

UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA

Faculté des Sciences Appliquées
Département de Génie Electrique



Mémoire

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et technologies

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

Présenté par :

LAZAR Ramdane

BOUMIDOUNA Yacine

Thème:

**Effet économique et environnemental de
l'emplacement d'une ferme éolienne dans un réseau
électrique**

Soumis au jury composé de :

M^r LAROUCI Benyekhlef

MCB

Président

UKM Ouargla

M^{me} BENBOUZA Naima

MCB

Encadreur/rapporteur

UKM Ouargla

M^r BOUDJELLA Houari

MCB

Examineur

UKM Ouargla

Année universitaire 2020/2021

Remerciements

Nos sincères remerciements à Dieu le tout puissant pour le courage, la force, la volonté, la persévérance, et la santé qu'il nous a donnés afin de réaliser ce mémoire.

Nous tenons à remercier du fond du cœur nos parents qui ont su nous donner une bonne éducation qui nous ont permis d'arriver à ce stade d'études.

*Comme nous remercions notre promotrice, Dr **BENBOUZA Naima** pour son encadrement, sa disponibilité, son soutien et ses exigences.*

*Nous tenons à remercier les membres du jury Dr **LAROUCI Benyekhlef** et Dr **BOUDJELLA Houari** d'avoir accepté de lire et évaluer le travail.*

Enfin, nous remercions tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Ramdane&Yacine.

Dédicace

Au nom de Dieu le Miséricordieux

Je dédie ce travail à :

à Mes très chères parents

Grâce à leur gentillesse, leurs encouragements et leurs grands sacrifices, ils ont su créer une atmosphère affectueuse propice à la poursuite de mes études, aucune dédicace ne peut exprimer mon respect et mes sentiments profonds pour eux, je prie Dieu de les bénir, de veiller sur eux, dans l'espoir qu'ils le feront Je serai toujours fier de moi.

A mon partenaire Yacine qui a partagé ce travail avec moi.

Mes très chers frères.

A mes amis et toute la famille électrotechnique.

Ramdane.

Dédicace

Je dédie ce travail :

A ma chère mère, A mon cher père, Pour tous leurs sacrifices, leur amour, leurs encouragements et leurs prières.

A mes chers frères Fares et Omar Pour leur appui et leurs encouragements.

A mon partenaire Ramdane qui a partagé ce travail avec moi.

A mes grands parents.

A toute ma famille Pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

A tous mes amis.

Yacine.

Sommaire

❖ Remerciements

❖ Dédicace

❖ Sommaire

❖ Résumé

❖ Liste des figures

❖ Liste des tableaux

Introduction générale 1

Chapitre I : Contexte énergétique mondial et national

I.1.Introduction..... 3

I.2.Contexte énergétique mondial 3

I.3.Contexte énergétique Algérien 7

I.4.Politique nationale du développement des énergies renouvelables 8

I.4.1. Organismes et entreprises économiques actifs dans le domaine des énergies renouvelables
au niveau national..... 9

a) Les centres de recherche..... 9

b) Les Unités de recherche 9

c) Les Agences de recherche 9

I.4.2. Cadre législatif 10

I.5.Potentiel éolien en Algérie..... 10

I.5.1.Le vent en Algérie..... 10

I.6. Conclusion 13

ChapitreII : Energie éolienne

II.1. Introduction 15

II.2. Énergie éolienne 15

II.2.1. Définition de l'énergie éolienne 15

II.2.2. Principe de fonctionnement d'une éolienne 16

Sommaire

II.2.3. Avantages de l'énergie éolienne	16
II.2.4. Désavantages de l'énergie éolienne.....	17
II.3. Technologie éolienne	17
II.3.1. Les différents Types des turbines éoliennes	17
II.3.1.1. Eolienne à axe vertical	17
a) Les éoliennes Savonius.....	17
b) Les éoliennes Darrieus.....	17
II.3.1.2. Eoliennes à axe horizontal	18
II.3.1.2.1. Les différents composants d'une Eolienne à axe horizontale	19
II.3.2. Éoliennes à vitesse constante.....	21
II.3.3. Éoliennes à vitesse variable	22
II.3.4 Puissance mécanique d'une éolienne.....	23
II.7. Conclusion.....	24

Chapitre III : Etude de l'effet de l'intégration de l'énergie éolienne dans un réseau électrique.

III.1. Introduction.....	26
III.2. Formulation du problème.....	26
III.2.1 Etude économique	26
a) Fonction du coût de la production par éolienne	27
III.2.2 Fonction environnemental	28
III.3. Transformation de l'optimisation bi-objective en optimisation mono objective.....	28
III.4. Présentation de la méthode d'optimisation de l'essaim de particules PSO.....	29
III.4. 1.Optimisation de l'essaim de particules algorithmme	29
III.5.Application.....	33
III.5.1. Cas du réseau électrique sans éolienne.....	33
III.5.2. Cas du réseau avec la ferme éolienne.....	36

Sommaire

III.6. Conclusion	40
Conclusion Générale	42

❖ BIBLIOGRAPHIES

Résumé:

Ce travail consiste en l'étude de l'effet économique et environnemental de l'intégration d'une ferme éolienne dans le réseau électrique. L'étude consiste en l'optimisation de la fonction du coût de production et la fonction d'émission des gaz NOx dans le cas du réseau électrique choisi tel qu'il est, puis avec l'ajout de la production éolienne. La simulation est faite sous l'environnement MATLAB à l'aide de la méthode d'optimisation par l'algorithme de l'essaim de particules PSO. La comparaison des résultats des deux cas démontre l'efficacité de l'incorporation de l'énergie éolienne dans la production d'énergie électrique que ce soit de point de vue économique ou environnemental par la diminution remarquable et intéressante dans le coût de production et la quantité des émissions des gaz toxiques.

Mots clés: réseau électrique, ferme éolienne, l'algorithme PSO (Amélioration de l'essaim de particules), Impact économique et environnemental.

Abstract:

This work consists of studying the economic and environmental effect of integrating a wind farm into the electricity grid. The study consists of the optimization of the production cost function and the NOx gas emission function in the case of the electricity grid chosen as it is, then with the addition of wind generation. The simulation is done under the MATLAB environment using the PSO particle swarm algorithm optimization method. The comparison of the results of the two cases demonstrates the efficiency of the incorporation of wind energy in the production of electrical energy whether from an economic or environmental point of view by the remarkable and interesting reduction in the cost of production and the quantity of emission of toxic gases.

Key words: electrical network, wind farm, the PSO algorithm (Particle Swarm Optimization), Economic and environmental impact.

ملخص:

يتكون هذا العمل من دراسة الأثر الاقتصادي والبيئي لدمج مزرعة الرياح في شبكة الكهرباء. تتكون الدراسة من تحسين دالة تكلفة الإنتاج ووظيفة انبعاث غاز أكاسيد النيتروجين في حالة اختيار شبكة الكهرباء كما هي، ثم إضافة توليد الرياح. تتم المحاكاة في برنامج MATLAB باستخدام طريقة تحسين خوارزمية سرب الجسيمات PSO. توضح مقارنة نتائج الحالتين كفاءة دمج طاقة الرياح في إنتاج الطاقة الكهربائية سواء من الناحية الاقتصادية أو البيئية من خلال التخفيض الملحوظ والمثير للاهتمام في تكلفة الإنتاج وكمية انبعاث الغازات السامة.

الكلمات المفتاحية: شبكة كهربائية، مزرعة طاقة الرياح، خوارزمية PSO (تحسين سرب الجسيمات)، التأثير الاقتصادي والبيئي.

Liste des figures

Figure III. 4: Emission Nox obtenu par PSO et SGA.	35
Figure III. 5: coût total obtenu par PSO et SGA.	36
Figure III. 6 : Coût de production et Coût total obtenus par PSO dans les deux cas.	38
Figure III. 7 : Emissions NOx obtenu par PSO dans les deux cas.	39
Figure III. 8 : PL obtenu par PSO dans les deux cas.....	39

Liste des tableaux

Chapitre III :

Tableau III. 1 : Coefficients de la fonction coût total	34
Tableau III. 2 : Résultats optimaux cas de la fonction globale	34
Tableau III. 3 : Résultats optimaux	37
Tableau III. 4 : comparaisation des résultats optimaux.	38

Liste des Acronymes et Symboles

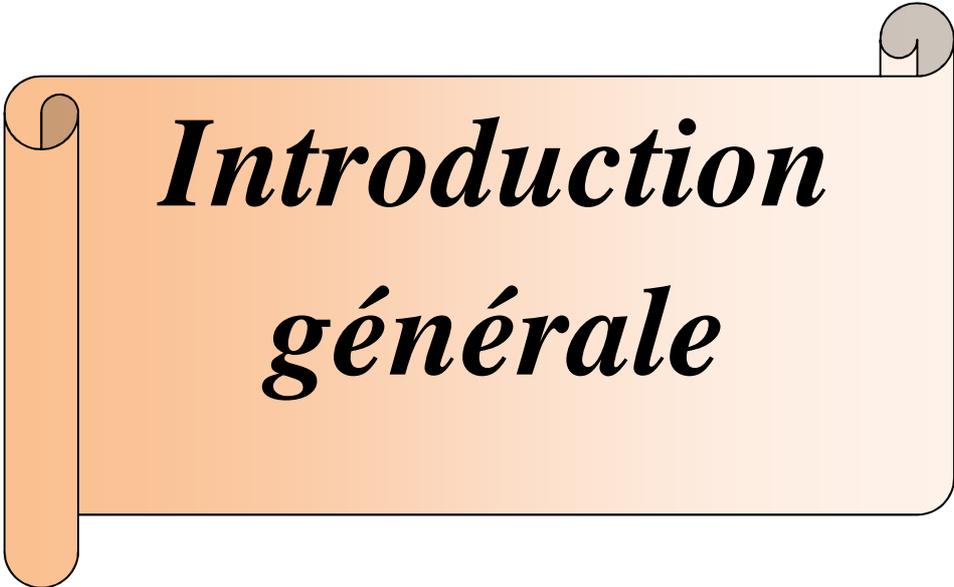
Abréviation utilisées

UTCF	Utilisation des Terres, leurs Changements et la Forêt.
PNM	les pays du nord de la Méditerranée.
PSEM	les pays du sud et de l'est de la Méditerranée.
CDER	Centre de Développement des Energies Renouvelables .
CDTA	Centre de Développement des Technologies Avancées .
UDTS	Unité de Développement de la Technologie du Silicium .
UDES	Unité de Développement des Equipements Solaires .
URERMS	Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien Adrar .
URAER	Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables .
ANDRU	Agence Nationale de Développement et de Recherche Universitaire .
ANVREDET	Agence Nationale de Valorisation des Résultats de la Recherche et du développement Technologique .
APRUE	Agence Nationale pour la Promotion et Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie.
ANDI	Agence Nationale du Développement et de l'Investissement .
ONS	Office National des Statistiques.
IANOR	Institut Algérien de Normalisation.
CDER	Centre de Développement des Energies Renouvelables.
SCE	Système de Conversion Eolien.
SGA	Simple Genetic Algorithm.
PSO	Particle Swarm Optimization.
Mtep	millions de tep .
KW	kilo watt.
MW	Méga Watt.

Liste des Acronymes et Symboles

Symbole

P_v	La puissance mécanique qui peut être extraite du vent.
C_p	est le coefficient de puissance aérodynamique.
ρ	la masse volumique de l'air ($1,225 \text{ kg/m}^3$).
R_p	le rayon de la surface active de l'éolienne .
V_v	la vitesse du vent.
V_d	la vitesse de déclenchement.
V_n	la vitesse nominale
V_M	la vitesse d'arrêt de la turbine.
P_n	la puissance nominale.
$F_{vj} (P_{vj})$	est la fonction du coût de la ferme éolienne.
P_{Gi}	la puissance générée.
P_{vj}	est la puissance générée par la ferme au noeud j.
A_i, B_i, C_i	Les coefficients de la fonction globale.
a_i, b_i, c_i	coefficients de coût.
n_g	nombre total de générateurs.
n_f	nombre total de fermes éoliennes.
d_j	le coefficient de coût propre à la fermes éoliennes.
P_d	Puissance active de charge totale.
P_L	Pertes actives totales dans le réseau.
$P_{Gi \min}$	Puissance minimale active du générateur.
$P_{Gi \max}$	Puissance maximale active du générateur.
$F_{thi} (P_{Gi})$	la fonction du coût du combustible.
$E_i(P_{Gi})$	est la fonction des émissions.
$\alpha_i, \beta_i, \delta_i$	sont des coefficients caractéristiques d'émission attachés à chaque groupe de production.
F_p	facteur pénalité des prix.



***Introduction
générale***

Introduction générale :

Face au contexte environnemental, économique et politique actuel, l'intégration des énergies renouvelables dans la part de la production d'énergie devient primordiale. Ces énergies renouvelables sont inépuisables et proviennent d'une source naturelle telle que le vent, l'eau, le soleil, et dont la caractéristique la plus importante est qu'il s'agit d'une énergie propre et respectueuse de l'environnement, car elle ne produit pas de gaz nocifs tels que le dioxyde de carbone, n'affecte pas négativement l'environnement et n'a pas d'impact négatif sur le niveau de température. Le marché des énergies renouvelables s'est considérablement développé ces dernières années, ce qui a amené de nombreux pays à revoir leur politique de développement en recourant à l'exploitation des énergies renouvelables qui produisent une énergie durable et respectueuse de l'environnement dont l'énergie éolienne est l'une de ces énergies qui est devenue une réalité mondiale incontournable.

