ménagers pour introduire sa teneur en matière organique en substrat dans la production de biogaz, cela contribue, donc, à la diminution des quantités de déchets et à l'enfouissement techniques. Ce procédé se déroule dans des installations fermées, le méthane est capté facilement et peut être, ensuite, utiliser pour des fins énergétiques. D'une autre part, ce procédé ne présente pas de concurrence pour la terre comme le cas des cultures énergétiques. Le triage adéquat a une influence importante la méthanisation ; s'il n'est pas performant, le substrat peut contenir beaucoup de matière inorganique réduisant la production de biogaz[5].

Le procédé de méthanisation est influé par plusieurs paramètres, ce qui donne lieu à plusieurs configurations dans laquelle la digestion anaérobique se développe. Néanmoins deux critères sont les plus importants à savoir la teneur en matière sèche et le mode de fonctionnement. Le tableau 1 résume quelques technologies existantes à l'échelle industriel[5].

Tableau 1. Principaux procédés utilisés pour la méthanisation de déchets [6]

Procédé	Teneur en matière sèche	Rang de température	Type de fonctionnement
BEKON	Sèche	Mésophile	Discontinu
Waasa	Humide	Mésophile	ou Continu
Krüger	Humide	Thermophile	Continu
Citec	Humide	Mésophile	Continu
Ros Roca	Humide	Thermophile	Continu
Process			
Dranco	Sèche	Mésophile	Continu
Kompogas	Sèche	Thermophile	Continu
Valorga	Sèche	Mésophile	ou Continu

Strabag	Humide	Thermophile Mésophile	ou Continu
Schwarting- Uhde	Humide	Thermophile	Continu
BTA	Humide	Mésophile	Continu
ISKA	Humide	Mésophile	Continu

Sexana et *al* ont estimés que la digestion anaérobie peut produire 2 à 4 fois plus de méthane par tonne de déchets solides en 3 semaines que celle d'une décharge en 6 à 7 ans[6]. Et 1 m³ de biogaz produit à partir du processus de digestion anaérobie peut générer 2,04 kWh d'électricité avec une efficacité de conversion de 35%[7]. On peut produire jusqu'à 150kg de méthane/ton des déchets municipaux (avec une composition de 60% organique et 40% d'humidité) [8].

La technologie du biogaz, connue sous le nom de digestion anaérobie (DA), est la décomposition de la matière organique à l'aide de procédés biologiques en l'absence d'oxygène, par conversion en biogaz et en résidu presque stable. Le biogaz est un mélange de méthane (55%75%) et de dioxyde de carbone (2545%). La proportion est fonction de la matière première (substrat). Le biogaz est inflammable quand la teneur en méthane doit être $\geq 40\%$. Le biogaz peut également contenir de petites quantités ($\leq 3\%$) d'impuretés, telles que le sulfure d'hydrogène, l'ammoniac, le monoxyde de carbone et d'autres gaz [9, 10].

Le digesteur peut être classé en fonction de la température, de la teneur en eau de la matière première et du nombre d'étages (mono ou multi-étages). Chaque digesteur possède des caractéristiques et des propriétés adaptées à une matière première spécifique. Il y a actuellement plus de digesteurs mésophiles (35°C) que thermophiles (55°C). Il existe des digesteurs humides et digesteurs secs, mais il n'y a plus de tendance claire. Les procédés multi-étages optimisent la digestion et améliorent le contrôle du processus en séparant les étapes de la digestion[9].

Avant d'être digéré, la matière première passe par un prétraitement. Le prétraitement dépend de la matière première. Le but est de bien mélanger différentes matières premières, d'ajouter de l'eau ou d'éliminer les matériaux indésirables tels que les gros objets et les matériaux inertes (par exemple, le plastique, le verre) afin d'avoir une meilleure qualité du digestat, une digestion plus efficace et éviter une défaillance du processus.

La digestion est un processus qui décompose la matière organique en composants chimiques plus simples en absence d'oxygène. Ce procédé peut être très utile pour traiter valoriser énergétiquement les déchets organiques générés tels que :

- Boues d'épuration.
- Déchets agricoles.
- Déchets solides municipaux.
- Déchets verts/botaniques.
- Déchets organiques industriels et commerciaux[9].

La technologie de digestion anaérobie est considérée comme la meilleure pour la gestion de la fraction organique des déchets solides ménagers et assimilés. Le biogaz récupéré est de haute qualité pour la production d'énergie et les biofertilisants pour fins agricoles[11]. Identifiée comme la meilleure option pour la collecte du méthane, la technologie de digestion anaérobie a gagné en popularité en Europe, avec plus de 17376 usines de biogaz et 459 usines de bio-méthane enregistrées en 2016. Il existe plus de 500 usines anaérobies en Allemagne et 140 au Royaume-Uni et en Italie[12-14]. Chima et *al* estimaient la quantité de déchets organiques générés au Nigéria, et la quantité de biogaz et de biofertilisants dérivant de ces déchets générés. Afin de fournir les données nécessaires aux études de faisabilité pour la mise en place d'un système de biogaz et par conséquent un système intégré de gestion des déchets biodégradables, durable et rentable qui prendra en charge les divers problèmes environnementaux[10]. Le biogaz récupéré est purifié avant d'être utilisé comme combustible. Le phénomène de purification du biogaz pourrait se faire par adsorption physique par la soude caustique, adsorption sur charbon actif et gel de silice, approche par permutaton ou par voie cryogénique [15]. La digestion anaérobie est une technologie fiable pour le traitement de la fraction organique des déchets ménagers et assimilés. Cependant, la présence de déchets de bois, de grosses particules, de composants à haute teneur en solides et un contenu biodégradable lent, présente un défi gênant du processus[16].

En termes de développement durable et impact environnemental, la digestion anaérobie a des grandes contributions à savoir :

- Restaurer les sols grâce au recyclage des nutriments, de la matière organique et du carbone

- Augmenter les rendements des cultures grâce à l'utilisation de biofertilisants riches en nutriments.
- Recirculation du phosphore, qui est essentiel pour la croissance des plantes mais dont l'apport est limité.
- Réduire la pollution d'air en remplaçant le biocombustible solide domestique par le biogaz.
- Traiter et recycler les déchets organiques pour réduire les odeurs et la propagation des maladies. Réduire déforestation.
- Fournir une solution énergétique fiable et décentralisée pour des bio-solides au profit des communautés éloignées et rurales.
- Réduire l'impact environnemental sur les plans d'eau et l'eau souterraine.
- Réduire la dépendance aux combustibles fossiles.
- Captage de la chaleur résiduelle des unités de cogénération liées aux usines de biogaz.
- Le biogaz est une ressource énergétique Stockable et fiable.
- Réduire l'impact environnemental des industries et améliorer leur durabilité, en extrayant de l'énergie à partir de leurs propres effluents.
- Stimuler la collaboration entre les industrie-agriculture au profit de tous.
- Création de la richesse, des microentreprises et de l'emploi direct et indirect.
- Réduire et capture les émissions gaz à effet de serre, à savoir le dioxyde de carbone, le méthane, d'oxydes nitreux et autres, provenant de la décomposition naturelle dans les décharges[17].
- Création du système intégré de gestion des déchets[10].

