

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département de Génie de l'Environnement

Mémoire de Master en :

**Comparaison des Energies Renouvelables :
cout et rentabilité**

Présenté par :

Mlle BOURKAIB Nor El Houda

Présenté et soutenu publiquement le (24/09/2017)

Composition du Jury

Président	H.Grib	Professeur	ENP Alger
Examineur	M.DROUCHE	Professeur	ENP Alger
Encadreur	N. MAMERI	Professeur	ENP Alger

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE



Département de Génie de l'Environnement

Mémoire de Master en :

**Comparaison des Energies Renouvelables :
cout et rentabilité**

Présenté par :

Mlle BOURKAIB Nor El Houda

Présenté et soutenu publiquement le (24/09/2017)

Composition du Jury

Président	H.Grib	Professeur	ENP Alger
Examineur	M.DROUCHE	Professeur	ENP Alger
Encadreur	N. MAMERI	Professeur	ENP Alger

© Anes Abd El Madjid

Remerciement

En premier lieu je souhaite remercier mon encadreur, Pr N.MAMERI qui m'a dirigé pour réaliser ce travail.

Ensuite je souhaite remercier l'ensemble des membres du jury pour le temps et l'énergie qu'ils ont dédié à la lecture et à la correction de mon manuscrit.

Je tiens à remercier H.GRIB d'avoir accepté d'être le président de mon jury ainsi que M. DROUCHE d'avoir accepté d'être rapporteur de mon mémoire.

Les réalisations pratiques de ma Master n'auraient jamais vu le jour sans les conseils d'A. AKBI l'économiste du centre de développement des énergies renouvelables Bouzaria . Un grand merci à toi.

Merci Ilias CHAACHOUA pour ta disponibilité, tes compétences et ton aide.

Je vais finir mes remerciements par la famille, les amis .Merci d'être là et merci pour tout ce que vous avez fait pour moi.

الملخص

الهدف من هذا العمل هو تصميم ابعاد لنوعين من محطه توليد الطاقه الهولئيه و الشمسيه في ادرار لحساب كلفه الاستثمار و سعر كلفه واحد كيلو واط ساعي للطاقه الكهربيائيه الاتيه من كلتا المحطتين. لقد تحصلنا على كلفه استثمار متشابهه لكلتا المحطتين لكن سعر الكلفه مختلف المقدر ب 0.039 اوروللطاقه الشمسيه و0.045 اورو للطاقه الهوائيه. هذه النتائج تبين صلاحيه الطاقه الشمسيهفي هذه المنطقه.

الكلمات المفتاحيه

الطاقه الشمسيه الطاقه الهوائيه كلفه الاستثمار سعر الكلفه

Abstract

The objective of this thesis is to size two power stations wind and photovoltaic at Adrar in order to calculate the investment cost and the cost price of a 1 kWh of electric power comes from the two stations.

We obtained a similar investment cost for both types of power stations, but the cost price is different, estimating 0.039 € for solar energy and 0.045 for wind energy. These results show the advantages of photovoltaic energy in this site.

Key words

Solar energy, wind energy, investment cost, cost price

Résumé

L'objectif de ce mémoire est de dimensionner deux centrales électriques éolienne et photovoltaïque à Adrar afin de calculer le cout d'investissement et le prix de revient d'un 1 kWh d'énergie électrique provient des deux centrales.

Nous avons obtenu un cout d'investissement similaire pour les deux types de centrales, mais le prix de revient est différent, en estimant 0.039 € pour l'énergie solaire et 0.045 pour l'énergie éolienne. Ces résultats montrent les avantages de l'énergie photovoltaïque dans ce site.

Mots clés

Energie solaire, énergie éolienne , cout d'investissement, prix de revient

Table des matières

Liste des figures

Nomenclature

Introduction.....9

I Généralités sur les énergies photovoltaïques et éoliennes. **Erreur ! Signet non défini.**

I.1 Introduction 12

I.2 L'énergie renouvelable et sa situation en Algérie 12

I.3 Potentiel solaire en Algérie..... 13

I.4 Potentiel éolien en Algérie 15

I.5 Energie photovoltaïque..... 16

I.6 Energie éolienne 18

I.7 Système raccordé à un réseau 20

II Dimensionnement des installations et calcul économique de leurs cout d'investissement
..... 22

II.1 Présentation du site 22

II.2 Caractéristiques du générateur photovoltaïque..... 23

II.3 Production d'énergie photovoltaïque..... 23

II.4 La surface retenue par les panneaux photovoltaïques 24

II.5 Cout d'une centrale photovoltaïque 24

II.5.1 Calcul du prix des modules photovoltaïques..... 24

II.5.2 Prix du système d'intégration au bâti 25

II.5.3 Prix des onduleurs photovoltaïques..... 25

II.5.4 Coût des armoires électriques CC (courant continu) et CA (courant alternatif) 25

II.5.5 Coût des câbles électriques photovoltaïques 25

II.6 Calcul du prix de revient 26

II.7	Caractéristiques de l'aérogénérateur	27
II.8	Calcul d'énergie éolienne	27
II.9	Cout d'une centrale éolienne	28
II.9.1	Cout d'acquisition des éoliennes.....	28
II.9.2	Frais de génie civil	28
II.9.3	Investissement initial.....	28
II.10	Le prix de revient	28
Conclusion	30
Références	31

Listes des figures

Figure I-1: Phases du programme algérien des énergies renouvelables Objectifs cumulés par filière	13
Figure I-2: carte d'ensoleillement annuel en Algérie	14
Figure I-3: carte de la moyenne annuelle d'irradiation globale reçue sur une surface horizontale	14
Figure I-4: carte de la vitesse du vent en Algérie à 10 m en (m/s)	15
Figure I-5 : Principe de fonctionnement de la cellule PV	17
Figure I-6:Conversion de l'énergie cinétique du vent	18
Figure I-7 : système photovoltaïque raccordé à un réseau	20
Figure II-1:Irradiation globale moyenne mensuelle.....	22
Figure II-2: Production d'électricité journalière moyenne par la centrale photovoltaïque	24
Figure II-3 : Vitesse moyenne mensuelle du vent à 10 m de hauteur	27

Nomenclature

CA	Courant alternatif
CC	Courant continu
CDER	Centre de développement des énergies renouvelables
LCOE	Low cost of electricity
PV	Photovoltaïque

Introduction

L'énergie est considérée comme un élément fondamental des sociétés contemporaines. La consommation nationale d'énergie a connu une croissance accrue, principalement due à l'amélioration du niveau de vie des citoyens, qui s'est traduite par l'augmentation du taux d'équipement. De même que la réalisation de plusieurs projets d'infrastructures d'utilité publique a contribué à cette croissance. Afin d'assurer ces besoins énergétiques, des ressources énergétiques durables ont été développées [1].

Il existe différentes énergies durables alternatives aux énergies fossiles telles que : la biomasse, la géothermie, l'hydraulique, l'éolienne et photovoltaïque. Ces deux dernières sont les énergies les plus utilisées à l'échelle mondiale jusqu'à aujourd'hui et les plus abondantes en Algérie.