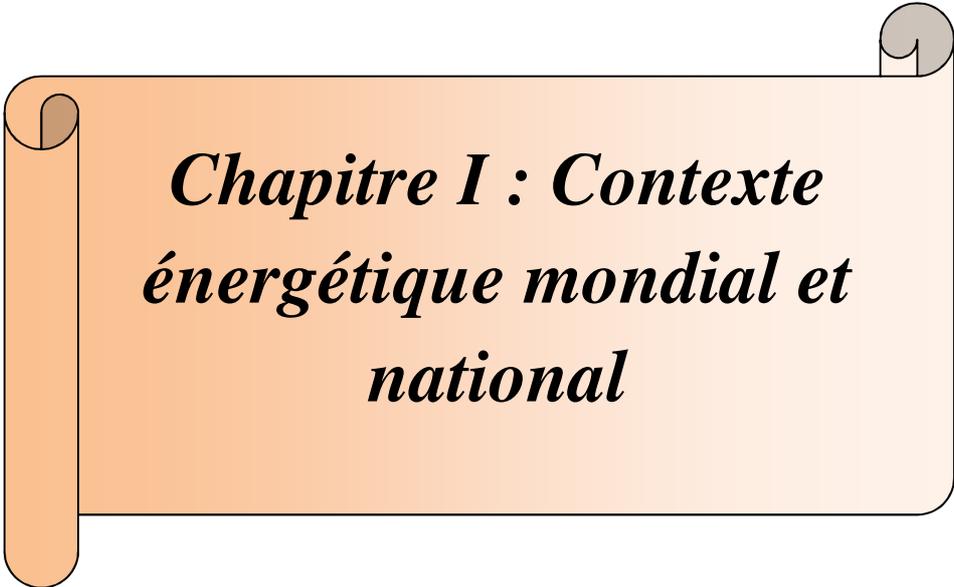
Le travail présenté dans ce mémoire est structuré comme suit :

Dans le premier chapitre, nous examinerons les défis énergétiques aux niveaux mondial et national ainsi que la stratégie nationale du développement des énergies renouvelables, nous donnerons un aperçu de la politique nationale envers ces nouvelles énergies en mettant l'accent sur le potentiel de l'énergie éolienne en Algérie.

Dans le deuxième chapitre, nous donnerons un aperçu sur les concepts de base de l'énergie éolienne ainsi que ses techniques, et les différents types d'éoliennes, à savoir les éoliennes à axe horizontal et l'axe vertical avec leurs différentes structures et applications.

Dans le troisième chapitre nous effectuerons une étude sur l'application de l'énergie éolienne dans la production d'électricité. Cette étude sera faite du point de vue économique et environnemental. Sous l'environnement MATLAB et à l'aide de l'algorithme d'optimisation de l'essaim de particules PSO nous effectuerons une optimisation de la fonction du coût des centrales de production dans un réseau électrique défini et de la fonction des émissions des gaz. La simulation sera faite pour deux cas ; pour le réseau donné tel qu'il est avec les centrales de production thermique puis sur le réseau avec l'intégration d'une ferme éolienne. Les résultats de simulations des deux cas seront comparés pour pouvoir mettre en évidence l'effet de l'incorporation de la production éolienne dans le réseau électrique du point de vue économique et environnemental.

Le travail sera finalisé par une conclusion générale sur l'étude et les résultats qui seront obtenus.



*Chapitre I : Contexte
énergétique mondial et
national*

I.1.Introduction:

Dans ce chapitre, nous discuterons le contexte énergétique aux niveaux mondial et national, et donnerons un aperçu de la politique nationale de développement des énergies renouvelables en mettant l'accent sur le potentiel de l'énergie éolienne en Algérie, et à partir de là, nous présenterons une évaluation des réalisations des parcs éoliens.

I.2.Contexte énergétique mondial:

Selon l'agence internationale de l'énergie (IEA,2017), la demande énergétique mondiale a connu une croissance soutenue, sur les 40 dernières années, passant de près de 6106 Mtep en 1973 à 13 647 Mtep, en 2015 (Figure I .1.). Elle a été multipliée par plus de 2.4 en 40 ans, ce qui correspond à un rythme de croissance annuelle moyen de l'ordre de 2.24 %. Cette tendance, si elle devait se prolonger sur les prochaines années, conduirait à plus que doubler la demande énergétique mondiale à l'horizon 2050 par rapport au niveau de l'année 2010. Le taux de consommation diffère d'un pays à un autre, il est déterminé par les conditions climatiques, le taux de croissance économique et le développement technologique.[1]

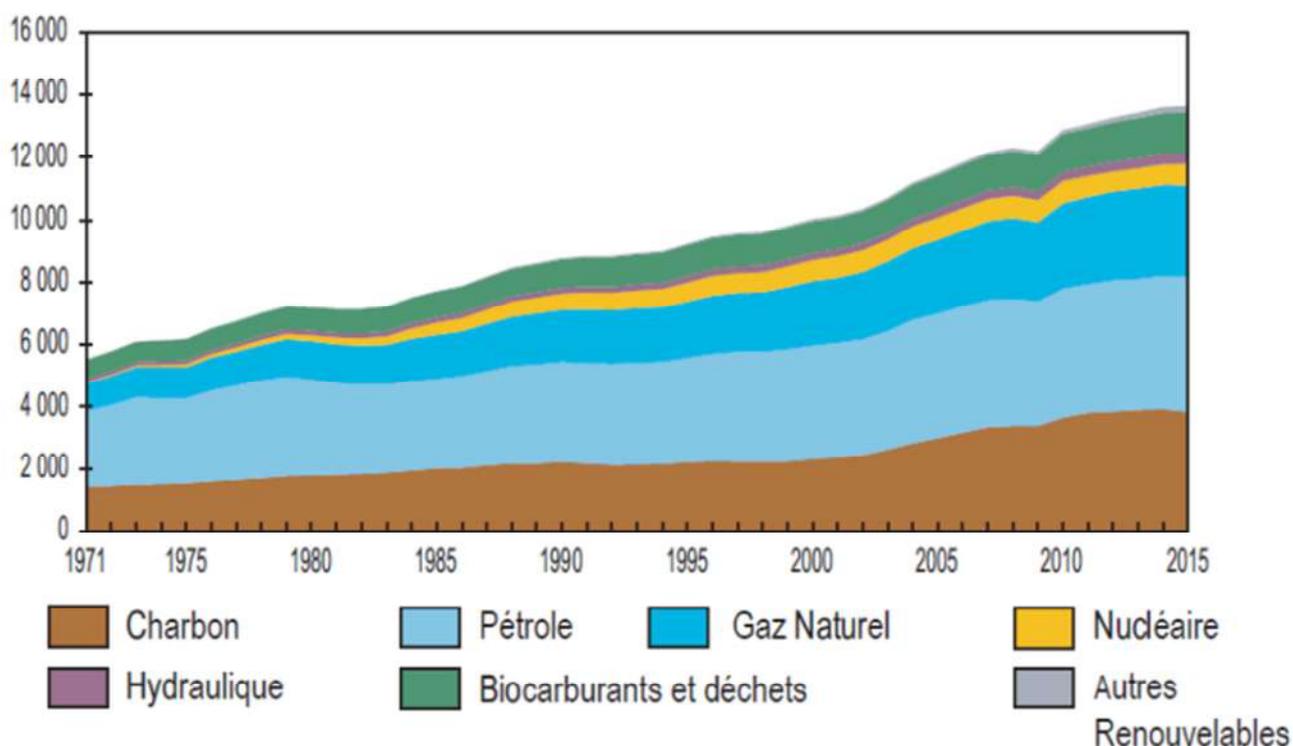


Figure I. 1 : Evolution de la consommation mondiale en énergie primaire en Mtep (IEA,2017).

La croissance de la demande énergétique est la principale cause du trop lent renouvellement des méthodes de production et de consommation des énergies. Les principaux pays pointés du doigt sont la Chine (ayant dépassé les Etats-Unis en 2009 comme plus grand consommateur énergétique du monde) et l'Inde, en pleine émergence. Les combustibles fossiles représentent en effet pour ces pays plus de la moitié de l'augmentation de la demande en énergie primaire.

L'un des enjeux cruciaux au niveau mondial est de réussir à faire que les pays en développement réalisent leur rattrapage économique avec l'intensité carbone (CO₂/PIB) la plus faible possible, en ne reproduisant pas les erreurs faites par les pays industrialisés. C'est un défi de taille qui implique des efforts très importants en termes d'amélioration de l'efficacité énergétique.

Selon le rapport WEO-2008, d'ici 2030, l'efficacité énergétique devrait représenter plus de 50 % des réductions d'émissions de CO₂ liées au secteur de l'énergie. La prépondérance de l'amélioration de l'EE comme levier d'atténuation des émissions de GES s'explique principalement par le fait que ces technologies sont pour la plupart déjà disponibles et comparativement moins coûteuses que les technologies de "décarbonisation".

Dans un nouveau contexte énergétique mondial caractérisé par des fortes contraintes de réduction des émissions en gaz à effet de serre, des résolutions importantes ont été prises dans les différents secteurs énergivores. Le secteur du bâtiment est, parmi les secteurs économiques, le plus gros consommateur mondial en énergie, représente une charge importante autour de 30% de la consommation d'énergie finale devant l'industrie et le transport qui consomme respectivement 31% et 35% de la consommation d'énergie finale (figure I.2.). Il est aussi responsable d'un cinquième des émissions de gaz à effet serre dans le monde. Il est classé devant le secteur de transport (14%), le secteur de l'énergie (11%) et le secteur de traitement des déchets (2%). L'industrie reste le secteur le plus émetteur de gaz à effet de serre (31%) suivi du secteur d'UTCF (Utilisation des Terres, leurs Changements et la Forêt) qui est responsable de (24%) (figure I.3.).[1]

■ Bâtiment ■ Transport ■ Industrie ■ Autres

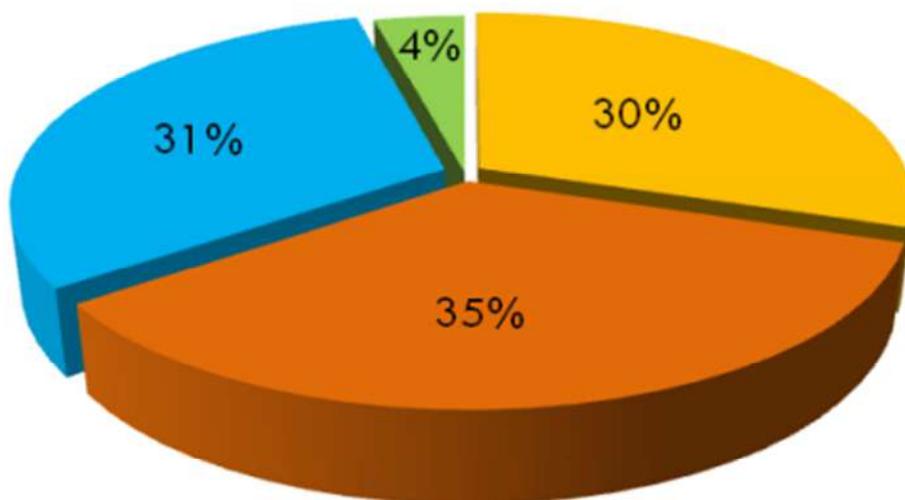


Figure I. 2 : Consommation d'énergie finale par secteur dans le monde en 2014 (IEA,2017).

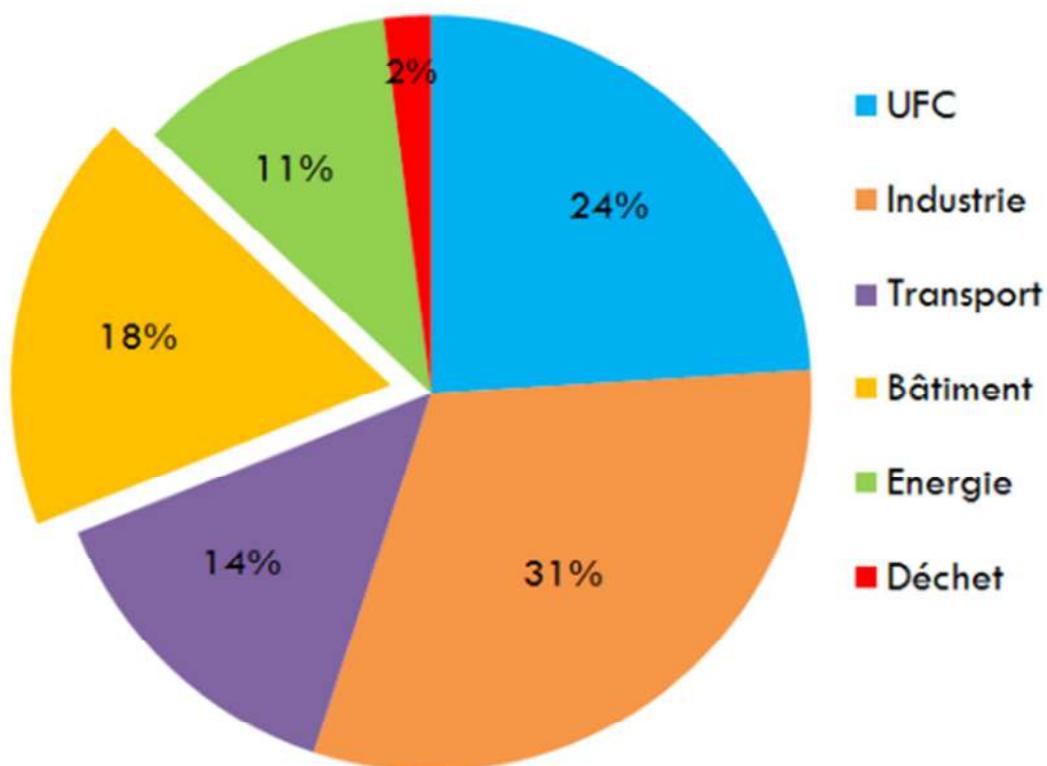


Figure I. 3 : Répartition des émissions mondiales de GES par secteur en 2014.

La consommation d'électricité dans le secteur du bâtiment représente 53 % de la consommation totale d'électricité au monde. Cependant il constitue une cible privilégiée des politiques d'efficacité énergétique, rendues indispensables à toutes les économies compte tenu des contraintes liées à la sécurité d'approvisionnement énergétique et aux changements climatiques.

En ce qui concerne les pays méditerranéens, qui regroupent les pays du nord de la Méditerranée (PNM) et les pays du sud et de l'est de la Méditerranée (PSEM), situés dans une zone considérée comme un véritable "hot spot" du changement climatique, la nécessaire action est d'autant plus urgente. Cette zone est soumise à une forte augmentation de la demande en énergie primaire qui devrait être multipliée par 1.5 d'ici 2030. Cette demande dans les PSEM devrait croître 4 à 5 fois plus rapidement que celle des pays de la rive nord jusqu'à représenter en 2030 plus de 42 % de la demande d'énergie du bassin méditerranéen contre 30 % en 2007.

