



Université Mohamed Khider de Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de genie électrique

# MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies  
Electrotechnique  
Réseaux électriques

Réf. :

---

Présenté et soutenu par :  
**Rechachi Wissem**  
**Rahmoun Hicham**

Le : 27 septembre 2020

## **Algorithme de recherche du corbeau appliqué au profit de la sécurité et l'économie des réseaux électriques**

---

### **Jury :**

M.	Becha Habiba	MCB	Université de Biskra	Président
M.	Benalia Khaled	MCB	Université de Biskra	Examineur
M.	Salhi Ahmed	MCA	Université de Biskra	Rapporteur

Année universitaire : 2019 - 2020

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrique

Filière : Electrotechnique

Option : Réseaux électriques

Mémoire de Fin d'Etudes

En vue de l'obtention du diplôme :

**MASTER**

*Thème*

*Algorithme de recherche du corbeau appliqué au profit de la  
sécurité et l'économie des réseaux électriques*

Présenté par :

*Rechachi Wissem*

*Rahmoun Hicham*

Avis favorable de l'encadreur :

*Dr. Salhi Ahmed*

**Avis favorable du President du Jury**

**M. Becha Habiba**

**Cachet et signature**

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Electrique

Filière : Electrotechnique

Option: Réseaux électriques

## *Thème :*

### *Algorithme de recherche du corbeau appliqué au profit de la sécurité et l'économie des réseaux électriques*

Proposé et dirigé par : Dr.Salhi Ahmed

## *Résumé :*

On étudie dans ce travail l'impact de l'intégration de l'énergie éolienne dans les réseaux électriques et son effet sur l'économie et la sécurité du réseau. Le problème économique est traité comme un problème d'optimisation de dispatching économique sans et avec l'intégration de l'énergie éolienne. Le problème de sécurité est traité comme un problème d'optimisation avec la minimisation d'une fonction risque relative au taux d'intégration de l'énergie éolienne. La résolution mono-objectif de chaque problème est achevé en utilisant une nouvelle méthode méta-heuristique appelée Algorithme de Recherche du Corbeau (Crow Search Algorithm – CSA) et appliquée pour un réseau de test IEEE 30 JB avec 06-unités de production de l'énergie électrique.

**Mots clés :** énergie éolienne, sécurité du réseau, algorithme de recherche du corbeau, dispatching économique.

### Remerciement

En tout premier lieu Je remercie Allah le tout puissant et sublime d'avoir éclairé mon chemin et de m'avoir aidé à réaliser ce mémoire de fin d'étude.

Je voudrai adresser toute ma gratitude à mon encadreur de ce mémoire Dr SALHI AHMED pour sa patience, sa disponibilité et surtout son expérience et ses Informations précieuses qui ont contribué à alimenter ma réussite de ce mémoire de fin d'étude

Je tiens à remercier sincèrement les membres du jury Dr.BECHA Habiba et BEN ALIA Khaled.

Je désire aussi remercie les enseignants de département de génie électrique d'Université Mohamed Khider Biskra qui m'ont fourni les informations nécessaires à la réussite de mes études universitaire particulièrement Mr. NAIMI Djemai, Mr.MAHDDAD Belkacem, et Mr MIMOUNE Sourî Mohamed et toutes personne de laboratoire de génie électrique Biskra LGEB dirigé par monsieur ZOZO Salah Eddine.

Je tiens également à remercier la société algérienne de production de l'électricité d'oumache biskra qui m'a accueilli pour faire mon stage et les ingénieurs d'électrotechnique qui m'ont suivi pendant la période de mon stage monsieur IMADEDINE Harzali et monsieur REZGUI Abdelkarim.

Mercie infiniment à ma famille spécialement mes chers parents pour tout ce qu'ils ont fait pour moi, merci à mon bon exemple dans la vie ma sœur RECHACHI Miled Zohra pour sa motivation et mes remerciements vont aussi à mes amis l'un à son nom «Une personne qui n'a jamais commis d'erreur n'a jamais tenté d'innover» **Albert Einstein**

**Wissem**

---

Dédicace

*A Ma très chère mère, pour son amour, son support moral et physique, ses prières et ses tendresses pour m'avoir donnée la force de continuer et obtenir ce projet de fin d'étude.*

*A Mon très cher père pour ses encouragements, son soutien moral et physique qui m'ont précieusement aidée à avoir ce mémoire de fin d'étude.*

*Que dieu grand et puissant les bénisse et leur accorde une très longue vie.*

*Amen*

*A mon encadreur Dr SALHI AHMED.*

*A mes deux grandes familles Rechachi et Zerarka*

*A mes chers frères et mes belles sœurs.*

*A mes meilleurs amis Hasnaoui Leila, Fatima Touti, Chicha Abdelhak et Ghiloubi Imam Barket qui m'a donné l'esprit du travail en groupe.*

