REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie mécanique
Spécialité : énergie renouvelable en mécanique

Analyse Multicritère de la Planification Energétique durable -cas de l'Algérie-

---

Présenté par :

Seghilani rabah

Mefti hacen

Proposé et Dirigé par :

Encadreur : Dr. Haddad Brahim Maitre de recherche B, UDES-Bou-Ismail

Co-Encadreur : Dr. Tassoult Houda Maitre de recherche B, UDES-Bou-Ismail

Promotion 2020

Dédicaces

بِسِم الله الرحمان الرحيم

Je voudrais remercier dieu pour toute l'énergie qu'il m'a donné durant ces cinq années et particulièrement après avoir passé 2 ans dans une filière différente que celle où je suis aujourd'hui, grâce à notre foi, nous croyons au destin, nous pouvons traverser les moments difficiles en regardant toujours le bon côté de la chose, hamdoulillah

Je voudrais principalement remercier mes chers parents, mes chers frères et toute ma famille sans qui je n'aurais jamais pu faire ce travail.

Nous dédions ce travail aux personnes qui comptent le plus pour nous : Tout d'abord à mes parents.

Aucune dédicace ne saurait mieux exprimer notre affection, notre reconnaissance, notre gratitude et notre respect le plus profonds

Merci pour votre présence et votre aide si précieuse

Rabah

Dédicaces

بِسمِ الله الرحمان الرحيم

Je voudrais remercier dieu pour toute l'énergie qu'il m'a donné durant ces cinq années et particulièrement après avoir passé 2 ans dans une filière différente que celle où je suis aujourd'hui, grâce à notre foi, nous croyons au destin, nous pouvons traverser les moments difficiles en regardant toujours le bon côté de la chose, hamdoulillah

Essentiellement, je voudrais remercier mes chers parents, mes chers frères et tous les membres de ma famille sans lesquels je n'aurais pas pu faire le travail.

Aussi, un grand merci à tous mes amis, en particulier Ahmed Bilal Yousef Muhammad Ilyas Adel et Rashid.

Hacen

REMERCIEMENTS

Nous tenons out d'abord à remercier « Allah » le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce travail.

Le travail qui a fait l'objet de ce mémoire a été effectué à l'unité de développement des équipements solaire (UDES) à Tipaza.

Tout d'abord, nous voudrions exprimer notre sincère gratitude à notre deux promoteurs Dr. Haddad Brahim et Dr. Tassoult Houda Maîtres de recherche à l'UDES, pour leurs précieux conseils, leurs disponibilités et leurs confiances tout au long de ce projet.

Nos vifs remerciements vont aux membres du jury, pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Nous tenons à saisir cette occasion et adresser nos profonds remerciements et reconnaissance à nos familles et amis et particulièrement à nos parents respectifs, qui par leurs prières et encouragements pendant toute la durée de notre cursus d'étude et plus particulièrement durant les derniers mois de rédaction et de préparation.

Enfin nous tenons également à remercier toutes les personnes intervenantes du centre de recherche l'UDES, qui par leurs paroles, leurs conseils nous ont encouragé durant la réalisation de ce travail.

TABLE DES MATIERES

Remerciement
Tables des matières I
Liste des Figures IV
Liste des Tableaux V
Liste des Abréviations VI
Introduction Générale 1

CHAPITRE I : Généralité sur le potentiel énergétique en Algérie

I.1 Introduction 3
I.2 Production de l'énergie électrique 4
I.2.1 Capacité installée 6
I.2.2 Consommation nationale d'électrici..... 7
I.2.3 Réseau de transport et de distribution d'électricité 7
I.3 Gisement énergétique de l'Algérie 8
I.3.1 Pétrole et gaz..... 8
I.3.2 Production primaire d'hydrocarbures..... 10
I.3.3 Nucléaire 13
I.4 Programme national d'énergie 14
II.4.1 Les centrales à combustible fossile (gaz)..... 14
II.4.2 Les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique) 15
II.4.3 Programme d'énergies renouvelables..... 16
II.4.4 Programme d'efficacité énergétique..... 18
I.5 Conclusion..... 19

Chapitre II : Analyse multicritère pour évaluer les différents processus de production énergétique

II.1 Introduction 21
II.2 Les facteurs Techniques 21
II.2.1 Quelques définitions importantes 21

II.2.2 La sécurité ……..... 22
II.2.3 La fiabilité…….. 22
II.2.4 La maturité……..... 23
II.3 Les facteurs économiques ……... 24
II.3.1 Le cout d'investissement…….. 24
II.3.2 L'opération et cout de maintenance..... 24
II.3.3 Le cout de carburant……..... 24
II.3.4 Le cout d'électricité ……..... 25
II.3.5 La valeur présente Nette……..… 25
II.3.6 Période du remboursement (Payback)..... 26
II.3.7 Durée de vie……... 26
II.3.8 L'équivalant de cout annuel (EAC)…… 27
II.4 Les facteurs environnementaux..... 27
II.4.1 L'Émissions de NOx …….. 27
II.4.2 L'Émissions de CO_2 …….. 28
II.4.3 L'Émissions de CO ……... 28
II.4.4 L'Émissions de SO_2 ……...……... 28
II.4.5 L'Émission de particule..... 29
II.4.6 Composés organiques volatiles non méthaniques…… 29
II.4.7 Soles et utilisation des terres …… 30
II.4.8 La pollution sonore (Bruit)…… ……... 30
II.5 Les facteurs sociaux 31
II.5.1 L'acceptation sociale …… 31
II.5.2 La création des postes de travail: ……..…… 32
II.5.3 Bénéfice social …….. 32
II.6 Structure de problème de production d'énergie……..... 34
II.7 Conclusion…….. 36

Chapitre III : Recherche bibliographique sur les applications de la méthode MCDM dans la production énergétique

PARTIE I : REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

III.1 Introduction…….... 38

III.2 Prise de décisions multicritères et planification de la politique énergétique. 39

III.3 L'utilisation de la méthode AHP pour la prise de décision énergétique…..... 40

PARTIE II : METHODES ANALYTIQUES DU PROCESSUS HIERARCHIQUE

III.4 Approche AHP…… 45

III.5 Formation AHP…… 48

III.6 Conclusion …… 51

Chapitre IV Analyse de problème de production énergetique pour le cas de l'Algerie

IV.1 Introduction……...…….. 51

IV.2 Méthodologie…… 52

IV.3 Résultats et discussions……..... 54

IV.3.1 Comparaison des sous facteurs économique ……. 55

IV.3.2 Comparaison des sous facteurs technique ……. 56

IV.3.3 Comparaison des sous facteurs environnement ……. 57

IV.3.4 Comparaison des sous facteurs social ……. 58

IV.4 Conclusion ……..... 60

Analyse des résultats et discussion…….... 61

Références…… 62

Conclusion générale…….. 64

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Puissance produite par type d'équipement à fin 2018 6

Figure I.2: Evolution de la puissance installée par origine (MW).……..... 7

Figure I.3 : Total ventes d'électricité (par type de tension) 7

Figure I.4 : Réseau de transport et de distribution électrique. 8

Figure I.5 : Carte des gisements pétroliers et gaziers en Algérie..... 9

Figure I.6 : Le tracé du gazoduc..... 12

Figure I.7 : Emission évitées (en millions de tonnes CO_2)..... 16

Figure I.8 : Diagramme des étapes du projet EnR de la production de l'électricité…….. 16

Figure I.9 : Programme de développement des énergies renouvelables (2015-2030) …….. 17

Figure Ⅱ.1 : Rapport de l'énergie primaire à l'énergie utilisée..... 21

Figure Ⅱ. 2 : L'évolution du taux de défaillance instantané en fonction du temps…… 26

Figure Ⅱ.3 : Analyse hiérarchique de problème..... 35

Figure Ⅲ. 1: Cadre d'aide à la décision multicritère 40

Figure Ⅲ.2 : La structure hiérarchique d e la méthode AHP..... 49

Figure IV.1: Approche méthodologique de la recherche..... 52

Figure IV.1 : Hiérarchie pour la sélection des ressources énergétiques pour l'Algérie…….. 53

Figure IV. 3 : Comparaison des principaux critères……..... 55

Figure IV. 2: Les valeurs d'importance Economique, Sous-facteur……..... 56

Figure IV.5 : Les valeurs d'importance Technique, Sous-facteur…….. 57

Figure IV. 3 : Les valeurs d'importance Environnement, Sous-facteur…… 57

Figure IV. 7 : Les valeurs d'importance Social, Sous-facteur…… 58

Figure IV. 8 : Pondérations normalisées des sous-critères obtenus à partir des commentaires d'experts 59

LISTE DES TABLEAUX

Tableau Ⅰ.1: Evolution de l'énergie électrique produit 1980-2018 (GWh) par type d'équipement…..... 5

Tableau Ⅰ-2 : Production primaire commerciale d'hydrocarbures (2017/2018) 10

Tableau Ⅰ 3 -: Répartition des exportations par produit……..... 11

Tableau Ⅰ 4 -: Taux d'exportation de gaz par pays……..... 11

Tableau Ⅰ 5 -: Bilan des Echanges Hydrocarbures……..…… 12

Tableau Ⅰ 6 - Consistance du programme de développement des énergies renouvelables (2015-2030) ……..... 17

Tableau Ⅱ. 1 : Les critères principaux de l'énergie ……..... 33

Tableau Ⅲ.1: Valeur nette de l'échelle de préférence pour AHP……..... 45

Tableau Ⅲ.2: Indice de cohérence aléatoire pour les matrices de taille n……..... 47

Tableau IV.1: Critères principaux et sous-critères du modèle énergétique …… 54

Tableau IV.2 : Matrice de comparaison par paires des principaux critères par rapport à l'objectif..... 54

Tableau IV.3: Matrice de comparaison par paires des sous facteurs économique par rapport à l'objectif……... 55

Tableau IV.3 : Matrice de comparaison par paires des sous facteurs technique par rapport à l'objectif……..... 56

Tableau IV.4 : Matrice de comparaison par paires des sous facteurs environnement par rapport à l'objectif…….. 57

Tableau IV.5 : Matrice de comparaison par paires des sous facteurs social par rapport à l'objectif…….. 58

Tableau IV.6 : Comparaison des sous critères avec les alternatives……... 59

Tableau IV.7: Classement agrégé des alternatives……... 60

LISTE DES ABRIVIATIONS

AHP : Analyse de la structure hiérarchique

AIEA : Agence internationale de l'énergie atomique

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

APS : Agence de presse algérienne

CDER : Centre de Développement des Énergies Renouvelables

CREG : Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz

ENR : Énergie Renouvelable

M.TEP : Millions de Tonne Équivalent Pétrole

MCDM Multi-Criteria Decision-Making (Prise de décision multicritères)

MEN : Ministère de l'Énergie et des Mines

PEE : Programme d'Efficacité Énergétique

PENREE : Programme Algérien des Énergies Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique

SPE : Société Algérienne de Production de l'Électricité

Introduction générale

La population mondiale ne cesse pas d'augmente jour après jour, elle va atteindre 8,4 milliards en 2030, par conséquence, la demande mondiale d'énergie devrait aussi augmenter. Selon les récentes études, la consommation globale augmentera de 36% entre 2011 et 2030 (BP, 2013). La production mondiale nette d'électricité peut augmenter de 69% d'ici 2040, passant de 21,6 billions de kilowattheures (kWh) en 2012 à 25,8 billions de kWh en 2020 et 36,5 billions de kWh en 2040 (International Energy Outlook, 2016).

La transition énergétique vers d'autres sources d'énergie en dehors les hydrocarbures devient de plus en plus importants pour plusieurs pays y compris les pays en développement. L'impact du mix énergétique sur l'environnement et le développement durable est reconnu comme un facteur capital et crucial. L'intégration des sources d'énergie nouvelles et propres dans le mix énergétique est un problème complexe qui a nécessité une analyse pluridisciplinaire et multidimensionnelle du problème. La production d'énergie et la protection de l'environnement constituent des défis fondamentaux à relever par les pays du monde entier dans le but global d'assurer le bien-être social. En ce sens, les recherches de nouvelles sources d'énergie restent des stratégies centrales pour trouver un bon équilibre entre les différents aspects entre l'énergie, l'environnement, l'économie et la société.

La stratégie de la politique énergétique s'est depuis longtemps concentrée sur trois objectifs principaux, la sécurité d'approvisionnement énergétique, la compétitivité du marché énergétique et la protection de l'environnement (Hämäläinen et Karjalainen, 1992). Pour cela, plusieurs perspectives doivent être prises en compte par les décideurs politiques et les méthodes multicritères sont particulièrement bien adaptées pour faire face à ce problème de planification énergétique.

L'Algérie, un des plus grands pays d'Afrique est un acteur majeur dans le marché international des hydrocarbures. En plus, l'économie du pays repose presque exclusivement sur l'exportation de pétrole et de gaz naturel qui est utilisé pour la production de l'électricité. Récemment, le pays vise de changer cette politique où le gouvernement s'est fixé comme objectif d'installer 22 GW des énergies renouvelables et 2000 MW de l'énergie nucléaire d'ici 2030. En fait, les pays en développement comprenant les pays de l'Afrique du Nord tentent d'investir dans les énergies renouvelables et l'énergie nucléaire pour satisfaire la forte demande énergétique, protéger l'environnement et garantir le bien-être social (Nakhle, 2016). En Afrique, la part des énergies renouvelables (hors énergie hydroélectricité) passera de 2% à 30%, entre

2013 et 2030 (IRENA, 2015). En ce qui concerne l'Afrique du Nord, l'électricité produite à partir des énergies renouvelables devrait passer de 2% à 38%, l'énergie solaire et l'éolienne jouent un rôle fondamental (IRENA, 2015). L'Algérie, le Maroc et l'Égypte manifestent également un grand intérêt pour l'intégration de l'énergie nucléaire dans leur mix énergétique.

L'objectif principal de notre étude est d'analyser le système du mix énergétique pour le cas de l'Algérie afin d'élaborer le modèle énergétique le plus adéquat pour le pays. La méthode multicritère AHP a été utilisée pour structurer le problème dans plusieurs niveaux (Objectif, critères principaux, sous critères et alternatives). Le feedback des experts a été utilisé pour évaluer les différents critères par rapport à l'objectif principal.

Le manuscrit s'articule autour de trois chapitres principaux :

Le premier chapitre est consacré à une présentation générale sur le potentiel énergétique en Algérie, les différentes sources d'énergie du pays ont été détaillées et analysées. Un constat général du système électrique Algérien est présenté et discuté pour voir les avantages et les inconvénients de la situation énergétique actuelle.

Le second chapitre est consacré à l'analyse des différents critères utilisés par la méthode multicritère **MCDM** pour étudier le problème de production énergétique dans les différents pays et régions. L'ensemble des critères technique, économique, environnemental et social ont été détaillés.

Le troisième chapitre est divisé en deux parties ; la première est consacrée pour la recherche bibliographique sur les applications des méthodes multicritères dans le domaine de production énergétique pour analyser les différentes sources d'énergies. La recherche est focalisée beaucoup plus sur l'utilisation de la méthode AHP afin d'analyser le mix énergétique. En suite dans la deuxième partie, les étapes de la méthode AHP et les équations mathématiques utilisées pour résoudre le problème ont été expliqués et présentée.

Pour finir, le quatrième chapitre est dédié à la méthodologie de travail et la présentation de modèle énergétique Algérien et aux résultats et discussions de l'étude sur l'évaluation des alternatives énergétique avec les différents critères technique, économique, environnemental et sociopolitique pour le cas de l'Algérie.

Enfin, notre étude se terminera par une conclusion générale qui récapitule les principaux résultats obtenus.

Chapitre I

Généralité sur le potentiel énergétique en Algérie

I

Généralité sur le potentiel énergétique en Algérie

I.1 Introduction

L'Algérie est l'un des plus grands pays du nord de l'Afrique ainsi que du continent africain, avec une superficie de plus de 2 millions Km^2, dont les deux tiers sont couverts de déserts (Amrouch et autres, 2012) avec une population d'environ 44 millions d'habitants en janvier 2020.

Le modèle énergétique Algérien repose actuellement presque exclusivement sur les ressources fossiles pour générer l'énergie électrique. La capacité installée de production d'électricité en Algérie passé de 17 GW en 2015 à 20 GW en 2020 selon le Ministère de l'Énergie et des Mines (MEN, 2020). Le gaz naturel représentait la principale ressource utilisée pour la production d'électricité, plus de 97% de la puissance totale étant basée sur le gaz naturel. Le gouvernement Algérien prévoit de réduire la dépendance aux énergies fossiles et le paradigme politique évolue vers d'autres options telles que les énergies renouvelables (solaire, éolien, biomasse ou géothermie) et nucléaire. En 2011, le gouvernement a lancé un programme visant à développer les énergies renouvelables et à promouvoir l'efficacité énergétique dans le pays. Selon le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER, 2015), environ 40% de l'électricité produite pour la consommation domestique en Algérie sera produite à partir de l'énergie renouvelable (EnR) d'ici 2030 (CDER, 2016) cette stratégie étant justifiée par des aspects tels que le potentiel générer de nouveaux emplois, diversification de la production d'électricité, préservation des ressources fossiles et objectifs de développement durable. Récemment, le programme est réduit de 22 GW a 15 GW et la période de réalisation a été prolongée jusqu'à 2035.

La demande de l'électricité a connu une évolution importante et particulièrement en période estivale, atteignant des pics de consommation importants due à la croissance rapide de

la population. Cette forte augmentation de la demande est une conséquence directe du changement des habitudes du consommateur et l'amélioration de sa qualité de vie, ainsi que la pulsion donnée au secteur économique et industriel (Populationdata, 2020).

I.2 Production de l'énergie électrique :

Les impératifs de préservation de l'environnement ont imposé l'utilisation du gaz naturel comme énergie primaire pour la production d'électricité, et exigent aussi de développer d'autres énergies dites propres et renouvelables comme l'énergie solaire et éolienne, dont les gisements sont disponibles et abondants dans tout le pays. Aussi, pour répondre au besoin en électricité, sans cesse croissant, un programme ambitieux a été engagé pour le dédoublement des capacités de production conventionnelle. La stratégie d'exécution de ce programme de production de l'électricité conventionnelle consiste avant tout, à développer une industrie nationale, à même d'assurer la fourniture des équipements destinés au secteur de l'énergie électrique. Les programmes indicatifs décennaux des besoins en moyens de production de l'électricité, élaborés par la Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz (CREG) chaque deux ans et approuvés par Monsieur le Ministre de l'Energie, prévoient les capacités de production à mettre en place sur une période décennale par région (Est, Ouest, Centre et Sud) et par filières selon deux scénarios d'évolution de la demande (moyen et fort). Le parc de production national est constitué des centrales électriques de la Société Algérienne de Production de l'Électricité (SPE), et de Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida (SKTM), qui sont une filiale de Sonelgaz, ainsi que des sociétés en partenariat avec Sonelgaz. (MEN, 2020).

Tableau I.1 : Evolution de l'énergie électrique produit 1980-2018 (GWh) par type d'équipement (Bilan Énergétique National ,2018)

Type d'équipement	1980	1990	2000	2006	2010	2016	2017	2018
Turbines à Vapeur	3621	8397	15757	14558	9692	11012	10074	10658
Turbines à Gaz	2223	6704	8830	16463	19564	24441	31009	36580
Cycle combiné	-	-	-	3419	15341	28899	29508	28244
Hydraulique	251	135	54	218	173	72	71	117
Diesel	125	246	368	246	403	281	286	347
Eolien	-	-	-	-	-	19	21	66
Photovoltaïques	-	-	-	-	-	205	500	600
Total	6220	15452	25008	34922	45174	66263	71470	76612

Il ressort du tableau ci-dessus que la production d'électricité en Algérie se développe considérablement, atteignant 76 612 GWh en 2018 par rapport à 2017 soit 71 470 GWh, soit une augmentation de 7.7%.

Nous constatons une augmentation de la production par turbines à gaz en 2018 de 4,32% par rapport à 2017 et de 0,14% pour les turbines à vapeur, nous constatons également une diminution de 4,42 % pour le cycle combiné, et une légère augmentation dans les autres sources.

Cette évolution est due à la diversité des sources de production, telles que les énergies renouvelables qui, malgré leur production limitée, sont encore en cours d'utilisation et en cours d'étude et de développement.

La figure 1 présente la puissance produite par type à la fin du l'année 2018

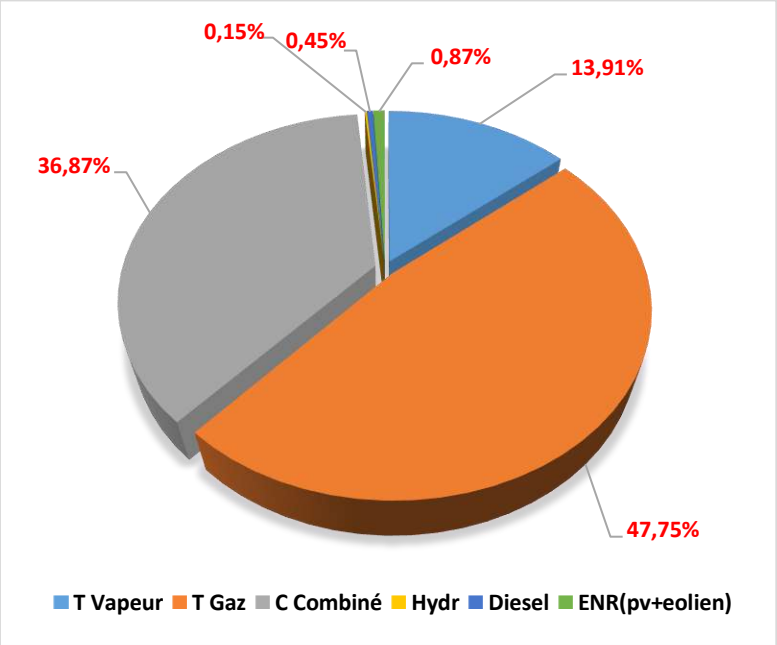


Figure I- 1 : Puissance produite par type d'équipement à fin 2018

I.2.1 Capacité installée :

La puissance installée du parc de production d'énergie électrique a atteint 20 964 MW en fin 2018, en hausse de 7,7 % par rapport à 2017, tirée par la hausse du parc de production de SPE (11,4%) pour une puissance installée de 14 533 MW en 2018.Cette augmentation est due à l'entrée en production des centrales cycle combiné d'Ain Arnet et de Ras Djinet ainsi que la mise en service d'un groupe de la centrale TG Ain Djasser III.