Le secteur du bâtiment représente environ 38 % de l'énergie finale consommée (ce pourcentage varie entre 27 et 65 % dans les PSEM) et 21 % dans les PNM.

Face à cette inégale répartition des ressources, et pour anticiper au plus tôt une inexorable amplification des tensions énergétiques, il devient essentiel pour les PSEM d'intégrer dès à présent les notions d'efficacité énergétique et de maîtrise des consommations tout en continuant à développer les différentes énergies renouvelables. Des projets pilotes ont montré qu'avec un surcoût de 10 à 25 % à la construction, jusque 60 % d'économies d'énergie pouvaient être réalisées. Ce potentiel peut être atteint à travers le regroupement de plusieurs mesures, comme le montre la (figure I.4) issues d'une étude réalisée par Plan Bleu en 2009.[1]

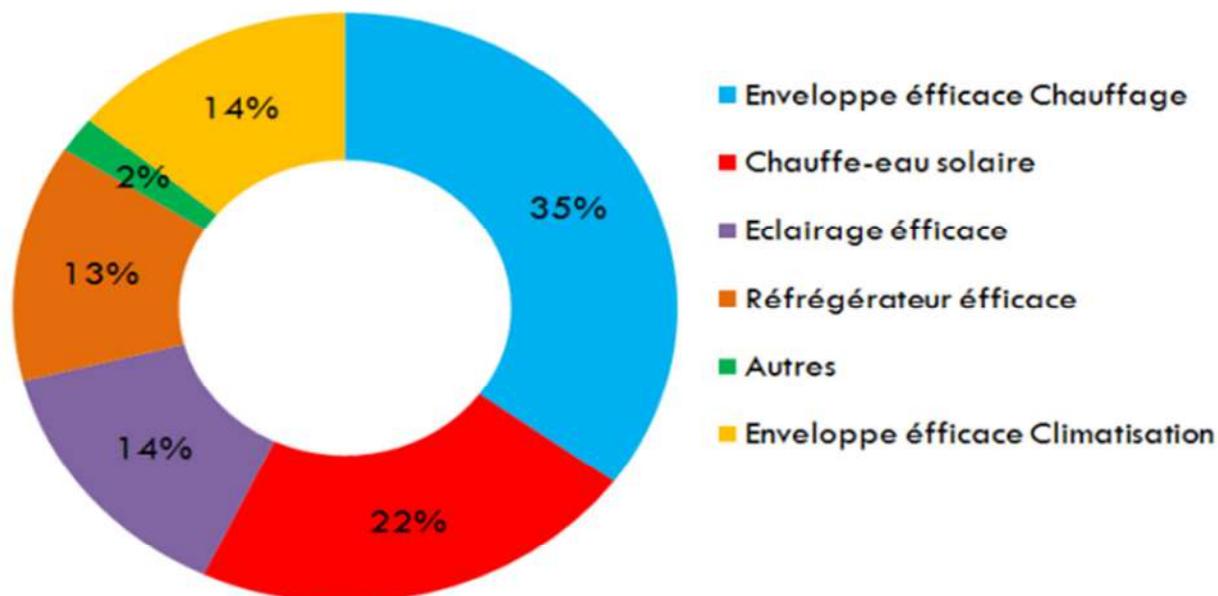


Figure I. 4 : Structure du potentiel d'efficacité énergétique dans la région de la Méditerranée du sud sur la période 2010-2030.

Notons que la mesure de l'amélioration des performances thermiques de l'enveloppe des bâtiments couvre 50% de ce potentiel, grâce aux économies d'énergie qu'elle implique pour les besoins de chauffage et de climatisation. Il en découle l'importance des mesures réglementaires relatives aux performances thermiques des bâtiments et à l'intérêt des techniques innovantes de construction en choisissant, voire élaborer, de nouveaux matériaux.[1]

I.3.Contexte énergétique Algérien:

La Société Algérienne de Production d'Electricité dispose d'un parc de production d'une capacité qui totalise une puissance installée de 6740 MW, composé de filières de types et de paliers de puissance différents. Les combustibles fossiles, et parmi eux majoritairement le gaz naturel dont le pays dispose en quantités importantes, constituent la première source de production d'électricité de l'Algérie. Ils assurent à eux seul 99.2% de la production totale du pays. Les sources renouvelables ne représentaient que 0.8% de la production renouvelable en 2011 et 98% de la production renouvelable est d'origine hydraulique.

Annuellement, la demande sur l'énergie électrique augmente de 5 à 7%. Depuis l'indépendance de l'Algérie, cette demande a connu une hausse de 400% en raison d'une démographie régulière (la population algérienne a triplée en cinquante ans). La demande de l'énergie est expliquée, par les responsables de la Sonelgaz (société nationale de l'électricité et du

gaz), par le changement des habitudes de consommation des algériens. Les foyers sont de plus en plus dotés de climatiseurs, congélateurs, fours à micro-ondes, ordinateurs, consoles de jeux vidéo, etc. ... (Figure I.5).[2]

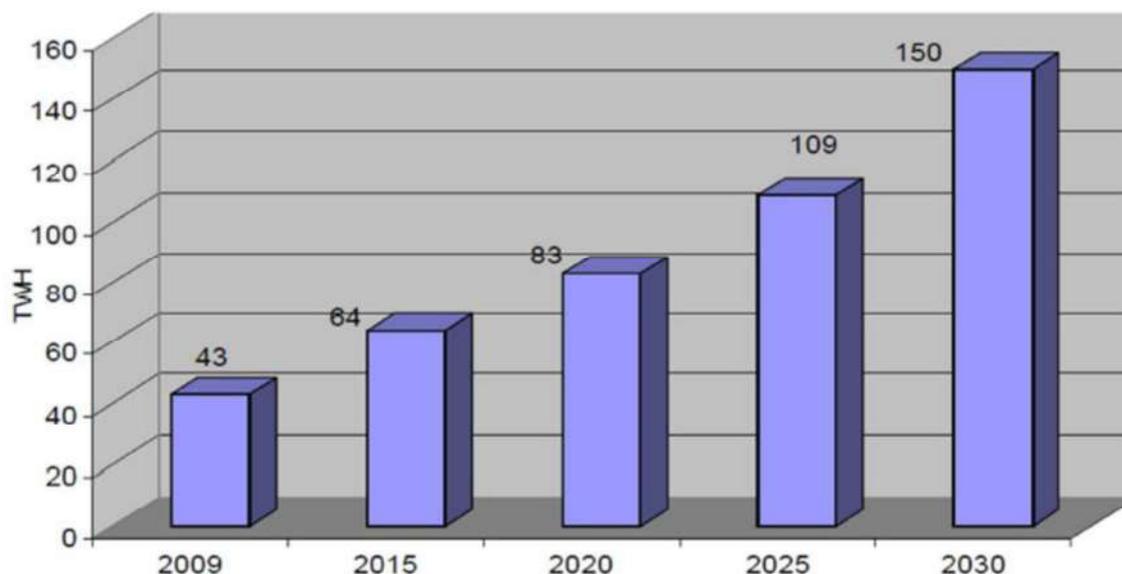


Figure I. 5 : **Perspective de la consommation énergétique algérienne.** [2]

L'Algérie souhaite aujourd'hui s'impliquer davantage dans le développement de ses filières renouvelables. L'ambitieux programme 2011-2030 prévoit ainsi l'installation de plus de 22000 MW de capacités renouvelables, dont 12000 MW seront dédiées à recouvrir la demande intérieure en électricité et 10000 MW seront destinés à l'exportation. D'ici à 2030, environ 40% de la production d'électricité allouée à la consommation nationale devraient être d'origine renouvelable.[2]

I.4. Politique nationale du développement des énergies renouvelables:

La politique nationale de promotion et de développement des énergies renouvelables est encadrée par des lois et des textes réglementaires. Les principaux textes régissant les énergies renouvelables sont : 1 la loi sur la maîtrise de l'énergie, 1 la loi sur la promotion des énergies renouvelables dans le cadre du développement durable, 1 la loi sur l'électricité et la distribution publique du gaz, avec son corollaire le décret exécutif relatif aux coûts de diversification. Cette politique s'appuie sur un ensemble d'organismes et d'entreprises économiques prenant, chacun en ce qui le concerne, le développement des énergies renouvelables.[3]

I.4.1. Organismes et entreprises économiques actifs dans le domaine des énergies renouvelables au niveau national:

La politique visant les énergies renouvelables s'appuie sur un ensemble d'organismes et d'entreprises économiques prenant chacun en ce qui le concerne le développement des énergies renouvelables [4]:

a) Les centres de recherche:

- Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) à Bouzareah Alger.
- Centre de Développement des Technologies Avancées (CDTA) à Alger.

b) Les Unités de recherche:

- Unité de Développement de la Technologie du Silicium (UDTS) à Alger .
- Unité de Développement des Equipements Solaires (UDES) à Alger.
- Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien Adrar (URERMS).
- Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables (URAER).

c) Les Agences de recherche:

- Agence Nationale de Développement et de Recherche Universitaire (ANDRU).
- Agence Nationale de Valorisation des Résultats de la Recherche et du développement Technologique (ANVREDET).
- Agence Nationale pour la Promotion et Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE).
- Agence Nationale du Développement et de l'Investissement (ANDI).
- Office National des Statistiques (ONS) : Institut Algérien de Normalisation (IANOR).
- Le réseau de la recherche scientifique : Actuellement, le réseau de la recherche scientifique sous tutelle compte dix-huit (18) établissements. Il regroupe dix (10) centres de recherche; cinq (5) unités de recherche et trois (3) agences de recherche en plus des laboratoires de recherche à compter six cents trente-neuf (639) laboratoires de recherche implantés au niveau des établissements universitaires.
- Le réseau universitaire algérien compte quatre-vingt-quatre (84) établissements d'enseignement supérieur répartis sur quarante-six wilayas (46), couvrant tout le territoire

national. Ce réseau est constitué de trente-six (36) universités, quinze (15) centres universitaires.

I.4.2. Cadre législatif:

La loi n°99-09: Cette loi favorise le développement des énergies renouvelables en l'inscrivant comme un des outils de maîtrise de l'énergie à travers les économies qu'elle permet de réaliser. Elle stipule que des avantages financiers, fiscaux et en matière de droits de douane peuvent être accordés pour les actions et les projets qui concourent à la promotion des énergies renouvelables.

La loi n° 02-01: Cette loi permet à la commission nationale de régulation de l'électricité et du gaz de prendre des dispositions en matière d'organisation du marché pour la promotion de la production d'électricité à partir des énergies renouvelables. Les producteurs utilisant les énergies renouvelables peuvent ainsi bénéficier de primes nommés coûts de diversification.

La loi n° 04-09: Cette loi prévoit l'élaboration d'un programme national de promotion des énergies renouvelables et la mise en place d'un observatoire national chargé de la promotion et du développement de l'utilisation des énergies renouvelables.[5]

I.5.Potentiel éolien en Algérie:

Les pas de l'Algérie dans le domaine des énergies éoliennes restent toujours réservés ou encore très lents comparé au développement rapide dans le monde. Cependant, l'Algérie dispose de tous les nécessaires pour le développement des énergies éoliennes, elle présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique.[6]

I.5.1.Le vent en Algérie:

Le vent est la source primaire de l'énergie éolienne. Son utilisation est en plein développement dans le monde, actuellement elle commence à être importante en Algérie. (La figure I.6) montre un exemple des régions ventées en Algérie d'après les données satellitaires du Laboratoire d'énergie éolienne du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER).[6]

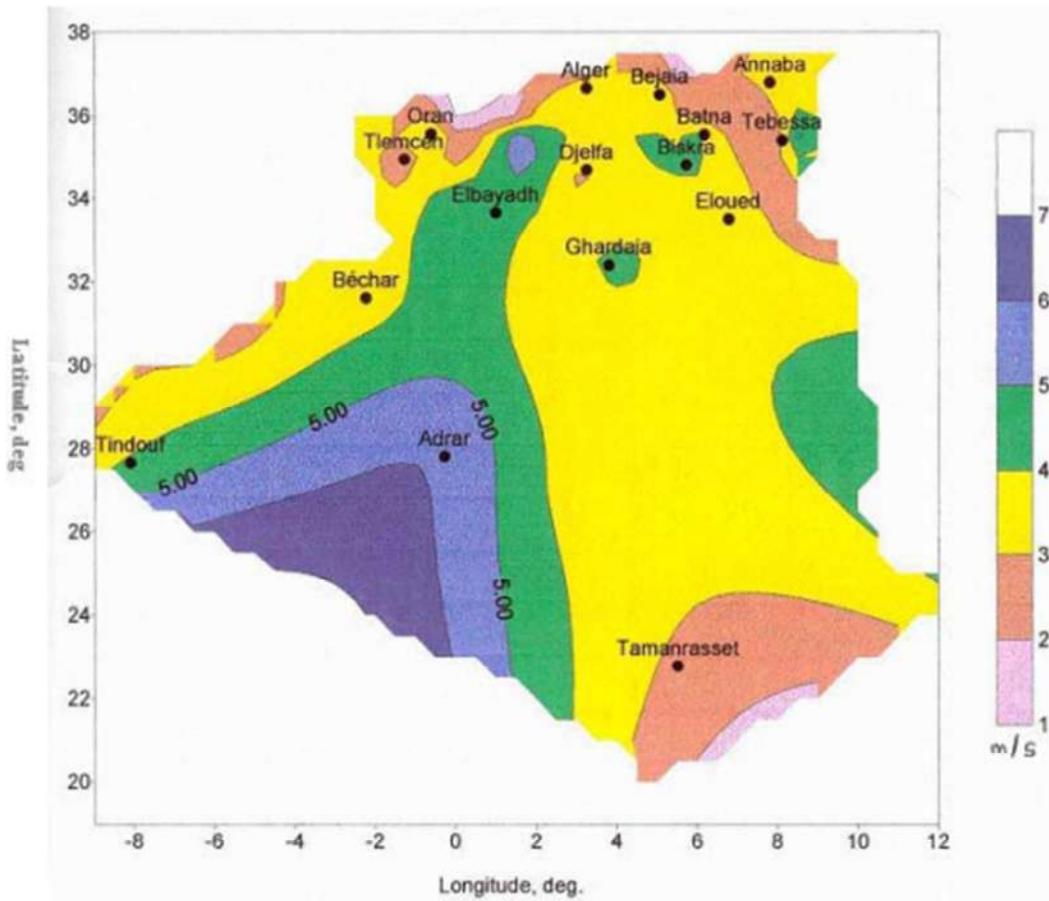
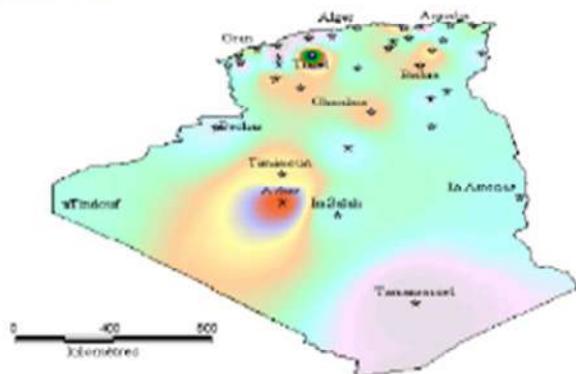


Figure I. 6 : Atlas du vent en l'Algérie.