En Algérie, Les déchets municipaux est une action prioritaire du ministère chargé de l'environnement. Depuis 2001, un ensemble de textes et d'organismes ont été adoptés, Avec l'engagement des moyens humains et techniques pour améliorer ce secteur. Les quantités des déchets ne cesse d'augmenter suite à l'augmentation de la population et à la croissance économique et l'amélioration du mode de vie. Les Algériens génèrent annuellement 8.5 millions de tonnes, dont environ 1.5 millions de tonnes de déchets industriels assimilables à des déchets ménagers. Ces quantités pourraient dépasser les 30 Millions de tonnes en 2025, si aucune politique préventive n'est mise en œuvre. L'enfouissement technique des déchets est

le seul mode d'élimination adopté, engendrant des coûts supplémentaires aux collectivités locales. Le financement de ce service par une taxe forfaitaire reste inapplicable, cela avait des conséquences négatives sur la qualité de service rendu et la qualité de la vie dans les agglomérations urbaines et para-urbaines. Une réorganisation du secteur est impérative, visant la promotion du recyclage et l'amélioration du rendement économique du secteur. Il existe des projets pilote du tri des déchets municipaux dans les centres d'enfouissement à Alger et Oran et d'autres wilayas, ainsi que des nouvelles politiques prometteuses au profit du secteur de recyclage. A fin, de stimuler le potentiel de ce secteur qui connaît des faibles taux de recyclage (>3%)[18, 19].

Récemment, le gouvernement a adopté une nouvelle version du programme développement des énergies renouvelables intégrant la bioénergie dans le futur mix énergétique algérien.

Pour un pays semi-aride comme L'Algérie, où la biomasse n'est pas abondante. Pour les ressources avec de grandes quantités, les ordures ménagères urbaines et assimilés peuvent couvrir les besoins des unités de biogaz à grande échelle, celle-ci sont plus intéressantes économiquement et plus efficace que les unités à petite échelle. En adoptant la Co-digestion afin d'augmenter la capacité des grandes unités de biogaz. Le substrat dissipé peut être, en effet, mélangés dans différents rapports pour augmenter la quantité de matière première. Par ailleurs, les Co-substrats les plus appropriés sont choisis. La Co-digestion, aussi, défait le problème de faible potentiel méthanogène ou le comportements acides de certains substrats et améliorer la qualité du biofertilisant pour applications agricoles[20].

Dans ce contexte vient notre étude à savoir l'estimation du potentiel de la production du biogaz à partir des déchets municipaux solide. Dans cette étude, on focalise sur digestion anaérobique comme le seul moyen de la conversion de la fraction organique continue dans les déchets ménagers et assimilés en Biogaz. Cela pourrait nous fournir une idée sur le potentiel et les opportunités que le secteur des déchets ménagers et assimilés peut offrir au future mixte énergétique Algérien. Au moment au pays doit se préparer à l'ère après-hydrocarbures, et a besoin de toutes ressources énergétique propres et écologique.

2 Méthode :

Le but de ce travail est d'estimer le potentiel Algérien en biogaz présent dans les déchets ménagers et para-ménagers. Les quantités des déchets et ses portions organiques sont estimées et la suite les quantités du gaz sont déduites et les localisations des centres de digestion sont optimisées. A l'aide du système d'information géographique, ArcGIS, les résultats obtenus sont tracés sous formes des cartographies.

2.1 Système d'information Géographique :

ArcGIS est un système d'information géographique. Délivré par l'Institut de la recherche et des systèmes environnementaux, connu sous le nom de « ESRI ». Ce programme (Arc GIS) se compose de plusieurs parties importantes :

- *Arc GIS Desktop* : C'est la zone ou le domaine sur laquelle nous travaillons, qui est la version de bureau du programme, qui est une collection d'applications pour les systèmes d'information géographique.
- *Arc SDE* : est la base de données de gestion géographique.
- *Arc IMS* : Il fait partie du système associé à Internet (recherche de cartes ou d'images ...).

Arc GIS Desktop : à son tour est composé en trois section par lesquelles les fonctions du système d'information géographique (SIG) peuvent être appliquées :

- *Arc Map* exécute de nombreuses fonctions et tâches, telles les actions sur des cartes, les dessiner, et éditer et visualiser, de sortie des données numériques, manipuler des calques, et ajouter des éléments à des cartes telles que la carte de la clé et l'échelle de dessin... etc.
- *ArcCatalog* : est le programme associé, organisant et gérant des données Systèmes d'information géographique. Il se dispose également d'un outil de navigation et de recherche d'informations géographiques. Il permet d'enregistrer et d'afficher des informations documentaires sur les fichiers du programme.
- *ArcToolbox* convertit et coordonne les différents fichiers Systèmes d'information géographique. Il est composé deux outils : *Arc info* et *ArcView*.

Méthode de dessin et de cartographie :

- On clique deux fois sur l'icône du programme du bureau
- Création d'un nouveau projet (Figure 1)
- Ensuite, nous cachons l'image de la carte que nous avons comme base pour les données cartographiques (Figure. 2).

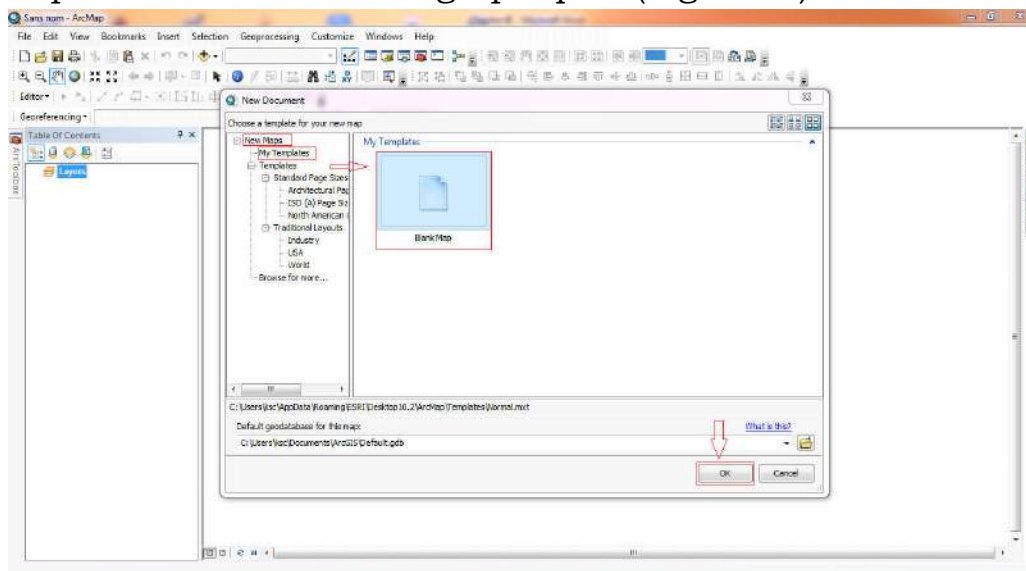


Figure 1. Fenêtre d'accès pour le programme ArcMap.