Le sud algérien et plus particulièrement le site d'Adrar dispose d'un fort potentiel énergétique solaire et éolien ce qui plaide en faveur du développement des systèmes à sources d'énergies renouvelables dans ces régions. D'une part, nous exploitons cette fortune énergétique, d'autre part, nous résolvons les problèmes rencontrés pour le transport de l'énergie électrique dans les zones éloignées. [2]

Les installations d'énergie solaire photovoltaïque doivent être dimensionnées pour qu'elles fournissent de l'énergie continuellement durant toute l'année. Ce qui exige la détermination du nombre de modules nécessaires pour le mois le plus défavorable de l'année. Et par conséquent, on assiste à un surplus d'énergie pour le reste des mois et à une augmentation considérable du coût du projet. Il est donc évident qu'un raccordement entre les centrales d'énergies renouvelables et le réseau est souhaitable. [3]

Pour faire le choix d'implantation d'une centrale photovoltaïque ou un parc éolien dans un site qui dispose d'un fort potentiel solaire et éolien. Il est nécessaire d'estimer le coût d'investissement et la rentabilité de chaque énergie.

Le travail présent a pour objectif de dimensionner un générateur photovoltaïque et un parc éolien raccordés au réseau. Ces deux centrales se situent à Adrar car cette dernière se distingue par son potentiel solaire ainsi que son potentiel éolien

Le but est d'estimer le coût d'investissements de ces deux centrales et la rentabilité de chacune afin de comparer les deux énergies et choisir la plus rentable à Adrar.

Le premier chapitre va nous permettre de présenter les énergies renouvelables et leurs situations en Algérie. Par la suite nous allons définir les deux énergies renouvelables étudiées dans notre travail ainsi que leurs avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre est consacré à calculer les couts des investissements et la rentabilité des installations photovoltaïques et éoliennes en passant par une présentation générale du site ou ces installations sont simulées.

Chapitre I

Généralités sur les énergies
photovoltaïques et éoliennes

I Généralités sur les énergies photovoltaïques et éoliennes

I.1 Introduction

L'intégration des énergies renouvelables dans le mix énergétique national constitue un enjeu majeur dans la perspective de préservation des ressources fossiles, de diversification des filières de production de l'électricité et de contribution au développement durable.

Dans le présent chapitre, nous allons présenter la situation des énergies renouvelables en Algérie en passant par son potentiel solaire et éolien ensuite nous allons présenter des petites généralités sur les deux énergies avec leurs avantages et inconvénients.

I.2 L'énergie renouvelable et sa situation en Algérie

La production d'électricité en Algérie est basée sur les combustibles fossiles (99,4% en 2006). Le 0,6 % restant provient des énergies renouvelables [4]. Les réalisations algériennes dans le domaine des énergies renouvelables sont très limitées en comparant avec l'actuelle évolution du parc d'énergie renouvelable mondial ou européen, qui a atteint des stades très avancés, malgré la position géographique stratégique du pays. [5]

Dernièrement, l'Algérie a lancé un programme national de développement des énergies renouvelables. Ce programme a connu une première phase consacrée à la réalisation :

- des projets pilotes et de tests des différentes technologies disponibles ;
- une meilleure connaissance du potentiel national en énergies renouvelables, notamment pour le solaire et l'éolien ;
- une baisse des coûts des filières photovoltaïque et éolienne qui s'affirment de plus en plus sur le marché pour constituer des filières viables à considérer.

La consistance du programme en énergie renouvelable à réaliser pour les besoins du marché national sur la période 2015-2030 est de 22 000 MW, dont plus de 4500 MW seront réalisés d'ici 2020. La réalisation du programme permettra d'atteindre à l'horizon 2030 une part de renouvelables de près de 27% dans le bilan national de production d'électricité et un volume de gaz naturel épargné par les 22 000 MW en renouvelables, atteindra environ 300 milliards de m³, soit un volume équivalant à 8 fois la consommation nationale de l'année 2014.

La répartition de ce programme par filière technologique, se présente comme suit :

- Solaire Photovoltaïque : 13 575 MW
- Eolien : 5010 MW
- Solaire thermique : 2000 MW
- Biomasse : 1 000 MW
- Cogénération : 400 MW
- Géothermie : 15 MW

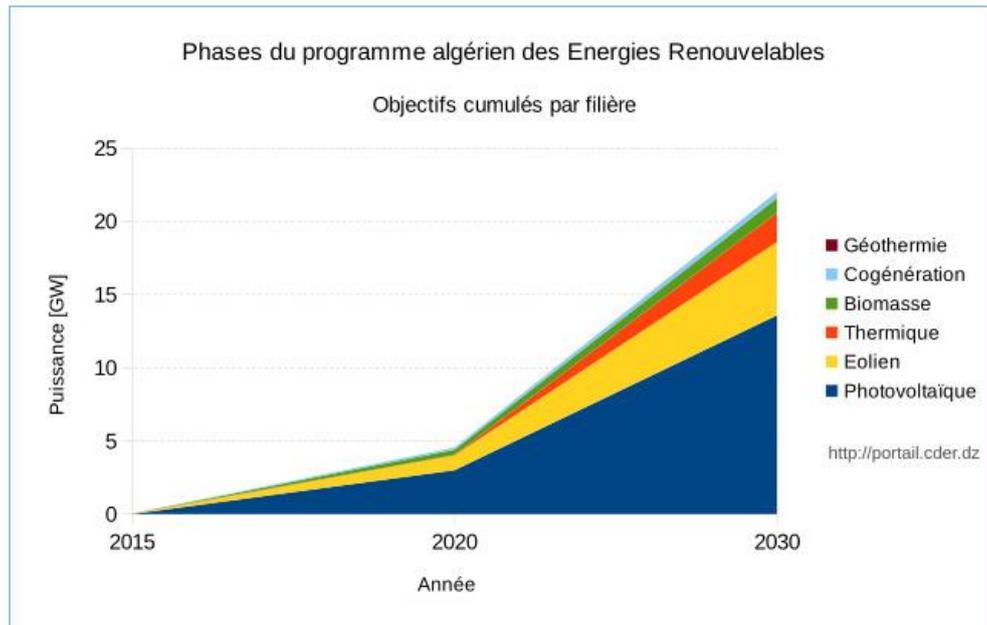


Figure I-1: Phases du programme algérien des énergies renouvelables Objectifs cumulés par filière [6]

I.3 Potentiel solaire en Algérie

L'Algérie possède le potentiel solaire le plus important de tout le bassin méditerranéen et dispose d'un des gisements solaires les plus élevés au monde avec 169440 TWh/an (évaluation effectuée par satellites par l'Agence Spatiale Allemande DLR), soit cinq mille fois la consommation nationale en électricité. [4]