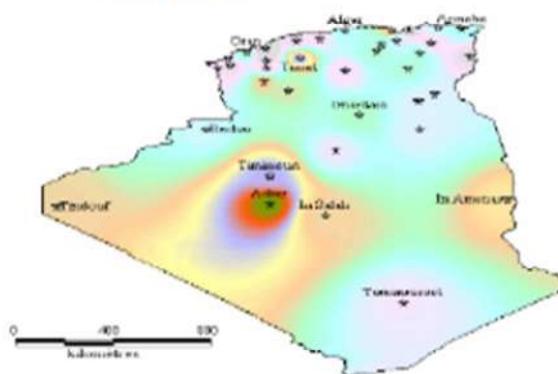
Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. Les atlas des vents saisonniers de l'Algérie sont représentés sur les (figures I.7) pour les quatre saisons (Eté, Printemps, Hiver et Automne).

Nous remarquons en général que les périodes estivales et printanières sont plus ventées que le reste de l'année.[6]

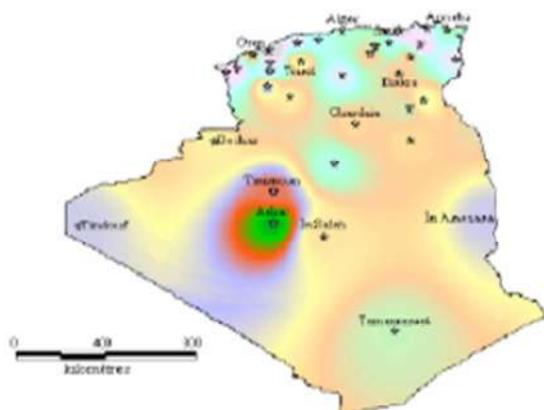
Hivers



Automne



Eté



Printemps

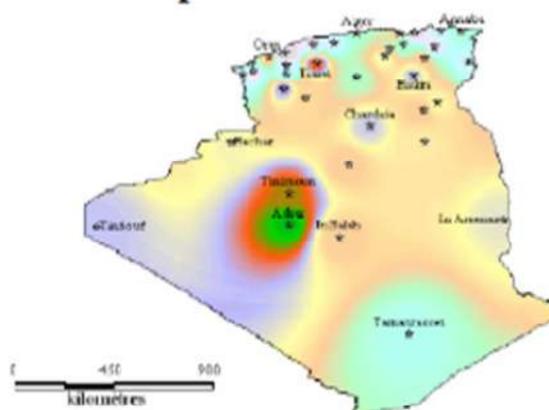


Figure I. 7 : Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol.

L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées.

Les éoliennes peuvent être installées pour produire de l'électricité, que ce soit raccorder à des réseaux électriques ou pour des sites isolés ou par hybridation de centrales diesel existantes ou nouvelles par des systèmes photovoltaïques ou éoliens. Un grand projet a été lancé en 2010 d'une ferme éolienne de 10 MW a 70 km d'Adrar ville (figure I.8), ainsi que d'autres éoliennes de pompage dans plusieurs régions isolées.[6]



Figure I. 8 : Adrar : la ferme éolienne de Kabertene.

I.6. Conclusion :

À travers ce dont nous avons discuté dans ce chapitre, il est apparu clairement que la transition énergétique vers les énergies renouvelables n'est plus optionnelle, mais est devenue nécessaire, car l'avenir sera orienté vers elle, et la politique nationale doit se concentrer sur son exploitation et son développement. Pour remédier aux futurs déséquilibres énergétiques sur les marchés locaux et étrangers.



Chapitre II :
Energie éolienne

II.1. Introduction:

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Ce chapitre sera consacré à la présentation de la filière de l'énergie éolienne.

II.2. Énergie éolienne:

II.2.1. Définition de l'énergie éolienne:

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (figure II .1).

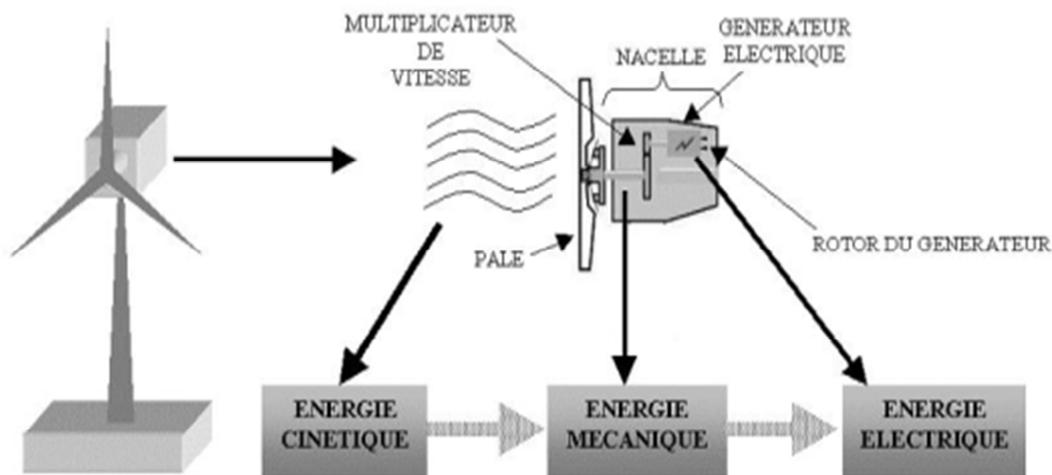


Figure II. 1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

Le SCE (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique. Selon la (figure II .2).[7]

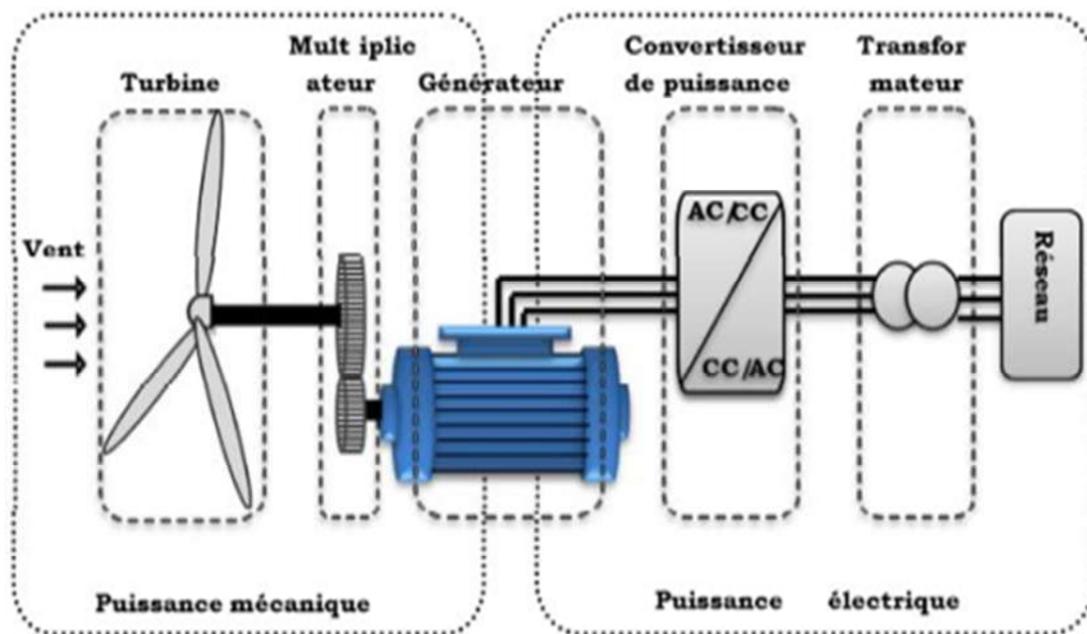


Figure II. 2 : Principaux organes du système de conversion éolien.

II.2.2. Principe de fonctionnement d'une éolienne:

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par une génératrice.[7]

II.2.3. Avantages de l'énergie éolienne:

Les avantages cités ci-dessus permettent à l'éolienne d'être une bonne alternative aux sources d'énergies fossiles. Ils sont récapitulés comme suit [8]:

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable et respecte l'environnement.
- C'est l'énergie la moins chère des énergies renouvelables.
- La production d'énergie éolienne ne produit pas d'émission de CO₂.
- L'énergie éolienne ne présente pas de risque comme l'énergie nucléaire.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie.
- En fonctionnement, les éoliennes peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.

II.2.4. Désavantages de l'énergie éolienne :

Parmi les inconvénients de l'énergie éolienne on cite [8]:

- L'impact visuel.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques.
- La puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne.
- Le bruit mécanique et l'impact sur les oiseaux.

II.3. Technologie éolienne :

II.3.1. Les différents Types des turbines éoliennes:

Les turbines éoliennes se subdivisent en éolienne mécanique utilisée pour le pompage de l'eau et en éolienne aérogénérateur qui fournissent de l'électricité injectée dans le réseau ou stockée dans les batteries.

On peut distinguer deux architectures principales d'éolienne : turbines à axe vertical et turbines à axe horizontal.[8]

II.3.1.1. Eolienne à axe vertical:

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour la production de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les oranges de commande et le générateur au niveau du sol ce qui facilite l'accessibilité et le de dépannage en cas disfonctionnement.

Néanmoins elles restent marginales, peu utilisées et même abandonnées à cause de leurs faibles vitesses, des turbulences qui affectent le capteur d'énergie situé au près du sol et la surface importante qu'elles occupent au sol.

Les éoliennes à axe vertical se subdivisent également en deux catégories :

a) Les éoliennes Savonius:

Qui démarrent seules, mais ont une médiocre efficacité (figure II.3.a).

b) Les éoliennes Darrieus :

Dont le fonctionnement est plus complexe, elles n'ont pas de couple à l'arrêt même par vent important mais elles ont une efficacité comparable à l'éolienne horizontale rapide (figure II.3.b).[8]



Figure II. 3: a) Eolienne Savonius

b) Eolienne Darrieus

II.3.1.2. Eoliennes à axe horizontal:

Elles sont constituées de plusieurs pales à la manière des ailes d'avions pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Celles destinées à la production d'électricité ont un nombre de pales variant entre 1 et 3 (figure II.4). Le rotor tripale est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le cout et la vitesse de rotation du capteur éolien.

Ces éoliennes sont plus utilisées que celles à axe vertical, vu leur cout moins important et elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques.[8]



Figure II. 4: Eolienne à axe horizontale.

II.3.1.2.1. Les différents composants d'une Eolienne à axe horizontale :

L'éolienne est constituée généralement des éléments mécaniques et électriques qui sont illustrée sur la figure II.5 et la figure II.6.[8]

- **La fondation :** elle doit être solide pour assurer la résistance de l'ensemble en cas de grand vent et/ou en cas de conditions de givrage.
- **Le mat ou la tour :** c'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier de l'énergie cinétique maximal du vent et pour éviter les perturbations.
- **Le rotor :** le rotor de l'aérogénérateur est constitué de pales qui sont elles-mêmes montées sur un moyeu. Le rôle essentiel du rotor est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le rendement maximal du rotor est d'environ 59% (limite de Betz).
- **La nacelle :** La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique (figure II.6). Les éléments regroupés sont :

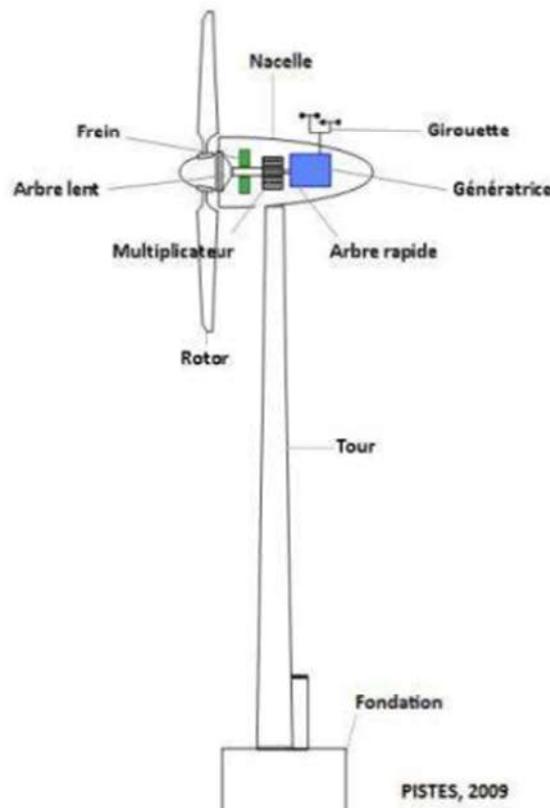
- **Multiplicateur** : il sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique.
- **Le système de refroidissement** : il se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice, et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.
- **La génératrice électrique** : elle est l'élément principal de la conversion mécano-électrique. Généralement, c'est une machine asynchrone à cage ou à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre 600 KW et 5 MW.
- **L'arbre lent** : il relie le moyeu au multiplicateur, il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.
- **L'anémomètre et La girouette** : l'anémomètre mesure la vitesse du vent et la girouette est un composant qui indique la direction du vent. L'information est transmise au

un

deux

- **Le**

le



système d'orientation via système de contrôle électronique pour ces composants.

système d'orientation : il permet d'orienter l'éolienne selon la direction du vent car il ne souffle pas toujours dans le même sens.