*A mon binôme Hichem rahmoun.*

*À mes collègues de promotion 2020.*

*Je dédie ce modeste travail.*

---

### Résumé :

On étudie dans ce travail l'impact de l'intégration de l'énergie éolienne dans les réseaux électriques et son effet sur l'économie et la sécurité du réseau. Le problème économique est traité comme un problème d'optimisation de dispatching économique sans et avec l'intégration de l'énergie éolienne. Le problème de sécurité est traité comme un problème d'optimisation avec la minimisation d'une fonction risque relative au taux d'intégration de l'énergie éolienne. La résolution mono-objectif de chaque problème est achevée en utilisant une nouvelle méthode méta-heuristique appelée Algorithme de Recherche du Corbeau (Crow Search Algorithm – CSA) et appliquée pour un réseau de test IEEE 30 JB avec 06-unités de production de l'énergie électrique.

**Mots clés :** énergie éolienne, sécurité du réseau, algorithme de recherche du corbeau, dispatching économique.

### ملخص:

ندرس في هذا العمل تأثير دمج طاقة الرياح في الشبكات الكهربائية وتأثيرها من الناحية الاقتصادية والناحية الأمنية للشبكة. المسألة الاقتصادية تمت معالجتها كمسألة توزيع اقتصادي أمثل لإنتاج الطاقة الكهربائية من دون ومع دمج طاقة الرياح. مسألة أمن الشبكة الكهربائية تمت معالجتها كمسألة أمثلة مع تصغير دالة الخطر والتي تتناسب و معدل دمج طاقة الرياح. الحل أحادي الهدف لكل مسألة يتم معالجته باستعمال خوارزمية جديدة شبه عشوائية تسمى خوارزمية بحث الغراب (CSA) التي تطبق على شبكة تجريبية IEEE30 JB ذات 06 وحدات إنتاجية للطاقة الكهربائية.

**الكلمات المفتاحية:** طاقة الرياح، أمن الشبكة، خوارزمية بحث الغراب، التوزيع الأمثل الاقتصادي.

### Abstract :

This work studies the impact of integrating wind energy into power grids and its effect on grid economics and security. The economic problem is treated as a problem of optimizing economic dispatch without and with integration of wind power. The safety problem is treated as an optimization problem with the minimization of a risk function relating to the rate of integration of wind energy. The single-objective resolution of each problem is completed using a new meta-heuristic method called the Crow Search Algorithm (CSA) and applied for IEEE 30 buses test network with 06-production units of the electric energy.

**Keywords:** wind energy, network security, crow search algorithm, economic dispatching.

---

<b>Remerciement</b> .....	
<b>Dédicace</b> .....	
<b>Résumé</b> .....	
<b>Liste des tableaux</b> .....	
<b>Liste des figures</b> .....	
<b>Liste des acronymes et symboles</b> .....	
<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Marché d'énergie électrique et dispatching économique</b> .....	<b>3</b>
I.1 Introduction .....	3
I.2 Le système d'énergie électrique et ses composants .....	3
I.2.1 Production de l'énergie électrique .....	4
I.2.1.a La centrale à turbine à gaz .....	4
I.2.1.b Les centrales nucléaires .....	5
I.2.1.c Les centrales à énergie renouvelable .....	6
I.2.2 Réseaux du transport .....	6
I.2.3 La consommation de l'énergie électrique .....	6
I.2.4 Fluctuation de la consommation de l'énergie électrique .....	6
I.3 Marché d'énergie électrique .....	7
I.3.1 Acteurs et activités du marché de l'électricité .....	7
I.3.2 Libération du marché de l'électricité .....	8
I.3.3 Les principaux acteurs du marché d'électricité en Algérie .....	8
I.3.3.a Production de l'électricité .....	8
I.3.3.b Transport de l'électricité .....	9
I.3.3.c Gestion et control du réseau électrique .....	9
I.3.3.d Distribution de l'électricité .....	10
I.3.3.e Commercialisation de l'électricité .....	10
I.4 Définition d'un problème d'optimisation .....	11
I.4.1 Formulation standard d'un problème d'optimisation .....	12
I.4.1.a La fonction objectif .....	12
I.4.1.b Variables de décision .....	12
I.4.1.c Contraintes .....	12
I.5 Résolution du problème d'optimisation .....	12
I.5.1 Méthodes exactes .....	12