La structure de la puissance installée par origine, est dominée par la part des turbines à gaz (55%), suivie par le cycle combiné (29%), et les Turbines Vapeur (11%). Le reste (5%) est partagé entre les autres moyens de production (diesel, hydraulique et EnR), (Bilan Énergétique National, 2018)

La figure 2 présente la puissance installée par origine à la fin du l'année 2018

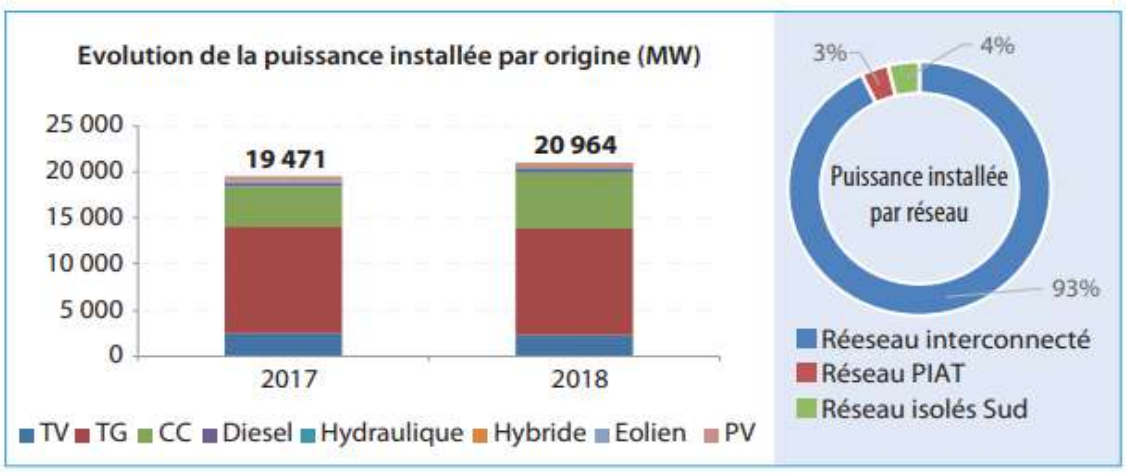
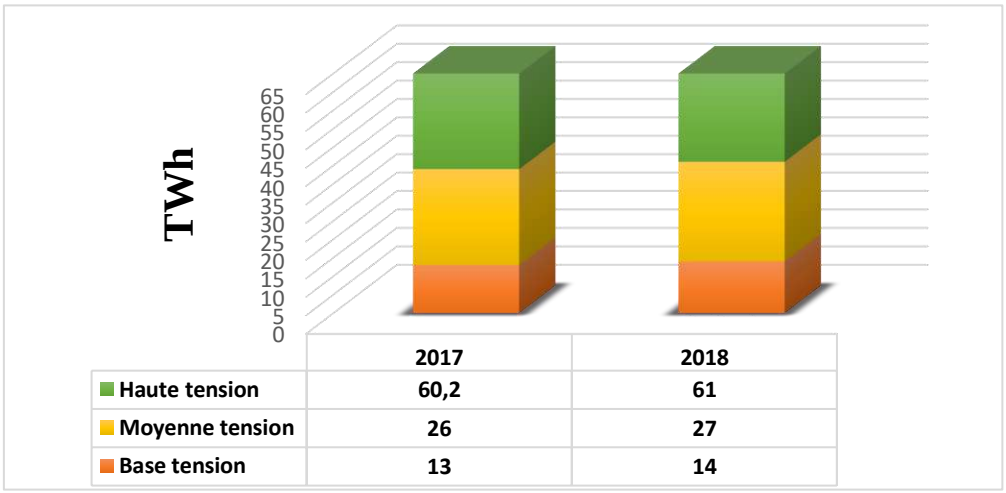


Figure I-2 : Evolution de la puissance installée par origine (MW). (Source Bilan Énergétique National 2018)

I.2.2 Consommation nationale d'électricité :

La consommation nationale d'électricité (y compris celle des auto-producteurs) a atteint 64,8 TWh en 2017 et de 66,8 TWh en 2018, reflétant un accroissement de 2,9%, suite notamment à l'augmentions de la demande des clients de Sonelgaz (2,6%), comme illustré dans le graphe ci-dessous (Bilan Énergétique National 2018) : Basse tension : 0,7%, Moyenne tension : 2,2%, Haute tension : 1,6%. (APS, 2019).



	2017	2018
Haute tension	60,2	61
Moyenne tension	26	27
Base tension	13	14

Figure I-3 : Total ventes d'électricité (par type de tension). (Source Bilan Énergétique National 2018)

I.2.3 Réseau de transport et de distribution d'électricité :

Le programme de développement en moyens de production et transport d'électricité est accompagné du renforcement du réseau de distribution (lignes MT/BT et postes), pour assurer

la fiabilité de l'approvisionnement et de la distribution de l'énergie électrique et garantir une meilleure qualité de service pour les citoyens.

Le réseau de transport et de distribution d'électricité a atteint, à fin 2018, une longueur totale de 368 623 km, reflétant un accroissement de près de 10 400 km par rapport à l'année 2017, soit un taux de +2,9%. (APS, 2019)

La figure 4 présente le Réseau de transport et de distribution électrique.

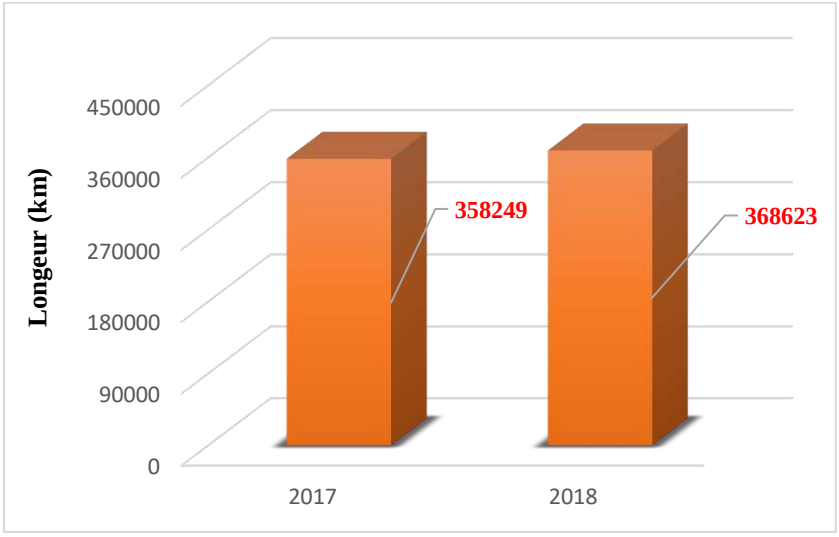


Figure I-4 : Réseau de transport et de distribution électrique. (Source Bilan Énergétique National 2018)

I.3 Gisement énergétique de l'Algérie :

I.3.1 Pétrole et gaz :

Le secteur pétrolier et gazier en Algérie constitue l'épine dorsale de l'économie nationale, représentant environ 30% du produit intérieur brut, 60% des recettes budgétaires et 95% des revenus d'exportations du pays dont 44% pour le gaz naturel, 33% pour le pétrole brut et 18% pour le pétrole raffiné. (Ben Abba, 2018)

« The International Statistical Agencies » estime que les réserves de gaz naturel de l'Algérie sont estimées à 4504 milliards de mètres cubes ; septième plus grande réserve au monde, représentant près de 70% des réserves d'hydrocarbures du pays. Toutefois, en novembre 2015, le gouvernement a annoncé que les réserves conventionnelles prouvées s'établissent désormais à 2745 milliards de mètres cube. Les exportations du gaz naturel représentent 44% des exportations totales du pays. En 2017, l'Algérie a produit presque 94.7 milliards mètres cubes

de gaz naturel (cinquième plus grande production au monde), dont 57% ont été exportés et 43% consommés localement. Pendant que la production de gaz naturel a connu une augmentation fluctuante de 09%, passant de 86.505 milliards mètres cubes en 2008 à 94.7 milliards mètres cubes en 2017, la consommation intérieure a connu une augmentation remarquable de 60% au cours des dix dernières années avec une moyenne de 5,2% par an. Cette tendance a été conduite par :

1. Un gain de population de près d'un million de personnes par an, passant de 34,5 millions en 2008 à 42 millions en 2018, soit une augmentation de 22%, et qui devrait atteindre 50 millions d'habitant en 2032 (augmentation de 24% en 14 ans). (Ben Abba, 2018)
2. La consumation locale de gaz qui répartit comme suit : 28% consumée par les ménages, 21% pour les industries transformatives gérées par Sonatrach, 09% pour d'autres industries, mais 42% du gaz consommé localement sert à générer presque 98 % de l'électricité totale produite, quatrième plus grand pays au monde générant de son électricité à partir de gaz naturel. En 2017, la production d'électricité a atteint un niveau de 7915 GW h, soit 3,2 fois plus que la production de 1999, qui s'élevait à 1885 GWh. Une augmentation en moyenne d'environ 7% par an. Cependant, depuis 2010, la demande d'une année à l'autre a augmenté de près de 20% et pour les prochaines dix années, la Sonelgaz prévoit une production supplémentaire de 2131 GW, soit une augmentation de 27%. Cela nécessiterait l'utilisation de 64% de la production actuelle de gaz. (Ben Abba, 2018).

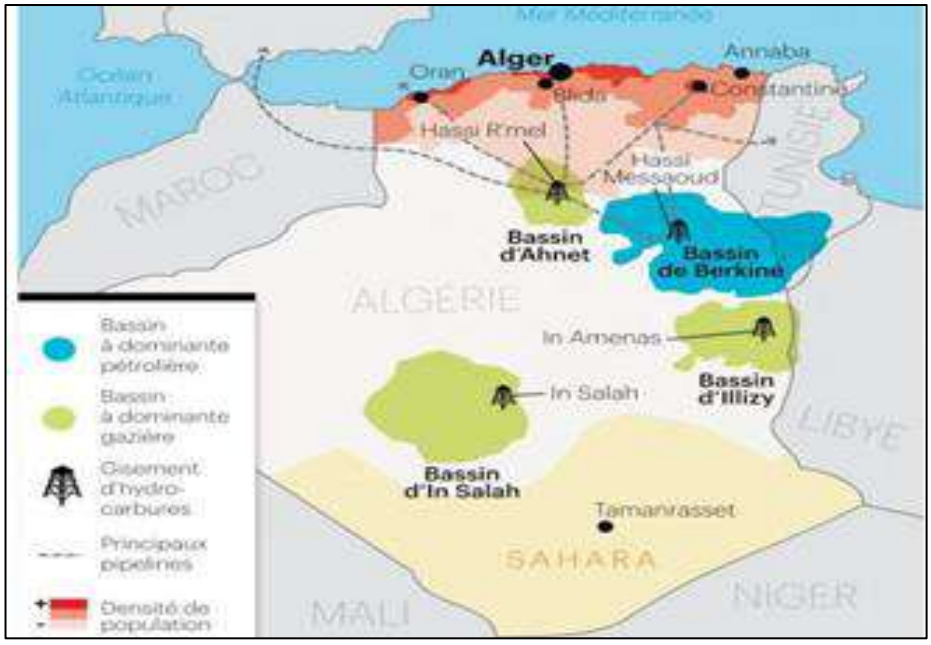


Figure I-5 Carte des gisements pétroliers et gaziers en Algérie**.**

I.3.2 Production primaire d'hydrocarbures :

La production primaire commerciale d'hydrocarbures a connu une légère baisse (-0,4%) en 2018 comparativement aux réalisations de 2017, avec 165,0 Millions de Tonne Equivalent Pétrole (M.TEP), La baisse de production de liquides (pétrole, condensat et GPL) a été légèrement compensée par l'augmentation de celle du Gaz Naturel, comme détaillé dans le tableau ci-dessous : (Bilan Énergétique National, 2018)

Tableau I.2: Production primaire commerciale d'hydrocarbures (2017/2018)
(Bilan Énergétique National, 2018)

	Unités	2017	2018	Evolution	
				Quantité	%
Pétrole brut	Million de tonnes	49.5	48.6	-0.9	-1.8
Gaz Naturel	Milliard de m^3	96.6	97.5	+0.9	+0.9
Condensat	Million de tonnes	9.2	8.8	-0.4	-4.3
GPL aux champs	Million de tonnes	8	7.9	-0.1	-0.8
Total	Million de TEP	165.7	165.0	-0.7	-0.4

L'activité a vu la mise en service du gisement gazier de Timimoune, opéré en association avec Total/Cepsa. D'autres projets de développement, de transport et de production d'électricité pour les besoins de la branche ont été réceptionnés comme suit :

1. La méga-station de compression Hassi R'mel du gazoduc GR4 ;
2. Les deux gazoducs d'alimentation en gaz des localités de Tamanrasset et Djanet ;
3. La centrale solaire PV de 10 MW à Bir Rebaa Nord en partenariat avec ENI.

A. Exportations

Le volume des exportations d'hydrocarbures en 2018 était de 101,4 Millions de TEP, contre 108,8 millions TEP durant l'année 2017, reflétant un recul de -7,0%. La baisse concerne tous les produits, à l'exception du gaz naturel et le condensat qui ont connu une légère augmentation, respectivement de (+1,0%) et (+2,1%), comme indiqué ci-dessous : (Bilan Énergétique National, 2018)

Tableau I.3 : Répartition des exportations par produit (Bilan Énergétique National, 2018)

		Unités	Quantité		Evolution	
			2017	2018	Quantité	%
Pétrole brut		Million de tonnes	24.7	21.7	-3.0	-12.2
Condensat			4.2	4.3	+0.1	+1.2
Produits raffinés			15.6	14.3	-1.3	-8.3
GPL			6.9	6.6	-0.3	-4.5
GNL		Million de m^3 GNL	26.5	21.5	-5.0	-18.9
Gaz Nature		Milliard de m^3	38.1	38.5	+0.4	+1
Total	**Quantité**	Million TEP	108.8	101.4	-7.4	-7.0
	Valeur	Milliard US $	33.2	39.0	+5.9	+17.6
	Prix réalisé (Pétrole brut)	$ /bl	53.9	71.3	+17.9	+32.2

En valeur, ces exportations ont affiché un gain appréciable de +5,9 milliards de dollars soit 39,0 milliards en 2018, contre 33,2 milliards en 2017, suite au rebond des cours sur le marché, en effet, les cours du pétrole brut ont atteint une moyenne de 71,3 $/bl en 2018, contre 53,9 $/bl en 2017, reflétant un gain de plus de 17 $ par baril (+32,2%). (APS, 2019)

B. Exportations de Gaz :

Les exportations Algériennes de gaz naturel en 2018 se sont élevées à 15,5 milliards de mètres cubes, dont 75% via des gazoducs et 25% dans des pétroliers, selon la société algérienne.

Le gaz est exporté par trois gazoducs, le premier vers l'Italie via la Tunisie, le second relie l'Algérie à l'Espagne via le Maroc et le troisième relie directement l'Algérie à l'Espagne via la Méditerranée (Sonatrach, 2019).

Tableau I.4: Taux d'exportation de gaz par pays (Sonatrach, 2019).

Pays	**Italie**	**L'Espagne**	**Turquie**	**France**
Le rapport (%)	35	31	8.4	7.8

L'Europe est le principal marché du gaz algérien, en particulier l'Italie avec 35%, suivie de l'Espagne avec 31%, puis de la Turquie avec 8,4% et enfin de la France avec 7,8%.

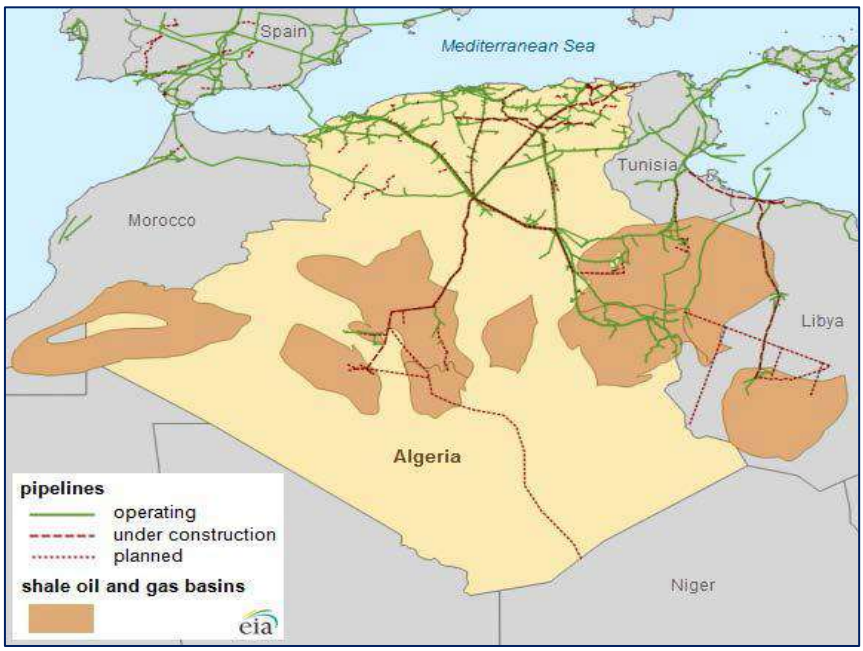


Figure I-6 : Le tracé du gazoduc

C. Bilan des échanges :

Le bilan des échanges d'hydrocarbures pour l'exercice 2018 fait ressortir une balance excédentaire de 100 M TEP, en baisse de (-4,3%) par rapport à 2017, comme indiqué ci-dessous

Tableau I.5 : Bilan des Echanges Hydrocarbures (Bilan Énergétique National, 2018**)**

Million de TEP	2017	2018	Evolution	
			Quantité	%
Exportations	108.8	101.4	-7.4	-6.8
Importations	3.9	1	-2.8	-73.3
Exportations nettes	105.0	100.4	-4.6	-4.3

I .3.3 Nucléaire :

L'Algérie a des réserves prouvées d'environ 29.000 tonnes, de quoi faire fonctionner pendant 60 ans deux centrales nucléaires d'une capacité de 1.000 mégawatts. Le choix d'un recours partiel au nucléaire découle d'une volonté de réduire la facture énergétique dans un pays où la demande en électricité a progressé de 15 à 20% ces dernières années, selon le ministère.

L'Algérie prévoit de construire sa première centrale nucléaire en 2025, et il travaille actuellement sur ce projet. Ce projet a été annoncé en novembre 2008 mais d'abord, il doit résoudre les problèmes de sécurité de l'installation plutôt que son emplacement et fournir les ressources en eau nécessaires.

Actuellement, l'énergie nucléaire n'est pas encore utilisée mais deux réacteurs fonctionnent à des fins de recherche scientifique, le premier est le « réacteur Es-Salam » à Ain Oussara dans la région du Sahara d'une capacité de 15 MW et un autre est appelé « réacteur NUR » d'une capacité d'un mégawatt et située dans le nord de l'Algérie

A. Réacteur nucléaire d'Aïn Oussara :

En 1983, l'Armée nationale populaire signe un accord avec la République populaire de Chine pour la fourniture d'un réacteur nucléaire de 15 mégawatts thermiques, du nom d'Es-Salam (« paix »), qui est construit en secret à la fin des années 1980 sur le site d'Aïn Oussera. Le réacteur algérien n'est découvert qu'en 1991 par un satellite de reconnaissance de l'US Air Force. Utilisant l'eau lourde comme fluide modérateur, il se prêterait assez facilement à une utilisation militaire : il pourrait permettre, à partir d'uranium naturel, de produire en un an assez de plutonium de la qualité nécessaire pour une bombe. (Metaoui, 2018)

B. Réacteur nucléaire de Draria :

Parallèlement, en 1989, l'Algérie se dote d'un réacteur à eau légère (comprenant de l'uranium 235 hautement enrichi à 20 %) de fabrication argentine, dénommé Nour (« lumière ») et d'une puissance d'un mégawatt thermique, par ailleurs surveillé par l'Agence internationale de l'énergie atomique (AIEA) et qui, selon elle, ne comporte pas de risque de prolifération. L'Algérie envisage également l'achat à l'Argentine d'un réacteur à eau pressurisée de 350-400 MW1. Peu après, un article du Washington Times, des satellites de reconnaissance de l'US Air Force survolent le site d'Aïn Oussera, entraînant une controverse dans la communauté du renseignement sur l'usage, militaire ou non, du site. Or, rétrospectivement, il est évident que ces articles ont été publiés dans un but de propagandes. Ces effets d'annonces n'ont jamais (Metaoui, 2018).