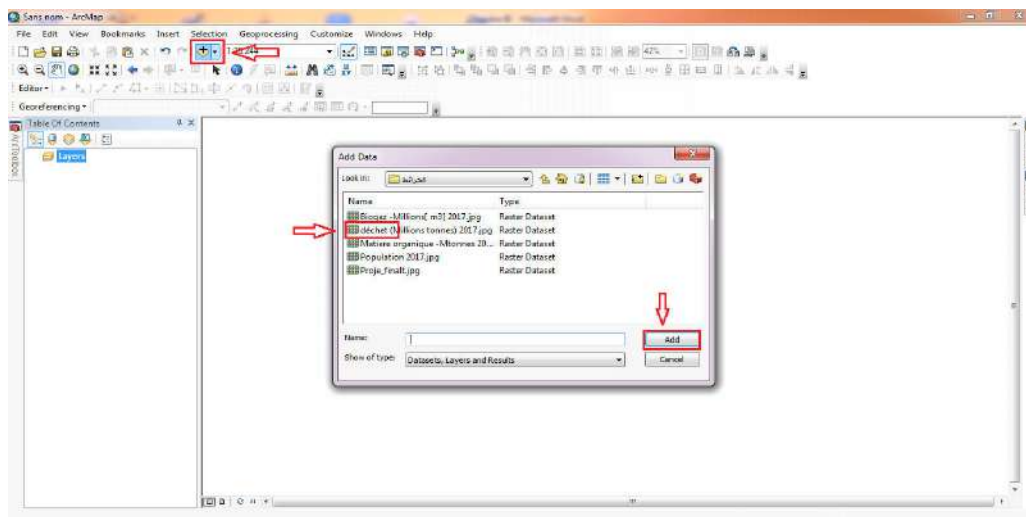


Figure 2. Fenêtre Sélectionner les éléments de dessin (feuille de dessin + image de la carte).

Et de la même manière nous obtenons un papier que nous y dessinons une carte (Figure 3). Les barres d'outils nous permettent de dessiner et contrôler l'image de carte et le papier de carte.

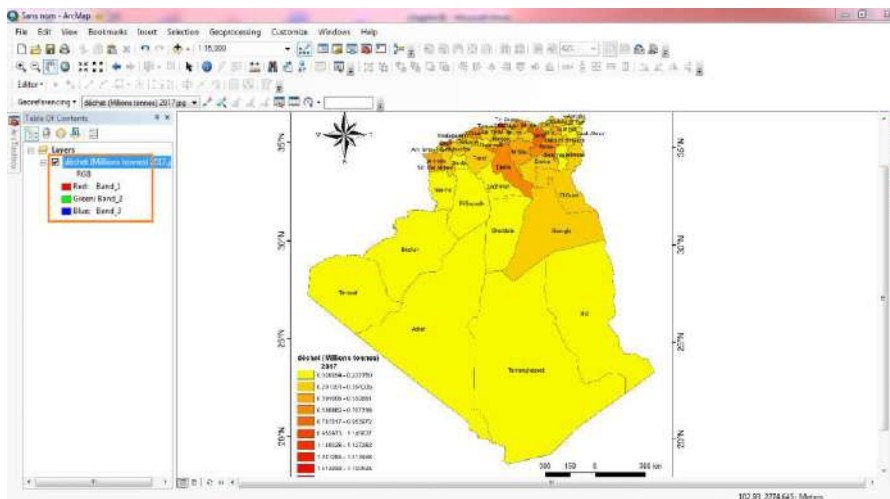


Figure 3. Interface du logiciel ArcMap.

2.2 Quantités de déchets ménagers en Algérie :

L'accroissement du revenu moyen de la population algérienne et le changement d'habitude alimentaire, se traduisent par un accroissement considérable des déchets ménagers. La quantité de déchets produits dépend du niveau de vie des populations. Dans le (Tableau.2), on présente l'évolution des quantités de déchets ménagers produites entre 1980 et 2025, par jour et par habitant, dans les deux catégories de ville en Algérie. Ces quantités sont fonction du niveau et qualité de vie qui a clairement évolué dans les deux dernières décennies. Les villes à forte densité de population ont un niveau de vie élevé par rapport aux petites villes, et par conséquent, génèrent un taux élevé des déchets ménagers.

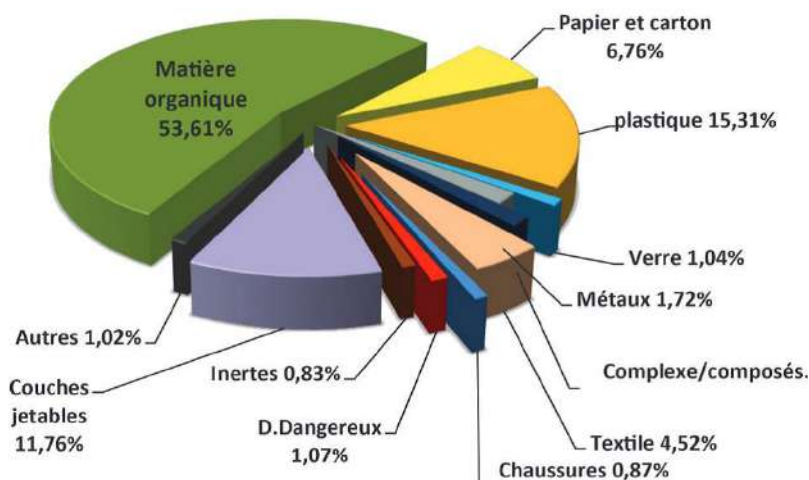


Figure 4. La composition moyenne des déchets solides municipaux en Algérie 2019[19].

La quantité moyenne journalière de déchets générés par habitant a presque doublé entre 1980 et 2010, passant d'une moyenne de 0,63 kg/j/habitant en 1980 à 1 kg/j/habitant en 2014. Selon le Ministère de l'Environnement, cette tendance devrait se poursuivre durant les prochaines années. En 2025, la moyenne journalière devra atteindre 1,25 kg/habitant [22].

Tableau 2. Quantité journalière des déchets générée par habitant[21].

	1980	2002	2014	2025
Villes moyennes (kg/hab/j)	0,5	0,6	0,8	1,0
Grandes villes (kg/hab/j)	0,76	0,9	1,2	1,5

Dans la littérature, notamment les documents officiels, on ne trouve pas une des statistiques rigoureuses des quantités des déchets solide municipaux générées, le taux de collecte, ainsi que le taux de recyclage. Les rapports établis et enquêtes des différents établissements, intervenant dans le secteur, sont dans la majorité des cas des estimations moyennées sur des échantillonnages d'étude. Nous nous sommes basés, dans cette étude, sur les données collectées (Tableau.2) avec un taux de collecte maximal. Les quantités, cumulées le long de l'an, des déchets D générés par chaque Wilaya i ayant la population P s'écrit comme suit :

- Déchets générés moyennés :

$$D_i = P_i * 1,25 * 365$$

Les calculs se basent sur les données de recensement l'année 2021 en Algérie [22][23] avec les résultats des travaux de l'agence national des déchets[21].

La méthanisation de déchets organiques ménagers peut produire entre 100 et 150 m³ de biogaz par tonne de ce type de substrat. Ce procédé se déroule dans d'installations fermées, le méthane n'échappe pas vers l'atmosphère, cela favorise le captage, stockage et les applications de production d'énergie.

L'utilisation de déchets organiques dans la digestion anaérobie ne provoque pas de la concurrence pour la terre comme le cas des cultures énergétiques [5]. On a adopté une moyenne de la productivité de 125 m³/tonne. La fraction organique dans les déchets est estimée de 60% [19].

- Le volume du biogaz VB peut s'écrit :

$$VB_i = D_i * 125 * 0.6$$

Les résultats sont regroupés dans (ANNEX A).