Figure II. 5: Les différentes composantes d'une éolienne.

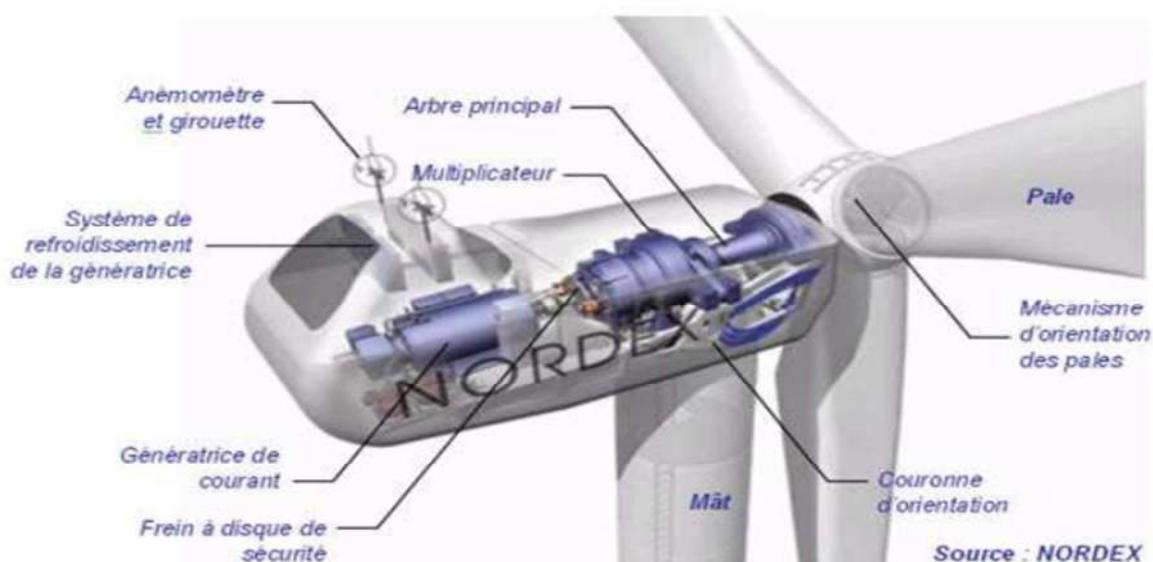


Figure II. 6: La nacelle.

II.3.2. Éoliennes à vitesse constante:

Les éoliennes à vitesse fixes sont la première à avoir été développées. Dans cette technologie le générateur est directement couplé au réseau. Sa vitesse mécanique est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles du générateur. La technologie inhérente aux éoliennes à vitesse fixe est bien maîtrisée. En effet c'est une technologie qui a fait preuve d'une simplicité d'implantation, une fiabilité et un faible coût. Cela permet une installation rapide de centaine de KW de générateur éolien. Cependant avec la mise en place du programme de projets d'éolienne dont la puissance est supérieure au MW, ce sont les éoliennes à vitesse variable qui se développent à l'avenir pour cette gamme de puissance. La configuration à vitesse fixe peut être représentée d'une manière simplifiée par le schéma de la figure II.7 la chaîne de conversion de l'énergie éolienne est composée de la turbine. Le multiplicateur de vitesse et de la génératrice.[9]

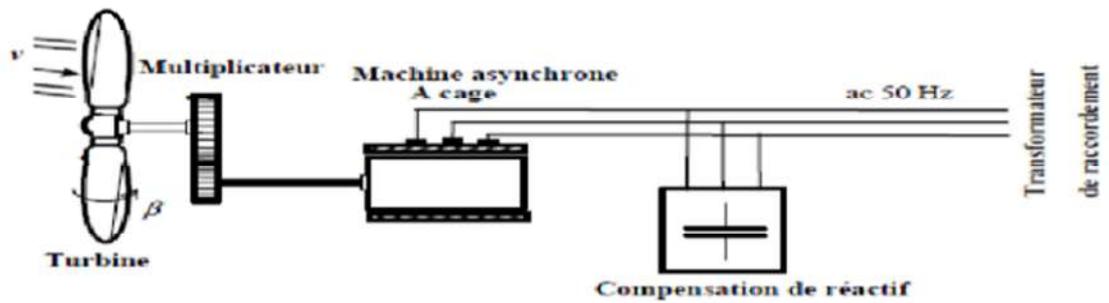


Figure II. 7:Éolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage.

II.3.3. Éoliennes à vitesse variable:

Les deux structures existantes des éoliennes à vitesse variable sont présentées sur la figure II.8. Est basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques. La configuration de la figure II.9.est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné.la vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance situé au circuit rotorique.[9]

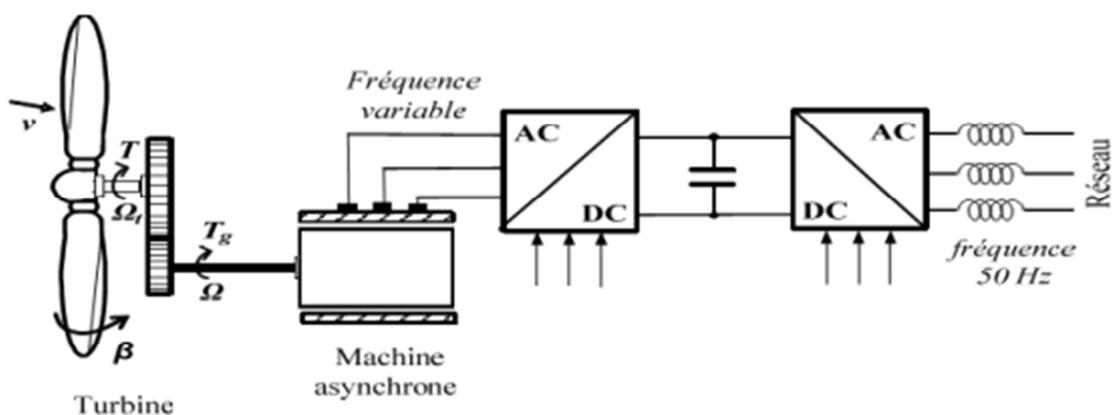


Figure II. 8:Éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone.

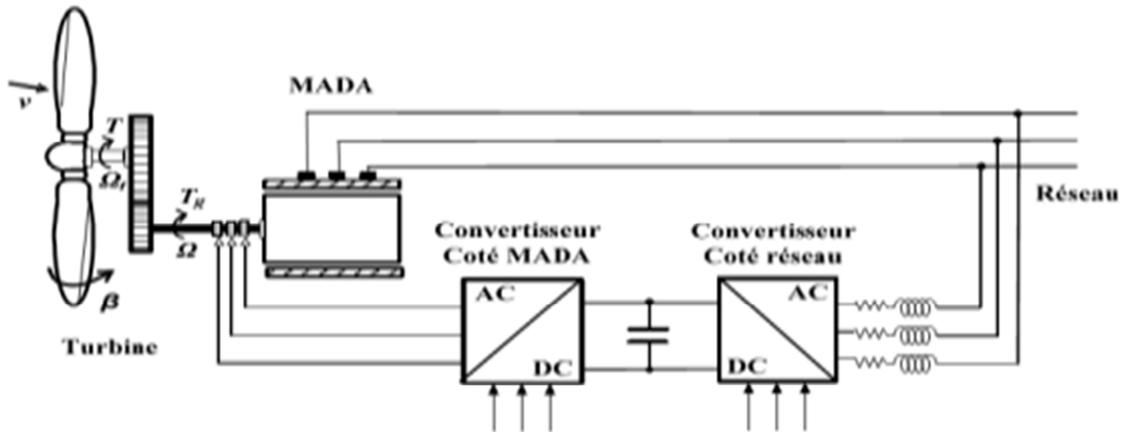


Figure II. 9: Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA.

II.3.4 Puissance mécanique d'une éolienne:

La puissance mécanique qui peut être extraite du vent se détermine au moyen de la fonction suivante [10] :

$$P_V = \begin{cases} 0 & V_v < V_d \\ \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_p^2 \cdot V_v^3 & V_d \leq V_v < V_n \\ P_N & V_n \leq V_v < V_M \\ 0 & V_v \geq V_M \end{cases}$$

Où

- C_p est le coefficient de puissance aérodynamique.

- ρ la masse volumique de l'air ($1,225 \text{ kg/m}^3$).

- R_p le rayon de la surface active de l'éolienne .

- V_v la vitesse du vent. V_d, V_n et V_M sont respectivement la vitesse de déclenchement, la vitesse nominale et la vitesse d'arrêt de la turbine.

- Le coefficient C_p ne peut théoriquement pas dépasser la limite de Betz ($C_{p_limite} = 0.593$) .

La puissance extraite par une éolienne est représentée par la figure 1. La courbe représente la caractéristique d'exploitation de l'éolienne. Il existe quatre zones principales qui sont:

- **La zone I** où la vitesse du vent est inférieure à la vitesse de démarrage de l'éolienne. Dans ce cas, la turbine ne fonctionne pas et ne produit donc pas d'énergie.

- **La zone II** dans laquelle la vitesse du vent est comprise dans le domaine $[V_d, V_n]$ correspond à la zone où il est possible d'optimiser la conversion d'énergie éolienne. C'est dans cette zone qu'il est intéressant de faire varier la vitesse de rotation. La puissance récupérée est alors variable.
- **La zone III** où la puissance développée par l'éolienne est limitée à la puissance nominale P_n .
- **La zone IV** lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse maximale admissible par l'éolienne V_M . Dans ce cas, la turbine est arrêtée par le système d'arrêt d'urgence afin de protéger la partie mécanique de l'éolienne et d'éviter son endommagement.

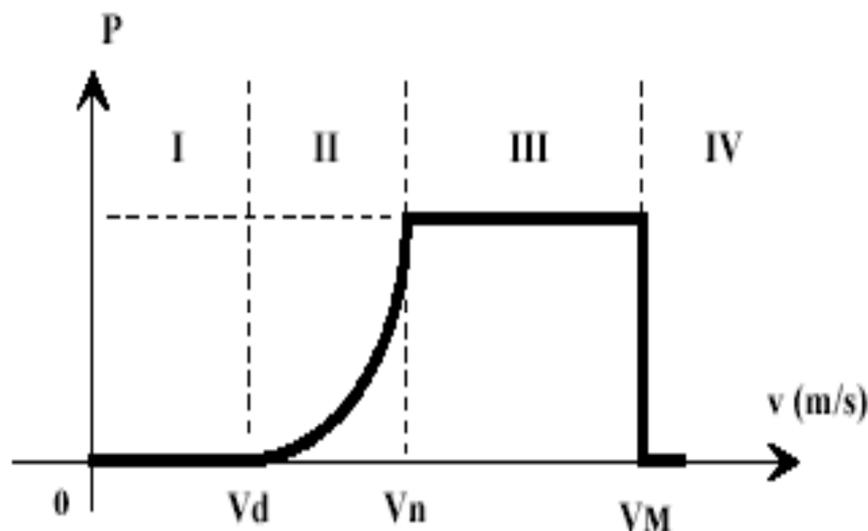
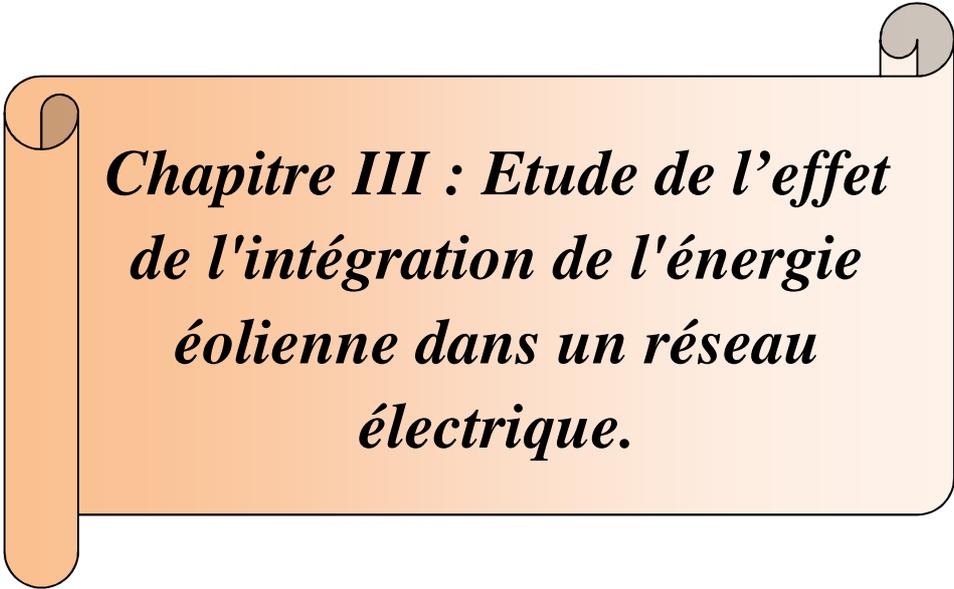


Figure II. 10: Puissance extraite par une éolienne en fonction de la vitesse du vent.

II.7. Conclusion:

Dans ce chapitre, un aperçu sur l'énergie éolienne a été donné, le principe de fonctionnement d'une éolienne a été présenté ainsi que les différents types d'éoliennes et leurs constituants et l'expression de la puissance mécanique extraite par une éolienne qui peut être utilisée pour la production d'électricité.