Le Sahara constitue le gisement solaire le plus important en Algérie. Avec un ciel clair, quasiment sans nébulosité. La durée d'insolation est de l'ordre de 3 500 heures/an. Elle est toujours supérieure à 8 heures/jours. Elle peut atteindre jusqu'à plus de 12 heures/jour au centre du Sahara pendant l'été, De par sa position géographique, la durée d'insolation journalière ne présente pas d'importants écarts entre les différents mois de l'année, comme

c'est le cas des villes du nord du pays. Ceci permet une disponibilité égale durant toute l'année. [2]

L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1 m² est de l'ordre de 5 kWh sur la majeure partie du territoire national, soit près de 1700 kWh/m²/an au Nord et 2650 kWh/m²/an au Sud du pays. [4] La région d'Adrar est particulièrement ensoleillée et présente le plus grand potentiel de tout le pays. [2]

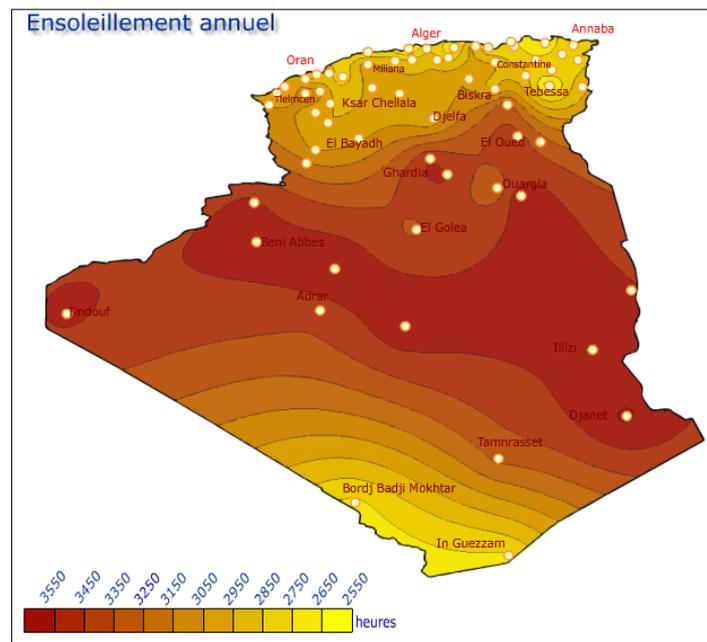


Figure I-2: carte d'enseillement annuel en Algérie [6]

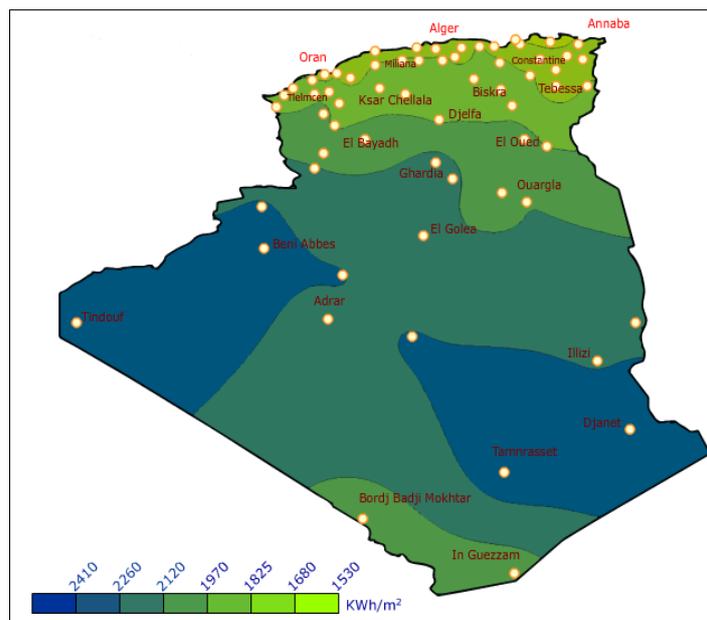


Figure I-3: carte de la moyenne annuelle d'irradiation globale reçue sur une surface horizontale [6]

I.4 Potentiel éolien en Algérie

La première expérience du pompage d'eau avec une éolienne en Afrique a été effectuée à Adrar en 1957 au Ksar Sidi Aissa, pour l'irrigation de 50 hectares, ce système éolien a été arrêté en 1962. [7]

En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le Nord est caractérisé par un littoral de 1200 km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental.

Le Sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien. La carte représentée ci-dessous (Figure I-4) montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-ouest, avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar.

Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est moins élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret ainsi que dans la région délimitée par Bejaïa au Nord et Biskra au Sud. En somme, le potentiel éolien est estimé à environ 37 TWh/an partagé entre: 1 TWh pour le Littoral, 4,5 TWh pour les Hauts plateaux et 31,5 TWh pour le Sahara. [8]

L'Algérie dispose d'un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production de l'énergie électrique, surtout dans le Sud du pays où les vitesses du vent sont plus élevées que celles du Nord. [4]

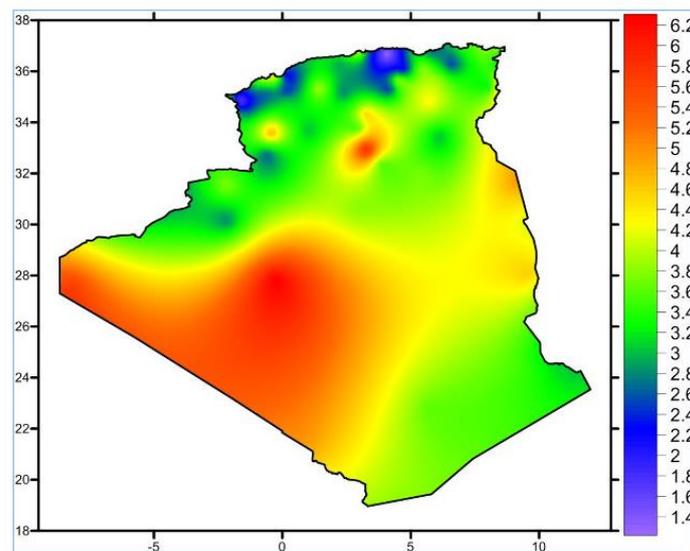


Figure I-4: carte de la vitesse du vent en Algérie à 10 m en (m/s)[6]

I.5 Energie photovoltaïque

L'énergie solaire vient de la fusion nucléaire qui se produit au milieu du Soleil. Elle se propage dans le système solaire et dans l'Univers sous la forme d'un rayonnement électromagnétique (des photons). La terre reçoit en permanence une puissance de 170 millions de gigawatt, dont elle absorbe 122 millions GW et réfléchit le reste. L'énergie totale absorbée sur une année est donc 3 850 ZJ (1 ZJ = 10²¹ J) ; par comparaison, la photosynthèse capte 3 ZJ, le vent contient 2,2 ZJ, et l'ensemble des usages humains de l'énergie, 0,5 ZJ dont 0,06 ZJ sous forme d'électricité. [4]