I.4 Programme national d'énergie :

I.4.1 Les centrales à combustible fossile (gaz) :

Pour faire face à la demande sans cesse croissante en énergie et améliorer ses prestations de service à la clientèle, le Groupe Sonelgaz procède, constamment, à la planification et à la réalisation de ses infrastructures électriques et gazières. Les plans de développement des sociétés du Groupe Sonelgaz, pour la période 2018-2028, prévoient le développement des ouvrages de production, de transport et de distribution de l'électricité, ainsi que les ouvrages de transport et de distribution du gaz. Par activité, ces plans de développement se présentent comme suit :

A. Production de l'électricité :

La capacité de production additionnelle nationale prévue sur la période 2018-2028 est de 18 749 MW (RIN+PIAT) dont :

1. 10 977 MW décidés pour le Réseau Interconnecté Nord (RIN) sur la période 2018 – 2023
2. 272 MW décidés pour le Pôle In Salah Adrar Timimoune (PIAT) sur la période 2018 – 2020
3. 7500 MW en capacité additionnelle sur la période 2024 – 2028. Le montant de l'investissement pour la période 2018-2028 est de 1 530 Milliards DA. (Sonelgaz, 2020)

B. Transport de l'électricité :

La longueur globale du réseau de transport de l'électricité à réaliser sur la période 2018-2028 est de l'ordre de 29 682 km, dont 22 526 km déjà décidés. A l'horizon 2028, la longueur totale du réseau de transport d'électricité atteindra les 52 207 km, dont 21 647 km en 220 kV et 9 827 km en 400 kV, pour une puissance de 107 660 MVA. (Sonelgaz, 2020).

C. Transport du gaz :

A l'horizon 2028, le gestionnaire du réseau de transport du gaz (Société Algérienne de Gestion du Réseau de Transport de Gaz) prévoit un montant d'investissement de 353 Mds DA pour la réalisation de 9 000 km de nouvelles canalisations qui permettront le transport d'un volume supplémentaire de 19 Gm^3 de gaz Ces nouvelles canalisations permettront le

raccordement de 441 distributions publiques et ramener le taux de desserte des communes en gaz à l'échelle nationale, de 89% en 2018 à 96% à fin 2019. (Sonelgaz, 2020)

D. Distribution de l'électricité et du gaz :

Le plan de développement des réseaux de distribution intègre les programmes d'électrification et de distribution publique du gaz initiés par l'état, les programmes propres et les nouvelles raccordements clientèle ainsi que les équipements de maintenance et d'exploitation et les projets de modernisation de la gestion et de l'exploitation. Ainsi, le plan de développement des réseaux et infrastructures de la société algérienne de distribution de l'électricité et du gaz, sur la période 2018-2028, prévoit de développer un réseau Electricité de 106 563 km de lignes, 51 694 postes et 1 365 034 branchements, et un réseau Gaz de 54 509 km, avec 2 322 184 branchements. (Sonelgaz, 2020)

I.4.2 Les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique :

L'Algérie entame la dynamique énergétique en lançant un ambitieux programme de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique. Cette vision du gouvernement algérien repose sur une stratégie qui met l'accent sur le développement de ressources permanentes telles que l'énergie solaire et leur utilisation pour diversifier les sources d'énergie et préparer un avenir meilleur. Ainsi, l'Algérie est entrée dans une nouvelle ère pour l'énergie durable. (MEN, 2020)

Le programme d'énergie renouvelable mis à jour consiste à installer environ 22 000 mégawatts d'énergie renouvelable d'ici 2030 pour le marché national, tout en maintenant l'option d'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent.

Le programme d'efficacité énergétique mis à jour vise à réaliser des économies d'énergie d'ici 2030 d'environ 63 millions de pieds pour tous les secteurs (construction, éclairage public, transports et industrie) en fournissant un éclairage haute performance, une isolation thermique, des chauffe-eau solaires et des combustibles propres (GPL et GNC).

Et des équipements industriels performants. Le programme d'efficacité énergétique permettra de réduire les émissions de dioxyde de carbone de 193 millions de tonnes. (MEN, 2020)

La figure 7 pressante les émissions évitées (en millions de tonnes)

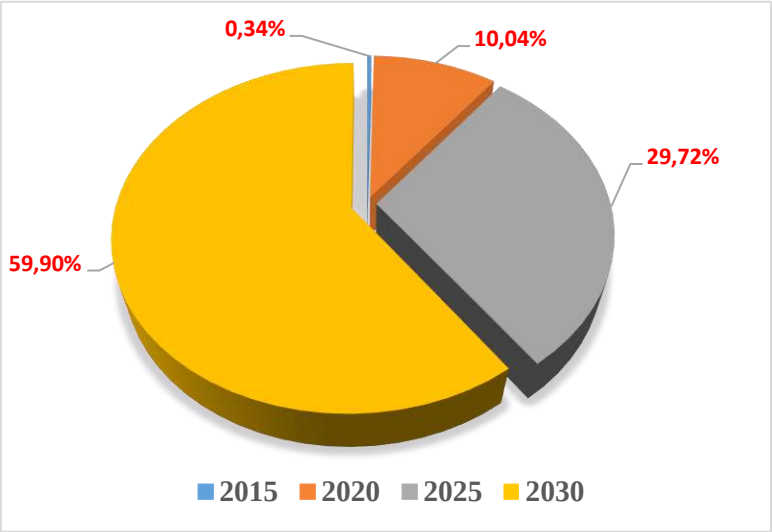


Figure I -7: Emission évitées (en millions de tonnes CO_2)

I.4.3 Programme d'énergies renouvelables :

L'Algérie entre dans une nouvelle ère pour l'énergie durable, Le programme énergies renouvelables dans sa version actualisée, consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 GW à l'horizon 2030

A travers ce programme, l'Algérie entend produire de l'électricité à partir des secteurs des énergies renouvelables qui seront les moteurs d'un développement économique durable sous l'impulsion nationale d'origine renouvelable.

Les projets EnR de production de l'électricité dédiés au marché national seront menés en deux étapes :

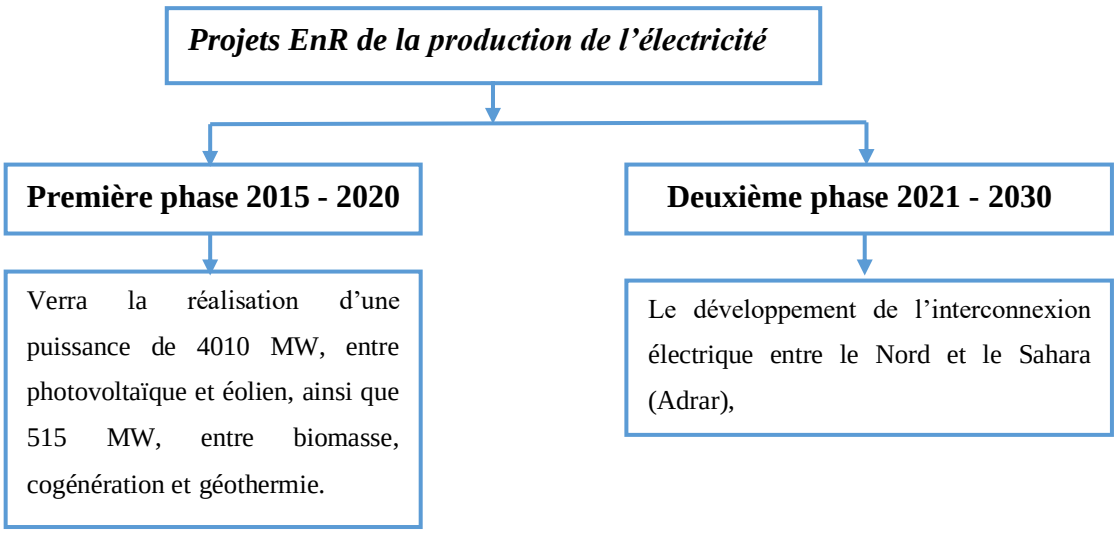


Figure I- 8 : Diagramme des étapes du projet EnR de la production de l'électricité

La deuxième phase permettra l'installation de grandes centrales d'énergies renouvelables dans les régions d'In Salah, Adrar, Timimoune et Bechar et leur intégration dans le système énergétique national, a cette échéance, le solaire thermique pourrait être économiquement viable.

La stratégie de l'Algérie en la matière vise à développer une véritable industrie des énergies renouvelables associée à un programme de formation et de capitalisation des connaissances, qui permettra à terme, d'employer le génie local algérien, notamment en matière d'engineering et de management de projets. Le programme EnR, pour les besoins d'électricité du marché national, permettra la création de plusieurs milliers d'emplois directs et indirects. (MEN, 2020)

Tableau I.6 : Consistance du programme de développement des énergies renouvelables (2015-2030) (MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE)

Unité (MW)	1ère phase 2015-2020	2éme phase 2021-2030	Total
Photovoltaïque	3 000	10 575	**13575**
Eolien	1 010	4 000	**5 010**
CSP	0	2 000	**2 000**
Cogénération	150	250	**400**
Biomasse	360	640	**1 000**
Géothermie	5	10	**15**
Total	**4 525**	**17475**	**22 000**

La figure 9 pressante le programme de développement des énergies renouvelables (2015-2030)

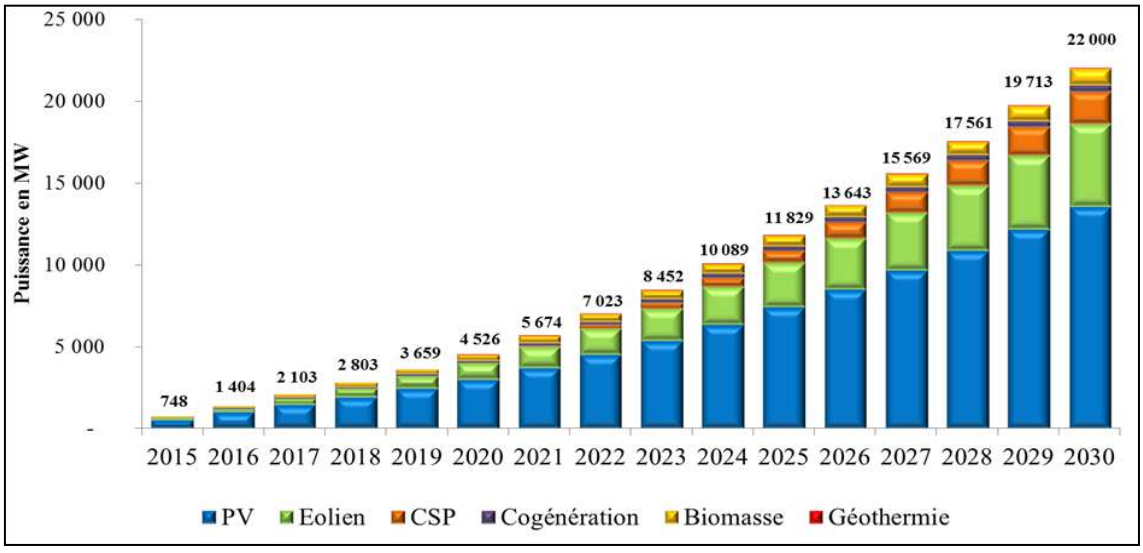


Figure I - 9 : Programme de développement des énergies renouvelables (2015-2030)

I .4.4 Programme d'efficacité énergétique :

L'Agence nationale pour la promotion et la rationalisation de l'utilisation de l'énergie (APRUE) a lancé le programme d'efficacité énergétique d'ici 2030 soutenu par le gouvernement algérien. Le programme ciblait trois secteurs principaux, le bâtiment, les transports et l'industrie. Le programme d'efficacité énergétique (EEP) devrait permettre d'économiser plus de 60 Mtep d'ici 2030 dans différents secteurs selon APRUE. Le programme s'est engagé à accroître la sensibilisation des industries à leur consommation d'énergie, ce qui est particulièrement important étant donné le développement attendu du secteur et l'augmentation conséquente des besoins énergétiques. L'efficacité énergétique sera favorisée par un grand nombre de mesures, notamment l'isolation thermique des bâtiments, le remplacement des lampes, les systèmes de chauffe-eau solaires, les audits, le remplacement des équipements industriels et la cogénération ou les changements de combustibles, entre autres. Le programme de l'efficacité énergétique affiche la volonté de l'Algérie de préserver les ressources du pays et optimiser leurs utilisations. (APRUE, 2020)

Secteur du bâtiment :

- Isolation thermique de 100000 appartements par an
- Mise en place de 100000 de capteur solaire d'eau par an
- Remplacement de 10 millions de lampes à incandescence par des lampes à faible consommation par an.

Secteur des transports :

- Conversion de 1,3 million de voitures de l'essence au GPL (gaz de pétrole liquéfié)
- Conversion de 11000 bus au GNC (gaz naturel comprimé)
- Acquisition de 11000 bus (CNG).

Secteur de l'industrie :

- Création d'audits énergétiques à raison de 50 à 100 audits par an

Lumière publique :

- Remplacement de 1,1 million du parc de lampes au mercure par des lampes au sodium d'ici 2019.

I.5 Conclusion

L'Algérie est l'un des premiers pays au monde à produire du pétrole et du gaz naturel. La production et la consommation d'énergie en Algérie représentent plus de 99% des hydrocarbures, mais malgré cela, l'utilisation de combustibles fossiles reste une mauvaise décision malgré son abondance, mais elle s'estompe, ainsi que son impact significatif sur l'environnement.

Par conséquent, et pour la sécurité énergétique intérieure du pays, l'Algérie a commencé réfléchir des solutions énergétiques et environnementales en investissant dans les énergies renouvelables. Selon le Programme algérien des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique (PENREE) 2012, qui vise à obtenir une capacité combinée de 22000 MW à partir de sources renouvelables d'ici 2030 en plus de l'énergie nucléaire qui est le trésor du pays. Avec cela, l'Algérie fait un grand pas vers une nouvelle ère énergétique, pour couvrir les besoins croissants de la population qui prolongeront la durée de vie du champ gazier.

Chapitre II

Analyse multicritère pour évaluer les différents processus de production énergétique

II

Analyse multicritère pour évaluer les différents processus de production énergétique

II.1 Introduction :

La prévision de systèmes de production d'énergie est un problème complexe, incertain et multidimensionnel car il relève de plusieurs critères fortement couplés comme les facteurs socio- économiques, techniques et environnementaux très différents d'un pays à un autre. Un large débat a été lancé au niveau de plusieurs pays à l'échelle politique et académique entre les scientifiques, les économistes, les sociologues, etc, car tous sont concernés par ce problème et essaient ensemble d'envisager la meilleure solution de production d'énergie et trouver ainsi un équilibre entre tous les aspects de la question.

II.2 Les facteurs Techniques :

II.2.1 Quelques définitions importantes :

- ***L'efficacité*** est la quantité d'énergie utile obtenue à partir d'une source d'énergie, le coefficient d'efficacité qui représente le rapport entre l'énergie obtenue (entrée) et l'énergie dépensée (sortie), exprime la capacité d'une technologie à convertir la source d'énergie primaire en électricité. (Jovanovic et autres, 2009) ; (Doukas et autres, 2007) (Pilavachi et autres, 2009) ; (Wang et autres, 2008)
- ***Le ratio d'énergie primaire*** C'est le rapport entre l'énergie primaire consommée à l'énergie demandée utilisée. La figure 9 illustre ce rapport.
-

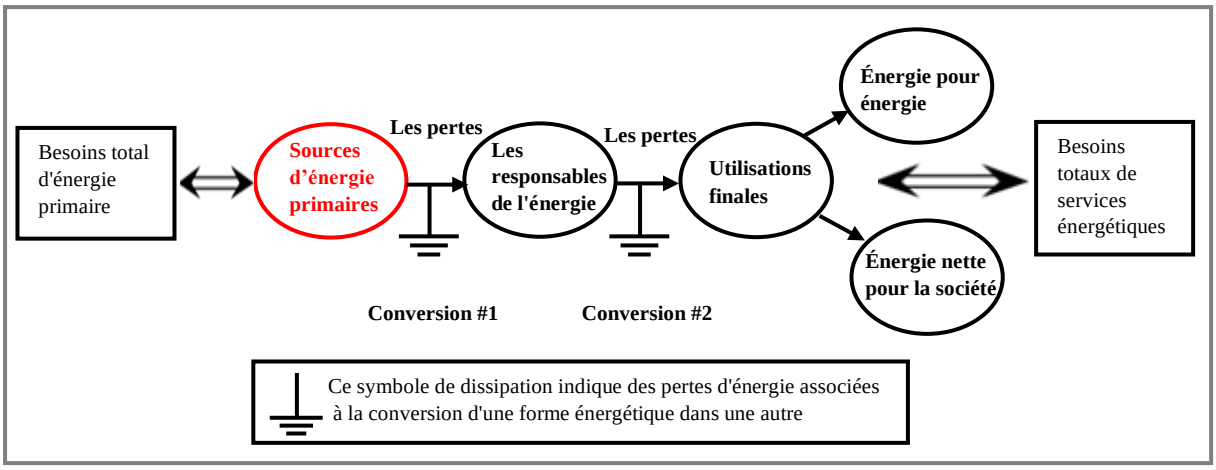


Figure II- 1 : Rapport de l'énergie primaire à l'énergie utilisée

- ***Rendement énergétique*** également connu sous le nom de l'efficacité deuxième loi ou l'efficacité rationnelle, calcule l'efficacité d'un processus qui prend la seconde loi de la thermodynamique en compte. Peut se définir comme la fraction mécanisable d'une énergie, ce qui représente en fait une mesure de la qualité de l'énergie ou de son niveau de dégradation, relativement à un état de référence. L'exergie donne accès à une dimension informationnelle et économique et de structuration systémique multi-échelles qui fait encore cruellement défaut à nos politiques énergétiques nationales et globales. (Dinca et autres, 2007) ; (Wang et autres, 2008) ; (Huang et autres, 2005)
- ***Le taux d'efficacité*** exprime la capacité de la technologie à convertir la source d'énergie primaire en électricité. (Dinca et autres, 2007) ; (Huang et autres, 2005) ; (Mamlook et autres, 2001)

II.2.2 La sécurité :

La sécurité de systèmes d'énergie est importante et vitale pour le développement des pays. La sécurité de base pour les travailleurs et l'environnement est une priorité, pour les centrales fossiles un risque d'explosion est possible et le risque d'accident pour une centrale nucléaire est bien réel, qui mené à des catastrophes terrible (accident nucléaire de Fukushima en 2011), donc les mesures de sécurité doivent être prises en considération comme un facteur technique et aussi comme un facteur social dans la politique de production d'énergie. (Wang et autres, 2008) ; (Wang et autres, 2008) ; (Huang et autres, 2005) ; (Mamlook et autres, 2001) ; (Mohsen et Akash, 1997) ; (Diakoulaki et Karangelis, 2007) ; (Madlener et autres, 2007)

II.2.3 La fiabilité :

La capacité d'un système ou d'un composant de s'acquitter de ses fonctions requises dans des conditions données pour une période de temps déterminée. La fiabilité est théoriquement définie comme la probabilité de défaillance, la fréquence des échecs. La fiabilité a toujours été une préoccupation dans le secteur énergétique. La qualité de l'équipement et leur entretien, le type de carburant, la conception (design) du système énergétique et comment c'est jeu actionné par grand rôle dans son sérieux. La fiabilité des systèmes énergétiques et leur façon et manière de fonctionner,

Des critères décisifs pour évaluer la fiabilité d'un système énergétique. (Dinca et autres, 2007) ; (Mamlook et autres, 2001) ; (Chatzimouratidis et Pilavachi, 2008) ; (Chatzimouratidis et Pilavach, 2008) ; (Cavallaro et Ciraolo, 2005)

II.2.4 La maturité :

La maturité technique est un critère fondamental pour évaluer le système énergétique (Wang et autres, 2008) ; (Cavallaro et Ciraolo, 2005) ; (Beccali et autres, 2003) l'entendue de cette énergie au niveau national et international. Dans le détail, les étapes suivantes peuvent être envisagées :

- Les technologies qui sont testées en laboratoire,
- Les technologies qui sont effectuées dans des installations pilotes, dont le but démonstratif est lié à l'expérimental, se référant aux conditions techniques et opérationnels
- Les technologies qui pourraient être encore améliorées,
- Les technologies consolidées, qui sont près d'atteindre les limites théoriques de l'efficacité.

Aussi il y a d'autres critères particuliers qui peuvent reflétant la technologie de système énergétique ou les équipements. La capacité d'une centrale énergétique (est défini à la quantité de l'électricité qu'elle produite au cours d'une période, divisée par la quantité de l'électricité qu'elle pourrait avoir produite si elle avait fonctionné à la pleine puissance pendant cette période) a été sélectionnée pour évaluer sa capacité (Diakoulaki et Karangelis, 2007) ; (Burton et autres, 2007). La disponibilité de carburant a été appliquée (Mamlook et autres, 2001) ; (1999) pour évaluer les systèmes énergétiques, comme les centrales combustibles fossiles, centrale solaire, centrale éolienne et l'hydroélectrique et nucléaires. Aussi un autre critère est la

capacité de répondre à la charge maximale, qui a été utilisée comme un critère pour évaluer les différents scénarios alternatifs dans le secteur de production d'électricité en Grèce (Diakoulaki et Karangelis, 2007). La régulation et les propriétés de contrôle ont été utilisé pour refléter ses performances techniques (Wang et autres, 2008). La connaissance de la technologie innovatrice a été utilisée pour montrer son développement (Doukas et autres, 2007). Le rapport de réservation à la production calcule la disponibilité (par des années) d'un certain type de carburant selon la consommation actuelle et l'augmentation de consommation annuelle/diminution le taux de chaque source d'énergie non-renouvelable pour la génération de courant électrique.