*Chapitre III : Etude de l'effet
de l'intégration de l'énergie
éolienne dans un réseau
électrique.*

III.1. Introduction:

Dans les systèmes électriques, il est indispensable, à chaque instant de produire l'énergie électrique nécessaire pour répondre à la demande. L'étude économique-environnemental consiste à déterminer les niveaux de production de l'ensemble des générateurs qui garantissent l'équilibre production-consommation au moindre coût avec des émissions des gaz toxiques minimisées. L'intégration des production d'énergie renouvelable dans le réseau électrique est une solution intéressante pour remplacer les combustibles fossiles tels que le pétrole et ainsi peut contribuer à minimiser le coût de production et à diminuer les émissions des gaz. Dans ce chapitre on s'intéresse à l'énergie éolienne, dont la production ne s'accompagne pas d'émission de gaz à effet de serre. L'analyse de l'effet de l'emplacement d'une ferme éolienne dans un réseau d'énergie électrique est faite par l'application de la méthode d'optimisation par l'essaim des particule connue sous le nom de PSO.

III.2. Formulation du problème:

III.2.1 Etude économique:

Les producteurs d'énergie électrique déterminent expérimentalement les courbes donnant le coût de production de chaque groupe en fonction de la puissance qu'il débite. La fonction associée à ces courbes est un polynôme de degré « n ». En pratique, le plus souvent, elle est présentée sous forme d'un polynôme de deuxième degré [10]:

$$F(P_{Gi}) = a_i P_{Gi}^2 + b_i P_{Gi} + c_i \quad (1)$$

La fonction $F(P_{Gi})$ n'est connue que sous une forme discrète, c'est à dire, à partir d'un certain nombre de points. C'est pour cette raison qu'on fait appel à des méthodes d'interpolation afin de déterminer les coefficients a_i, b_i etc c_i qui sont propres à chaque unité de production.

La minimisation de la fonction de coût total de production d'énergie électrique est une tâche qui se présente de la manière suivante :

$$\text{Min}\{F = \sum_{i=1}^n F_i(P_{Gi})\} \quad (2)$$

Sous les contraintes suivantes :

$$\sum_{i=1}^{ng} P_{Gi} - P_{ch} - P_L = 0 \quad (3)$$

$$P_{Gimim} \leq P_{Gi} \leq P_{Gimax} \quad (4)$$

$$\sum_{i=1}^{ng} Q_{Gi} - Q_{ch} - Q_L = 0 \quad (5)$$

$$Q_{Gimim} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gimax} \quad (6)$$

$$V_{imim} \leq V_i \leq V_{imax} \quad (7)$$

$$|\delta_{ij}| \leq \delta_{ij,max} \quad (8)$$

Résoudre ce problème avec toutes ces contraintes est difficilement réalisable pour un grand réseau comportant généralement plusieurs nœuds et lignes d'interconnexion, donc il est nécessaire de simplifier le problème.

Pour cela on peut négliger les contraintes (7) et (8), en supposant que tous les nœuds ont à peu près la même tension en module et en phase et Les contraintes (5) et (6), étant donné que la puissance réactive n'a pas une influence considérable sur la fonction coût.

L'expression des pertes de transmission en fonction des puissances générées est donnée par :

$$P_L = \sum_{i=1}^{ng} \sum_{j=1}^{ng} P_{Gi} B_{ij} P_{Gj} \quad (9)$$

P_{ij} : puissances générées de toutes les unités

B_{ij} : matrice des coefficients de Kron

a) Fonction du coût de la production par éolienne:

La fonction du coût d'une centrale éolienne peut être représentée par la fonction linéaire suivante[10] :

$$F_{vj}(P_{vj}) = d_j P_{vj} \text{ (\$/h) } j=1,2,\dots,n_f \quad (10)$$

$F_{vj}(P_{vj})$ est la fonction du coût de la ferme éolienne, P_{vj} est la puissance générée par la ferme au nœud j d_j est le coefficient de coût propre à la ferme éolienne et n_f nombre total de fermes éoliennes.

La minimisation de la fonction du coût total de production thermique et éolienne est une tâche qui se présente de la manière suivante :

$$\text{Min} \left\{ F = \sum_{i=1}^{ng} F_{thi}(P_{Gi}) + \sum_{j=1}^{n_f} F_{vj}(P_{vj}) \right\} \quad (11)$$

Sous les contraintes :

$$\sum_{i=1}^{ng} P_{Gi} + \sum_{j=1}^{n_f} P_{vj} - P_d - P_L = 0 \quad (12)$$

$$P_{Gimim} \leq P_{Gi} \leq P_{Gimax} \quad i=1,\dots, ng \quad (13)$$

$$0 \leq P_{vj} \leq P_{vjmax} \quad j=1,\dots,n_f \quad (14)$$

P_d : Puissance active de charge totale.

P_L : Pertes actives totales dans le réseau.

$P_{Gi\ min}$: Puissance minimale active du générateur.

$P_{Gi\ max}$: Puissance maximale active du générateur.

III.2.2 Fonction environnemental:

Le problème du dispatching environnemental consiste à minimiser la fonction des émissions des gaz provenant des centrales de production. Il peut être décrit de la manière suivante [11] :

$$\text{Min} \left\{ E = \sum_{i=1}^{ng} E_i(P_{Gi}) \right\} \quad (15)$$

Où

$$E_i(P_{Gi}) = \alpha_i P_{Gi}^2 + \beta_i P_{Gi} + \delta_i \text{ (Kg/h)} \quad (16)$$

Sous les contraintes données par les équations (3) et (4).

$E_i(P_{Gi})$ est la fonction des émissions et α_i , β_i et δ_i sont des coefficients caractéristiques d'émission attachés à chaque groupe de production.

III.3. Transformation de l'optimisation bi-objective en optimisation mono objective:

L'étude économique- environnemental consistent donc à chercher la minimisation simultanée de deux fonctions décrites par les mêmes variables objets, nous disons que le problème d'optimisation représente un problème bi-objectifs ou bi- critères. La difficulté principale d'un tel problème d'optimisation est liée à la présence de conflits entre les deux fonctions. Pour cela, nous avons transformé ce problème en un problème d'optimisation mono-objectif, en introduisant un facteur de pénalité des prix F_p (\$/Kg) dont l'expression est donnée par [11] :

$$F_{pi} = \frac{F_i(P_{Gi\ max})}{E_i(P_{Gi\ max})} \text{ ($/Kg)} \quad (17)$$

Pour déterminer le facteur de pénalité des prix F_p lié à une charge donnée, il faut:

- Calculer le rapport $\frac{F_i(P_{Gi\ max})}{E_i(P_{Gi\ max})}$ pour chaque générateur.
- Classer les valeurs des facteurs trouvées par ordre croissant.
- Ajouter la puissance générée maximale de chaque unité ($P_{Gi\ max}$) une par une, en commençant par la puissance de la centrale ayant le plus petit facteur. Une fois $\sum P_{Gi\ max} \geq P_{ch}$, on arrête le calcul.
- A ce stade, F_p lié à la dernière unité dans le processus de sommation est le facteur de pénalité des prix correspondant à la charge donnée.

Le problème d'optimisation mono- objectif se présente de la manière suivante :

$$\text{Min} \left\{ \psi = \sum_{i=1}^{ng} F_i(P_{G_i}) + F_p \sum_{i=1}^{ng} E_i(P_{G_i}) \right\} (\$/h) \quad (18)$$

L'équation (18) peut être réécrite en fonction des coefficients et des puissances générées:

$$\text{Min} \left\{ \psi = \sum_{i=1}^{ng} A_i P_{G_i}^2 + B_i P_{G_i} + C_i \right\} (\$/h) \quad (19)$$

Avec $A_i = a_i + F_p a_i$, $B_i = b_i + F_p b_i$ et $C_i = c_i + F_p \delta_i$

III.4. Présentation de la méthode d'optimisation de l'essaim de particules PSO:

III.4. 1. Optimisation de l'essaim de particules algorithme:

L'optimisation de l'essaim de particules (PSO) s'inspire du comportement social et coopératif affiché par divers espèces pour combler leurs besoins dans l'espace de recherche. L'algorithme est guidé par l'expérience personnelle (Pbest), l'expérience globale (Gbest) et le mouvement actuel des particules pour décider de leurs prochaines positions dans l'espace de recherche. De plus, les expériences sont accélérées par deux facteurs "c1" et "c2", et deux facteurs aléatoires des nombres générés entre [0, 1] alors que le mouvement actuel est multiplié par un facteur d'inertie "W" variant entre $[W_{\min}; W_{\max}]$.

La population initiale (essaim) de taille N et de dimension D est notée $= [X_1, X_2, \dots, X_N]^T$,

où 'T' désigne l'opérateur de transposition. Chaque individu (particule) X_i ($i = 1, 2, \dots, N$) est donné comme:

$X_i = [X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,D}]$. De plus, la vitesse initiale de la population est notée $V = [V_1, V_2, \dots, V_N]^T$.

Ainsi, la vitesse de chaque particule X_i ($i = 1, 2, \dots, N$) est donnée par $V_i = [V_{i,1}, V_{i,2}, \dots, V_{i,D}]$.

L'indice i varie de 1 à N alors que l'indice j varie de 1 à D. Les algorithmes détaillés des différentes méthodes.

sont décrits ci-dessous par souci d'exhaustivité:

$$V_{i,j}^{K+1} = w * V_{i,j}^K + c_1 * r_1 * (Pbest_{i,j}^K - X_{i,j}^K) + c_2 * r_2 * (Gbest_j^K - X_{i,j}^K)$$

$$X_{i,j}^{K+1} = X_{i,j}^K + V_{i,j}^{K+1}$$

In eqn.(1) $Pbest_{i,j}^K$ représente le record personnel j^{th} composante de la i^{th} individu, alors que $Gbest_j^K$ représente la j^{th} composante du meilleur individu de la population jusqu'à l'itération k.

La figure (III.1) montre la recherche mécanisme de PSO dans l'espace de recherche multidimensionnel.[12]

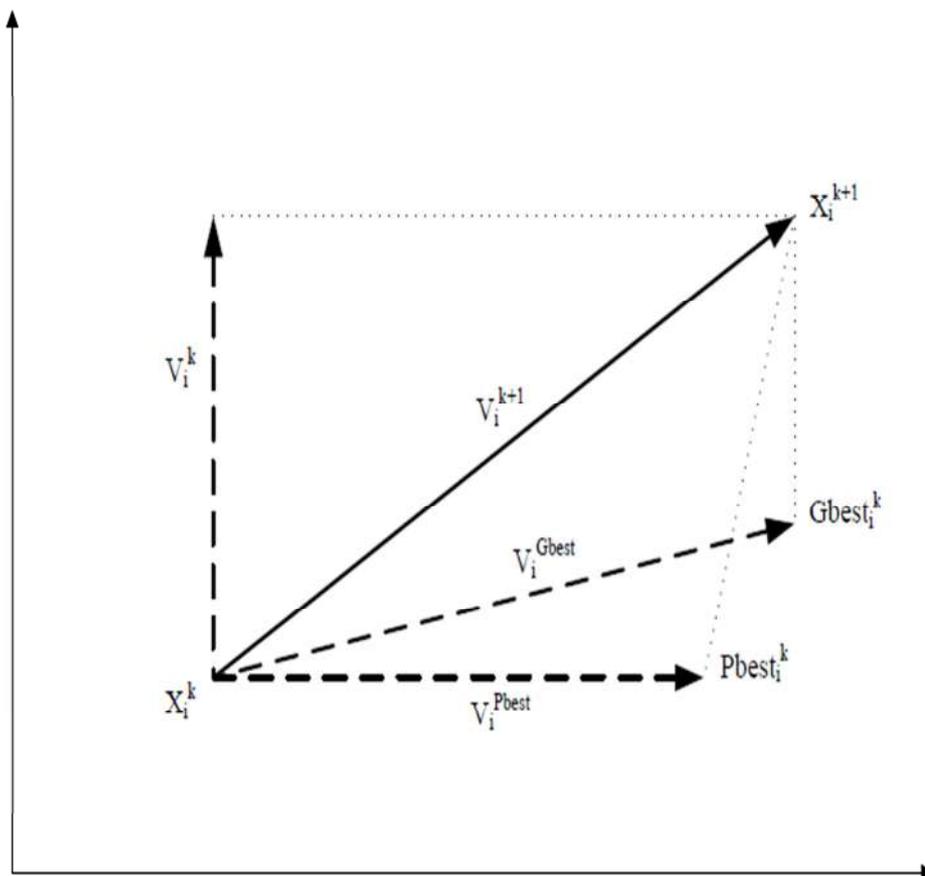


Figure III. 1: Mécanisme de recherche d'PSO dans l'espace de recherche multidimensionnel.