Grâce aux cellules photovoltaïques, on peut convertir les rayonnements solaires en électricité. Le français Edmond Becquerel fut le premier à avoir observé ce phénomène en 1839. Cet effet est illustré sur la figure I-5. Un photon d'énergie suffisante qui percute un atome peut arracher un électron et lui communiquer une certaine vitesse, ce qui permet de créer des charges électriques. Ces charges créées ont toute une chance de se recombiner. En constituant une jonction de deux zones de type opposé (jonction P-N), un champ électrique apparaît au voisinage de cette jonction qui maintient la séparation des charges positives et négatives. L'électron arraché sera accéléré par le champ électrique et parviendra éventuellement dans la zone de type N, de même la charge positive acquise par l'atome se propagera vers la zone de type P. Ainsi, une tension électrique apparaît entre les deux phases de la jonction et si elles sont reliées par un circuit extérieur, un courant s'y écoulera. Comme une pile chimique, la cellule photovoltaïque produira de l'électricité à courant continu. Leur association en série/parallèle donne lieu à un module ou panneau photovoltaïque. Son énergie produite sera fonction principalement de la lumière reçue par la photopile. [9] Cette dernière dépend de :

- l'énergie solaire envoyée par le Soleil (fluctuations décennales, saisonnières, et ponctuelles).
- la nébulosité (nuages, brouillards, etc.), qui est importante à l'équateur et plus faible en milieu intertropical.
- la latitude, la saison et l'heure, qui influent sur la hauteur du soleil et donc l'énergie par unité de surface au sol, ainsi que sur la nébulosité en fonction du climat local. [4]

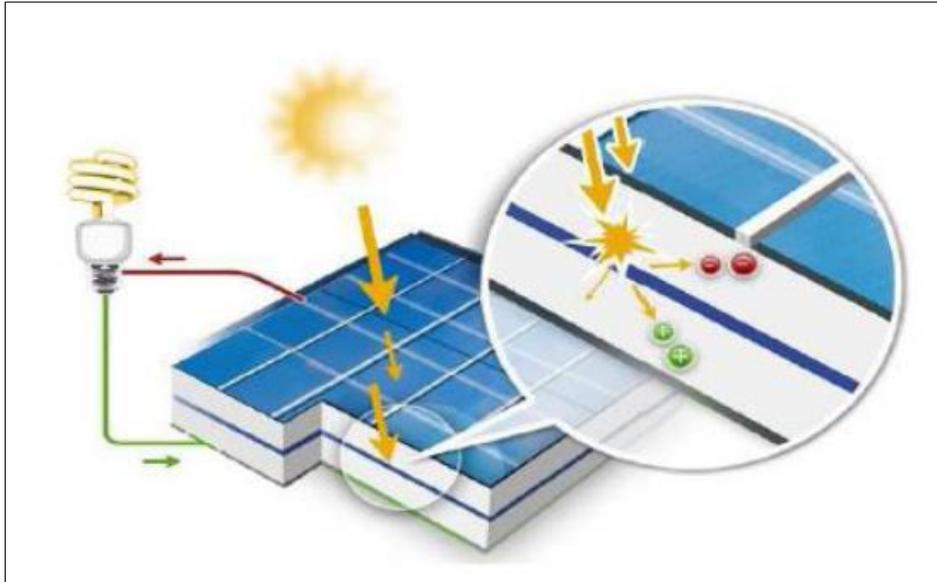


Figure I-5 : Principe de fonctionnement de la cellule PV [9]

Les avantages et les inconvénients du photovoltaïque [4, 5]

Avantages du photovoltaïque

- Le soleil est une source d'énergie propre et renouvelable, qui ne produit ni de gaz polluant ni des déchets toxiques.
- L'énergie solaire est inépuisable, contrairement aux énergies fossiles.
- Les endroits isolés deviennent autonomes.
- Les panneaux solaires sont recyclables.
- Les panneaux solaires sont simples et rapides à installer et ne présentent aucun danger au niveau de l'installation ou de l'exploitation.

Inconvénients du photovoltaïque

- La fabrication des panneaux solaires photovoltaïques relève de la haute technologie en demandant énormément de recherche et de développement. Cela augmente le coût des investissements dans ce domaine.
- Le rendement des panneaux photovoltaïques est de l'ordre de 20 %.
- Le niveau de la production d'électricité n'est pas stable et n'est pas prévisible et il dépend de l'ensoleillement d'où il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit.
- La durée de vie d'une installation photovoltaïque varie de 20 à 30 ans. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps en général les pertes de rendement sont estimées de 1 % par an.

I.6 Energie éolienne [10]

L'énergie éolienne dépend du site où la force du vent dépasse 15 km/ heure. La force du vent fait tourner les pales et entraîne le rotor qui transmet l'énergie reçue à un générateur qui produit de l'énergie électrique. Cette dernière est acheminée par un câble électrique souterrain au réseau public d'électricité. La transformation du vent en électricité s'effectue par la différence de pression entre les deux faces de la pale et crée une force aérodynamique qui met le rotor en mouvement.

Ce mouvement est généralement accéléré par un multiplicateur et l'énergie mécanique transmise est transformée en énergie électrique par le générateur. Le rotor du générateur tourne à grande vitesse, produit de l'électricité à une tension d'environ 690 volts. Cette électricité ne peut être utilisée directement, elle est traitée grâce à un convertisseur électrique qui se traduit par une augmentation de la tension à 20 000 volts. (Figure I-6)

Avec le développement de la technologie, les éoliennes modernes deviennent fiables et silencieuses. Elles développent des puissances supérieures au mégawatt et délivrent une énergie électrique à un prix très concurrentiel par rapport au nucléaire ou au thermique classique. Les techniques récentes cherchent de nouvelles turbines plus puissantes et plus régulières à des hauteurs de 300 m, 1200 m et même à 5000 m pour produire 100 fois plus d'électricité qu'une éolienne à basse altitude. Les pales et les piliers sont de forte résistance en matériaux composites ayant une légèreté et une solidité et évitent la corrosion en milieux agressifs.