Ensuite, à travers le programme ArcGIS, ces résultats sont projetés en cartographie de l'Algérie, sur plusieurs couches d'information (figure 5).

Dans une première étape, on super-positionne les couches d'information sur le logiciel ArcGIS, toute en respectant les contraintes et les restrictions, afin, d'éliminer les zones inappropriées.

Second, on reclasse les critères, pour pouvoir évaluer la convenance des zones a la production des biogaz à partir des déchets municipaux solides, en utilisant des outil d'ArcGIS. On peut par la suite choisir des sites adéquats d'installation des unités de production (reclassées de 0 à 7.25, le score le plus élevé étant plus approprié).

Les contraintes imposées sont généralement :

- Les assiettes foncières des municipalités(tampons), les sites sont éloignés des villes pas moins de 15 km.
- Les réserves naturelles
- Les plans d'eau : chotts, les barrages et les oueds.

Les critères, quand-a-elles, sont en ordre :

- Le potentiel en biogaz.
- La proximité des route (pas plus de 500 m).
- La proximité des villes, pour des raisons logistiques, les sites sont éloignés des villes pas moins de 15 km.
- La proximité des linges de transport du gaz.

Ces contraintes et critères ont été utilisées dans de nombreuses études bibliographiques pour la sélection de sites appropriés dans différents domaines[23-25] (figure.5).

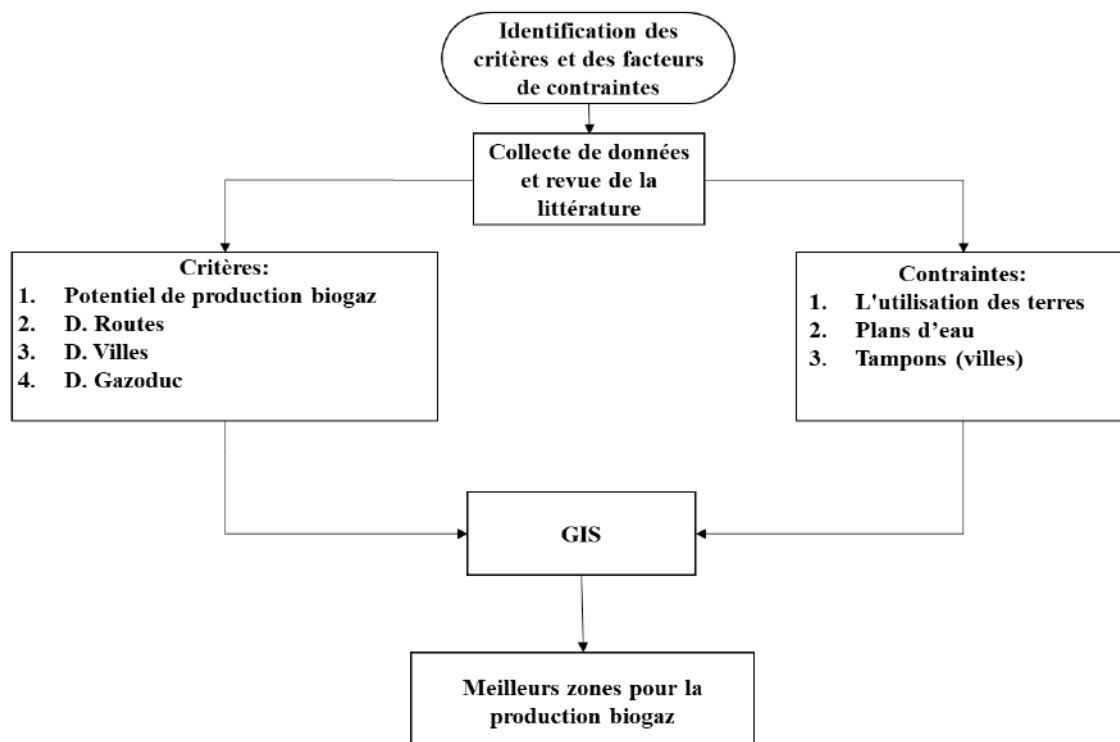


Figure 5. Organigramme de la méthodologie

3 Résultats et discussions

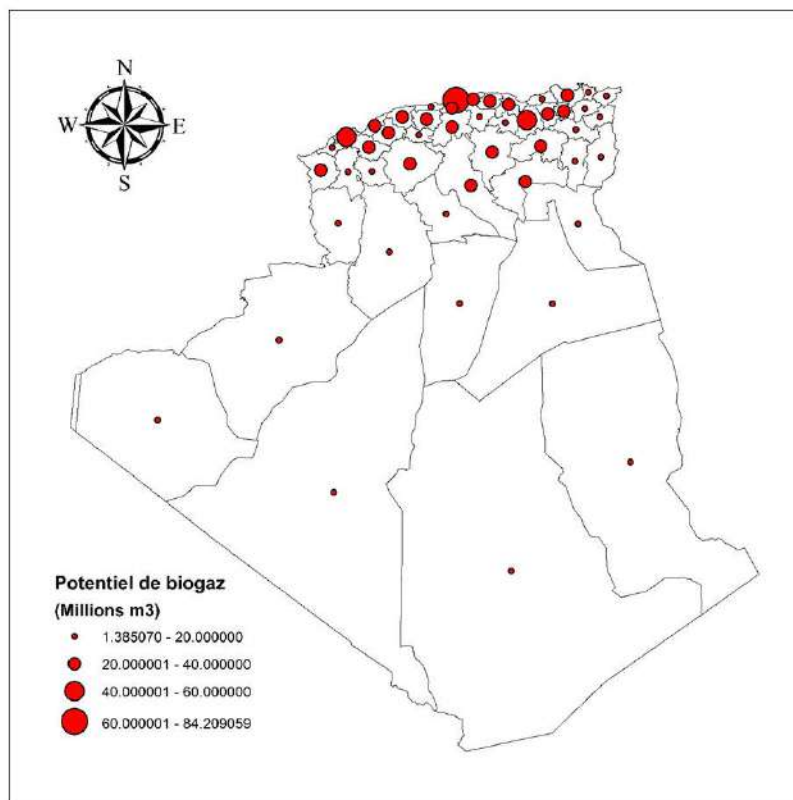


Figure 6. Potentiel de biogaz reparti sur le territoire national (millions m³/an)

Les données récoltées, à savoir, les quantités générées, le taux de récupération des déchets municipaux solide et sa portion en matière organique en Algérie, sont utilisées pour chaque wilaya, pour pouvoir en déduire le potentiel en biogaz de chaque wilaya. Ensuite, ces potentiels sont injectés dans le logiciel ArcGIS, pour avoir une répartition géographique du potentiel (figure 6).

Les résultats montrent une dépendance claire avec la concentration de la population. Car, en raison d'absence de statistiques régionales et locales, les données utilisées sont, de base, moyennées sur la population de l'Algérie.

La deuxième étape, est de tracer les couches d'information des contraintes et les critères ; Les contraintes et les critères imposés sont repartis sur la carte de l'Algérie (figure 7).