Les différentes étapes de l'PSO sont les suivantes :

1. Définir les paramètres w_{min} , w_{max} , $c1$ et $c2$ de PSO
2. Initialiser la population de particules ayant des positions X et des vitesses V
3. Définir l'itération $k = 1$
4. Calculer la fitness des particules $F_i^K = f(X_i^K)$, $\forall i$ et trouver l'indice de la meilleure particule b
5. Sélectionnez $Pbest_i^K = X_i^j, \forall i$ et $Gbest^K = X_b^K$
6. $w = w_{max} - k * (w_{max} - w_{min}) / Maxite$

7. Mettre à jour la vitesse et la position des particules

$$V_{i,j}^{K+1} = w \times V_{i,j}^K + c_1 \times \text{rand}(\) \times (Pbest_{i,j}^K - X_{i,j}^K) + c_2 \times \text{rend}(\) \times (Gbest_j^K - X_{i,j}^K); \forall_j \text{ et } \forall_i X_{i,j}^{K+1} = X_{i,j}^K + V_{i,j}^{K+1}; \forall_j \text{ et } \forall_i$$

8. Évaluer la condition physique $F_i^{K+1} = f(X_i^{K+1})$, \forall_i et trouver l'indice de la meilleure particule b1

9. Mise à jour Pbest de la population \forall_i

$$\text{Si } F_i^{K+1} < F_i^K \text{ alors } Pbest_i^{K+1} = X_i^{K+1} \text{ sinon } Pbest_i^{K+1} = Pbest_i^K$$

10. Mise à jour Gbest de la population

$$\text{Si } F_{b1}^{K+1} < F_b^K \text{ alors } Gbest^{K+1} = Pbest_{b1}^{K+1} \text{ et ensemble } b = b1 \text{ sinon } Gbest^{K+1} = Gbest^K$$

11. Si $K < Maxite$ alors $k = k + 1$ et aller à l'étape 6 sinon aller à l'étape 12

12. Imprimer la solution optimale en tant que $Gbest_t^K$

Les paramètres les plus couramment utilisés de l'algorithme PSO sont considérés comme suit:

- Poids inertiel : 0,9 à 0,4
- Facteurs d'accélération (c1 et c2) : 2 à 2,05
- Taille de la population : 10 à 100
- Maximum itération (Maxite): 500 to 10000
- Vitesse initiale: 10 % de la position

Un organigramme détaillé des PSO tenant compte des étapes ci-dessus est illustré à la figure (III.2).[12]

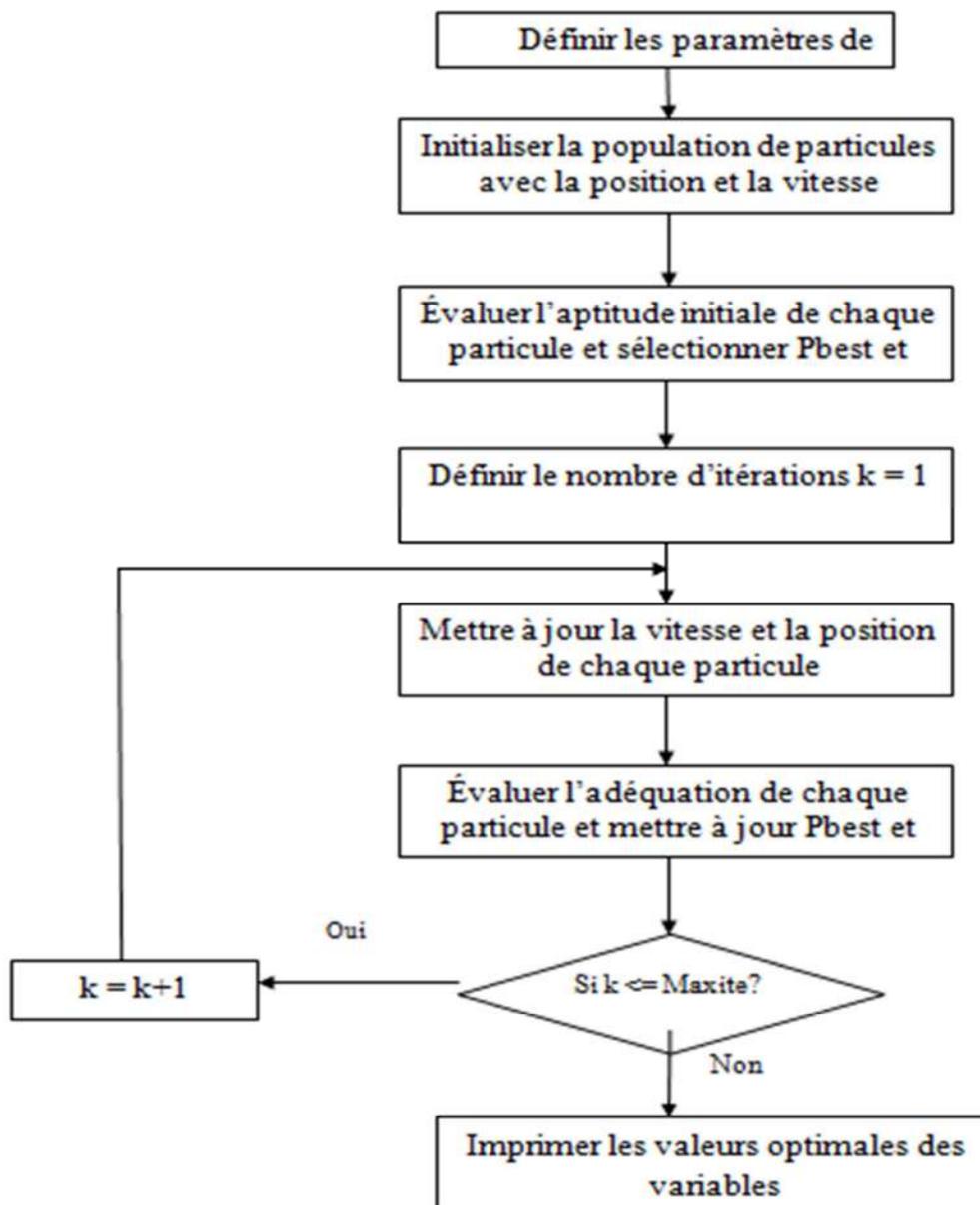


Figure III. 2: Organigramme de PSO.

III.5.Application :

Le réseau investi est un réseau à courant alternatif à 3 nœuds producteurs .

Les fonctions des coûts des trois générateurs sont les suivantes :

$$F_1(P_{Gi}) = 0.03546P_{G1}^2 + 38.30553P_{G1} + 1243.5311$$

$$F_2(P_{Gi}) = 0.02111P_{G2}^2 + 36.32782P_{G2} + 1658.5696$$

$$F_3(P_{Gi}) = 0.01799P_{G3}^2 + 38.27041P_{G3} + 1356.6592$$

Les équations des émissions NOx sont:

$$E_1(P_{Gi}) = 0.00683P_{G1}^2 - 0.54551P_{G1} + 40.2669$$

$$E_2(P_{Gi}) = 0.00461P_{G2}^2 - 0.51160P_{G2} + 42.89553$$

$$E_3(P_{Gi}) = 0.00461P_{G3}^2 - 0.51160P_{G3} + 42.89553$$

Sous les contraintes :

$$35 \leq P_{Gi} \leq 210$$

$$130 \leq P_{G2} \leq 325$$

$$125 \leq P_{G3} \leq 315$$

La matrice des coefficients des pertes transmises est :

$$B_{mn} = 10^{-5} \begin{bmatrix} 7.1 & 3.0 & 2.5 \\ 3.0 & 6.9 & 3.2 \\ 2.5 & 3.2 & 8.0 \end{bmatrix}$$

Pour une puissance demandée de 400 MW, les résultats des puissances actives, des pertes de transmission, du taux des émissions et du coût total sont donnés dans le tableau(III.1).

III.5.1. Cas du réseau électrique sans éolienne:

En premier lieu on considère le réseau électrique sans l'intégration de la ferme éolienne.

La fonction à minimiser est la suivante:

$$\text{Min} \left\{ \psi = \sum_{i=1}^{ng} A_i P_{Gi}^2 + B_i P_{Gi} + C_i \right\} \text{ (\$/h)} \quad (19)$$

Avec $A_i = a_i + F_p a_i$, $B_i = b_i + F_p \beta_i$ et $C_i = c_i + F_p \delta_i$

Avec F_p qui a été évalué à 44.78 (\$/kg)

Sous les contraintes :

$$\sum_{i=1}^{ng} P_{Gi} - P_d - P_L = 0$$

$$P_{Gimim} \leq P_{Gi} \leq P_{Gimax} \quad i=1,2,3$$

Le tableau III.1 représente les coefficients de la fonction coût total.

générateur	Ai	Bi	Ci
1	0.3413	13.8733	3047
2	0.2276	13.4143	3579.7745
3	0.2244	15.3568	3277.86

Tableau III. 1 : Coefficients de la fonction coût total .

Les résultats de simulation sont donnés par le tableau III.2 où on a effectué une comparaison avec les résultats de simulation par laméthode d'optimisation des algorithmes génétique simple SGA donnés dans la référence [11]:

	PSO	SGA
$P_{G1}(MW)$	103.0413	99.47
$P_{G2}(MW)$	145.2424	147.26
$P_{G3}(MW)$	159.1768	161.08
$P_L(MW)$	7.3111	7.69
$E(P_{Gi})(Kg/h)$	200.6789	201.35
$F(P_{Gi}) (\$/h)$	20852	20858
Coût total(\$/h)	29814	29820

Tableau III. 2 : Résultats optimaux cas de la fonction globale.

Les résultats trouvés peuvent être illustrés par l'histogramme de la figure (III.3- III.4 et III.5) suivants:

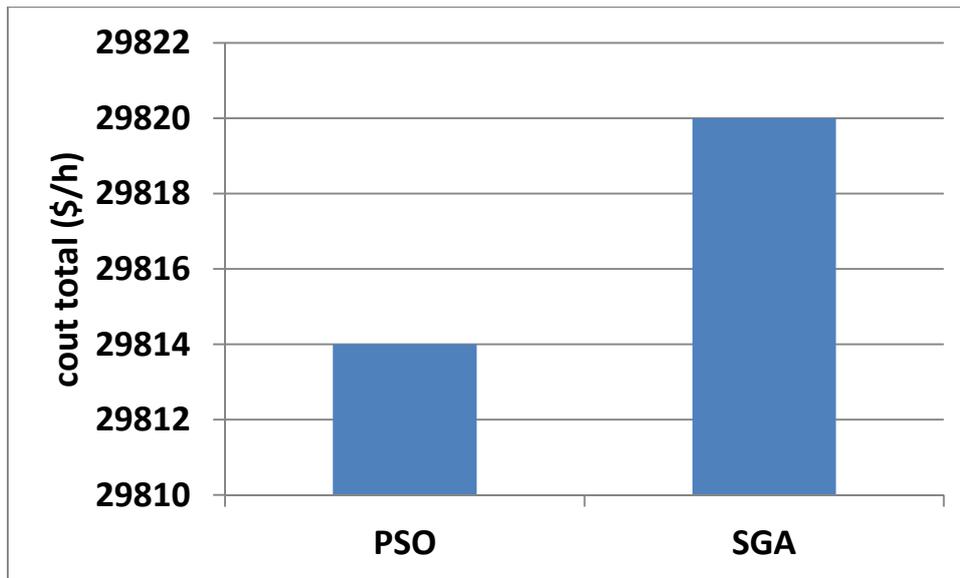


Figure III. 3: coût de production obtenu par PSO et SGA.

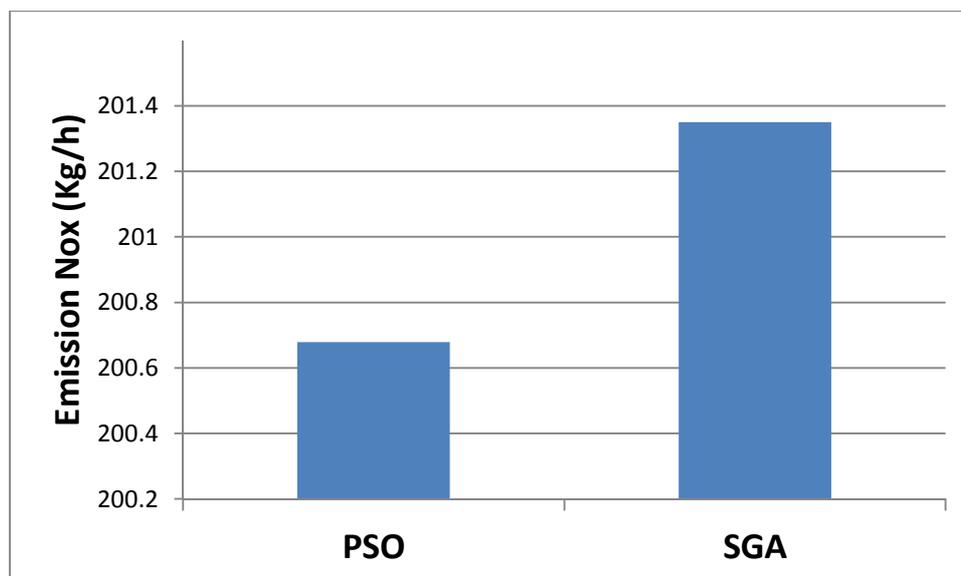


Figure III. 4: Emission Nox obtenu par PSO et SGA.

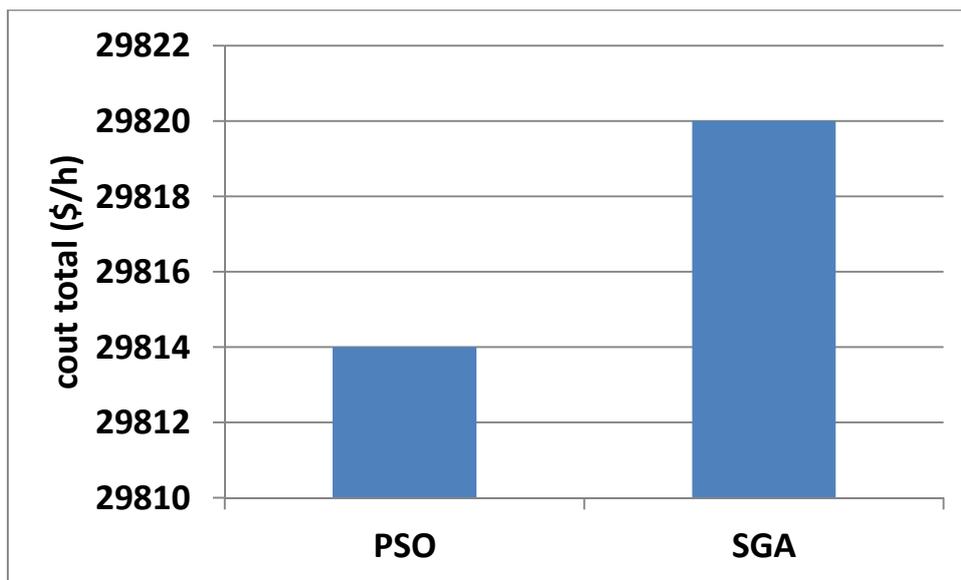


Figure III. 5: coût total obtenu par PSO et SGA.

Commentaires :

D'après les résultats trouvés, nous pouvons dire qu'il y a un écart entre les puissances générées optimales le coût de production, les émissions de gaz NOx et les pertes de transmission pour les deux algorithmes PSO et SGA. L'optimisation du coût de production, des pertes transmises et des émissions toxiques est meilleure lors de l'application de PSO par rapport aux SGA :

- Le coût total donné par PSO est de 29814 \$/h et autour de 29820\$/h pour SGA, ce qui représente une différence de 6 \$/h
- les pertes de transmission sont minimisées par la méthode de PSO de 0.38 MW par rapport à celle de SGA
- une diminution de 1.06 Kg/h équivalent à 25.44 Kg/jour de gaz toxique émis dans l'atmosphère.