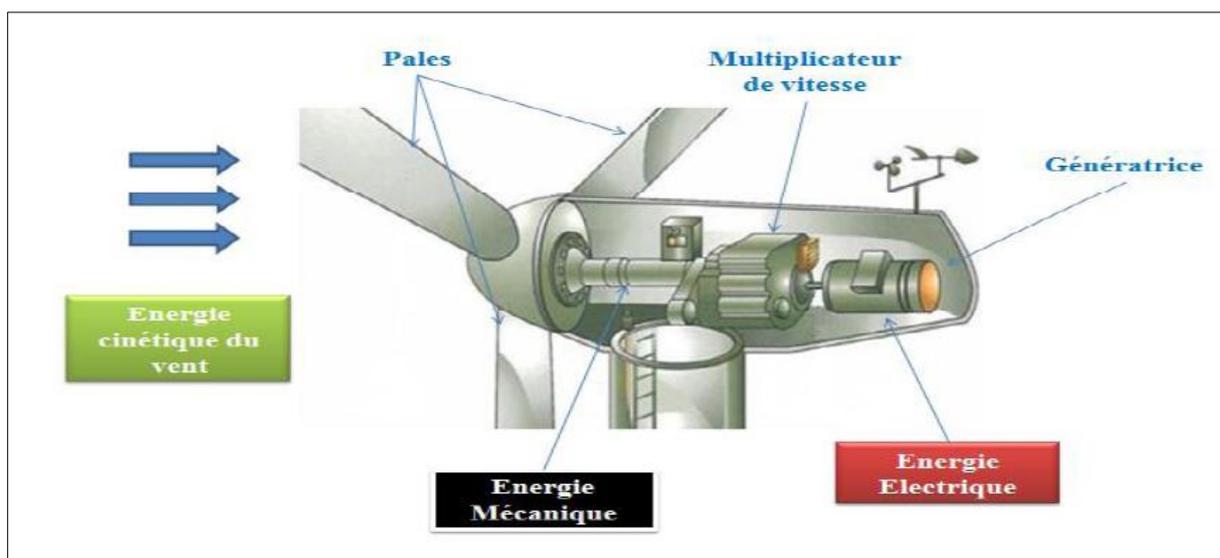


Figure I-6: Conversion de l'énergie cinétique du vent [9]

Avantages et inconvénients des énergies éoliennes

Avantages des énergies éoliennes [5]

Outre les nombreux avantages qu'elle partage avec les autres sources renouvelables d'énergie, l'exploitation de l'énergie éolienne présente une série d'avantages qui lui sont propres

- La période de haute productivité, située souvent en hiver où les vents sont plus forts, correspond à une période de l'année où la demande d'énergie est très importante.
- Les frais de fonctionnement sont limités en comparant avec le haut niveau d'habileté et la relative simplicité des technologies mises en œuvre.
- Ce type d'énergie peut être facilement intégré dans un système électrique existant déjà
- Les éoliennes sont rentables dans les régions bien ventées.

Inconvénients des énergies renouvelables [4, 5]

- la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante et sa qualité n'est pas toujours très bonne.
- Le vent est intermittent, et des périodes de grand froid se traduisant par une demande accrue d'énergie s'accompagnent fréquemment de vent faible, voire nul. Ce qui nécessite l'association au système éolien d'autres sources d'énergie renouvelable moins aléatoire ou des sources conventionnelles, on parle donc de «système Hybride», ou encore des systèmes de stockage.
- Son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences.
- Le design des fermes éoliennes doit être conçu de façon à réduire leur impact visuel, particulièrement dans les régions rurales où le potentiel éolien est souvent le plus grand.
- Son impact sur les oiseaux tel que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines.
- Le bruit émis par les turbines éoliennes à cause du passage de l'air dans l'hélice, et aussi de la rotation des éléments mécaniques.

I.7 Système raccordé à un réseau

Les systèmes de production d'énergie photovoltaïque connectés à un réseau sont une résultante de la tendance à la décentralisation du réseau électrique. Les systèmes connectés à un réseau réduiront la nécessité d'augmenter la capacité des lignes de transmission et de distribution. Un système connecté à un réseau produit sa propre électricité et achemine son excédent d'énergie vers le réseau, auprès duquel il s'approvisionne au besoin; ces transferts éliminent le besoin d'acheter et d'entretenir une batterie d'accumulateurs. Il est toujours possible d'utiliser ceux-ci pour servir d'alimentation d'appoint lorsqu'il survient une panne de réseau, mais ce n'est pas nécessaire. Les systèmes plus petits comportent un boîtier renfermant un petit convertisseur synchrone coordonné au réseau installé à l'endos de chaque panneau. Les systèmes plus importants comportent un grand onduleur qui peut être relié à plusieurs panneaux (tout comme dans le cas des systèmes non connectés). Ces deux dispositifs convertissent le courant continu en courant alternatif et ils synchronisent le courant de sortie à celui du réseau afin de ralentir le compteur électrique.

Si la puissance de sortie du système photovoltaïque est moindre que la consommation, le compteur ralentit. Au contraire, si elle l'excède, le compteur tourne à rebours et accumule un crédit. Ce crédit peut être utilisé auprès du service de distribution quand le soleil est absent. Expliqué autrement, le réseau de distribution tient lieu de batterie d'accumulateurs sans limite. (Figure I-7) [11]

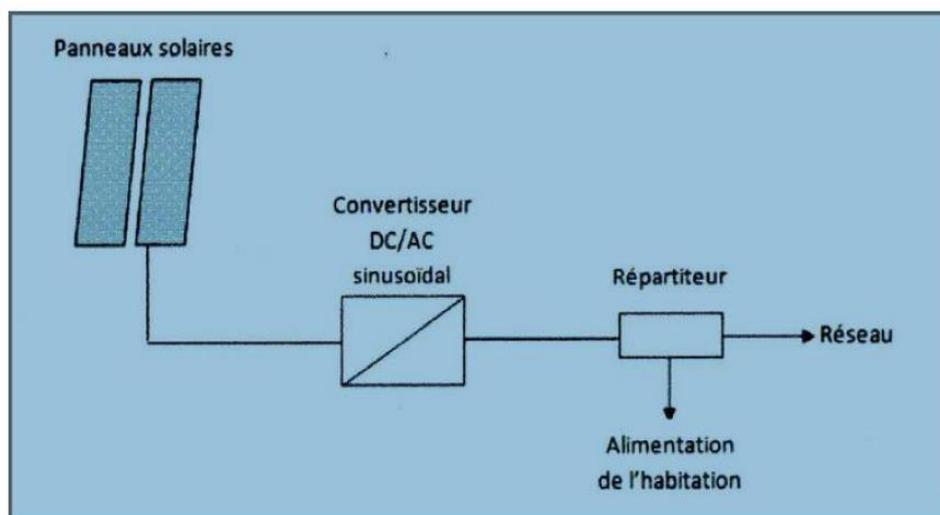


Figure I-7 : système photovoltaïque raccordé à un réseau

Chapitre II

Dimensionnement des installations et calcul
économique de leurs coûts
d'investissement

II Dimensionnement des installations et calcul économique de leurs coûts d'investissement

L'objectif de notre travail consiste à calculer le coût d'investissement des centrales photovoltaïques et éoliennes situées à Adrar pour déterminer quelle est la centrale la plus rentable.

II.1 Présentation du site

Adrar est doté d'un fort potentiel de rayonnement solaire, et la région est caractérisée par une saison d'été très chaude (Mars- Aout) avec une température moyenne mensuelle qui dépasse les 36 °C. Le site situe à 27°55'38" Nord, 0°11'12" Ouest, s'élève à 273 m au-dessus du niveau de la mer. Les valeurs moyennes mensuelles journalières de l'irradiation globale sur un plan horizontal et un plan incliné optimal pour la période 2001-2012 sont représentées dans la figure II-1.