II.3 Les facteurs économiques :

II.3.1 Le cout d'investissement :

Le coût d'investissement comprend tous les coûts qui touchent : L'achat d'équipements mécaniques, installations technologiques, la construction des routes et des connexions au réseau national, les services d'ingénierie, de forage et d'autres travaux de construction accessoire. Les coûts de la main-d'œuvre ou des coûts pour la maintenance d'équipement ne sont pas inclus dans les coûts d'investissement. Les centrales nucléaires et les centrales de charbon sont caractérisées par de hauts coûts d'investissement et de bas coûts d'exploitation tandis que la génération chauffée au gaz est caractérisée par des coûts d'investissement inférieurs et des coûts d'exploitation plus hauts. Le coût d'investissement est le critère économique le plus utilisé pour évaluer des systèmes énergétiques. (Jovanovic et autres, 2009) ; (Doukas et autres, 2007) ; (Pilavachi et autres, 2009) ; (Wang et autres, 2008) ; (Diakoulaki et Karangelis, 2007) ; (Afgan et Carvalho, 2002) ; (Huang et autres, 2005) ; (Chattopadhyay et Ramanathan, 1998) ; (Wang et autres, 2009) ; (Løken et autres, 2009)

II.3.2 L'opération et cout de maintenance :

Elle est devisée en deux parties, la première qui relève du cout d'opération incluant les salaires de travailleurs et le fond qui est dépensé pour l'énergie et l'ensemble de produit et service qui sont nécessaires pour faire fonctionner le système énergétique correctement. La deuxième partie est le cout de maintenance qui signifie l'entretien du système énergétique et qui vise à augmenter sa durée de vie pour éviter les effets qui peuvent faire échouer la réussite de projet. (Pilavachi et autres, 2009) ; (Dinca et autres, 2007) ; (Wang et autres, 2008) ;

(Mamlook et autres, 2001) ; (Cavallaro et Ciraolo, 2005) ; (Chattopadhyay et Ramanathan, 1998) ; (Løken et autres, 2009) ; (Madlener et autres, 2007)

II.3.3 Le cout de carburant :

Le coût du carburant se réfère au fond dépensé pour la fourniture de matières premières nécessaires (l'uranium pour les centrales nucléaires) pour faire fonctionner un système énergétique. Les coûts de carburant peuvent varier considérablement dans une période de temps et d'une zone à une autre pour plusieurs raisons, y compris la demande, la production et les facteurs politiques. Le carburant est un élément indispensable et très important alors certains chercheurs ont adopté le coût du carburant à des évaluations (Jovanovic et autres, 2009) ; (Mamlook et autres, 2001) ; (Wang et autres, 2009). Il faut noter que le cout de carburant est exclu du coût d'opération quand ces deux critères sont sélectionnés dans l'évaluation de système énergétique.

II.3.4 Le cout d'électricité :

C'est le coût de produit d'une centrale électrique est considéré comme un critère pour évaluer sa performance économique du point de vue consommateurs (Diakoulaki et Karangelis, 2007) ; (Afgan et Carvalho, 2002) ; (Wang et autres, 2009) ; (Pilavachi et autres, 2006) ; (Afgan et Carvalho, 2008). Les pays, les investisseurs, les producteurs et les consommateurs ont des attentes différentes sur le coût électrique, il dépendra de plusieurs paramètres clés et circonstance spécifique à chaque projet (cout de financement, prix d'énergie et de carbone, sécurité des approvisionnements, réduction des émissions de CO_2 et structure de marché) (Agence international de l'énergie, 2010). Il est nécessaire d'évaluer le coût électrique des différents systèmes énergétiques de façon rationnelle.

II.3.5 La valeur présente Nette :

Elle est définie comme la valeur actuelle totale d'une série chronologique des flux de trésorerie. Il s'agit d'une méthode standard pour l'utilisation de la valeur temps de l'argent à l'évaluation de projets énergétiques à long terme. Utilisée pour la budgétisation des investissements et largement dans l'économie, elle mesure l'excédent ou le déficit des flux de trésorerie, en valeur actualisée, une fois les frais de financementsont remplis. Ce critère est

souvent utilisé pour évaluer la faisabilité d'un projet d'énergie par l'investisseur. On peut calculer le VPN par la formule suivante :

$$VAN_n = (VA_1 + VA_2 \cdots\cdots\cdots + VA_n) - Coût\ de\ l'investissement\ initial.$$

Où : VAN = la valeur actuelle nette du projet au cours d'un nombre « n » d'années

VA_1 Jusqu'à VA_n = les flux monétaires tirés de chaque année de projet (positifs pour les rentrées d'argent et négatifs pour les sorties d'argent). Il est également considéré nécessaire au stade précoce de l'énergie. (Wang et autres, 2008) ; (Huang et autres, 2005) ; (Papadopoulos et Karagiannidis, 2008) ; (Haralambopoulos et Polatidis, 2003)

II.3.6 Période du remboursement (Payback)

La période de récupération d'un projet énergétique se réfère à la période de temps pour récupérer la somme de l'investissement initial, une récupération sur une plus courte période est évidemment préférable à des périodes de récupération plus longues (Wang et autres, 2008) ; (Huang et autres, 2005); (Papadopoulos et Karagiannidis, 2008).Un calcul de remboursement est un type de coût/bénéfice qui traite exclusivement des économies de coûts d'exploitation d'un nouvel équipement si ces économies sont le travail, le temps ou l'énergie, "Payback" détermine combien de temps il faudra pour le retour sur investissement matériel initial. Ce concept est une bonne mesure pour la comparaison des différents systèmes de production d'énergie, car il concerne la vitesse à laquelle les économies sont réalisées, non pas combien les coûts de l'équipement ou la quantité d'énergie réelle utilisée. Par exemple, les calculs de récupération de l'énergie solaire sont généralement basés sur le fait que le soleil est gratuit, alors la question devient simplement : « combien de temps faut-il pour payer l'équipement si la source d'alimentation est libre ?" Mais avant de répondre à cette question, on a besoin de savoir combien d'équipements solaires avons-nous vraiment besoin. L'énergie solaire est chère, donc il est logique d'investir dans l'efficacité énergétique pour réduire la taille du système photovoltaïque dont on a besoin.

II.3.7 Durée de vie

La durée de vie d'un système énergétique est la période d'utilisation acceptable en service ou la centrale peut fonctionner avant que l'équipement doit être remplacé. Il est mesuré en années. En règle générale, l'énergie vitale du système poursuit la courbe en baignoire

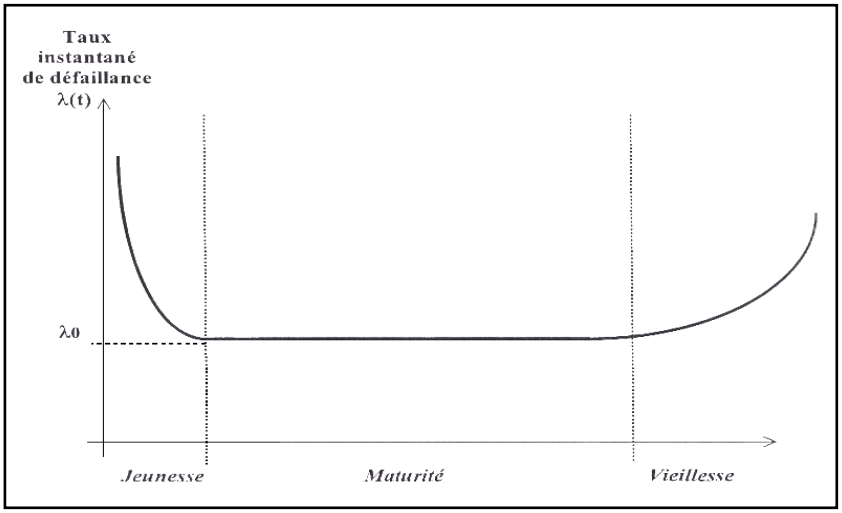


Figure Ⅱ - 2 : L'évolution du taux de défaillance instantané en fonction du temps (Roger et al, 2018)

Cette courbe se divise en 3 parties : jeunesse, maturité et vieillesse du système. Après une période, la probabilité de défaillance ressuscitera. Contrairement à la période de récupération, la durée de vie est préférable à l'investisseur et elle a été utilisée pour sélectionner le meilleur système énergétique. (Pilavachi et autres, 2009) ; (Wang et autres, 2008) ; (Burton et autres, 2007)

II.3.8 L'équivalant de cout annuel (EAC)

C'est le coût par année de posséder et d'exploiter un actif sur sa durée de vie entière. Le (EAC) permet de comparer les coûts annuels de différents projets d'investissement qui, à la base, n'ont pas la même durée de vie. Certains travaux emploient EAC comme un critère d'évaluation (Wang et autres, 2008) ; (Huang et autres, 2005) ; (Papadopoulos et Karagiannidis, 2008) ; (Alanne et autres, 2007). Mathématiquement, le CEA est calculé en divisant la VAN (valeur actuelle nette) d'un projet ou d'un actif par la valeur actuelle d'un facteur de rente. Le facteur de rente est basé sur le flux du temps assortis de paiements fixes sur la période de temps spécifiée en tenant compte de leurs valeurs de temps.

La formule est calculée comme suit :

$$EAC = VAN/(A_{(R,T)} \quad ou\ A_{(R,T)} = \frac{(1-\frac{1}{R^T})}{R}$$

R est le taux de prêt ou coût en capital, T est le temps de la durée de vie.

Un facteur aussi important pour évaluer un projet (système énergétique).

II.4 Les facteurs environnementaux :

II.4.1 L'Émissions de NOx :

C'est un terme générique pour les oxydes mono-azote NO et les dioxydes d'azote NO_2. Ils proviennent essentiellement de la combustion des combustibles fossiles et biomasse et quelques procédés industriels (production d'acide nitrique, fabrication d'engrais, traitement de surfaces, …etc), plus spécialement dans une température très élevée. Le NOx à un effet direct et indirect sur la santé humaine, par pénétration dans les plus fines ramifications respiratoires pouvant entrainer une dégradation de la respiration, une hyperréactivité des bronches aux infections microbiennes chez les enfants, et un effet sur l'environnement par intervention dans le processus de formation de l'ozone (effet de serre), contribution au phénomène des pluies acides et changement climatique. Le NO_X c'est un facteur qui est pris en considération dans l'étude et l'évaluation d'un système énergétique. (Jovanovic et autres, 2009) ; (Wang et autres, 2008) ; (Wang et autres, 2008) ; (Huang et autres, 2005) ; (Diakoulaki et Karangelis, 2007) ; (Løken et autres, 2009) ; (Chatzimouratidis et Pilavachi, 2008)

II.4.2 L'Émissions de CO_2 :

Le dioxyde de carbone ou CO_2 est un gaz incolore, inodore et insipide qui est environ une fois et demi plus dense que l'air dans les conditions normales, le CO_2 contribue 9-26% à l'effet de serre. Il est principalement libéré par la combustion des systèmes énergétiques de source fossile, la nouvelle technologie de cycles combinant des brûlants de gaz naturels peuvent économiser presque 33% des émissions de CO_2 par rapport aux cycles classiques. L'émission de CO_2 est un facteur important pour évaluer le système énergétique. (Jovanovic et autres, 2009) ; (Pilavachi et autres, 2009) ; (Wang et autres, 2008) ; (Huang et autres, 2005) ; (Burton et autres, 2007) ; (Afgan et Carvalho, 2002) ; (Wang et autres, 2009) ; (Løken et autres, 2009) ; (Papadopoulos et Karagiannidis, 2008)

II.4.3 L'Émissions de CO :

Le Monoxyde de carbone (CO) est produit par la combustion incomplète des composés contenant du carbone, en particulier dans les moteurs à combustion interne (moteur essence) et les centrales fossiles (gaz naturel, hydrocarbures, charbons). Sa durée de vie atmosphérique

varié de quelques semaines jusqu'à des mois selon les conditions métrologique et géographique (Wang et autres, 2008) ; (Wang et autres, 2008) ; (Huang et autres, 2005). Il participe aux mécanismes de formation de l'ozone troposphérique et Contribue à l'effet de serre par sa transformation en CO_2. L'émission de CO a été sélectionnée pour caractériser la performance de systèmes énergétique.

II.4.4 L'Émissions de SO_2 :

Le dioxyde de soufre (SO_2) est émis lors de la combustion des matières fossiles telles que charbons et fiouls. Les sources principales sont les centrales thermiques, les grosses installations de combustion industrielles et les unités de chauffage individuel et collectif ainsi que le transport maritime. Ce gaz a un effet sur la santé (toux et affections respiratoires), d'autre effet aussi sur l'environnement, car il se transforme principalement en acide sulfurique et il participe aux phénomènes de pluies acides, et contribué à la dégradation des matériaux, donc des bâtiments et du patrimoine historique. Le sous critère est utilisé pour jauger le système énergétique. (Jovanovic et autres, 2009) ; (Diakoulaki et Karangelis, 2007) ; (Chattopadhyay et Ramanathan, 1998) ; (Chatzimouratidis et Pilavachi, 2008)

II.4.5 L'Émission de particules :

Les particules véhiculent principalement des imbrûlés et noyaux carbonés issus de processus de combustion (l'émission est principalement libérée par le carbone et le pétrole, la biomasse et aussi par les centrales photovoltaïques au cour de la construction cellulaire), des particules secondaires issues de la conversion gaz / particules (SO_2, NOx, COV), de nucléation de molécules de gaz, de condensation de gaz et de réactions gazeuses dans des gouttelettes d'eau.

Les particules ont un impact sanitaire majeur sur la population, elles peuvent engendrer de graves problèmes respiratoires et cardio-vasculaires (Lamminen et Isherwood, 2007) ; (Bond et autres, 1999). De plus, Ces teneurs élevées sont, en outre, à l'origine de la détérioration de monuments historiques par l'action de leur acidité sur le calcaire, et sont également responsables des phénomènes de réduction de visibilité atmosphérique. (Chatzimouratidis et Pilavachi, 2008)

Leurs impacts sur l'environnement et les nuisances qu'elles engendrent dépendent toutefois de leurs granulométries et de leurs compositions chimiques, elle-même liée à leurs sources d'émission. Alors plusieurs programmes été installé dans beaucoup des pays pour but

de diminuer et réduire l'émission des polluant dans l'atmosphère notamment les particules fines.

II.4.6 Composés organiques volatiles non méthaniques

C'est un terme générique pour une large variété de composés chimiquement différents, pouvant contenir en plus des atomes de carbone et d'hydrogène (solvants hydrocarbonés), des atomes de chlore (solvants chlorés), d'oxygène (solvants oxygénés), de soufre, d'azote, etc. (2008). Les COVNM sont émis relativement en faible quantité lors de la combustion d'énergies fossiles et la combustion de moteurs internes, mais en plus grande quantité avec l'utilisation de la biomasse. Ces polluants recouvrent un grand nombre de composés aux effets parfois très différents (nuisances olfactives, altération de la fonction respiratoire, troubles nerveux, …). Les COV les plus nocifs sont ceux qui présentent des risques cancérogènes ; il s'agit notamment du formaldéhyde et de certains composé aromatiques (benzène et dérivés aromatiques polycycliques,).

II.4.7 Soles et utilisation des terres :

Le critère d'utilisation de terrain est très important dans la politique d'énergie, car les centrales de production d'énergie occupent de grands terrains. L'environnement et le paysage sont directement touchés par les terres utilisées par les systèmes d'énergie (Wang et autres, 2008) ; (Wang et autres, 2008) ; (Madlener et autres, 2007) ; (Chatzimouratidis et Pilavachi, 2008) ; (Beccali et autres, 2003) ; (Afgan et Carvalho, 2002) ; (Wang et autres, 2009) ; (Pilavachi et autres, 2006). Le débat se relance pour l'occupation des terrains par les centrales énergétiques, notamment quand la location est près d'un métropolitain, car la qualité de vie est infectée directement, au lieu d'installer des centrales qui peuvent être remplacées par des parcs et des espaces de loisirs …etc. Ajoutant le dérangement qui est causé par les travaux nécessaires comme, les exactions, tunnels, transport des équipements, installation …etc, qui déstabilise le système écologique de cet endroit. (Beccali et autres, 2003)

Les centrales énergétiques occupant des différents espaces tandis que la capacité de production est le même. La centrale biomasse et biocarburant qui nécessitants une large espace. Donc ce critère devenu primordiale dans la stratégie de production d'énergie.

II.4.8 La pollution sonore (Bruit) :

La pollution sonore qui est produite par les systèmes énergétiques perturbe l'équilibre de l'activité, la vie humaine, animale. Elle conduit non seulement à des effets négatifs sur l'environnement, chez l'homme, cela peut entraîner des problèmes d'irritabilité, d'insomnie et de dépression. Ce facteur peut être social ou environnemental utilisé pour évaluer le système énergétique. (Wang et autres, 2008) ; (Wang et autres, 2008) ; (Huang et autres, 2005) ; (Cavallaro et Ciraolo, 2005) ; (Madlener et autres, 2007). En Algérie la loi sur le bruit est bien éclairée dans l'article 2 du décret n°93-184 du 27 juillet 1993, et qui est : *« Les niveaux sonores maximums admis dans les zones d'habitation et dans les voies et lieux publics ou privés sont de 70 décibels (70 DB) en période diurne (6 heures à 22 heures) et de 45 décibels (45 DB) en période nocturne (22 heures à 6 heures) »*. Ajoutant, certains critères qui reflétant la contribution de système énergétique à l'environnement. Par exemple, l'épuisement des ressources non renouvelable (Abiotique), Ecotoxicité – des eaux douces ; - des eaux marines ; - des écosystèmes terrestres, Eutrophisation (Surabondance de nutriments engendrant la croissance anormale de certaines espèces), Radiations radioactives (Mutation génétique). (Dinca et autres, 2007)

L'impact visuel reflète la nuisance visuelle qui peut être créée par le développement d'un projet énergétique dans un espace donné, et ce critère été utilisé pour évaluer les différentes alternatives de centrales éolienne proposées. (Cavallaro et Ciraolo, 2005)

II.5 Les facteurs sociaux :

II.5.1 L'acceptation sociale :

C'est un ensemble des avis des résidents, des autorités et autres parties prenantes locales sur un projet énergétique. L'acceptabilité sociale repose sur la perception des inconvénients et des bénéfices que les parties prenantes associent au projet. C'est un facteur important pour la réalisation des projets, d'après une étude de l'EWEA (European Wind Energy Association) en Juillet 2010 portant sur le développement de projets éoliens au sein de l'Union Européenne, l'absence d'acceptabilité sociale est à l'origine de nombreux retards et avortements de projets. A l'échelle mondiale, par exemple dans le nord-est de l'Inde, la mobilisation des activistes, étudiants, scientifiques et politiques contre le projet de barrage de « Subansiri a culminé » en décembre 2011, protestant contre l'ampleur des impacts environnementaux et des risques encourus par les populations du fait de la sismicité de la zone, le mouvement a gagné une

bataille : la construction de l'ouvrage prévue pour 2012 a été repoussée à 2014 au plus tôt. Ce retard a accru le budget prévisionnel de 60 %, pour atteindre un montant de 1,5 milliards d'euros. Un autre exemple récent et actuel, on remarque une absence d'acceptabilité sociopolitique pour gaz de schiste. (Chatzimouratidis et Pilavachi, 2008) ; (Cavallaro et Ciraolo, 2005) ; (Chatzimouratidis et Pilavachi, 2008)

Finalement l'acceptation social est « le résultat d'un processus par lequel les parties concernées construisent ensemble les conditions minimales à mettre en place, pour qu'un projet, programme ou politique s'intègre de façon harmonieuse, et à un moment donné, dans son milieu naturel et humain ». (Afgan et Carvalho, 2002)

II.5.2 La création des postes de travail :

C'est le nombre des postes de travail qui peut offrir un système énergétique au cours de sa durée de vie, dans la période de la construction et de l'exploitation jusqu'au déclassement, c'est un facteur très important pour la société local (Chatzimouratidis et Pilavachi, 2008).

Dans le processus de la prise de décision pour un système énergétique, le facteur création des postes de travail est indispensable et fondamental. (Madlener et autres, 2007) ; (Chatzimouratidis et Pilavachi, 2008) ; (Beccali et autres, 2003) ; (Haralambopoulos et Polatidis, 2003)

II.5.3 Bénéfice social :

Le bénéfice social est devenu un critère très important pour la qualité de vie de la société local dans ses dernières décennies. C'est un critère qui exprime comment un système énergétique peut contribuer à l'amélioration et la progression de la société locale, plus spécialement dans les régions moins développées, Le bénéfice social est également un critère qualitatif et non mesurable, mais quelques critères similaires peuvent être exprimés, comme les postes d'emploi, la vie sociale et la génératrice de revenu. Ce facteur est utilisé directement pour la politique de production énergétique. (Mamlook et autres, 2001) ; (Mohsen et Akash, 1997)

Aussi, on trouve d'autres critères qui été utilisés par un certain chercheur dans la politique de production d'énergie comme le critère « l'économie national », ce critère est employé pour évaluer la contribution de système énergétique au développement de l'économie national et

social (Mohsen et Akash, 1997) ; (Mamlook et autres, 2001). Le critère « la santé sociale » aussi appliqué dans la recherche de meilleure alternative de CHP (Les systèmes de cogénération ou production combinée de chaleur et d'électricité [78]. La valeur de compensation est le cout d'argent remis à la société locale suite aux effets négatifs comme l'occupe de terrain et l'émission des polluants, le bruit…. Etc, causés par un système énergétique. (Chatzimouratidis et Pilavachi, 2008)

Les dépenses « d'énergie des ménages » consacrée à l'électricité et le carburant sont utilisés comme un facteur pour analyser les cinq scénarios des systèmes d'énergies à Belgrade (Jovanovic et autres, 2009). La comptabilité avec le cadre de la politique nationale et administratif et législatif de pays, que veut dire la technologie soutenue par l'état (Beccali et autres, 2003). L'avancement de performance est le système ou la technologie qui est développée actuellement et la possibilité de continuité et de s'améliorer dans le futur ou non. La facilité de maintenance, est de mesurer la commodité d'entretien des systèmes ou des équipements.