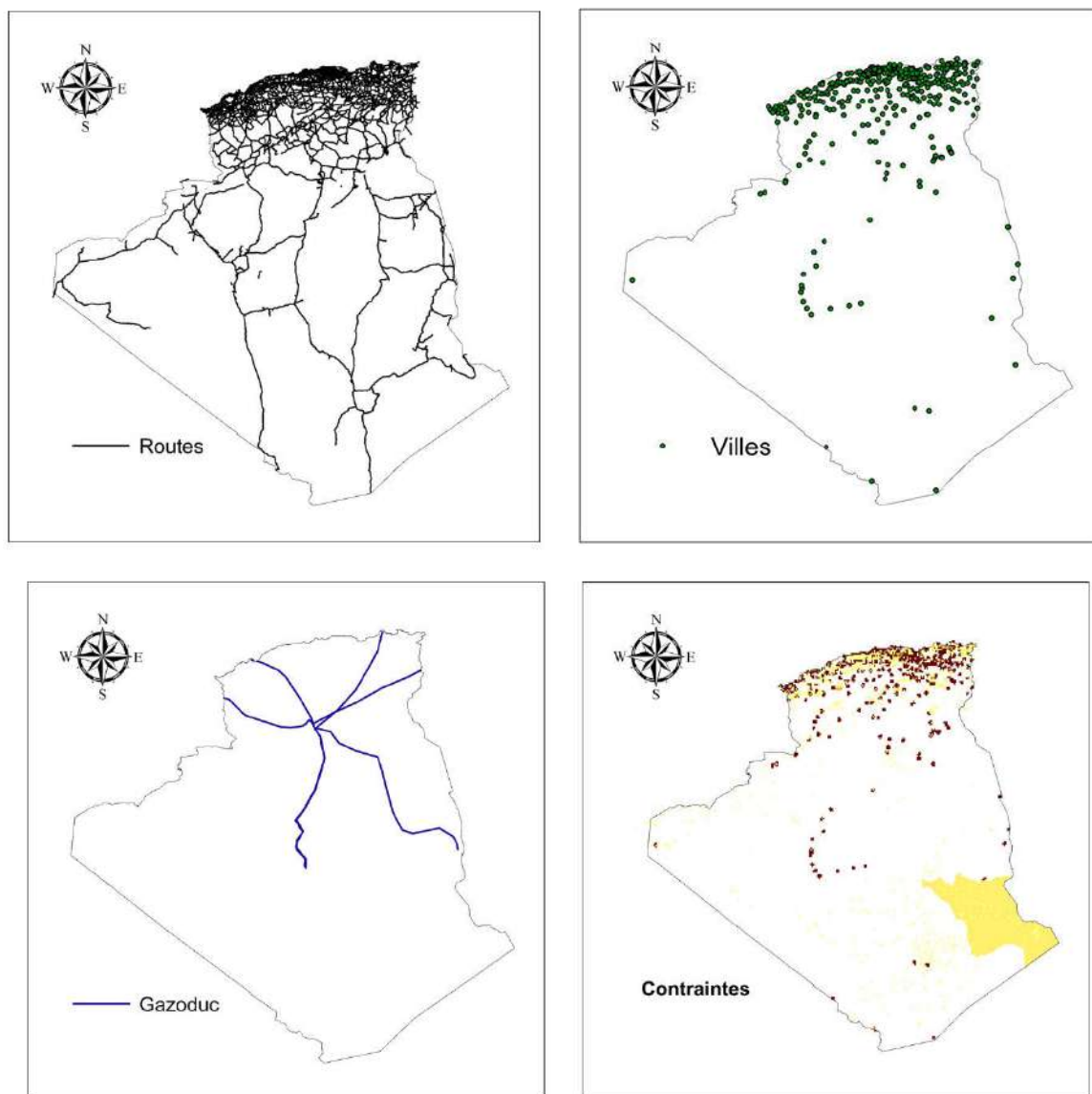


Figure 7. Couches informations

La phase finale, est de mettre en superposition les cartes tracées. Afin, d'exclure les zones qui présentent de contrainte quelconque, et d'extraire les zones répondants aux critères, avec bien sur le classement imposé. Ces zones sont de zones de convenance en matière de production de biogaz : reclassées de 0 à 7.25, le score le plus élevé étant plus approprié (figure 8.).

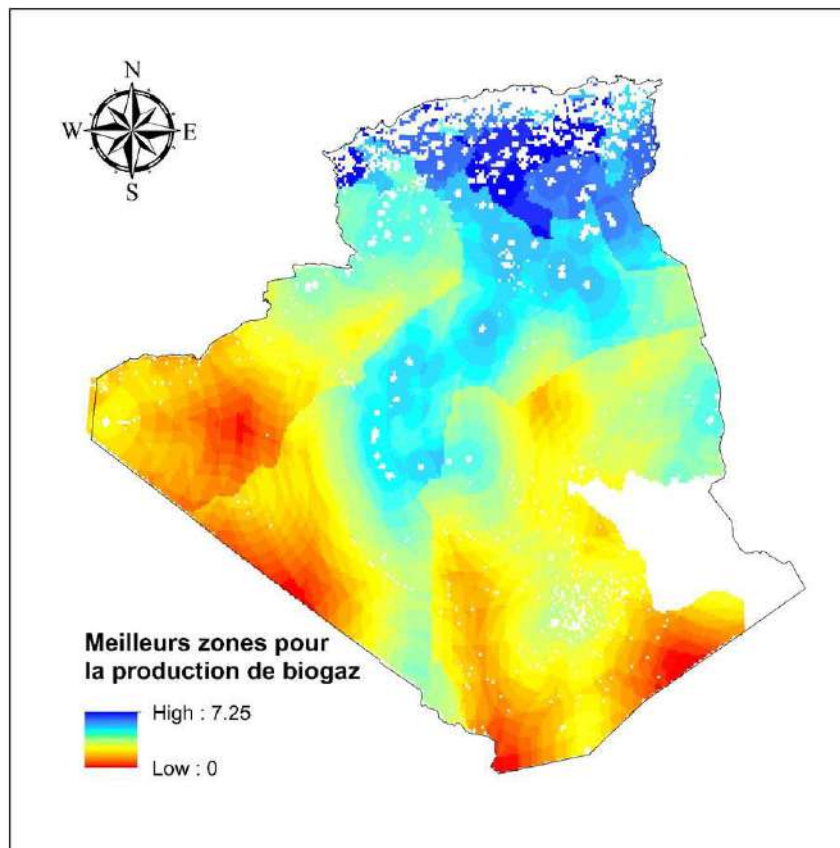


Figure 8. Zones de convenance pour la production du biogaz

Les résultats montrent un potentiel algérien acceptable pour la production du biogaz. Plusieurs applications de grande taille peuvent être mises en marche vue l'abondance de matière première dans quelque zone (en bleu dans la figure 8). Notamment, le transport urbain et la production d'électricité (moteur et turbine) par le biais de centre de digestion de taille adéquate [20, 27, 28]. Le biogaz produit peut-être, vu sa similarité après purification, injecté dans le réseau national du gaz naturel. Les zones de faible convenance peuvent s'orienter vers des applications de petite taille comme le chauffage et la cuisson domestique, le chauffage des serres agricoles...etc.