---

I.5.1.a Méthode du gradient .....	13
I.5.2 Méthodes approchées .....	14
I.5.2.a Méthodes heuristiques .....	14
I.5.2.b Méthodes Méta-heuristiques .....	14
I.5.2.c Optimisation par colonie des fourmis (ACO) .....	15
I.5.2.d Optimisation par essaims particulaires (PSO) .....	15
I.6 Dispatching économique .....	15
I.6.1 Formulation du problème du dispatching économique .....	16
I.6.1.a Caractéristique Coût- Puissance d'une unité de production .....	16
I.6.1.b Les contraintes d'égalité .....	17
I.6.1.c Les contraintes d'inégalité .....	17
I.6.1.d Les contraintes pratiques .....	17
I.7 Conclusion .....	20
<b>Chapitre II : Intégration d'énergie éolienne dans le réseau électrique.....</b>	<b>21</b>
II.1 Introduction .....	21
II.2 Énergies renouvelables .....	21
II.2.1 Définition .....	21
II.2.2 Evolution de puissance des énergies renouvelables .....	21
II.2.2.a Au monde .....	21
II.2.2.b En Algérie .....	22
II.2.3 Type d'énergie renouvelable .....	22
II.2.3.a L'énergie solaire : thermique et photovoltaïque .....	22
II.2.3.b Énergie géothermique .....	23
II.2.3.c Energie hydraulique .....	23
II.2.3.d Energie biomasse .....	23
II.3 Énergie éolienne .....	24
II.3.1 Historique .....	24
II.3.2 Définition .....	24
II.3.3 Synthèse des avantages et des inconvénients de l'éolien .....	25
II.3.3.a Avantages .....	25
II.3.3.b Inconvénients .....	25
II.3.4 Evolution d'énergie éolienne .....	25
II.3.4.a Au monde .....	25

---



II.3.4.b Gisement éolien en Algérie .....	26
II.3.5 Structure d'une éolienne .....	27
II.3.6 Principe de conversion .....	28
II.3.6.a Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique .....	29
II.3.6.b Production d'énergie mécanique .....	30
II.3.6.c Conversion de l'énergie mécanique produite en énergie électrique .....	30
II.3.7 Caractéristiques d'une éolienne .....	30
II.3.7.a Puissance produite en fonction de la taille des pales .....	30
II.3.7.b Puissance produite en fonction de la vitesse du vent .....	31
II.3.8 Impact de l'intégration des éoliennes sur le réseau électrique .....	32
II.3.8.a Impact sur le coût de production .....	32
II.3.8.b Impact sur sécurité du système électrique .....	34
II.9 Conclusion .....	35
<b>Chapitre III : Algorithme de recherche du corbeau .....</b>	<b>36</b>
III.1 Introduction .....	36
III.2 Comportement des corbeaux .....	36
III.3 Inspiration du comportement des corbeaux pour l'optimisation .....	37
III.4 Algorithme de recherche du corbeau .....	37
III.5 L'influence de la portée du vol <i>fl</i> .....	39
III.5 La méthodologie de la CSA pour l'optimisation .....	40
III.5.1 Organigramme de l'algorithme de recherche du corbeau CSA pour l'optimisation .....	42
III.6 Conclusion .....	44
<b>Chapitre IV : Intégration de l'énergie éolienne : applications et simulation .....</b>	<b>45</b>
IV.1 Introduction .....	45
IV.2 Stratégie de travail .....	45
IV.3 Présentation du réseau électrique étudié .....	46
IV.4 Cas d'étude de Dispatching économique .....	48
IV.4.1 Résolution du problème de dispatching économique sans intégration de l'énergie éolienne .....	48
IV.4.1.a Choix des paramètres de CSA .....	48
IV.4.1.b Simulation et résultats .....	48
IV.4.1.c Convergence de l'algorithme CSA pour la résolution du Dispatching économique .....	50

---

IV.4.2 Cas d'étude de dispatching économique avec l'intégration de l'énergie éolienne	51
IV.4.2.a Choix des paramètres de CSA et les données relatives au problème	51
IV.4.2.b Simulation et résultats	52
IV.4.2.c La convergence de l'algorithme CSA avec l'intégration d'énergie éolienne	55
IV.5 Cas d'étude du risque d'intégration de l'énergie éolienne	55
IV.5.1 Choix des paramètres de CSA	56
IV.5.2 Simulation et résultats	56
IV.5.3 Convergence de l'algorithme CSA pour la minimisation de la fonction risque	58
IV.5.4 Etude comparative	59
IV.6 Conclusion	61
<b>Conclusion générale</b>	<b>62</b>
<b>Bibliographie</b>	<b>64</b>
<b>Annexe</b>	<b>69</b>

---

Liste des tableaux :