Les deux critères sont utilisés pour montrer la contribution de différentes technologies d'énergie au développement social. (Wang et autres, 2008) ; (Wang et autres, 2008) ; (Huang et autres, 2005)

Tableau II.1 : Les critères principaux de l'énergie

Le critère		**La description**
C.1 : Critères Techniques	C.1.1 Efficacité :	C'est le ratio de l'énergie de la production (output energy) sur l'énergie de l'entrée (input energy)
	C.1.2 Exergie d'efficacité	C'est l'énergie qui est disponible à être utilisée
	C1.3 Ratio d'énergie primaire	Est défini comme une énergie primaire de consommation sur l'énergie utilisée (Energie demandée).
	C1.4 Sécurité	La sécurité peut être considérée comme un critère de l'évaluation pour montrer les effets de systèmes d'énergie sur la société et le peuple.
	C1.5 Fiabilité	Peut être défini comme la capacité d'un système de produit comme est entendu.
	C1.6 Maturité	Le degré de maturité de la technologie montrer comment la technologie répandue aux deux niveaux national et international.
C.2 : Critères	C2.1 Émissions des gaz et des particules	Il implique principalement l'émission des NOx, CO_2, CO, SO_2 et les particules qui peuvent affectés la santé humaine et mener au réchauffement de la planète et contribuer à l'effet de serre

	C2.2 Composés Organiques Volatils Non Méthaniques	Composés (NMVOCs) est un terme générique pour une grande variété de composés chimiquement différents, comme par exemple, benzène, éthanol, formaldéhyde, cyclohexane ou acétone.
	C2.3 Sols et utilisation des terres	L'environnement, le paysage et la qualité de vie de la population sont affectés directement par l'occupation de terrain causé par les systèmes de production d'énergie.
	C2.4 Pollution sonore	toute forme de pollution du bruit causé par le système d'énergie qui rendre malaise la vie humaine et animale
C3.Critères économiques	C3.1 Cout d'investissement	C'est le cout d'achat de matériel mécanique, technologique, installation, construction de routes et les services de l'ingénierie.
	C3.2 Opération et cout de maintenance	Ça englobe les salaires de travailleurs, les fonds, dépensé pour l'énergie, les produits et services pour l'opération du système d'énergie. Le coût de l'entretien qui peut à augmenter la durée de vie de système énergétique.
	C3.3 Cout de carburant	C'est le cout de matières premières pour faire fonctionner une centrale énergétique
	C3.4 Cout d'électricité	C'est le coût du produit de centrale électrique qui évalue sa performance économique du point de vue de consommateurs.
	C3.5 Valeur présente Nette	Il est défini comme la valeur présente totale d'une série du temps de courants de l'argent
	C3.6 Période du remboursement	Elle fait référence à la période de temps exigée pour le retour sur un investissement à 'rembourser ' la somme de l'investissement original
	C3.7 Durée de vie	C'est la vie attendue d'un système d'énergie
	C3.8 Equivalant de cout annuel	C'est le coût par année de posséder et opérer un atout sur sa vie entière durée. Il est calculé en divisant le NPV (Net present value) d'un projet d'énergie par la valeur présente d'une annuité facteur
C4. Critères sociaux	C4.1 Acceptation publique	C'est un critère qualitatif qui exprime la vue d'ensemble des opinions qui ont été en rapport sur les systèmes d'énergie par la population locale concernant la réalisation supposée des projets sous révision du point vue du consommateur
	C4.2 Création du poste travail	Le nombre de poste de travail créé pendant la vie du cycle du projet.
	C4.3 Bénéfice social	Il exprime le progrès social dans les régions locales qui logent les systèmes d'énergie, en estimant le total social et l'impact économique.

II.6 Structure de problème de production d'énergie

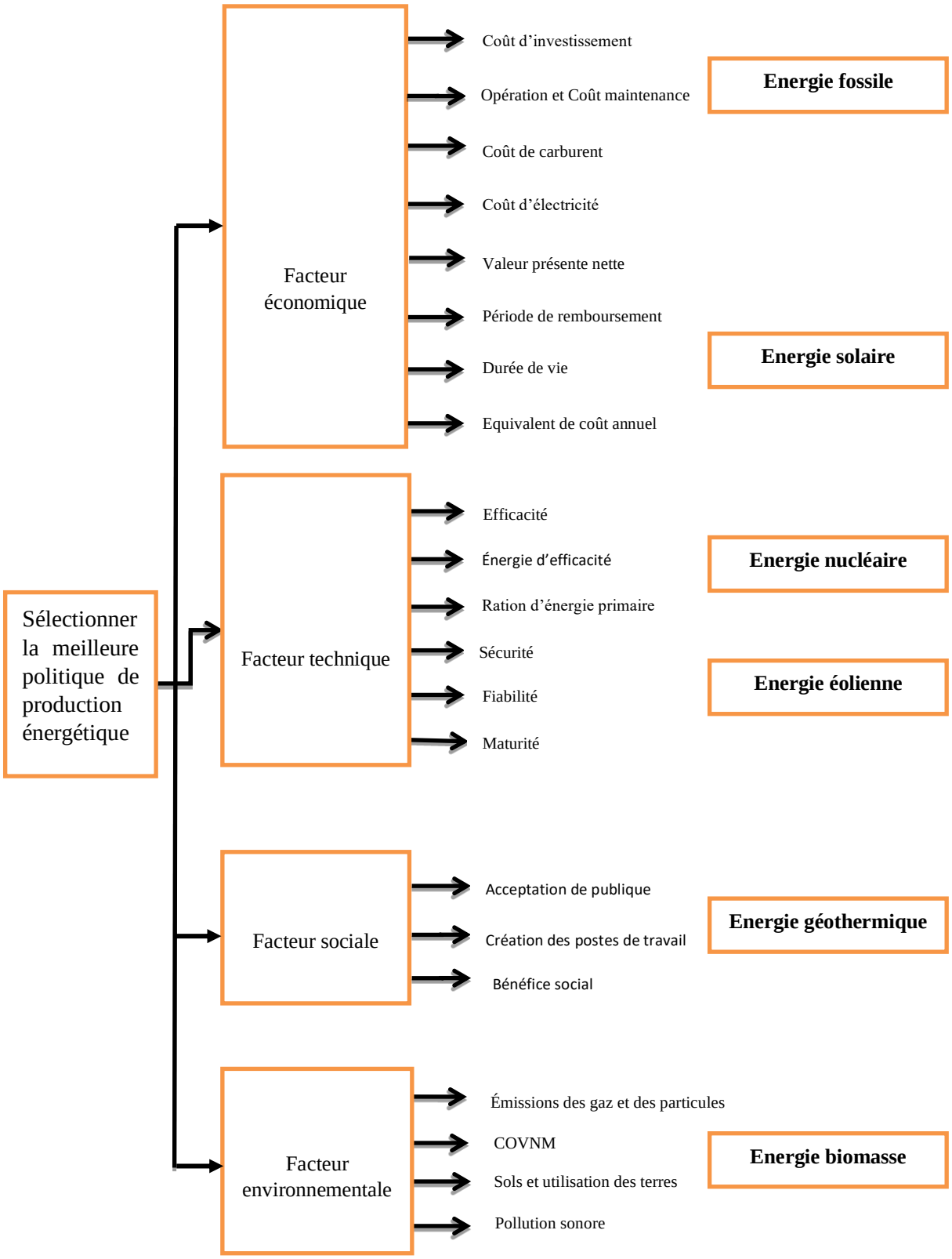


Figure II - 3 : Analyse hiérarchique de problème

II.7 Conclusion

L'analyse de processus de production énergétique est un problème multicritère et multidimensionnel qui diffèrent d'un pays a un autre. Généralement, le problème prendre en compte l'aspect technique, économique, et environnemental et social.

Cependant, il est important de reconnaître que chaque source d'énergie présente des avantages et des inconvénients et un mélange équilibré doit être trouvé qui correspond le mieux aux besoins du pays et assurer une balance équitable entre les dimensions sociales, environnementales et des coûts et reconnaître les contraintes et défis techniques des composants du système.

Chapitre III

Recherche bibliographique sur les applications de la méthode MCDM dans la production énergétique

III

Recherche bibliographique sur les applications de la méthode MCDM dans la production énergétique.

PARTIE I

REVUE BIBLIOGRAPHIQUE

III.1 : Introduction

Le processus de hiérarchie analytique (AHP) est une technique de comparaison par paire pour comparer les critères et son alternative pour dériver la valeur pondérée. AHP est la méthode la plus populaire utilisée dans la prise de décision multicritère (Multi-Criteria Decision-Making MCDM). AHP a été appliqué avec succès dans les problèmes de MCDM comme l'une des méthodes les plus fréquemment utilisées. Le principal avantage de l'AHP est sa capacité inhérente à gérer les actifs incorporels et les calculs mathématiques moins lourds. Il est également plus facile à comprendre que les autres méthodes MCDM. Cette méthode aborde systématiquement le problème alternatif de sélection et de justification en utilisant l'analyse de la structure hiérarchique et les concepts de la théorie des ensembles flous (Bozbura et autres, 2007). Des recherches récentes ont utilisé la méthode Saaty AHP pour résoudre divers problèmes de prise de décision multicritères. Bien que l'approche AHP ait été critiquée pour certains aspects, en particulier ses comparaisons par paires, elle est toujours très populaire grâce à sa capacité à structurer hiérarchiquement un problème complexe, multi-personnes et multi-attributs, et permet d'étudier chaque niveau de la hiérarchie séparément, en combinant les résultats à mesurer que l'analyse progresse. Dans l'AHP de Saaty, la technique unique était la matrice de comparaison par paire pour comparer les critères et les alternatives afin de dériver les valeurs pondérées. L'échelle nette de 1 à 9 est utilisée dans la version antérieure d'AHP pour l'évaluation de comparaison par paire.

Cependant, dans une application réelle, les décideurs préfèrent le jugement de flexibilité plutôt que des valeurs numériques précises dans le processus d'évaluation. Par exemple, la valeur numérique telle que 7 ou 5 ne peut pas représenter efficacement dans le processus de comparaison par paire, par rapport aux valeurs approximatives. Pour cette raison, l'échelle nette a été modifiée en utilisant le concept de la théorie des ensembles flous, en utilisant spécifiquement des nombres flous triangulaires. AHP floue (FAHP) a été introduit pour gérer l'incertitude dans le jugement linguistique. La recherche initiale sur le FAHP a été menée par (Laarhoven, 1983)**,** qui ont discuté de l'utilisation de nombres triangulaires flous et de la méthode des moindres carrés logarithmiques de Lootsma pour dériver des poids flous et des échelles de performances floues. (Buckley, 1985)A décrit le FAHP comme une extension directe du AHP, utilisant des nombres trapézoïdaux et la méthode de la moyenne géométrique pour dériver des poids flous et des scores de performance flous. Les nombres flous ont été introduits pour exprimer des variables linguistiques. L'un des principaux avantages de l'AHP correspond à sa capacité inhérente à gérer les actifs incorporels et les calculs mathématiques moins lourds. La communauté scientifique internationale a accepté l'AHP comme une technique de prise de décision multicritères robuste et flexible, utile pour les problèmes de décision complexes. Il est également plus facile à comprendre que les autres méthodes MCDM.

L'étude et l'analyse de la production énergétique à moyen et long terme est très pertinente pour l'élaboration des politiques énergétiques, mais c'est aussi un problème très complexe, incertain et multidimensionnel. La planification énergétique nécessite de prendre en compte plusieurs critères reflétant des mesures économiques, environnementales, techniques et sociales. Les approches de prise de décision multicritères sont fréquemment utilisées pour aider les décideurs (Decision Making) à sélectionner les meilleures solutions pour optimiser le système de production énergétique.

La méthode MCDM peut être divisée en deux catégories, l'une comprenant les modèles compensatoires et l'autre comprenant les modèles non compensatoires selon (Hwang, 1981)**.** Le nombre de solutions est limité (prise de décision multi-attribut) dans la première méthode et non limité (Prise de Décision Multi-Objectif) dans la seconde.

Les différentes études qui traitent le problème de la planification énergétique à l'aide de la méthode MCDM seront présentées et discutées. Pour raison de simplicité, exclusivement les méthodes qui concernent un nombre fini d'alternatives seront présentés.

Les approches de décision multicritères pour le cas de l'AHP sont détaillées, notamment pour l'intégration des énergies renouvelables et fossile.

III.2 : Prise de décisions multicritères et planification de la politique énergétique

La prise de décision est l'un des problèmes les plus complexes auxquels sont confrontés les individus ou les groupes (entreprises ou gouvernement) en raison des problèmes environnementaux et sociaux complexes qui nécessitent l'évaluation de critères à l'échelle multiples qui sont généralement contradictoire. La prise de décision multicritères est une approche de recherche opérationnelle qui peut être utilisée pour s'attaquer à ce type de problème et minimiser leur complexité.

Le développement de la prise de décision multicritères a commencé dans les années 70 (Climaco et Antunes, 1994). La Figure 12 montre les différentes étapes d'un processus de planification basé sur un cadre multicritères pour soutenir la prise de décision, comme proposé par l'US Army Corps of Engineers (Yoe, 2002). Dans la Figure, les rectangles représentent le processus de planification et les bulles représentent les composants de la technique standard analyse décisionnelle multicritères (MCDA).

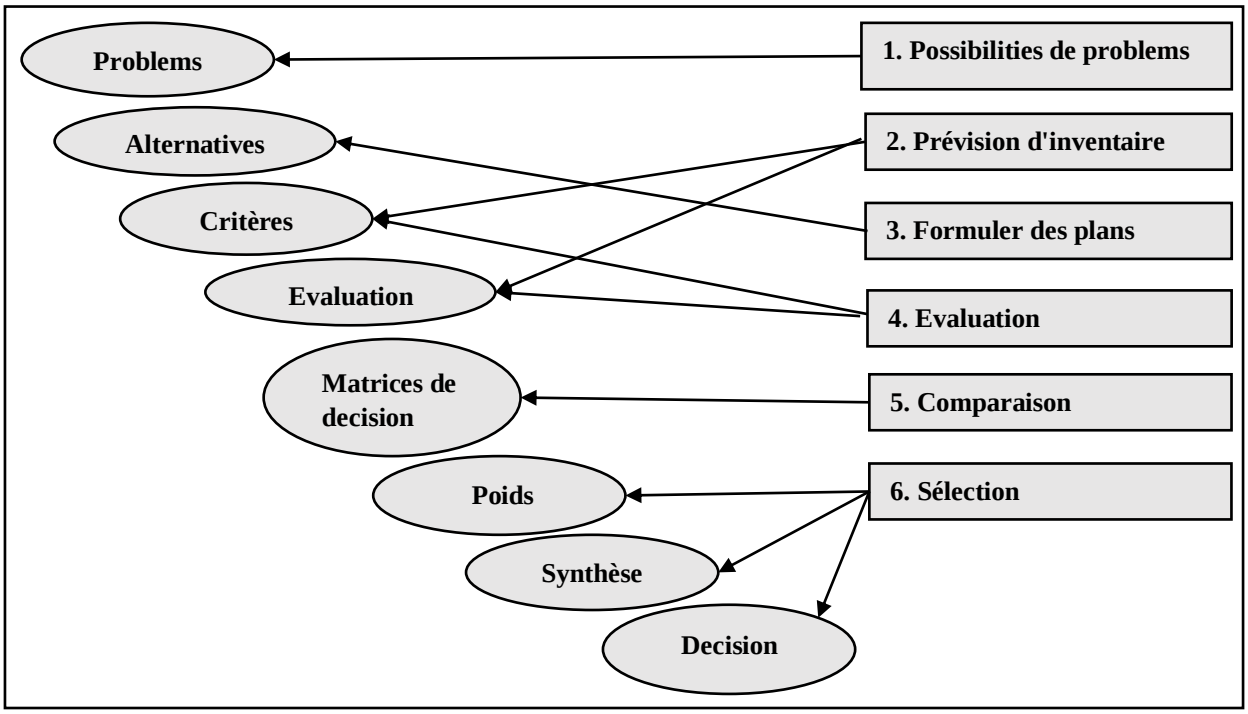


Figure III- 1 : Cadre d'aide à la décision multicritère (Linkov et al, 2004)

III.3 : L'utilisation de la méthode AHP pour la prise de décision énergétique

Parmi les méthodes les plus populaires émerge est l'AHP, elle est fréquemment utilisée pour la prise de décision énergétique. De nombreux auteurs ont proposé l'utilisation de l'approche décisionnelle multicritères (MCDM) pour soutenir les décideurs à la sélection des meilleures options et politiques énergétiques. (Wimmler et autres, 2015) Et (Wang et Poh , 2014) ont démontré que les méthodes de la famille AHP sont particulièrement bien adaptées pour les problèmes de prise de décision énergétique. (Wimmler et autres, 2015) Ont examiné les méthodes multicritères pour les systèmes d'énergie renouvelable sur les iles et ils ont conclu que la méthode AHP est la plus fréquemment appliquée.

La popularité de l'AHP pour l'analyse des décisions dans la modélisation de l'énergie et de l'environnement est également démontrée par le travail de (Wang et Poh , 2014). Dans la même vision, (Stein, 2013) a souligné que des méthodes permettant de combiner des données qualitatives et quantitatives, y compris l'AHP, sont particulièrement utiles pour l'analyse des politiques énergétiques. Quelques exemples d'utilisation du AHP pour soutenir la prise de décision concernant les options d'énergie renouvelable sont résumés ci-après.

(Danie et autres, 2010) Ont été évaluées les énergies renouvelables en Inde et ont été affectées à une approche AHP. Plus tard, (Amer et Daim , 2011) ont également utilisé l'AHP pour la première fois au Pakistan pour la priorisation des technologies d'énergie renouvelable pour la production d'électricité. Deux ans après, (Demirtas, 2013) a appliqué la méthode AHP pour évaluer la meilleure technologie d'énergie renouvelable pour la planification de l'énergie durable en Turquie. (Ahmad et Tahar , 2014) Ont aussi établi un modèle d'évaluation basé sur méthode de priorisation des options renouvelables (solaire, biomasse, éolien et hydraulique) en Malaisie. La méthode AHP a été appliquée par (Janjić et autres, 2015)Pour le choix de la répartition des technologies alternatives d'alimentation électrique selon des critères de développement durable, y compris aspects environnementaux, économiques, techniques et sociaux.

Par la suit, des essais et des recherches menées dans ce domaine. (Stojcetovic et autres, 2016) Ont proposé une méthodologie hybride intégrant le SWOT105 (Forces, faiblesses, opportunités, menaces) analyse et le processus de hiérarchie analytique (AHP) pour la sélection

et la périodisation des RES. (Al-Garni et autres, 2016) Ont présenté une approche multicritère décisionnelle pour évaluer les sources de production d'énergie renouvelable en Arabie saoudite en utilisant AHP et a conclu en faveur du solaire PV suivi par les technologies solaires thermiques comme technologies les plus prometteuses.

(Ozdemir et Sahin, 2018) Ont effectué des études analytiques de la prise de décision multicritères dans le choix d'un site pour une installation solaire photovoltaïque utilisant AHP en Turquie.

D'autres recherches ont pour but de développer l'approche AHP. (Gottfried et autres, 2018) Ont utilisé l'analyse SWOT-AHP-TOWS et ils l'ont appliqué dans le comportement des investissements privés dans le secteur chinois du biogaz, en Chine. (Vishnupriyan et Manoharan , 2018) Ont analysé la décision multicritère d'intégrer les énergies renouvelables en centre de l'Inde du Sud. (Ghimire et Kim, 2018) Ont également analysé les obstacles au développement des énergies renouvelables dans le contexte du Népal à l'aide de l'AHP. (Bili et Vagiona, 2018) Ont également utilisé plusieurs systèmes d'analyse des normes et d'information géographique pour localiser les parcs éoliens terrestres sur l'ile d'Andros. (Keeley et Matsumoto, 2018) Ont étudié l'importance relative des déterminants l'endroit de l'énergie éolienne et solaire dans les pays en développement en utilisant l'AHP. (Lin et autres, 2019) Ont étudié le système énergétique distribué durable en Chine et la prise de décision pour les stratégies et les impacts politiques en utilisant AHP.

L'application d'approches AHP modifiées et sa combinaison avec d'autres multicritères les méthodes sont également fréquemment rapportées dans la littérature sur la prise de décision énergétique. Par exemple, La méthode du processus de hiérarchie analytique floue (FAHP) a été utilisée pour évaluer les options énergétiques plusieurs pays et cas. Pour le cas de la Turquie, (Kahraman et autres, 2009) ont appliqué cette méthode de sélection des options d'énergies renouvelables dans le pays. Aussi pour la Turquie, (Talinli et autres, 2010) ont présenté une analyse comparative de trois sources d'énergie (éolien, thermique et nucléaire) pour les processus de production d'électricité. (Tasri et Susilawati , 2014) Se sont appuyés sur la méthode FAHP pour sélectionner l'option d'énergie renouvelable la plus adéquate pour produire de l'électricité en Indonésie. (Shahriari et autres, 2011) Ont étudié le secteur industriel dans la province de Téhéran en utilisant la méthode d'optimisation du portefeuille d'énergie durable. (Shen et autres, 2010) Ont utilisé l'approche FAHP pour sélectionner les sources d'énergie

renouvelable appropriées pour répondre aux besoins énergétiques, environnementaux et les objectifs de la politique économique de Taiwan

(Wang et autres Y. X., 2020) Ont évalué les différentes ressources d'énergie renouvelables pour le cas de Pakistan en utilisant la méthode SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities, and Threats) et l'approche Fuzzy-AHP. On trouve aussi le travail du (Choi et autres, 2020), Ils ont élaboré une décision multicritère à l'aide de la méthode Fuzzy-Topsis pour transformer le secteur de l'électricité de la Corée en considèrent plusieurs scenarios. Quant à (Azhar et Ullah, 2020), ont analysé le problème de mix énergétique de Pakistan en tenant compte les centrales électriques renouvelables et conventionnelles. (Ibrahim Kshanh, 2020) A établi une nouvelle étude pour évaluer les sources d'énergies renouvelables à l'aide de l'approche (FAHP) pour le cas sur l'Égypte.