D'après les résultats fournis par le système d'information géographique photovoltaïque (Joint Research Centre) [12] nous remarquons que l'irradiation moyenne journalière sur un plan horizontal est importante sur la période avril - août, comparativement aux autres mois de l'année, elle dépasse les 7 kWh/m².jour durant les mois de juin et juillet. Le degré de l'inclinaison optimal est estimé à 28° [12]

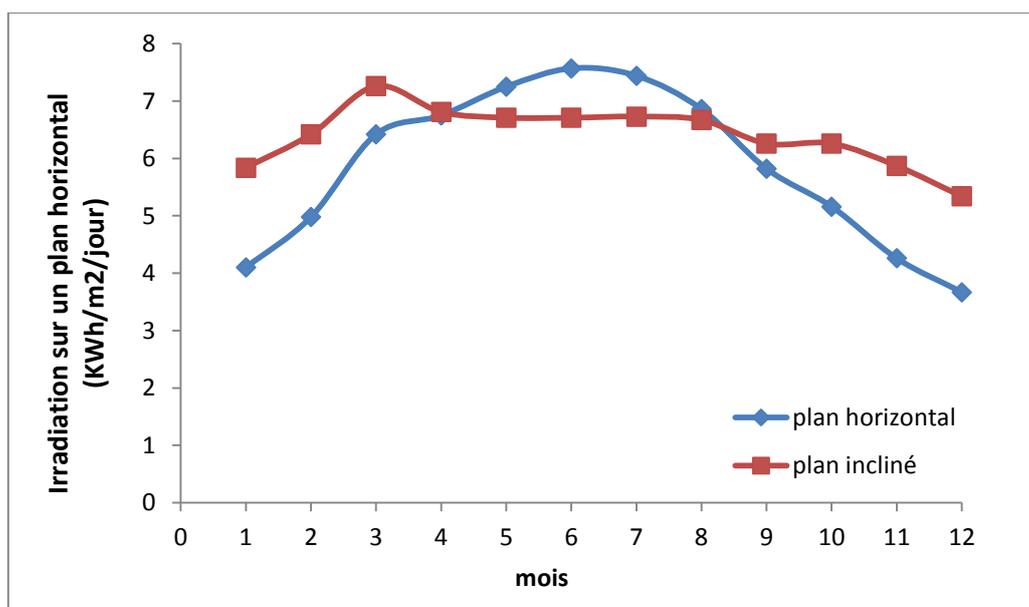


Figure II-1: Irradiation globale moyenne mensuelle [12]

II.2 Caractéristiques du générateur photovoltaïque

La centrale photovoltaïque étudiée a une puissance de 20 MW. Elle est composée de 100000 (calculé par la relation suivante : $20 \cdot 10^6 / 200$) panneaux photovoltaïques produites de silicium monocristallin (CEM200M-72 Condor). Nous avons choisi ce type de panneaux à cause de leurs caractéristiques qui sont citées comme il suit :

- Fabrication élaboré à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal de 72 cellules.
- Très bon rendement de 14 à 20 %.
- Durée de vie importante de 30 ans
- Puissance nominale de 200 W

II.3 Production d'énergie photovoltaïque

Une centrale photovoltaïque ne peut jamais fonctionner avec sa puissance nominale à cause de différentes pertes produites pendant le temps. Nous les citons au-dessous :

- Pertes estimées à cause de la température et des niveaux faibles de rayonnement: 14.9%
- Pertes estimées à cause des effets de la réflectance angulaire: 2.7%
- D'autres pertes (câble, onduleur, etc.): 14.0%
- Pertes conjuguées du système PV: 28.8%

Le système d'information géographique photovoltaïque (Joint Research Centre) [12] nous a fourni les informations d'irradiation du site d'Adrar et nous a calculé directement l'énergie journalière produite par notre centrale en rendant compte les différentes pertes. Le résultat obtenu est représenté sur la figure II-2.

Nous remarquons sur la figure II-2 que le mois le plus reproductible de l'énergie photovoltaïque est le mois de Mars malgré que le mois le plus irradié soit le mois de juin. Cela est expliqué par la baisse du rendement des panneaux photovoltaïques par l'augmentation de la température en été.

Une autre remarque, la variation de la production de l'énergie photovoltaïque varie légèrement pendant l'année. Ce qui rend le système plus stable.

La production d'énergie moyenne mensuelle annuelle est 90,7 MWh.

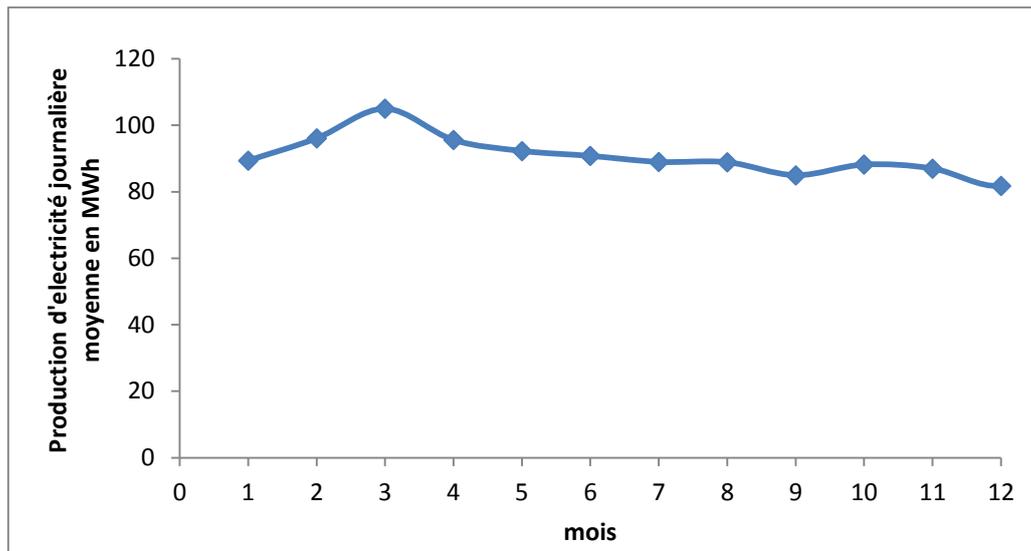


Figure II-2: Production d'électricité journalière moyenne par la centrale photovoltaïque [12]

II.4 La surface retenue par les panneaux photovoltaïques

La surface du panneau photovoltaïque est de 1.28 m^2

La surface totale de la centrale est $128000 \text{ m}^2 \approx 13 \text{ ha}$

II.5 Coût d'une centrale photovoltaïque [13]

Une installation photovoltaïque raccordée au réseau est composée des éléments suivants :

- Les modules photovoltaïques
- Un système d'intégration au bâti
- Les onduleurs photovoltaïques
- Une armoire électrique CC (courant continu) et une armoire électrique CA (courant alternatif)
- Des câbles électriques

Pour déterminer le coût d'une installation photovoltaïque, il est indispensable de connaître le prix de chacun de ces composants. Ensuite, viendra s'ajouter le coût de la main d'œuvre, qui représente une part essentielle dans la qualité d'une installation photovoltaïque.