4 Conclusion

Ce travail est une étude avec le SIG système d'information géographique ArcGIS. Afin, de déterminer les zones de convenance à la production de biogaz, en Algérie, à partir des déchets municipaux solides. Nous avons présenté, dans ce travail, la digestion anaérobie (méthanique) comme un moyen de la valorisation énergétique de la portion organique dans les

déchets municipaux solides ; et nous avons présenté les technologies de digestion anaérobie dans la production de grande et petite taille (tableau 1). Ensuite, nous avons tracé, suivant la méthodologie adoptée, les données récoltées, à l'aide de SIG, en plusieurs étapes, les zones de convenance à ce type de production cette ressources.

Les algériens génèrent annuellement près de 8 millions tonnes de déchets municipaux solides, mais, l'enfouissement technique est le seul moyen utilisé pour l'élimination des déchets avec un taux très faible de tri. Ces centres émettent annuellement des tonnes de méthane et d'autres gaz polluants en atmosphère. Cette technique a montré ces avantages en terme de la valorisation énergétique des déchets, la réduction des émissions de GES et produire des biofertilisants pour secteur agricole. Toute en réduisant, énormément, le recours à l'enfouissement technique ce qui contribue à la préservation des eaux souterraines. Ce gisement reste, à l'heure actuelle, sans valorisation économiques réelle.

L'Algérie possède un potentiel acceptable en matière de la production du biogaz à partir des déchets solides municipaux de l'ordre de 960 millions m³/an, si les conditions de récupération et conversion sont optimums.

En perspective de cette étude, une étude de localisation adéquate des centres de digestion de différentes tailles en se basant sur le zonage réalisé.

Reference

1. Kaza, S.Y., Lisa C.; Bhada-Tata, Perinaz; Van Woerden, Frank, *What a Waste 2.0 : A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050*, in *Urban Development*. 2018, World Bank: Washington, DC.
2. Kumar, A. and S.R. Samadder, *A review on technological options of waste to energy for effective management of municipal solid waste*. *Waste Management*, 2017. **69**: p. 407-422.
3. Baran, B., M.S. Mamis, and B.B. Alagoz, *Utilization of energy from waste potential in Turkey as distributed secondary renewable energy source*. *Renewable Energy*, 2016. **90**: p. 493-500.
4. Achillas, C., et al., *Social acceptance for the development of a waste-to-energy plant in an urban area*. *Resources, Conservation and Recycling*, 2011. **55**(9): p. 857-863.
5. David, W.A.M.J.B., *The biogas handbook: Science, production and applications*. 2013, Cambridge (United Kingdom): Woodhead.
6. Saxena, R.C., D.K. Adhikari, and H.B. Goyal, *Biomass-based energy fuel through biochemical routes: A review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009. **13**(1): p. 167-178.
7. Murphy, J.D., E. McKeogh, and G. Kiely, *Technical/economic/environmental analysis of biogas utilisation*. *Applied Energy*, 2004. **77**(4): p. 407-427.
8. Scarlat, N., et al., *Evaluation of energy potential of Municipal Solid Waste from African urban areas*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015. **50**: p. 1269-1286.
9. Monnet, F., *An Introduction to Anaerobic Digestion of Organic Wastes, Final Report*. 2003. p. 1-43.
10. Ngumah, C.C., et al., *BIOGAS POTENTIAL OF ORGANIC WASTE IN NIGERIA*. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, 2013. **7**(1): p. 110-116.
11. Liu, Y., P. Xing, and J. Liu, *Environmental performance evaluation of different municipal solid waste management scenarios in China*. *Resources, Conservation and Recycling*, 2017. **125**: p. 98-106.
12. Hospido, A., et al., *Environmental Evaluation of Different Treatment Processes for Sludge from Urban Wastewater Treatments: Anaerobic Digestion versus Thermal Processes (10 pp)*. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2005. **10**(5): p. 336-345.
13. Association, E.E.B. *6th Edition of the Statistical Report of the European Biogas Association*. 2016 2020]; Available from: <http://www.european-biogas.eu/2016/12/21/eba-launches-6th-edition-of-the-statistical-report-of-the-european-biogas-association>.
14. Lotti, T., et al., *Two-stage granular sludge partial nitrification/anammox process for the treatment of digestate from the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste*. *Waste Management*, 2019. **100**: p. 36-44.
15. Rajaeifar, M.A., et al., *Electricity generation and GHG emission reduction potentials through different municipal solid waste management technologies: A comparative review*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017. **79**: p. 414-439.
16. Tyagi, V.K., et al., *Anaerobic co-digestion of organic fraction of municipal solid waste (OFMSW): Progress and challenges*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018. **93**: p. 380-399.
17. Association, W.B., *The contribution of Anaerobic Digestion and Biogas towards achieving the UN Sustainable Development Goals*. 2018. p. 1-24.
18. Djemaci, B., *La gestion des déchets municipaux en Algérie : Analyse prospective et éléments d'efficacité*, in *Sciences de l'environnement*. 2012, Université de Rouen France.
19. Agency, N.W., *Caractérisation des déchets ménagers et assimilés campagne nationale 2018 / 2019*. 2019: Alger, Algeria. p. 1-32.
20. Akbi, A., et al., *An overview of sustainable bioenergy potential in Algeria*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017. **72**: p. 240-245.
21. L'ENVIRONNEMENT, M.D. *RAPPORT SUR L'ÉTAT DE L'ENVIRONNEMENT EN ALGÉRIE 2017* [cited 2019 december 2019]; Available from: https://www.me.gov.dz/a/?page_id=2853.

22. STATISTIQUE, O.N.D. *population et demographie 2017*. 2017 December 2017]; Available from: <https://www.ons.dz/>.
23. Settou, B., et al., *GIS-Based Method for Future Prospect of Energy Supply in Algerian Road Transport Sector Using Solar Roads Technology*. Energy Procedia, 2019. **162**: p. 221-230.
24. Messaoudi, D., et al., *Site selection methodology for the wind-powered hydrogen refueling station based on AHP-GIS in Adrar, Algeria*. Energy Procedia, 2019. **162**: p. 67-76.
25. Gouareh, A., et al., *GIS-based analysis of hydrogen production from geothermal electricity using CO₂ as working fluid in Algeria*. International Journal of Hydrogen Energy, 2015. **40**(44): p. 15244-15253.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

La recherche des sources d'énergie alternatives est un enjeu majeur de la 3^{ème} millénaire. Assurer un approvisionnement énergétique stable et confiant, tout en maintenant des politiques environnementales rigoureuses et encourageant l'insertion et des technologies des énergies renouvelables, est en même temps un objectif et un défi quotidien des gouvernements. Comparée à d'autres sources d'énergies renouvelables (solaire, éolienne, géothermale...etc.), la biomasse se présente comme une alternative attirante aux énergies fossiles pour de nombreux aspects :

- La biomasse n'est pas une source intermittente comme notamment le solaire et l'éolienne (avec, bien entendu, de bon approvisionnement et logistique).
- Elle est une énergie à zéro empreinte carbonique (CO₂ dégagé = CO₂ absorbé pour sa croissance), et contribue à l'élimination et la valorisation énergétique des déchets municipaux, forestier et agricoles.
- Elle contribue à la réduction l'émission des gaz polluants lors de sa combustion.
- Elle possède un éventail étendu de matière première et leurs procédés de conversion avec des technologies adéquates.
- Les solutions offertes par les technologies de l'énergie biomasse répondent à la taille des applications.
- Elle peut être un vecteur d'activité économique, contribuant à la création de la richesse et l'emploi, qui répond à la notion du développement durable.