(Wang et autres B. K., 2010) Ont évalué le charbon, le pétrole, le gaz naturel, l'énergie nucléaire et les énergies renouvelables comme énergies alternatives pour la Chine en utilisant un modèle de décision hiérarchique (HDM). (Erkan et autres, 2016) Ont analysé l'intégration des énergies renouvelables dans une construction de maisons avec énergie autonome, la méthode AHP a été appliquée pour déterminer le meilleur système hybride (PV et turbine éolienne. (Hämäläinen et Karjalainen , 1992) Ont utilisé AHP et des arbres de valeur pour déterminer les poids relatifs des critères d'évaluation des politiques énergétiques finlandaises. Plus récemment, AHP a été proposé pour la sélection de stratégies d'atténuation du CO2 pour le transport routier aux États-Unis (Javid et autres, 2014)

(Konstantinos et autres, 2019) Ont proposé une méthodologie de système d'aide à la décision pour sélectionner les sites d'installation de parcs éoliens en utilisant AHP et TOPSIS en Grèce. Plus récemment, (Ayodele et autres, 2020) ont proposé un modèle SIG multicritère pour la sélection de sites de parcs éoliens à l'aide d'un processus de hiérarchie analytique floue a été élaborer pour l'étude de cas du Nigéria. (Singh et autres, 2020). Une approche basée sur AHP floue et M−TOPSIS pour la sélection des matériaux composites utilisés dans les applications structurelles. (Khan et autres, 2019) Priorité floue basée sur AHP et taxonomie des facteurs de succès de l'amélioration des processus logiciels dans le développement mondial de logiciels. (Solangi et autres, 2019) Évaluation des stratégies de planification énergétique durable au Pakistan : une approche SWOT-AHP et Fuzzy-TOPSIS intégrée. (Falak et autres, 2020) Évaluation des techniques d'amélioration continue utilisant la technique hybride MCDM

dans un environnement flou. (Wang et autres B. S., 2019) Sélection de technologies de conversion d'énergie durable pour les résidus agricoles : une priorisation floue basée sur AHP-VIKOR du point de vue du cycle de vie. (Büyüközkan et autres, 2020)Un nouveau modèle de qualité de service numérique et son analyse stratégique dans l'industrie aéronautique utilisant un AHP flou intuitif à valeurs d'intervalle.

(Sadeghi et autres, 2012) Ont évalué quatre alternatives renouvelables énergies (solaires, géothermiques, hydroélectriques et éoliennes) pour la province de Yazd en Iran et ressources au FAHP pour déterminer les poids relatifs des critères d'évaluation. Quelque récents, les exemples incluent l'utilisation du FAHP pour l'évaluation des technologies à faible émission de carbone pour l'électricité aux Philippines (Promentilla et autres, 2016), pour la pondération des critères pour l'énergie durable ressources pour le cas de la Turquie (Büyüközkan et Güleryüz , 2016)) ou pour faire face à l'imprécision de jugement subjectif dans un programme d'efficacité énergétique dans les favélas de Rio de Janeiro (Ribas et Silva Rocha , 2015)

Une autre variante de l'AHP est l'ANP (processus de réseau analytique) permettant de prendre en compte les interdépendances entre les éléments de la hiérarchie. Cette méthode a été appliquée par (Atmaca et Basar , 2012)pour l'évaluation des centrales existantes et des centrales envisagées pour la construction en le futur proche en Turquie (Köne et Büke , 2007)ont élaboré un modèle le multicritère ANP pour déterminer la meilleure technologie alternative pour la production d'électricité en Turquie. Aussi pour la Turquie, (Önüt et autres, 2008) ont utilisé l'ANP pour évaluer les ressources énergétiques les plus appropriées pour industrie manufacturière. L'utilisation de l'ANP a également été démontrée pour l'analyse des préférences pour les centrales à biomasse en Italie (Cannemi et autres, 2014)et pour évaluer et sélectionner les sources d'énergie de biomasse préférable pour produire du carburant pour les centrales électriques en Iran (Safari et autres, 2017)). (Ebrahimi et autres, 2018) Est un modèle ANP innovant pour hiérarchiser les systèmes PV / T sur la base d'une approche cout-efficacité, Asia.

(Ulloa et autres, 2018) Ont utilisé une méthode de conception basée sur l'AHP pour une unité PV-T légère, portable et flexible pour les abris pour drones. (Seyedmohammadi et autres, 2019) Développer un modèle utilisant des éléments de matière, des techniques AHP et SIG pour évaluer l'aptitude des terres à l'agriculture.

L'utilisation de la méthode AHP ne se limite pas aux zones énergétiques, elle a été utilisée avec succès pour la prise de décision dans d'autres domaines tels que ;

- L'agriculture et les problèmes d'irrigation (Valipour et Montazar , 2012),
- Analyse de cas d'accident de la route (Najib et autres, 2012),
- Soins médicaux et de santé décision (Liberatore, M. J., Nydick, R. L., 2008)
- Ou pour la gestion des déchets électriques et équipements électroniques (Kim et autres, 2013)

Parmi tant d'autres, démontrant la polyvalence du sa haute reconnaissance et son acceptation pour résoudre des problèmes de décision complexes. L'objectif de cette section n'était pas de présenter une revue exhaustive de la littérature, mais plutôt pour montrer l'importance de l'AHP pour soutenir les problèmes de planification énergétique En résumé, AHP permet traitant de différents critères et s'appuie fréquemment sur les commentaires d'experts ou de parties prenantes aboutissant à une définition claire des priorités des critères et au classement des meilleures énergies options en fonction des conditions régionales.

PARTIE II

METHODES ANALYTIQUES DU PROCESSUS HIERARCHIQUE

III.4 : Approche AHP

La méthode AHP est construite en respectant les étapes suivantes :

- **Étape 1 :** Définissez le problème et déterminez son objectif.
- **Étape 2 :** Construisez le diagramme hiérarchique du problème MCDM. Construire le modèle énergétique à différents niveaux (objectif, principaux critères, sous-critères et alternatives)
- **Étape 3 :** Les experts sont consultés pour donner leur jugement pour chaque critère dans des comparaisons par paires en tenant compte de l'objectif. Les experts sont consultés à l'aide d'une échelle linguistique afin de faciliter le jugement. Les valeurs des comparaisons par paire dans l'AHP sont déterminées selon l'échelle introduite par Saaty

(1977). Selon cette échelle, les valeurs disponibles pour les comparaisons par paires sont des membres de l'ensemble : {9, 8, 7, 6, 5, 4, 3, 2, 1, 1/2, 1/3, 1/4, 1 / 5, 1/6, 1/7, 1/8, 1/9}.

Tableau III.1 : Valeur nette de l'échelle de préférence pour AHP

Échelle d'importance pour comparaison pair A (a_{ij})	**Numérique Réciproque**	**Évaluation (Décimal)**
Importance extrême	9	1/9 (0.111)
Très fort à extrêmement	8	1/8 (0.125
Importance très forte	7	1/7 (0.143)
Fortement à très fort	6	1/6 (0.167)
Importance forte	5	1/5 (0.200)
Modérément à fort	4	1/4 (0.250)
Importance modérée	3	1/3 (0.333)
Égale à modérément	2	1/2 (0.500)
Importance égale	1	1 (1.000)

La matrice de comparaison par paire A=$\left[a_{ij}\right]_{ij=1\ldots\ldots\ldots\ldots n}$ illustrée dans l'éqaution1 est conçue pour évaluer l'importance relative des critères et pour comparer les alternatives pour chaque critère, comme indiqué dans le tableau 8.

$$A_{ij} = \begin{array}{c} \\ C_1 \\ C_2 \\ . \\ . \\ C_n \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} C_1 & C_2 & . \; . & C_n \end{array} \\ \begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & \ldots\ldots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \ldots\ldots & a_{2n} \\ . & .. & \ldots\ldots & a_{3n} \\ . & . & \ldots\ldots & . \\ . & & & \\ a_{2n} & . & \ldots\ldots & a_{nn} \end{vmatrix} \end{array} \qquad (1)$$

Où :

n= Numéro des critères à évaluer

C_i=i^{th} Critères

a_{ij} = Importance de i^{th} critères selon j^{th} critères

Pour tout i et j il faut que :

a_{ij}=1 une comparaison du critère i avec lui-même donne une importance égale

$a_{ji}=\frac{1}{a_{ij}}$ Une comparaison des critères est considérée comme réciproque

w_i et w_j sont les poids des éléments i et j respectivement.

- **Étape 4 :** La matrice par paire normalisée est calculée en divisant chaque valeur de la matrice de comparaison par paire par la somme de ses colonnes. Le vecteur de priorité de chaque critère peut être obtenu en calculant la moyenne des éléments de chaque ligne de la matrice normalisée. La somme de tous les éléments du vecteur prioritaire doit être 1.
- **Étape 5 :** La valeur propre ʎ et le test CI de la comparaison par paire sont calculés en utilisant Eq. (2) et Eq. (3) respectivement. Enfin, le CR de la comparaison matricielle est calculé à l'aide de l'équation. (4).

Valeur propre,

$$ʎ_i = \frac{\sum_j^n (\sum_{i=1}^n A_{ij}) W_j}{A_{ij}} \qquad (2)$$

Test de cohérence,

$$CI = \frac{ʎ_{max} - n}{n-1} \qquad (3)$$

Ratio de cohérence,

$$CR = \frac{CI}{RI} \qquad (4)$$

Le tableau 9 décrit les indices aléatoires des tailles de matrice pour calculer le rapport de cohérence de la matrice de jugement.

Le RI est sélectionné dans le tableau 9 pour chaque comparaison matricielle par paire.

Tableau III.2 : Indice de cohérence aléatoire pour les matrices de taille N

N	**1-2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**
RI	0.0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

Le rapport de cohérence est acceptable s'il ne dépasse pas 0,1. Si le CR est supérieur à 0,1, la matrice de jugement doit être considérée comme incohérente. Ainsi, la comparaison doit être répétée.

Toutes les étapes 3, 4 et 5 doivent être répétées pour les principaux critères, sous-critères et alternatives

- **Étape 6 :** Calculez le poids relatif pour obtenir le classement final des alternatives. La meilleure alternative indique les poids les plus forts.

$$W_i = \sum A_i K_{ij} \qquad (4)$$

Où,

W_i =Note relative globale des facteurs i

A_i =Poids moyen normalisé pour les facteurs i

K_{ij} =Note moyenne normalisée pour les alternatives j par rapport aux facteurs i.

Différentes décisions seront prises par des experts et ces décisions individuelles devraient être intégrées dans la décision de groupe pour obtenir la décision finale. Selon Forman et Peniwati (1998), pour l'agrégation des priorités individuelles dans la décision de groupe, une moyenne arithmétique ou géométrique serait acceptable, mais une moyenne géométrique peut être considéré comme plus cohérent avec le sens des jugements ou des priorités de l'AHP. Le programme de la méthode AHP a été élaboré à l'aide du logiciel Excel et exécuté pour calculer les scores et classer les alternatives selon la méthodologie mathématique (Whitaker, 2007).

III.5 : Formation AHP

Dans ce travail, le diagramme hiérarchique du problème MCDM et du modèle énergétique a été construit à différents niveaux (objectif, critères principaux, sous-critères et alternatives), comme le montre la Figure 2. Cette figure présente la hiérarchie de décision AHP pour le problème de la sélection des technologies d'énergie durable, montrant les relations de cet objectif principal, les 4 principaux critères, les sous-critères et les alternatives. Le groupe

d'expert comprenait des chercheurs scientifiques dans le domaine des énergies renouvelables et des gestionnaires ou des décideurs de manufactures énergétiques opérant dans le secteur énergétique Algérien. Les experts ont été informés de l'objectif de l'étude et des informations ont été recueillies par le biais de questionnaires envoyés par courrier ou remplis lors de réunions en face à face. Le questionnaire s'est tout d'abord concentré sur la comparaison du sous-critère visant à obtenir des pondérations pour chaque sous-critère. Pour faciliter les taches, l'échelle de comparaison été se frome linguistique et après les jugements ont été converti en valeur numérique.

La Figure 13 explique la structure hiérarchique générale de la conception AHP avec le niveau correspondant à l'objectif, aux critères et aux alternatives.

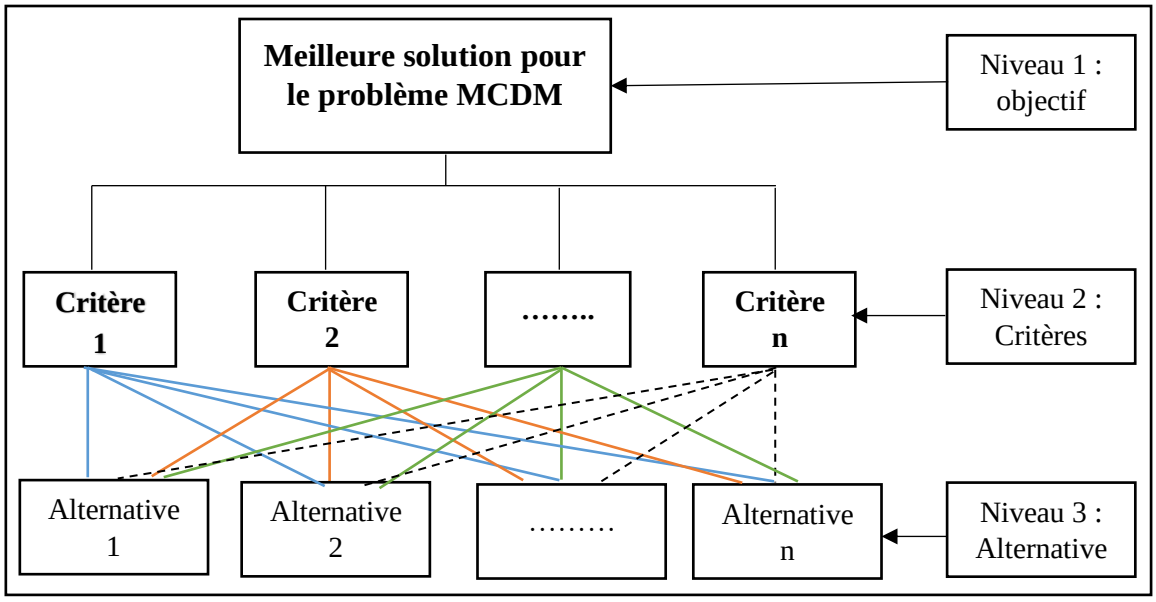


Figure III -2 : La structure hiérarchique d e la méthode AHP

Les procédures AHP peuvent être résumes comme suit :

1. Développer des représentations graphiques des problèmes donnés dans le terme de diagramme de hiérarchie.
2. Mise à l'échelle de la comparaison par paire de chaque élément des critères et alternatives déterminés.
3. Calculez la cohérence de la comparaison par paire sur la base des informations fournies par les décideurs.
4. Calculer la priorité des pondérations pour les éléments à chaque niveau de la hiérarchie de décision (objectif / intérêt global, critères / attributs et alternatives).

5. Développer la priorité des poids globaux dans toute la structure et classer les alternatives.

Le vecteur de poids obtenu représente la priorité que chaque expert a attribuée à chacun de ces sous-critères dans le modèle proposé. Deuxièmement, les commentaires des experts ont été utilisés pour évaluer la performance des alternatives pour chaque sous-critère, résultant sur la matrice normalisée des options. En combinant ces informations, le classement final des alternatives RES a été obtenu.

Les experts ont été référés à l'aide d'une échelle linguistique afin de faciliter le jugement. Les valeurs des comparaisons par paires dans l'AHP ont été déterminées selon l'échelle introduite par Saaty et autres, (1977). Selon cette échelle, les valeurs disponibles pour les comparaisons par paire sont membres de l'ensemble : {9, 7, 5, 3, 1}, comme détaillé dans le tableau 1.

Un contrôle de cohérence doit être effectué pour chaque matrice de jugements et dans les quelques cas d'incohérence, l'expert a été informé et la procédure a été répétée afin de parvenir à une matrice acceptable.

III.6 : Conclusion

Le problème de production énergétique est très complexe et multidimensionnel. L'approche multicritère est utilisée pour faciliter la prendre résoudre ce genre de problème. Une fois l'objectif est déterminé, le problème est structuré dans plusieurs niveaux. Choisir les critères pour analyser la décision de production énergétique est très important et capital. La recherche bibliographique dans cette section sera utilisée pour construire le modèle énergétique spécifique pour le cas de l'Algérie.

L'approche AHP permet de traiter le problème énergétique via les différents critères et utiliser le feedback d'expert ou les parties pour classer les meilleures options énergétiques en fonction des besoins régionaux et nationaux. L'utilité de la méthode est bien évidente dans la littérature qui a montré sa large application dans différents problèmes énergétiques et dans plusieurs régions et pays.

Dans le chapitre suivant, le cas de l'Algérie sera abordé pour analyser la problématique du mix énergétique en utilisant l'approche multicritère (AHP) et les experts pour évaluer l'importance des différents critères et déterminé les sources d'énergies adéquates pour le pays.

Chapitre IV

Analyse de problème de production énergétique pour le cas de l'Algérie

IV

Analyse de problème de production énergétique pour le cas de l'Algérie

IV.1 Introduction

Le choix de différentes sources d'énergie pour produire de l'électricité implique plusieurs critères, A ce titre, l'approche décisionnelle multicritères est particulièrement utile pour supporter les problèmes de planification énergétique permettant de considérer des critères pertinents et de classer la meilleure source d'énergie,

Quatre critères principaux directement liés à l'objectif de durabilité émergent parmi les plus fréquemment rapportés pour construire le modèle énergétique : technique, économique, environnemental et sociopolitique, Cinq sources d'énergie (solaire, éolienne, biomasse, gaz et nucléaire) sont les principales ressources énergétiques à considérer pour l'Algérie,

L'approche et les méthodes utilisées dans cette étude sont présentées, les résultats et les discussions sont analysés,

IV.2 Méthodologie

Suite à la revue de littérature présentée dans le chapitre III, les modèles énergétiques utilisés dans différents pays et régions ont été pris en compte pour construire le modèle énergétique et sélectionner les critères principaux, sous-critères et alternatives pour le cas de l'Algérie. Les cinq sources d'énergie renouvelable ont été sélectionnées en fonction du potentiel énergétique Algérien et les objectifs politiques. Les sources d'énergie comprenaient le solaire, l'éolien, la biomasse, le gaz Natural et le nucléaire. En résumé, cette étude a été menée en utilisant la méthode AHP afin de classer et d'analyser les alternatives des RES en fonction des perspectives économiques, techniques, environnementales et sociales. Afin de résoudre le problème, une approche de recherche a été conçue qui nécessitent la formulation à l'aide de la méthode AHP

et le questionnaire pour collecter les avis des experts, La méthodologie de recherche suivie est présenté dans le diagramme de la figure 1 suivante.

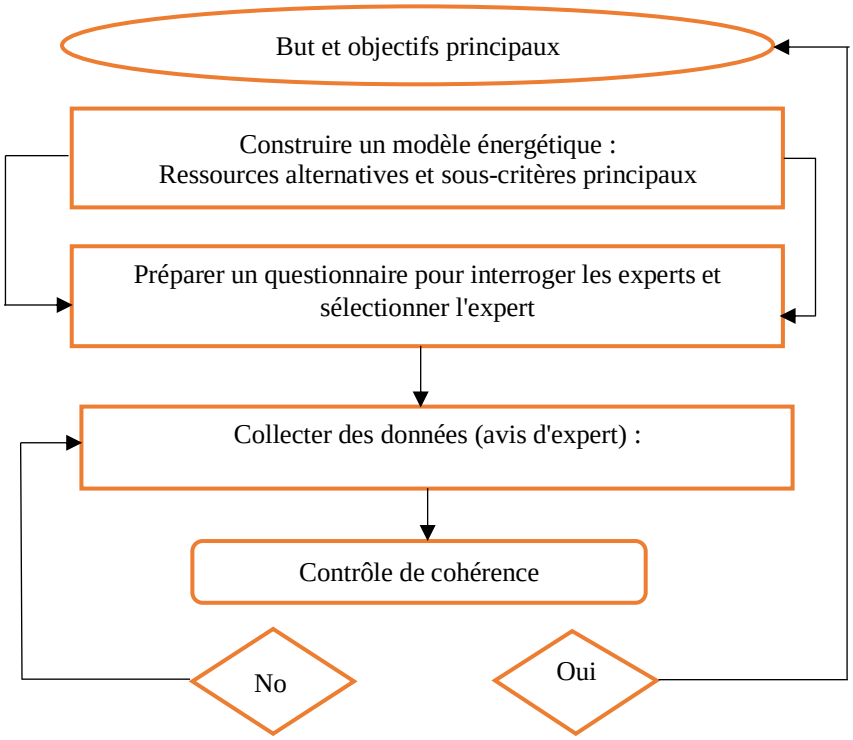


Figure IV -1 : Approche méthodologique de la recherche

Dans ce travail, le diagramme hiérarchique du problème énergétique a été construit à quatre niveaux (objectif, principaux critères, sous-critères et alternatives), le principe de cette hiérarchie peut être schématisé de la manière suivante (figure 2).