III.5.2. Cas du réseau avec la ferme éolienne:

On a refait la simulation après l'ajout de la production de l'énergie électrique provenant de la ferme éolienne qui est équivalente à 110 MW avec l'hypothèse que le coefficient du coût propre à l'éolienne est pris égal à zéro.

La fonction à minimiser est la suivante :

$$\text{Min} \left\{ \psi = \sum_{i=1}^{ng} F_{vj}(P_{vj}) + \sum_{i=1}^{ng} A_i P_{Gi}^2 + B_i P_{Gi} + C_i \right\} (\$/h)$$

Sous les nouvelles contraintes par l'ajout de la production éolienne :

$$\sum_{i=1}^{ng} P_{Gi} + \sum_{j=1}^{nf} P_{wj} - P_d - P_L = 0$$

$$P_{Gimim} \leq P_{Gi} \leq P_{Gimax} \quad i=1,2,3$$

Les résultats de simulation sont présentés dans le tableau III-3:

	Réseau avec éolienne
$P_{G1}(MW)$	39.1143
$P_{G2}(MW)$	131.0000
$P_{G3}(MW)$	127.0000
$P_L(MW)$	4.1534
$E(P_{Gi})(Kg/h)$	137.5609
Coût de production (\$/h)	15965
$T(P_{Gi}) (\$/h)$	21986

Tableau III. 3 : Résultats optimaux .

On regroupe les résultats de la simulation du réseau sans éolienne et avec éolienne dans le tableau III.4:

	Sans éolienne	Avec éolienne
$P_{G1}(MW)$	103.0413	39.1143
$P_{G2}(MW)$	145.2424	131.0000
$P_{G3}(MW)$	159.1768	127.0000
$P_L(MW)$	7.3111	4.1534
$E(P_{Gi})(Kg/h)$	200.6789	137.5609
Coût de production(\$/h)	20852	15965
$T(P_{Gi})$ (\$/h)	29810	21986

Tableau III. 4 : comparaison des résultats optimaux.

Les résultats obtenus sont illustrés par des histogrammes dans les figures (III.6- III.7et III.8).

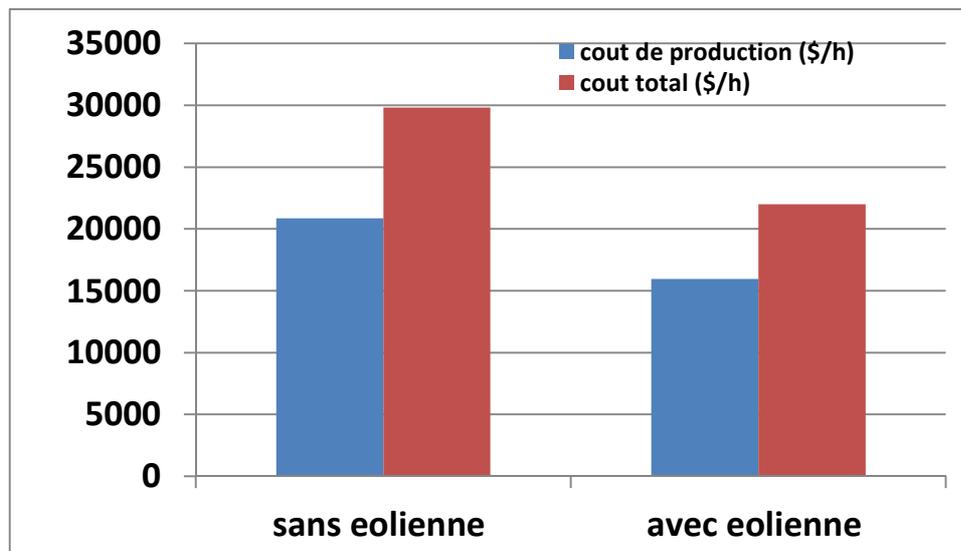


Figure III. 6: Coût de production et Coût total obtenus par PSO dans les deux cas.

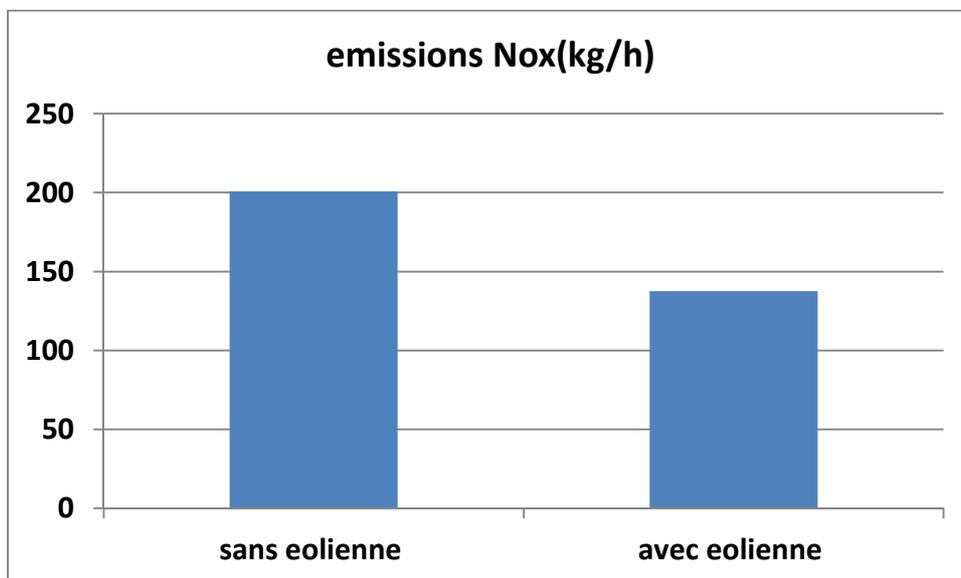


Figure III. 7: Emissions NOx obtenu par PSO dans les deux cas.

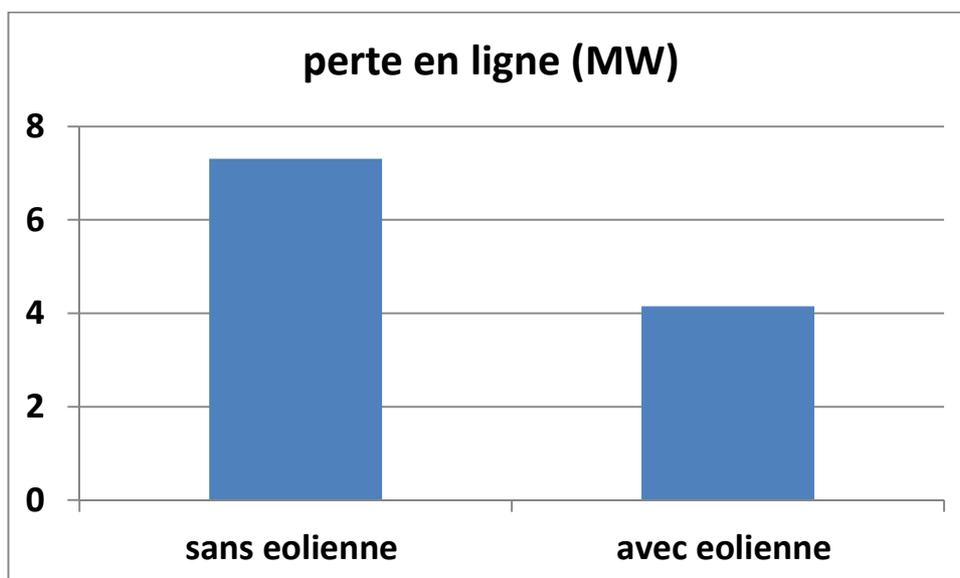


Figure III. 8 : PL obtenu par PSO dans les deux cas.

Commentaires:

A travers les résultats trouvés, si on analyse les deux cas, nous pouvons dire qu'il y'a un écart entre le coût total, le coût de production , les émissions des gaz et les pertes de transmission.

Lorsque l'énergie éolienne est intégrée dans le réseau électrique étudié /

- les pertes de transmission sont réduites de 3,1577 MW .
- les émissions de gaz sont réduites de 63,118 Kg/h équivalent de 1514 ;832 Kg/jour.
- Le cout de production est réduit de 4887 \$/h
- Le coût total lié à la charge donnée est également réduit de 29810 \$/h à 21986 \$/h, soit une réduction de 7824 \$/h.

III.6. Conclusion:

L'analyse économique et environnemental de l'intégration d'un parc éolien dans le réseau électrique à l'aide de l'algorithme PSO a donné des résultats très acceptables. La comparaison des deux cas avant et après l'ajout de la production éolienne dans le réseau électrique a montré l'économie bénéficié pour la production de l'énergie électrique à travers les centrales thermiques et la réduction remarquable des émissions de gaz toxique dans l'atmosphère , ce qui nous permet de dire que l'intégration des énergies renouvelable comme l'énergie éolienne dans le réseau électrique est d'une grande efficacité et importance à prendre en considération par les producteurs d'énergie électrique .



***Conclusion
générale***

Conclusion Générale:

Dans ce travail, après avoir donné un aperçu sur le contexte énergétique mondial et national et sur l'incorporation des énergies renouvelables dans la production d'électricité, nous avons spécifié l'énergie éolienne en présentant son principe de fonctionnement et les différents types d'éoliennes et leurs applications.

Ensuite nous avons étudié comment réduire les coûts de production de l'énergie électrique des centrales thermiques à travers l'exploitation de l'énergie éolienne dans le réseau électrique ainsi que la réduction de la proportion de gaz toxiques dans l'atmosphère pour préserver l'environnement.

Nous avons effectué une simulation sous l'environnement MATLAB à l'aide de l'algorithme d'optimisation par l'essaim de particules PSO. Cette simulation consiste en la minimisation de la fonction du coût de production de l'énergie électrique et la fonction des émissions des gaz toxiques en considérant deux cas ; le premier c'est le cas du réseau électrique choisi pour l'étude tel qu'il est avec les centrales thermiques de production d'électricité seulement et le deuxième cas en ajoutant une source de production éolienne dans le réseau électrique défini.

Les résultats obtenus lors de la simulation ont montré clairement l'impact de l'intégration de la production éolienne dans le réseau électrique. On a remarqué qu'il y a une baisse intéressante dans le coût de production et une diminution remarquable des émissions des gaz toxique.

De ce fait on peut conclure que l'énergie éolienne peut être une solution très intéressante pour remplacer les sources fossiles dans la production d'électricité du faite qu'elle est considéré comme énergie d'origine gratuite et renouvelable et le plus important qu'elle n'a aucun danger sur l'environnement parce qu'elle n'émet aucun gaz ou déchets toxique dans l'environnement.

Comme continuité de ce travail on propose une étude plus profonde en tenant en compte l'état dynamique de la charge demandé qui varie réellement tout au long de la journée. Cette variation influe directement sur la production des centrales thermique et aussi en tenant en compte de la variation de la production éolienne qui dépend de la vitesse du vent qui est variable.

BIBLIOGRAPHIES

- [1] Mr. Kadraoui Hicham "**Diagnostic Et Solutions Adaptées Pour L'amélioration De L'efficacité Energétique D'une Construction Multizone Energivore**", Doctorat En Sciences, 'Université Abou-Bekr Belkaid – Tlemcen '.
- [2] Le Groupe Sonalgaz. www.sonelgaz.dz, Consulté 2018.
- [3] Harfak Bachir ET Boudia Mohammed "**Etude D'une Centrale Photovoltaïque Alimente Un Réseau Intelligent**", Memiore Master, 'Universite Ahmed Draïa Adrar Faculte Des Sciences Et De La Technologie Departement DES Sciences ET Technologies', 2018.
- [4] <http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/pdf/14e-inventaire-Chap03-3.9.1-Algerie.pdf>, Consulté 2018.
- [5] Salmi Mohamed "**Contribution A La Quantification De L'irradiation solaire globale En Algérie Et Applications Aux Générateurs Photovoltaïques**", Doctorat En Sciences, 'Université Ferhat Abbas De Sétif', 2012.
- [6] Mlle. Zerari Naziha "**Modélisation et Optimisation Multi Objectifs D'une Eolienne A Axe Horizontal D'un Système De Production Eolien Isolé De Petite Taille** ", Doctorat En Science, 'Université Badji Mokhtar-Annaba faculté Des Sciences De L'ingénieur département d'Electromécanique ', 2015.
- [7] Gouchida Noureddine Et Saoulimahmoud "**Comparaison Entre Différents Types Des Générateurs Eoliennes Dans La Stabilité D'un Réseau Electrique**", Memiore Master, 'Universite Kasdi Merbah Ouargla Faculté Des Sciences Appliquées Département De Génie Electrique', 2017.
- [8] Bellabiod Yacine Et Zerifi Abdelmoumene "**Contribution A L'analyse Du Comportement Et A La Gestion Optimale D'un Système D'énergie Hybride (Eolien, Groupe Electrogène-Batteries De Stockage)** ", Memiore Master, ' Université M'hamed Bougara Boumerdes Faculté Des Sciences Département Physique', 2017.
- [9] Tamissa Houria et Touti Narimane "**Comparaison Entre Les Techniques D'extraction De Puissance MPPT Appliquées A Une Eolienne Hybride**", Memiore Master, 'Universite Kasdi Merbah Ouargla Faculté Des Sciences Appliquées Département De Génie Electrique', 2017.
- [10] Lahouaria Benasla , Abderrahim Belmadani et Mostefa Rahli, Article "**Influence De L'emplacement D'une Ferme Eolienne Sur Ledispatching Economique Environnemental**" "Annals. Computer Science Series. 11th Tome 2nd Fasc. – 2013.

BIBLIOGRAPHIES

- [11] Article " **Etude d'un dispatching économique- environnemental par la méthode Harmony Search** "Volume 50, Number 1, 2009.
- [12] <https://www.researchgate.net/publication/297245624>. Mahamad Nabab Alam "**Particle Swarm Optimization: Algorithm and its Codes in MATLAB** ", ' National Institute of Technology, Warangal', on 07 March 2016.