II.5.1 Calcul du prix des modules photovoltaïques

Le prix d'un seul panneau est 154 €

Le prix totale est : $154 * 100000 = 15\,400\,000 \text{ €}$

II.5.2 Prix du système d'intégration au bâti

La surimposition correspond à un type de pose où le champ photovoltaïque n'assure pas l'étanchéité de la toiture (ou support des panneaux). Les modules sont directement fixés sur le support existant, sans les modifier.

Le prix estimé pour ce système est 0.15 €/ Wc

Le total du prix pour notre centrale est $20.10^6 * 0.15 = 3\ 000\ 000$ €

II.5.3 Prix des onduleurs photovoltaïques

Dans une installation photovoltaïque, les onduleurs permettent de transformer le courant continu issu du champ photovoltaïque en courant alternatif compatible avec le réseau.

En moyenne le coût des onduleurs, dans une installation photovoltaïque raccordée au réseau, est de 0.2 € par Wc. L'onduleur est à changer tous les 10 ans

Le total du prix est $20.10^6 * 0.2 = 4\ 000\ 000$ €

II.5.4 Coût des armoires électriques CC (courant continu) et CA (courant alternatif)

Les armoires électriques CC et CA sont obligatoires et permettent notamment d'assurer la sécurité des biens et des personnes autour de l'installation photovoltaïque.

En moyenne le coût des armoires électriques CC et CA est de 0.12 € par Wc (prix hors taxe).

Le prix de cet item est $20.10^6 * 0.045 = 900\ 000$ €

II.5.5 Coût des câbles électriques photovoltaïques

Pour relier le champ photovoltaïque aux onduleurs et aussi les onduleurs aux points de raccordement, des câbles électriques sont nécessaires.

En moyenne le coût des câbles électriques s'élève à 0.075 € par Wc (prix hors taxe).

Le prix total est $20.10^6 * 0.029 = 580\ 000$ €

Le coût d'investissement total est 24 000 000 €

II.6 Calcul du prix de revient

Quant au matériel, il est prévu pour durer au moins 25 ans. L'onduleur est cependant à changer tous les 10 ans. Le prix de revient est calculé pour un an.

Le prix des panneaux photovoltaïques : $15400000 / 25 = 616\ 000\ \text{€}$

Le prix du support des panneaux : $3000000 / 25 = 120\ 000\ \text{€}$

Le coût des onduleurs : $4000000 / 10 = 400\ 000\ \text{€}$

Le coût des armoires électriques : $900000 / 25 = 36\ 000\ \text{€}$

Le coût des câbles électriques : $580000 / 25 = 23\ 200\ \text{€}$

Frais d'entretien d'une installation photovoltaïque :

L'entretien d'une installation photovoltaïque est minime. Afin de produire un maximum d'électricité tout-au-long de l'année, les modules doivent rester propres. Ainsi, il est recommandé de nettoyer, deux fois par an, les modules photovoltaïques, en les arrosant simplement avec de l'eau. Les coûts de maintenance de la centrale s'élèvent à 0.15 €/kWc

Le total du prix est $20.10^3 * 0.15 = 3000\ \text{€}$

L'intérêt du capital investi :

Il est estimé de 6% du cout d'investissement par an.

Le total est $1\ 200\ 000 * 0.06 = 72\ 000\ \text{€}$

Le taux d'inflation :

Il est estimé de 8 % du cout d'investissement

Le total est $1\ 200\ 000 * 0.08 = 96\ 000\ \text{€}$

La somme totale : $1\ 366\ 200\ \text{€} \approx 1\ 400\ 000\ \text{€}$

La production d'énergie annuelle : $35880000\ \text{kWh} \approx 36\ \text{GWh}$

LCOE: 0.039 €/kWh

II.7 Caractéristiques de l'aérogénérateur

Cette étude est faite par GUERRI, directrice de divisions des énergies éoliennes CDER [14]

Le parc éolien de Kaberten d'une puissance de 10.2 MW est situé à 72 km au nord de la wilaya d'Adrar. Il est composé de 12 éoliennes de puissance unitaire 850 KW. Les études d'évaluation du potentiel éolien disponible en Algérie montrent que les vitesses de vent moyennes dans cette région sont de l'ordre de 6 m/s, à 10 m de hauteur. Les éoliennes étant installées sur des mats de 55 m de hauteur, la vitesse disponible à la hauteur du mat devrait être de l'ordre de 8 m/s.

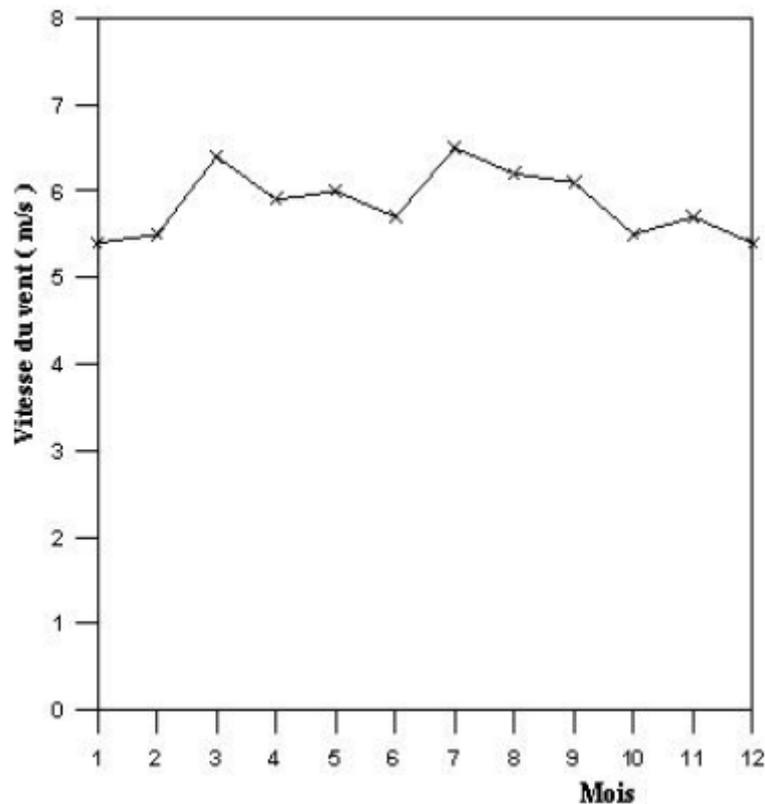


Figure II-3 : Vitesse moyenne mensuelle du vent à 10 m de hauteur [2]

II.8 Calcul d'énergie éolienne

Une analyse des données enregistrées par le système de contrôle-commande de la ferme éolienne a montré que l'énergie électrique fournie par le parc après une année de fonctionnement était de 19.5 GWh. Pour comparer cette centrale à celle du photovoltaïque nous devons estimer la production de l'énergie éolienne pour une centrale de puissance nominale égale à 20 MW. Pour le faire, nous utilisons la règle de trois et nous trouvons 38.23

GWh. Une production d'énergie éolienne très proche de la production d'énergie photovoltaïque. Cela confirme qu'Adrar dispose d'un potentiel solaire très fort aussi le potentiel éolien.