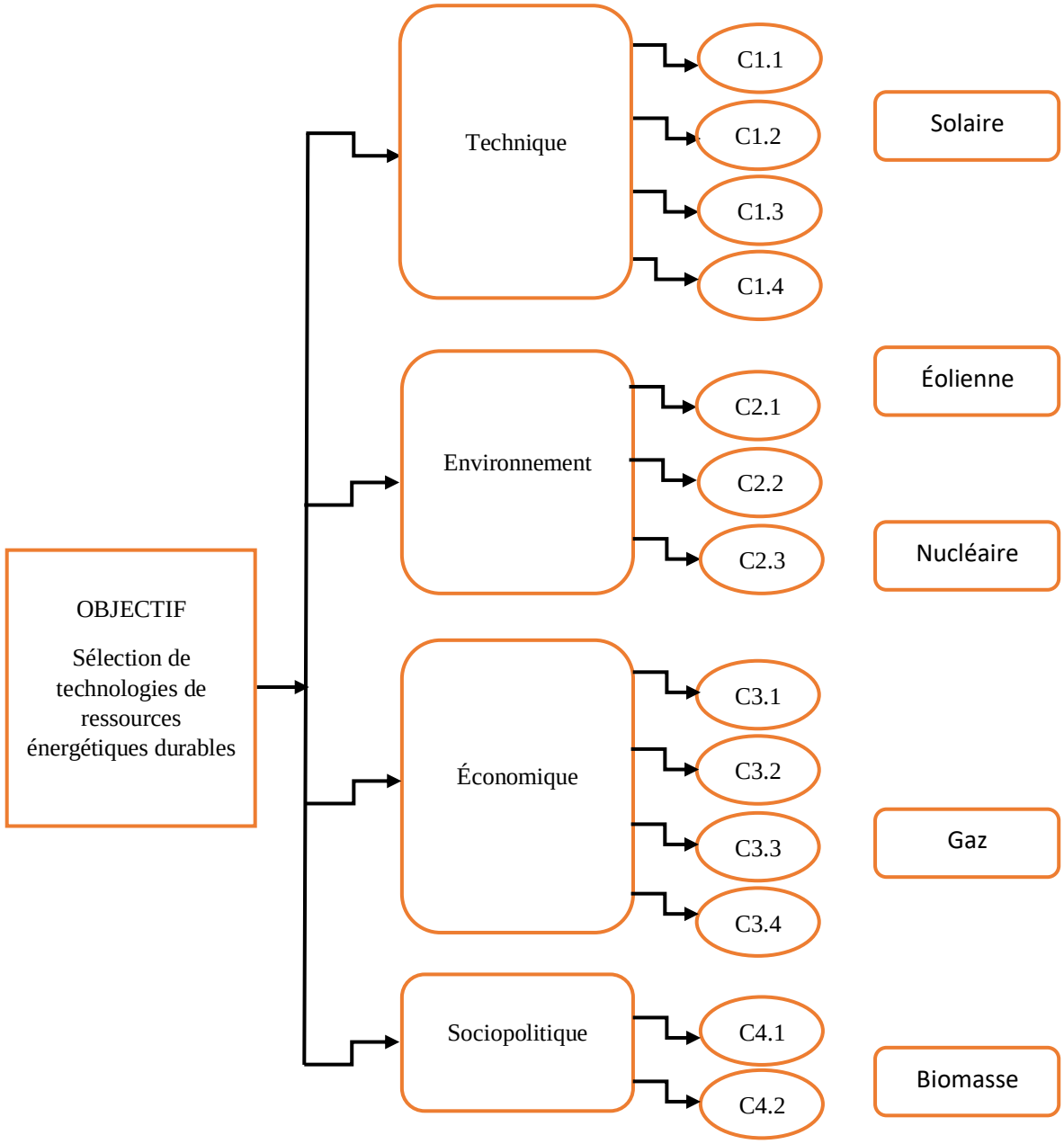


Figure IV. 4 : Hiérarchie pour la sélection des ressources énergétiques pour l'Algérie

Le choix de critères principaux, les sous critères et les alternatives a établi en prenant en compte la recherche bibliothèque précédente et la situation énergétique du pays. Le tableau 1 regroupe les quatre critères principaux et les sous critères en se basant sur les ressources énergétiques pour l'Algérie.

Tableau IV-1 : Critères principaux et sous-critères du modèle énergétique

Critères	Sous-critères
Technique	Efficacité
	Sécurité des systèmes énergétiques
	Fiabilité
	Maturité technologique
Économique	Cout d'investissement
	Opération et cout de maintenance
	Cout d'électricité
	Durée de vie
Environnement	Émissions des gaz et des particules
	Sols et utilisation des terres
	Pollution sonore
Sociopolitique	Acceptation publique
	Création du poste travail

IV.3 Résultats et discussions

Bien que les résultats rapportés dans ce manuscrite qui étaient encourageants, cette étude nécessitait un effort énorme des experts. Pour s'affranchir de ces verrous, chaque option énergétique a été évaluée par rapport à chaque sous-critère par 11 experts, Les variables d'échelle linguistique exprimées par l'expert ont été transformées en valeurs numériques, Pour ce faire, au sein de ce chapitre, une étude détaillée est données dans les tableaux ci-dessous.

La comparaison des priorités de chaque critère sont présentées dans le tableau 2 et le poids agrégé pour chaque critère est présenté dans les figures suivantes,

Tableau IV-8 : Matrice de comparaison par paires des principaux critères par rapport à l'objectif

	Technique	Économique	Environnement	Sociopolitique
Technique	1	1	3	2
Économique	1	1	3	2
Environnement	1/3	1/3	1	½
Sociopolitique	1/2	½	2	1

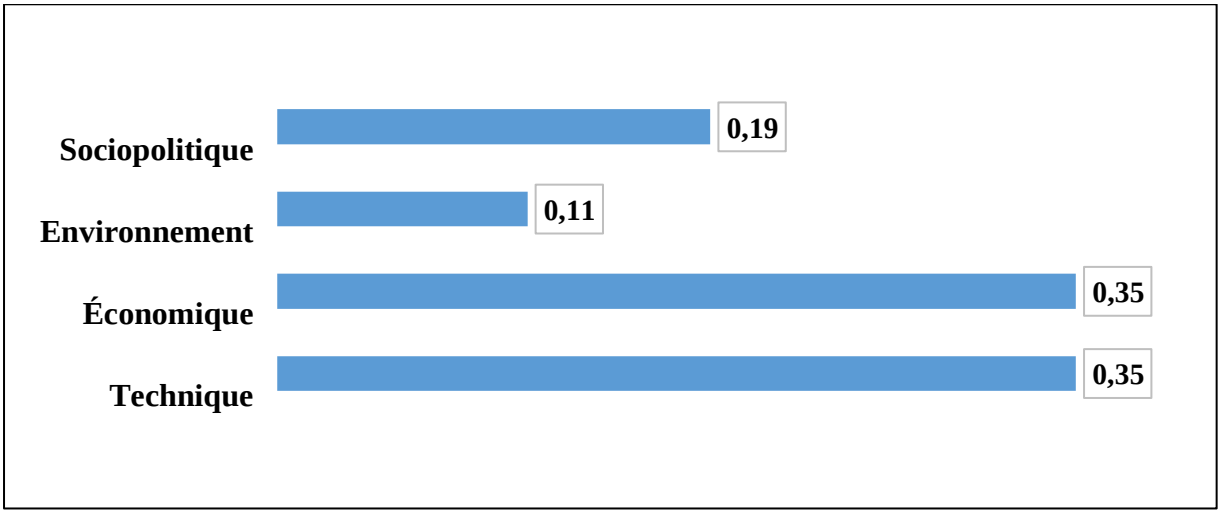


Figure IV .3 : Comparaison des principaux critères

Les critères les plus importants sont le facteur technique et économique (0,35) suivi du facteur social et politique (0,19) et enfin le facteur environnemental (0,11).

La comparaison des sous facteurs pour chaque critère principal est établie pour le deuxième niveau de diagramme,

IV.3.1 Comparaison des sous facteurs économique :

En se basant sur l'importance des facteurs économiques dans notre étude, le tableau 3 regroupe les paires de ces facteurs pour analyser le problème

Tableau IV-3 : Matrice de comparaison par paires des sous facteurs économique par rapport à l'objectif

	Cout d'inv	O &M Cout	Durée de vie	Cout d'électricité
Cout d'inv	1	1	2	3
O &M Cout	1	1	2	3
Durée de vie	½	½	1	2
Cout d'électricité	1/3	1/3	1/2	1

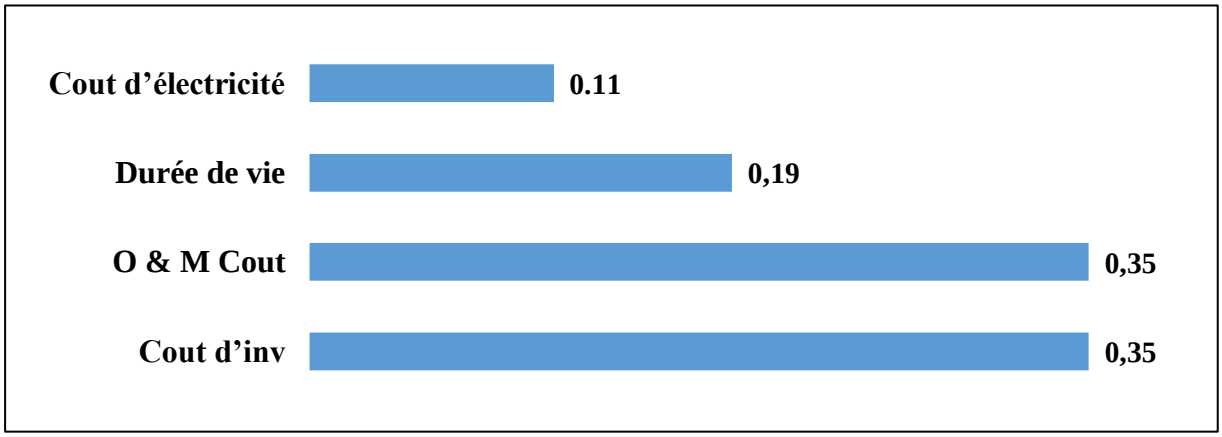


Figure IV.5: Les valeurs d'importance Economique, Sous-facteur

Les sous-facteurs économiques les plus importants sont le cout d'investissement et le opération et coût de maintenance à une valeur élevé (0,350) suivi par la durée de vie à (0,189) et enfin le coût de l'énergie primaire (0,109) est classé en dernière position,

IV.3.2 Comparaison des sous facteurs technique :

Le tableau 4 donne une comparaison par paires des sous facteurs techniques. Les valeurs figurées dans ce tableau sont également les valeurs réellement prises pour notre stratgie de travail.

Tableau IV-9 : Matrice de comparaison par paires des sous facteurs technique par rapport à l'objectif

	Efficacité	**Maturité**	**Fiabilité**	**Sécurité**
Efficacité	1	2	1	4
Maturité	1/2	1	1/2	2
Fiabilité	1	2	1	4
Sécurité	1/4	½	1/4	1

Les valeurs figurant dans le tableau 4 sont schématisées dans la figure suivante (Figure 5).

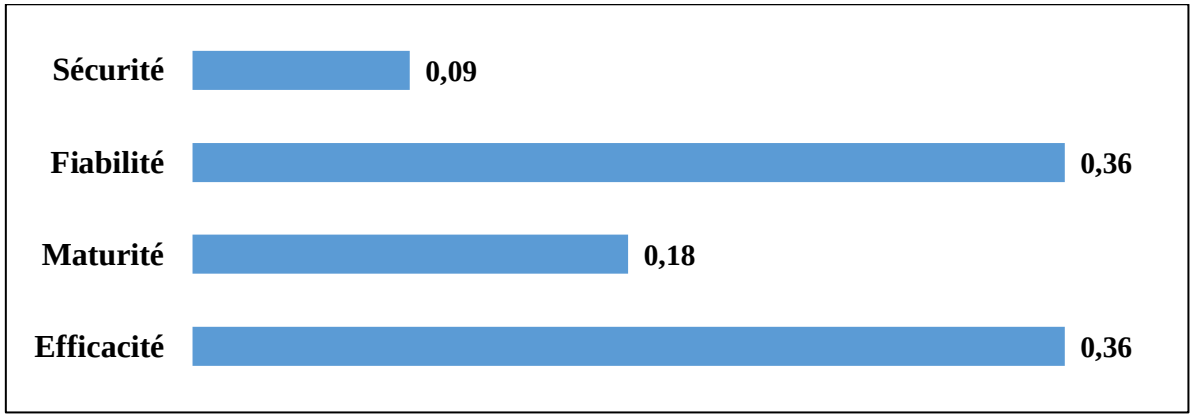


Figure IV .5 : Les valeurs d'importance Technique, Sous-facteur

Les sous-facteurs techniques les plus importants sont l'efficacité et la fiabilité avec une valeur de (0,36), suivi de la maturité technologique à (0,18) et en dernier c'est le facteur de sécurité énergétique (0,09),

IV.3.3 Comparaison des sous facteurs environnement :

Du fait que les facteurs environnementaux jouent un rôle dominant dans la stratégie énergétique, le tableau 5 montre la comparaison par paires de ces sous facteurs par rapport au problème de Mix énergétique. L'Interprétation de ces valeurs est schématisée dans la figure 6.

Tableau IV-10 : Matrice de comparaison par paires des sous facteurs environnement par rapport à l'objectif

	CO_2	Sols et utilisation des terres	Pollution sonore
CO_2	1	1/5	1/2
Sols et utilisation des terres	5	1	3
Pollution sonore	2	1/3	1

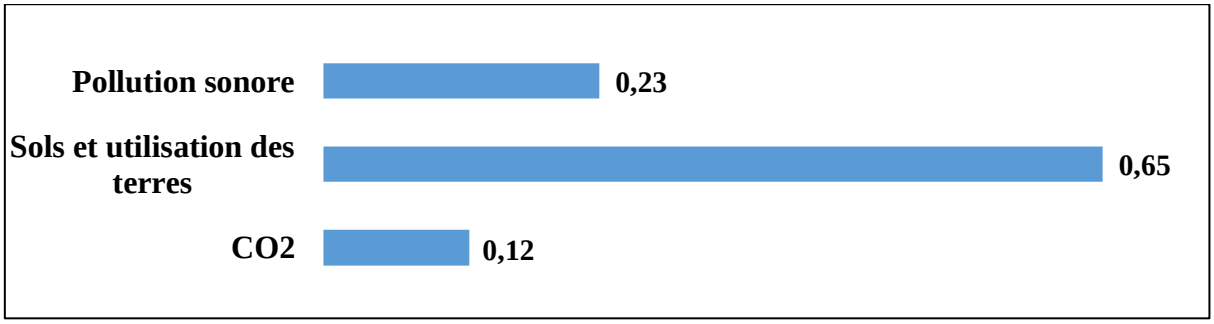


Figure IV.6 : Les valeurs d'importance Environnement, Sous-facteur

Les sous-facteurs environnementaux les plus importants sont l'utilisation du sol et des terres avec une valeur (0,648), suivie par la pollution sonore (0,230) et finalement les émissions de gaz et de particules est de (0, 122),

IV.3.4 Comparaison des sous facteurs social :

Le tableau 6 résume les valeurs des éléments sociaux entrant dans la matrice de comparaison.

Tableau IV-11 : Matrice de comparaison par paires des sous facteurs social par rapport à l'objectif

	Acceptation publique	Postes de travail
Acceptation publique	1	1/3
Postes de travail	3	1

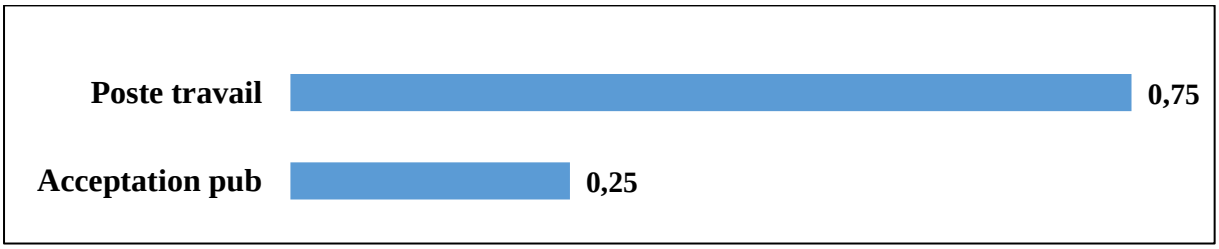


Figure IV.7 : Les valeurs d'importance Social, Sous-facteur

La création d'emplois est un facteur capital avec un taux de (0,75), suivie par l'acceptation publique de (0,25),

Afin de parvenir aux objectifs définis dans ce travail. Le tableau 7 récapitule la comparaison des sous facteurs majores avec les alternatives énergétiques. Dans ce contexte, et en particulier dans ce tableau, et pour répondre parfaitement à des attentes que nous avons retenu, nous avons donné la meilleure option de chaque sous critère (les valeurs en gras), dans la mesure où elles sont pertinentes pour la compréhension du classement finals de ces alternatives.

Tableau IV-12 : Comparaison des sous critères avec les alternatives

Sous-critères	Solaire	Eolienne	Nucléaire	Gaz	Biomasse
Efficacité	0,06	0,03	0,27	**0,46**	0,18
Maturité	0,10	0,04	0,26	**0,46**	0,15
Fiabilité	0,08	0,03	0,30	**0,45**	0,15
Sécurité	**0,49**	0,06	0,20	0,11	0,14
Cout d'investissement	0,11	0,22	0,11	**0,49**	0,06
Opération et cout de maintenance	**0,41**	0,30	0,07	0,11	0,13
Cout d'énergie	0,29	0,29	0,04	0,08	0,29
Durée de vie	0,12	0,07	**0,38**	0,21	0,21
Émissions des gaz et des particules	0,30	0,30	0,30	0,04	0,06
Sols et utilisation des terres	0,30	**0,33**	0,21	0,12	0,04
Pollution sonore	0,09	0,11	**0,38**	0,35	0,04
Acceptation publique	0,29	0,29	0,07	0,29	0,07
Création du poste travail	**0,58**	0,18	0,11	0,11	0,03

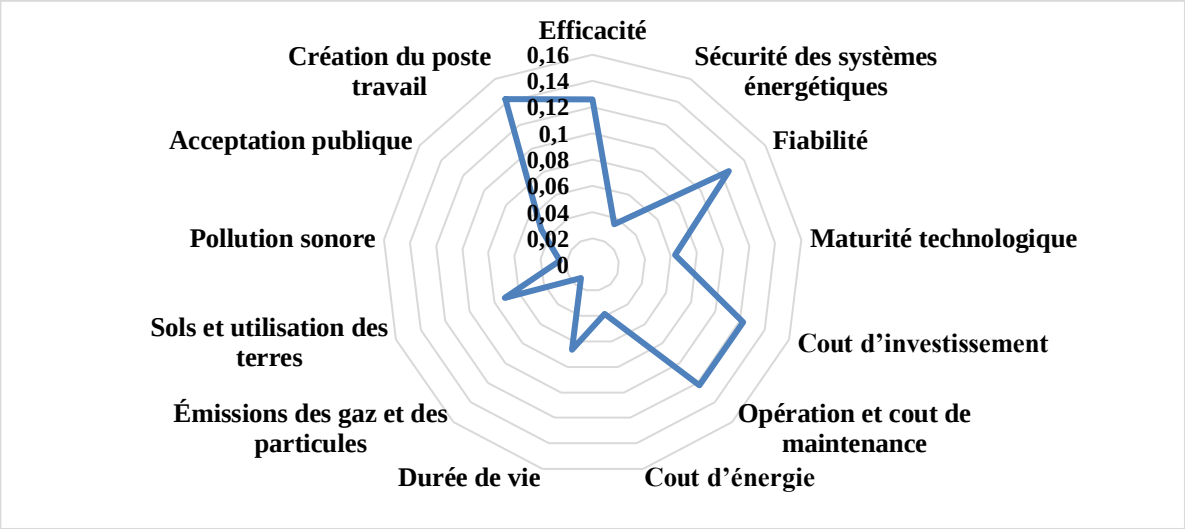


Figure IV.8 : Pondérations normalisées des sous-critères obtenus à partir des commentaires d'experts

Le facteur social s'est avéré très important d'après le sous-facteur "création de postes de travail" avec une valeur plus élevée, soit plus de (0,14) par-rapport à l'ensemble des sous-facteurs. Les deux sous-facteurs techniques (Efficacité- fiabilité) ont été classés en deuxième position avec une même valeur de 0,13. Pour les deux sous-facteurs économiques (coût

d'investissement-opérations et maintenance), on les retrouve en troisième position avec une même valeur qui est de 0,12,

Les classement final des alternatifs sont obtenus à partir de la combinaison des pondérations des sous-critères avec la matrice de comparaison (Tableau 3). Les résultats du clasement final des alternatifs énergétiques sont présenté dans le Tableau 8,

Tableau IV -13: Classement agrégé des alternatives

Alternatives	Classement
Gaz	0,29
Solaire	0,22
Nucléaire	0,20
Éolienne	0,17
Biomasse	0,12

D'après cette étude, le gaz naturel est classé en première position comme meilleure source d'énergie primaire pour générer de l'électricité (0,29), Le solaire est placé en deuxième avec un score de 0,22, suivi par le nucléaire avec 0,19, L'éolienne et biomasse sont classées en quatrième et cinquième avec une valeur de 0,17 et 0,12,

IV.4 Conclusion

Le problème de production d'énergie électrique pour le cas de l'Algérie a été étudié à l'aide de la méthode de AHP sous plusieurs critères technique, économique, environnement et sociologique, Les sources d'énergies considérées sont le fossile (Gaz), le nucléaire et le renouvelables (Eolienne, solaire, biomasse).