Notre travail est constitué de cinq chapitre de différentes thématiques, nous avons commencé, par une recherche bibliographique est élaborée, répartie sur deux chapitres :

Dans le premier chapitre, nous avons discuté le contexte énergétique au monde et particulièrement en Algérie, avec des chiffres et figures actualisés, afin de tracer une image complète du contexte du travail. Ensuite, nous avons récapitulé le cadre législatif et institutionnel, notamment en Algérie, marquant, en question, des énormes efforts étatiques.

Loin des fluctuations du marché international du pétrole et les crises de prix, de la suralimentation du marché et les instabilités politiques et sécuritaire, la situation énergétique en Algérie peut être résumée, d'une

part, par la montée de la consommation interne, l'épuisement de réserves anciennes sans enregistrer des nouvelles découvertes de taille, cela limite les capacités d'exportations des hydrocarbures

A cours terme, la production interne ne satisferait, donc, que la demande interne, dans un pays « quasi-dépendant » de ces exportations. D'autres part, l'Algérie possède d'énormes potentiel en matière d'énergies renouvelables, et une volonté politiques claire pour les promouvoir ; grâce une production législative et institutionnel très avancé par rapport à plusieurs pays similaires. Ce qui met le recours aux énergies renouvelables en tête des préoccupations du gouvernement. Le souci est de résoudre l'équation du développement durable, et répondre efficacement, à la fois, à la demande énergétique, tout en préservant l'environnement et la qualité de vie, le climat et les microclimats, et lutter contre le réchauffement climatique.

La deuxième partie de la recherche bibliographique, le deuxième chapitre, est consacré à une récapitulation des différentes formes, possible, de transformation et de conversion de l'énergies biomasse. La biomasse ; qui est l'une des formes des énergies renouvelables. Nous avons regroupé les conversions thermochimiques de la biomasse : la combustion, la pyrolyse et la gazéification, et les conversions biochimiques : la fermentation alcoolique (aérobie) et méthanique (anaérobie), les algues, la production d'Hydrogène et autres.

Le troisième chapitre est une étude expérimentale. Après la production du biodiesel à partir des déchets d'huiles de cuisson. Les propriétés physico-chimiques du mélange ternaire biodiesel – diesel – propanol sont mise en examen, à savoir composition en acides gras (FAC), FT – IR, TGA, DSC, RMN, ensuite certains paramètres de performance des moteurs et des émissions ont été examinés, avec différentes proportions arbitraires du mélange ternaire « biodiesel – diesel – propanol ». Le biodiesel présente un excellent FAC, viscosité cinématique, indice de cétane, stabilité à l'oxydation, plus pouvoir calorifique et indice d'iode. En suite le mélange avec le propanol le biodiesel, a représenté une amélioration positive des propriétés d'écoulement et de densité, ainsi que de FT – IR et RMN DSC et TGA. Le test sur le moteur à combustion interne et les performances en matière d'émissions ont révélé de bonne résultats, avec l'ajout de propanol. Cette étude a prouvé la faisabilité des mélanges ternaires avec des avantages en termes de propriétés et des performances acceptables du moteur et des émissions par rapport à la littérature.

Le quatrième chapitre est une étude perspective du secteur des transports Algérien, à l'horizon de 2050. Le secteur des transports algérien principalement en mode routier, est caractérisé par une expansion continue, gourmand, totalement dépendant des pétro-produits. Les émissions en GES de ce secteur sont, aussi, irrécupérables et en constante augmentation.

Dans cette étude nous avons conçu et comparé, par rapport au scénario BAU, des scénarios. Nous avons, clairement, constaté que ni les biocarburants ni les hybrides peuvent eux seuls atteindre les objectifs de toute politique de transition énergétique. Par rapport au scénario BAU, nous avons vu avec les scénarios façonnés que, seulement 14% des demandes nationales peuvent être satisfaites par les biocarburants dans le scénario BIO, 19% dans le scénario HYB1, 31% dans le scénario HYB2 et environ 66% dans le scénario MIXT, et pour une politique façonnée dans un scénario, en 2050, la consommation annuelle algérienne pourrait baisser jusqu'à 35%, 43% des émissions de CO₂ et 73% des émissions de NO_x pourraient être atténuées par rapport au scénario BAU. Ces résultats prometteurs indiquent l'énorme potentiel de diversification des ressources dans le secteur des transports.

Le dernier chapitre, chapitre cinq, est une étude, par le logiciel d'information géographique ArcGIS, d'estimation du potentiel Algérien du biogaz, à partir des déchets municipaux solides. Nous avons discuté dans cette étude le potentiel national repartie en cartographie en plusieurs couche d'information. Le potentiel national Algérien actuel avec les technologies de la digestion anaérobique est de l'ordre de 960 millions m³/an. La valorisation énergétique de ses déchets solides, à savoir la digestion anaérobique, a une grande utilité nationale :

- Réduire les grandes quantités enfouillées chaque jour au territoire national.
- Améliorer le cadre de vie en réduisant les odeurs et la pollution au milieu urbain et para-urbain.
- Réduire les émissions en GES des centres d'enfouissement technique par le captage des gaz énergétique comme le méthane.
- Produire des « biofertilisant », qui est le résidu de l'opération de digestion, pour le secteur agricole ; réduisant, ainsi, le recours aux produits chimiques, toxiques, cancérigènes et polluants.
- Créer de la richesse et de l'emploi, par un nouveau secteur d'activité économique.

Finalement, en perspective, la biomasse et ses modes de conversion, est considérée comme un moyen efficace de la préservation de l'environnement et la lutte contre les impacts climatiques de la civilisation sur l'environnement, notamment, le réchauffement climatique, en contribuant au remplacement de l'énergie fossiles dans le bouquet énergétique, l'atténuation des émissions des gaz à effet de serre, le traitement et la valorisation énergétique des déchets et la création de la richesse et de l'emploi.

La biomasse s'offre d'un large éventail de matières premières très variés et un grand nombre de processus de conversion énergétique, de petit et grande taille, avec des applications urbaines, para-urbaines et rurales. Une bonne classification des matières premières organique, est le premier pas dans le choix du mode de conversion énergétique. Cela offre un vaste champ de recherche et de développement, notamment, dans un pays semi-aride comme l'Algérie, qui engage toutes ses ressources dans un développement vert et durable.