II.9 Cout d'une centrale éolienne

Les couts d'investissement comprennent principalement les couts d'acquisition des éoliennes et de leur transport sur site, les frais d'études du projet, les frais de génie civil, frais d'installation des éoliennes et des transformateurs, les frais de réalisation du réseau électrique interne à la ferme ainsi que les frais de raccordement au réseau de distribution d'électricité.

II.9.1 Cout d'acquisition des éoliennes

Ce cout varie avec la puissance des éoliennes et représentent plus de 70 % de l'investissement initial. Le cout spécifique des éoliennes pour notre centrale varie de 1014 €/kW à 1411 €/kW.

Le cout total de l'acquisition des éoliennes varie de 10 342 800 € à 14 392 200 € [14]

II.9.2 Frais de génie civil

Les frais de génie civil et autres frais sont évalués à 20 % du cout des éoliennes.

Le cout total des frais de génie civil varie de 2 168 560 € à 2 878 440 € [14]

II.9.3 Investissement initial

Le cout initial d'investissement est le cout d'équipement qui veut dire la somme du cout d'acquisition des éoliennes et les frais de génie civil

La somme varie de 12 4 00 000 € à 17 300 000 € [14]

Pour une centrale éolienne de 20 MW, son cout d'investissement varie de 24 510 000 € à 34 000 000 €.

II.10 Le prix de revient

Pour l'évaluation du prix de revient d'un 1 kWh, il est nécessaire de calculer le cout d'investissement pour une année. Ainsi que les frais de fonctionnement et maintenance, les frais des intérêts et inflations.

La durée de vie des équipements est estimée à 20 ans.

Cout d'investissement d'une année :

Le cout d'investissement pour une année est le rapport entre le cout d'investissement global et la durée de vie des équipements

Le cout varie de 625 000 € à 865 000 €

Frais de fonctionnement et maintenance :

Les couts de fonctionnement et maintenance sont estimés à 25 % du cout d'investissement d'une année

Le cout total varie de 156 250 € à 216 250 €

Frais des intérêts :

Nous admettons que le taux d'intérêt est 8 % du cout de l'investissement d'une année.

Le cout total varie de 50 000 € à 69 200 €

Frais d'inflation :

Le taux d'inflation est estimé à 6 % du cout de l'investissement d'une année.

Le cout total varie de 37 500 € à 51 900 €

La somme varie de 868 750 € à 1 202 350 €

Le prix de revient varie de 0.045 €/kWh à 0.06 €/kWh

D'après les résultats obtenus de la simulation des deux centrales photovoltaïque et éolienne, nous remarquons que le cout d'investissement des deux centrales est pratiquement le même. La seule différence est la durée de vie de ces deux centrales telles que les technologies photovoltaïques ont avancé plus pour atteindre une durée de vie de 25 ans comparativement aux technologies éoliennes. Cette différence a été traduite par une augmentation du prix de revient.

En comparant les prix de revient des deux centrales, nous constatons que le système photovoltaïque a un impact économique plus favorable par rapport à celui éolien.

Le prix de revient de 1 kWh d'énergie éolienne n'est pas très loin. Il peut se diminuer en augmentant l'efficacité des éoliennes à faible prix.

Conclusion générale

Dans cette étude nous avons présenté l'estimation de la centrale photovoltaïque et éolienne qui seront situées à Adrar. Le calcul de l'énergie produite par ces deux centrales est basé sur les résultats obtenus du système d'information géographique photovoltaïque pour les années 2001- 2012. Ce résultat nous confirme que le site d'Adrar est doté d'un potentiel éolien suffisant pour produire de l'énergie éolienne.

L'aspect économique des deux centrales montre que le système photovoltaïque est plus favorable que le système éolien. Ce résultat n'empêche pas de développer cette technologie en atteignant des résultats meilleurs que les résultats présents.

Références

- [1] «Programme de développement de l'efficacité énergétique à l'horizon 2030,» Agence Nationale pour le Promotion et la rationalisation de l'Utilisation de l'Energie , 2015.
- [2] S. Diaf, M. Haddadi et M. Belhamel, «Analyse technico économique d'un système hybride (photovoltaïque/éolien) autonome pour le site d'Adrar,» *Revue des Energies Renouvelables* , vol. 9, n° %13, pp. 127 - 134, 2006.
- [3] A. El Khadimi, L. Bchir et A. Zeroual , «Dimensionnement et Optimisation Technico-économique d'un Système d'Energie Hybride Photovoltaïque - Eolien avec Système de Stockage,» *Rev. Energ. Ren*, vol. 7, pp. 73-83, 2004.
- [4] A. ATOUI, «Modélisation Et Commande D'un Système Hybride Éolien-photovoltaïque Alimentant Un Site Isolé,» Mémoire de Magister : Automatique : Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2011.
- [5] DERBAL Massinissa et DEBBAH Nabih, «Étude et Commande d'un Système Hybride Eolien Photovoltaïque Connecté au Réseau avec Stockage. Contribution à l'Amélioration de la Qualité de l'Énergie,» Mémoire du projet de fin d'études: électrotechnique: Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2013.
- [6] [En ligne]. Available: <http://www.cder.dz>.
- [7] A. FERRAI, «Dimensionnement des Infrastructures Utilisant Diverses Sources énergétiques Renouvelables Potentielles pour l'Alimentation Electrique d'un Village,» Mémoire de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, 2008.
- [8] K. Abdelhamid, «Etude comparative entre le stockage à hydrogène et les batteries au plomb dans un système hybride (Photovoltaïque / Eolien) autonome,» Thèse de Doctorat en Sciences : Ecole Nationale Polytechnique , Alger, 2012.
- [9] LAMRAOUI Soufyane et TITOUCHE Nacer, «Étude et commande d'un système de

production hybride éolien/photovoltaïque,» Projet de fin d'études : électrotechnique: Ecole Nationale Polytechnique , Alger, 2014.

[10] S. Essaid, «Portail Algérien des Energies Renouvelables,» 8 février 2015. [En ligne]. Available: portail.cder.dz › Actualités › News.

[11] B. Mohammed, «Modélisation de systèmes énergétiques photovoltaïques et éoliens intégration dans un système hybride basse tension,» Thèse docteur en physique université Abou-bekr belkaid , Tlemcen.

[12] «Système d'information géographique photovoltaïque,» European Commission Joint Research Centre, [En ligne]. Available: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>.

[13] «GuidEnR Photovoltaïque informations photovoltaïques,» [En ligne]. Available: www.photovoltaïque.guidenr.fr/VIII_3_cout-onduleur-photovoltaïque.php.

[14] G. Ouahiba, «cout de production de l'électricité d'origine éolienne en Algérie,» bulletin des energies renouvelables N°39 du centrz de developpement des energies renouvelables, Alger, 2016.

[15] [En ligne]. Available: <http://www.cder.dz>.