Les facteurs technique et économique ont été déterminés pour la décision de production de l'énergie électrique pour le pays. Le facteur social été aussi considéré important avec le sous facteur création des postes de travail. Finalement, l'environnement été un critère important crucial avec le sous facteur sols et utilisation des terres. Les énergies renouvelables on aussi classé comme une énergie souhaitable pour produire de l'énergie notamment le solaire, L'énergie solaire a donné des valeurs adéquates pour le facteur social comme la création des nouveaux postes de travail, L'importance des critères sociaux pour les énergies renouvelables est aussi prouvée par l'étude de Haddad et al, 2017. Le nucléaire a été trouvé convenable pour produire l'énergie particulièrement pour les critères technique et aussi économique.

Les résultats ont montré que le gaz naturel est la meilleure source d'énergie pour générer de l'électricité due ces avantages surtouts technique comme la maturité, l'efficacité et la fiabilité.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cinque source d'énergie ont été évaluées sous plusieurs critères technico-économique, environnement et social. La méthode AHP a été appliquée pour analyser le problème. Treize critères avec cinq sources d'énergies ont été utilisés pour analyser le problème de production d'énergie électrique pour le cas de l'Algérie.

Un questionnaire a été élaboré pour avoir le feedback des experts, une échelle linguistique a été pour faciliter le jugement des experts. La comparaison des critères et des alternatives réalisées par les experts a été converti en valeur numérique et injecté dans les matrices de calcul pour classer les alternatives.

Les résultats ont montré que le gaz naturel est une source d'énergie importante pour le pays pour subvenir le besoin de l'énergie due ces avantages techniques par rapport les autres sources d'énergies. Le solaire est aussi trouvé comme une bonne source d'énergie pour l'Algérie suivi par le nucléaire et l'éolienne et biomasse.

Le modèle énergétique proposé dans notre étude peut être modifié en ajoutant d'autres critères pour traiter/analyser un problème spécifique de production d'énergie (régionale, sectorielle…etc).

La méthode AHP est efficace pour attaquer ce genre de problèmes mais d'autres méthodes sont elles aussi souhaitables pour étudier le problème de production énergétique.

A cause de la pandémie de la COVID-19 le nombre des experts participants à l'évaluation du problème ont été limité donc il est préférable d'élargir le nombre d'experts pour faire intervenir tous les spécialistes du domaine.

Références

Références

Afgan et Carvalho. (2002). Multi-criteria assessment of new and renewable energy power plants. *Energy*, 739–55.

Afgan et Carvalho. (2008). Sustainability assessment of a hybrid energy system. *Energy Policy*, 2903-2910.

Agence international de l'énergie. (2010). *Couts de prévisionnels de production de l'électricité.* Organisation de coopération et développement économique /.

Ahmad et Tahar . (2014). "Selection of renewable energy sources for sustainable development of electricity generation system using analytic hierarchy process: A case of Malaysia". *Renewable Energy*, 458–466.

Akash et autres, B. M. (1999). Multi-criteria selection of electric power plants using analytical hierarchy process. *Electric Power Systems Research*, 29–35.

Alanne et autres, K. S.-I. (2007). Multi-criteria evaluation of residential energy supply systems. *Energy and Buildings,* 1218–26.

Al-Garni et autres, K. A.-H. (2016). "A multicriteria decision making approach for evaluating renewable power generation sources in Saudi Arabia". *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 137–150.

Alizadeh et autres, R. S. (2020). Improving renewable energy policy planning and decision-making through a hybrid MCDM method.,. *Energy Policy*, 111174.

Amer et Daim . (2011). "Selection of renewable energy technologies for a developing county: A case of Pakistan". *Energy for Sustainable Development.*, 420–435.

Amrouch et autres. (2012). Compressed Natural Gas: The new alternative fuel for the Algerian transportation sector. 33, 102–110. *Procedia Engineering*, 102-110.

APRUE. (2020). Récupéré sur http://www.aprue.org.dz

APS.(2019,Juillet,07). Récupéré sur Algeriepresse service

: http://www.aps.dz/economie/91571-electricite-un-nouveau-record-de-consommation

Atmaca et Basar . (2012). "Evaluation of power plants in Turkey using Analytic Network Process (ANP)". *Energy*, 555–563.

Ayodele et autres, T. R. (2020). A multi-criteria GIS based model for wind farm site selection using interval type-2 fuzzy analytic hierarchy process: The case study of Nigeria. *Applied energy*, 1853-1869.

Azhar et Ullah. (2020). MCDM Analysis of Renewable and Conventional Energy Power Plants in Pakistan. *International Conference on Computing, Mathematics and Engineering Technologies (iCoMET) .IEEE*, 1-6.

Beccali et autres, M. C. (2003). Decision-making in energy planning. Application of the electre method at regional level for the diffusion of renewable energy technology. *Renewable Energy*, 2063–87.

Ben Abba, M. (2018, novembre 13). *Le Quotidien d'Oran*. Récupéré sur http://www.lequotidien-oran.com/index.php?news=5268831&archive_date=2018-11-13

Bilan Énergétique National.(2018). Récupérésur

https://www.energy.gov.dz/Media/galerie/bilan-des realisation_2018_5e11d13a6420a.pdf

Bili et Vagiona. (2018). . Use of multicriteria analysis and GIS for selecting sites for onshore wind farms: the case of Andros Island (Greece). . *European Journal of Environmental Sciences*, 5-13.

Bond et autres, T. C. (1999). Light absorption by primary particle emissions from a lignite burning plant. *Environmental Science & Technology*, 3887-3891.

Bozbura et autres, F. T. (2007). Prioritization of human capital measurement indicators using fuzzy AHP. *Expert systems with applications* , 1100-1112.

Buckley, P. J. (1985). A critical view of theories of the multinational enterprise." The economic theory of the multinational enterprise . *Palgrave Macmillan, London,*, 1-19.

Burton et autres, J. H. (2007). A multicriteria assessment of smallscale energy technology applications in local governments. *Energy Policy*, 6402–12.

Büyüközkan et Güleryüz . (2016). “Fuzzy Multi Criteria Decision Making Approach for Evaluating Sustainable Energy Technology Alternatives”. *International Journal of Renewable Energy Sources*, 1-6.

Büyüközkan et autres, G. H. (2020). A new digital service quality model and its strategic analysis in aviation industry using interval-valued intuitionistic fuzzy AHP. . *Journal of Air Transport Management*, 101817.

Cannemi et autres, M. M. (2014). “Modeling decision making as a support tool for policy making on renewable energy development”. *Energy Policy*, 127–137.

Cavallaro et Ciraolo, F. L. (2005). Amulticriteria approach to evaluate wind energy plants on an Italian island. *Energy Policy*, 235–44.

CDER. (2016). *Nouveau programme national sur l’efficacité énergétique (2016-2030).*

Récupérésur https://portail.cder.dz/

CDER. (*2015*).(National Renewable Energy programm Algeria (2015-2030)).. CDER.

Récupérésur https://portail.cder.dz/

Chattopadhyay et Ramanathan, D. R. (1998). A new approach to evaluate generation capacity bids.. *IEEE Transactions on Power Systems*, 1232–7.

Chatzimouratidis et Pilavach, A. i. (2008). Sensitivity analysis of the evaluation of power plants impact on the living standard using the analytic hierarchy process. *Energy Conversion and Management*, 3599–611.

Chatzimouratidis et Pilavachi. (2008). Multicriteria evaluation of power plants impact on the living standard using the analytic hierarchy process. *Energy Policy*, 1074–89.

Chatzimouratidis et Pilavachi. (2008). Sensitivity analysis of the evaluation of power plants impact on the living standard using the analytic hierarchy process. *Energy Conversion and Management*, 3599-3611.

Choi et autres, D. A. (2020). Multi-criteria decision analysis of electricity sector transition policy in Korea. . *Energy Strategy Reviews*, 100485.

Climaco et Antunes. (1994). Man-machine interfacing in MCDA. In Multiple Criteria Decision Making . *Springer, New York, NY.*, 239-253).

Danie et autres, V. N. (2010). "Evaluation of the significant renewable energy resources in India using Analytical Hierarchy Process". *Multiple Criteria Decision Making for Sustainable Energy and Transportation Systems*, 13-26.

Demirtas, O. (2013). "Evaluating the Best Renewable Energy Technology for Sustainable Energy Planning". *International Journal of Energy Economics and Policy*, 23-33.

Diakoulaki et Karangelis, D. F. (2007). Multi-criteria decision analysis and cost-benefit analysis of alternative scenarios for the power generation sector in Greece. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 716 27.

Dinca et autres, C. B. (2007). A multi-criteria approach to evaluate the natural gas energy systems. *Energy Policy*, 5754–65.

Doukas et autres, H. A. (2007). Multi-criteria decision aid for the formulation of sustainable technological energy priorities using linguistic variables. *European Journal of Operational Research*, 844–55.

Ebrahimi et autres, M. A. (2018). Innovative ANP model to prioritization of PV/T systems based on cost and efficiency approaches: With a case study for Asia. *Renewable Energy*, 434-446.

Erkan et autres, T. E. (2016). "AHP Based Decision Making Process for Zero Energy House Building". *Advanced Management Science*, 329–332.

Falak et autres, J. K. (2020). Evaluation of Continuous Improvement Techniques using Hybrid MCDM Technique under Fuzzy Environment. *Materials Today: Proceedings*, 1295-1305.

Ghimire et Kim. (2018). An analysis on barriers to renewable energy development in the context of Nepal using AHP. . *Renewable energy*, 446-456.

Gottfried et autres, O. D. (2018). SWOT-AHP-TOWS analysis of private investment behavior in the Chinese biogas sector. . *Cleaner Production*, 632-647.

Hämäläinen et Karjalainen . (1992). “Decision support for risk analysis in energy policy”. *European Journal of Operational Research.*, 172–183.

Haralambopoulos et Polatidis, D. A. (2003). Renewable energy projects: structuring a multi-criteria group decision-making framework. *Renewable energy*, 961-973.

Huang et autres, F. Y. (2005). Study on comprehensive evaluation model for combined cooling heating and power system (CCHP). *Journal of Engineering Thermophysics*, 13–6.

Huang et autres, F. Y. (2005). Study on comprehensive evaluation model for combined cooling heating and power system (CCHP). *Journal of Engineering Thermophysics*, 13–6.

Hwang, K. Y. (1981). Multiple attribute decision making: methods and applications. . *Springer, Berlin.*

Ibrahim Kshanh. (2020). Multiple criteria decision making FAHP Model of Renewable Energy Sources Planning for Sustainable Development Egypt case study .

Janjić et autres, A. S. (2015). “Multi criteria Methods for Distributed Generation Resources Optimization”. *Energy and Power Engineering*, 261–276.

Javid et autres, R. J. (2014). “Selection of CO2 mitigation strategies for road transportation in the United States using a multi-criteria approach”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 97-960.

Jovanovic et autres, M. A. (2009). Sustainable development of the Belgrade energy system. *Energy*, 532–9.

Kablan, M. M. (2004). “Decision support for energy conservation promotion: an analytic hierarchy process approach”. *Energy Policy*, 1151–1158.

Kahraman et autres, C. K. (2009). “A comparative analysis for multiattribute selection among renewable energy alternatives using fuzzy axiomatic design and fuzzy analytic hierarchy process”. *Energy*, 1603–1616.

Keeley et Matsumoto. (2018). Relative significance of determinants of foreign direct investment in wind and solar energy in developing countries–AHP analysis. *Energy Policy*, 337-348.

Khan et autres, A. A. (2019). Fuzzy AHP based prioritization and taxonomy of software process improvement success factors in global software development. *Applied Soft Computing*, 105648.

Kim et autres, M. J. (2013). “Application of Delphi-AHP methods to select the priorities of WEEE for recycling in a waste management decision-making tool”. *Journal of Environmental Management*, 941-948.

Köne et Büke . (2007). “An analytical network process (ANP) evaluation of alternative fuels for electricity generation in Turkey”. *Energy Policy*, 5220–5228.

Konstantinos et autres, I. G. (2019). A Decision Support System methodology for selecting wind farm installation locations using AHP and TOPSIS: Case study in Eastern Macedonia and Thrace region, Greece. *Energy Policy,*, 232-246.

Laarhoven, W. H. (1983). Photochemical cyclizations and intramolecular cycloadditions of conjugated arylolefins. Part I: Photocyclization with dehydrogenation. *Recueil des Travaux Chimiques des Pays-Bas*, 185-204.

Lamminen et Isherwood, E. &. (2007). Comparison of fine particle emissions from a modern small-scale biomass boiler and from a large-scale coal-firing power plant. *In European Aerosol Conference*.

Liberatore, M. J., Nydick, R. L. (2008). "The analytic hierarchy process in medical and health care decision making: A literature review". *European Journal of Operational Research*, 194-207.

Lin et autres, R. L. (2019). Towards a sustainable distributed energy system in China: decision-making for strategies and policy implications. Energy, . *Sustainability and Society*, 1-25.

Løken et autres, E. B. (2009). Use of the equivalent attribute technique in multi-criteria planning of local energy systems . *European Journal of Operational Research*, 1075-1083.

Madlener et autres. (2007). New ways for the integrated appraisal of national energy scenarios: the case of renewable energy use in Austria. *Energy Policy*, 6060–74.

Madlener et autres. (2007). New ways for the integrated appraisal of national energy scenarios: the case of renewable energy use in Austria. *Energy Policy*, 6060-6074.

Mamlook et autres. (2001). A neuro-fuzzy program approach for evaluating electric power generation systems. *Energy*, 619–32.

Mamlook et autres. (2001). Fuzzy sets programming to perform evaluation of solar systems in Jordan. *Energy Conversion and Management*, 1717–26.

Mastrocinque et autres, E. R.-E. (2020). An AHP-based multi-criteria model for sustainable supply chain development in the renewable energy sector.. *Expert Systems with Applications*, 113321.

MEN.(2020). MINISTÈRE DEL'ÉNERGIE Récupérésur

:https://www.energy.gov.dz/?rubrique=electricite-et-gaz

Messaoudi et autres, D. S. (2019). Site selection methodology for the wind-powered hydrogen refueling station based on AHP-GIS in Adrar, Algeria. .. *Energy Procedia*, 67-76.

Metaoui, F. (2018). Récupéré sur https://algeria-watch.org/?p=12288

Mohsen et Akash, M. B. (1997). Evaluation of domestic solar water heating system in Jordan using analytic hierarchy process. *Energy Conversion and Management*, 1815–22.

Mokarram et autres, M. M. (2020). A novel optimal placing of solar farms utilizing multi-criteria decision-making (MCDA) and feature selection. . *Cleaner Production*, 121098.

Najib et autres, L. A. (2012). "Weight of road accident causes using analytic hierarchy process". *ARPN Journal of Science and Technology*, 39-44.

Önüt et autres, S. T. (2008). “Multiple criteria evaluation of current energy resources for Turkish manufacturing industry”. *Energy Convers Manage*, 1480–1492.

Ozdemir et Sahin. (2018). Multi-criteria decision-making in the location selection for a solar PV power plant using AHP. . *Measurement*, 218-226.

Papadopoulos et Karagiannidis, ,. A. (2008). Application of the multi-criteria analysis method Electre III for the optimisation of decentralised energy systems . *Omega*, 766-776.

Pilavachi et autres. (2006). Multi-criteria evaluation for CHP system options. *Energy Conversion and Management*, 3519-3529.

Pilavachi et autres. (2009). Multi-criteria evaluation of hydrogen and natural gas fuelled power plant technologies. *Applied Thermal Engineering*, 2228–34.

Populationdata. (2020). *Populationdata*. Récupérésur

https://www.populationdata.net/pays/algerie/

Promentilla et autres, M. C. (2016). “A Calibrated Fuzzy AHP Approach to Derive Priorities in a Decision Model for Low Carbon Technologies”. *DLSU Research Congress 2016 De La Salle University, Manila*.

Ribas et Silva Rocha . (2015). Decision Support System for Prioritizing Investments in an Energy Efficiency Program in Favelas in the City of Rio de Janeiro”. *Multi-Crit Decis*, 89-99.

Sadeghi et autres, A. L. (2012). “Evaluation of renewable energy sources for generating electricity in province of Yazd: a fuzzy MCDM approach”. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, 1095–1099.

Safari et autres, M. J. (2017). “Assessment of Biomass Energy Sources in Electricity Generation Using Analytic Network Process Method”. *Modern Applied Science*, 23-36.

Seyedmohammadi et autres, J. S. (2019). Development of a model using matter element, AHP and GIS techniques to assess the suitability of land for agriculture. *Geoderma*, 80-95.

Shahriari et autres, G. H. (2011). “Optimal Sustainable Energy Portfolio in Tehran Province Industries Using Fuzzy AHP”. *Basic & Applied Sciences*, 2584-2594.

Shen et autres, Y. C. (2010). “An assessment of exploiting renewable energy sources with concerns of policy and technology”. *Policy Energy*, 4604–4616.

Shete et autres, R. S. (2020). A Pythagorean fuzzy AHP approach and its application to evaluate the enablers of sustainable supply chain innovation. *Sustainable Production and Consumption*.

Si et autres, T. W. (2020). Multi-criteria comprehensive energy efficiency assessment based on fuzzy-AHP method: A case study of post-treatment technologies for coal-fired units. *Energy*, 117533.

Singh et autres, A. K. (2020). A fuzzy-AHP and M− TOPSIS based approach for selection of composite materials used in structural applications. *Materials Today: Proceedings*.

Solangi et autres, Y. A. (2019). Evaluating the strategies for sustainable energy planning in Pakistan: An integrated SWOT-AHP and Fuzzy-TOPSIS approach.. *Journal of Cleaner Production*, 117655.

Sonatrach. (2019). Récupéré sur Sonatrach. https://sonatrach.com/

Sonelgaz. (2020). Récupéré sur https://www.sonelgaz.dz/

Stein, E. W. (2013). "A comprehensive multi-criteria model to rank electric energy production technologies". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 640–654.

Stojcetovic et autres, N. D. (2016). "Application of integrated strengths, weaknesses,opportunities, and threats and analytic hierarchy process methodology to renewable energy project selection in Serbia". *JOURNAL OF RENEWABLE AND SUSTAINABLE ENERGY*, 035906.

Suganthi, L. (2018). Multi expert and multi criteria evaluation of sectoral investments for sustainable development: An integrated fuzzy AHP, VIKOR/DEA methodology. . *Sustainable cities and society*, 144-156.

Tahri et autres, M. H. (2015). "The evaluation of solar farm locations applying Geographic Information System and Multi-Criteria Decision-Making methods : Case study in southern Morocco". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 1354–1362.

Talinli et autres, I. T. (2010). "Comparative analysis for energy production processes (EPPs): Sustainable energy futures for Turkey". *Energy Policy*, 4479–4488.

Tasri et Susilawati . (2014). "Selection among renewable energy alternatives based on a fuzzy analytic hierarchy process in Indonesia". *Sustainable Energy Technologies and Assessments.*, 34-44.

Taylan et autres, O. A.-V. (2020). Assessment of energy systems using extended fuzzy AHP, fuzzy VIKOR, and TOPSIS approaches to manage non-cooperative opinions. . *Sustainability*, 2745.

Ulloa et autres, C. N. (2018). AHP-based design method of a lightweight, portable and flexible air-based PV-T module for UAV shelter hangars.. *Renewable Energy*, 767-780.

Valipour et Montazar . (2012). "Sensitive Analysis of Optimized Infiltration Parameters in SWDC model". *Advances in Environmental Biology*, 2574-2581.

Vishnupriyan et Manoharan . (2018). Multi-criteria decision analysis for renewable energy integration: A southern India focus. *Renewable energy*, 474-488.

Wang et autres. (2008). A fuzzy multi-criteria decision-making model for trigeneration system. *Energy Policy*, 3823–32.

Wang et autres. (2008). Integrated evaluation of distributed triple-generation systems using improved grey incidence approach. *Energy*, 1427–37.

Wang et autres. (2009). Weighting methodologies in multi-criteria evaluations of combined heat and power systems. *International Journal of Energy Research*, 1023-1039.

Wang et autres, B. K. (2010). “A decision model for energy resource selection in China”. *Energy Policy*, 7130–7141.

Wang et autres, B. S. (2019). Selecting sustainable energy conversion technologies for agricultural residues: A fuzzy AHP-VIKOR based prioritization from life cycle perspective. . *Resources,Conservation and Recycling*, 78-87.

Wang et autres, Y. X. (2020). Strategic renewable energy resources selection for Pakistan: Based on SWOT-Fuzzy AHP approach. *Sustainable Cities and Society*, 101861.

Wang et Poh . (2014). “A survey of integrated decision analysis in energy and environmental modeling”. *Energy.*, 691-702.

Wimmler et autres, C. H. (2015). “Multi-Criteria Decision support Methods for Renewable Energy Systems on Islands”. *Journal of Clean Energy Technologies.*, 185-195.

Yoe, C. (2002). Trade-Off Analysis Planning and Procedures Guidebook. Written for the US Army Corps of Engineers. *Institute for Water Resources.*

Zhuet et autres, G. N. (2020). A fuzzy rough number-based AHP-TOPSIS for design concept evaluation under uncertain environments. . *Applied Soft Computing*, 106228.