ANNEXE

ANNEX A. Le volume de gaz correspond au déchets générés dans chaque wilaya pour l'année 2017

CODE	wilaya	Population2008	Population2021	D _i (Millions tonnes/an)	VB _i (Millions m ³ /an)
1	Adrar	399714	491323.5295	0.090114877	11.26435961
2	Chlef	1002088	1231754.237	0.225919124	28.2398905
3	Laghouat	455602	560020.3713	0.102714736	12.83934204
4	Oum El Bouaghi	621612	764077.8202	0.140141423	17.5176779
5	Batna	1119791	1376433.316	0.252455076	31.55688445
6	Béjaia	912577	1121728.417	0.205739013	25.71737667
7	Biskra	721356	886681.9175	0.162628547	20.3285684
8	Béchar	270061	331955.6576	0.060884817	7.61060213
9	Blida	1002937	1232797.817	0.22611053	28.26381621
10	Bouira	695583	855002.0631	0.156818066	19.60225824
11	Tamanrasset	176637	217120.0265	0.039822527	4.977815858
12	Tébessa	648703	797377.744	0.146249045	18.28113068
13	Tlemcen	949135	1166665.061	0.213980956	26.74761944
14	Tiaret	846823	1040904.41	0.19091488	23.86436001
15	Tizi Ouzou	1127607	1386040.647	0.25421718	31.77714752
16	Alger	2988145	3672991.059	0.673672473	84.20905907
17	Djelfa	1092184	1342499.131	0.246231122	30.77889024
18	Jijel	636948	782928.6427	0.1435989	17.94986246
19	Setif	1489979	1831463.85	0.335913363	41.98917042
20	Saida	330641	406419.848	0.07454248	9.317810047
21	Skikda	898680	1104646.396	0.202605957	25.32574464
22	Sidi Bel Abbes	604744	743343.8822	0.13633856	17.04231997
23	Annaba	609499	749188.6697	0.137410567	17.17632086
24	Guelma	482430	592997.0187	0.108763066	13.59538321
25	Constantine	938475	1153561.92	0.211577676	26.44720946
26	Médéa	819932	1007850.324	0.184852347	23.10654343
27	Mostaganem	737118	906056.3739	0.166182065	20.77275808
28	M'Sila	990591	1217622.266	0.223327144	27.91589298
29	Mascara	784073	963772.882	0.176767994	22.09599922
30	Ouargla	558558	686572.6194	0.125926001	15.74075007
31	Oran	1454078	1787334.782	0.327819541	40.97744259
32	EL Bayadh	228624	281021.8071	0.051542912	6.442864025
33	Illizi	52333	64327.07954	0.01179839	1.474798809
34	Bordj Bou Arreridj	628475	772513.7354	0.141688675	17.71108444

35	Boumerdes	802083	985910.5524	0.180828319	22.6035399
36	El Tarf	408414	502017.4625	0.092076278	11.50953473
37	Tindouf	49149	60413.34592	0.011080563	1.385070351
38	Tissemsilt	294476	361966.2751	0.066389139	8.298642429
39	El Oued	647548	795958.0322	0.145988653	18.24858157
40	Khenchela	386683	475305.9847	0.087177059	10.89713236
41	Souk Ahras	438127	538540.3164	0.098775026	12.34687822
42	Tipaza	591010	726462.2184	0.133242252	16.65528146
43	Mila	766886	942646.8331	0.172893212	21.61165154
44	Ain Défla	766013	941573.7523	0.172696396	21.58704948
45	Naama	192891	237099.2433	0.043486965	5.43587062
46	Ain Temouchent	371239	456322.41	0.083695234	10.46190425
47	Ghardaïa	363598	446930.1868	0.081972583	10.24657286
48	Relizane	726180	892611.5189	0.16371611	20.46451378

قطاع الطاقة الجزائري يمتد بقوة ويعتمد كليًا على المنتجات البترولية. بسبب ارتفاع الطلب المحلي والتغيرات في نمط الحياة من ناحية، ومن ناحية أخرى، تتزايد باستمرار غازات الدفيئة غير القابلة للاسترداد المنبعثة من القطاعات الاقتصادية المختلفة ولها تأثير على البيئة. لذلك، هناك حاجة ماسة لأنواع وقود بديلة أنظف وصديقة للبيئة ومجدية اقتصاديًا من بينها الطاقة الحيوية. يجب أن تلعب الكتلة الحيوية، ولديها القدرة، دورًا مساهمًا في تحقيق أهداف الطاقة والسياسات البيئية، الهادفة إلى التنمية المستدامة. من خلال هذا العمل الذي تم تنفيذه، قمنا بمساهمة في تقييم قدرات الطاقة الكامنة في الكتلة الحيوية في الجزائر. تم تناول العديد من الموضوعات، وهي تبيين بقايا زيوت الطهي كوقود لمحركات الديزل مع إضافة كحول البروبانول، كذلك تمت دراسة آفاق قطاع النقل الجزائري مع إدخال الوقود الحيوي وأنواع أخرى من الطاقات النظيفة للتخفيف من غازات الدفيئة. الدراسة الأخيرة هي دراسة تقديرية لإمكانات الغاز الحيوي المستخلص من النفايات الصلبة لبلديات الجزائر. يمكن إدخال الطاقة الحيوية، من خلال تبيين النفايات المختلفة (زيت الطهي المستخدم، والنفايات الصلبة البلدية) في سياسة طاقة مناسبة. مع تحليل النتائج ومناقشتها. تشير هذه النتائج الواعدة إلى الإمكانات الهائلة لتتبع الموارد في قطاع الطاقة. لذلك، فإن تنفيذ مثل هذه السياسات أمر أساسي لسياسة انتقالية مستدامة لقطاع الطاقة والاقتصاد الجزائري.

Abstract

The Algerian energy sector is growing, very greedy and is totally dependent on petro-products, due to the rise in local demand and changes in lifestyle, on the one hand. On the other hand, the irrecoverable GHGs emitted by different economic sectors are constantly increasing and have an impact on the environment. Therefore, there is a strong need for cleaner, environmentally friendly and economically viable alternative fuels. Biomass should, and has the capacity, to play a contributory role in achieving the objectives of energy and environmental policies, aiming at a sustainable development. In the work carried out, we have marked a contribution to the energy recovery of the potential of biomass in Algeria. Several topics were addressed, namely, the valorization of cooking oils as a fuel in mixed with diesel and Propanol, the prospects of the Algerian energy sector with the introduction of bio-fuels, the mitigation of GHG and the transition of are detailed, the estimation of the potential of biogas from municipal solid waste in Algeria is also discussed. Biomass, by valorizing different wastes (used cooking oil, municipal solid waste), can be introduced in an adequate energy policy. The results are analyzed and discussed. These promising results indicate the enormous potential for resource diversification in the energy sector. Therefore, the implementation of such policies is fundamental for a sustainable transition policy of the Algerian energy sector.

Résumé

Le secteur énergétique algérien en expansion, très gourmand, est totalement dépendant des pétro-produits, en raison de la montée de la demande locale et des changements de mode de vie, d'une part. d'autre part, les GES irrécouvrable émis par des différents secteurs économiques sont en constante augmentation et ont un impact sur l'environnement. Par conséquent, il existe un fort besoin de carburants alternatifs plus propres, respectueux de l'environnement et économiquement viables. La biomasse devrait, et a les capacités, de jouer un rôle contributif dans la réalisation des objectifs, des politiques énergétiques et environnementales, visant un développement durable. Dans les travaux réalisés, nous avons marqué une contribution de la valorisation énergétique du potentiel de la biomasse en Algérie. Plusieurs thèmes ont été abordés, à savoir, la valorisation des huiles de cuisson comme un carburant en mixte avec les diesel et Propanol, les perspectives du secteur énergétique algérien avec l'introduction des bio-carburants, l'atténuation des GES et la transition des sont détaillées, l'estimation du potentiel du biogaz à partir des déchets municipaux solides en Algérie est aussi discuté. La biomasse, en valorisant différents déchets (huiles de cuisson usagées, déchets solides municipaux), peut être introduite dans une politique énergétique adéquate. Les résultats sont analysés et discutés. Ces résultats prometteurs indiquent l'énorme potentiel de diversification des ressources dans le secteur de l'énergie. Par conséquent, la mise en œuvre de telles politiques est fondamentale pour une politique de transition durable du secteur énergétique algérien.