**Chapitre IV :**

Tableau IV- 1 Les coefficients de la fonction du coût de chaque générateur.....	47
Tableau IV- 2 Résultats d'optimisation du coût de production – Réseau 06 unités .....	48
Tableau IV- 3 Répartition optimale de la puissance générée -contrainte d'inégalité- .....	49
Tableau IV- 4 Résultats de simulation de Dispatching Economique pour 06 unités de production thermiques avec l'intégration d'énergie éolienne.....	52
Tableau IV- 5 Répartition optimale de la puissance générée par les centrales thermiques (avec l'intégration d'énergie éolienne). .....	53
Tableau IV- 6 Résultats de simulation de la minimisation de la fonction risque pour 06 unités de production d'énergie électrique classiques avec l'intégration d'énergie éolienne. ....	56
Tableau IV- 7 Répartition optimale de la puissance générée active par les centrales thermiques (en présence des fermes éoliennes) avec les limites minimales et maximales. ....	57
Tableau IV- 8 Résultats correspondants à l'étude comparative.....	59

Liste des figures

**Chapitre I :**

Figure I- 1 Organisation du réseau électrique .....	3
Figure I- 2 Schéma de principe de fonctionnement d'une turbine à gaz .....	4
Figure I- 3 Fonctionnement d'une centrale nucléaire .....	5
Figure I- 4 Organisation du marché d'électricité .....	8
Figure I- 5 Les métiers du groupe SONELGAZ .....	10
Figure I- 6 Chiffres clés sur SONELGAZ .....	11
Figure I- 7 Méthode de gradient .....	13
Figure I- 8 Le vecteur gradient .....	14
Figure I- 9 Caractéristique coût (\$/h) en fonction de puissance générée (MW) .....	16
Figure I- 10 La caractéristique Coût=f (puissances) pour plusieurs combustibles .....	18
Figure I- 11 Effet d'ouverture et fermeture des vannes sur le caractéristique coût =f (P <sub>g</sub> ) .....	19
Figure I- 12 La caractéristique du coût d'une unité génératrice à deux zones interdite .....	20

---

**Chapitre II :**

Figure II- 1 Evolution et Prévisions de développement de la production d'énergie électrique (a) mondiale En générale, (b) Par énergies renouvelables .....	22
Figure II- 2 Programme algérien d'énergie renouvelable .....	22
Figure II- 3 Eolienne de Charles.F.Brush (Etats-Unis, 1888) .....	24
Figure II- 4 Evolution de production mondiale d'énergie éolienne (En haut : Offshore/En bas : Onshore) .....	26
Figure II- 5 La vitesse du vent (en m/s) à 50 mètres d'altitude .....	26
Figure II- 6 Structure générale d'une éolienne .....	28
Figure II- 7 Conversion de l'énergie cinétique du vent .....	28
Figure II- 8 Evolution de la puissance d'une éolienne en fonction de sa taille .....	31
Figure II- 9 Courbe de puissance d'une turbine éolienne (cas du système V110-2.0 MW du constructeur Vestas) .....	32
Figure II- 10 Représentation floue du niveau de sécurité en termes de pénétration du vent .....	33

---

**Chapitre III :**

Figure III- 1 Diagramme des états dans CSA (a) $f_l < 1$ et (b) $f_l > 1$ .....	39
Figure III- 2 Pseudo code du CSA proposé .....	40
Figure III- 3 Organigramme de l'algorithme CSA pour l'optimisation .....	44

---

*Chapitre IV :*

Figure IV- 1 Schéma présentant la stratégie du travail .....	46
Figure IV- 2 La configuration du réseau électrique de 6 unités de production .....	46
Figure IV- 3 Schéma unifilaire du réseau test IEEE 30 JB .....	47
Figure IV- 4 Répartition optimale des puissances générées pour 06 unités .....	50
Figure IV- 5 Caractéristique de convergence de l’algorithme CSA pour un réseau 06 unités .	50
Figure IV- 6 Répartition optimale des puissances générées pour 6 unités de production d’énergie électrique et de la puissance éolienne. ....	53
Figure IV- 7 Caractéristique coût en fonction d’itérations de l’algorithme CSA pour un réseau 06 unités avec l’intégration d’énergie éolienne .....	55
Figure IV- 8 Répartition optimale des puissances générées pour 6 unités de production d’énergie électrique avec la puissance éolienne optimale .....	57
Figure IV- 9 Caractéristique de convergence de l’algorithme CSA pour un réseau de 06 unités avec l’intégration d’énergie éolienne .....	59

*Liste des acronymes et symboles*

Acronymes	
PSO	Particle Swarm Optimization
TGV	La turbine à gaz et la turbine à vapeur
SONELGAZ	la Société Nationale de l'Electricité et du Gaz
SPE	la Société Algérienne de Production de l'Électricité
SKS	Shariket Kahraba Skikda
SKB	Shariket Kahraba Berrouaghia
SKH	Shariket Kahraba Hadjret Ennouss
SKT	Shariket Kahraba Terga
SKD	Shariket Kahraba de Koudiet Edraouch
GRTE	Société Algérienne de Gestion du Réseau de Transport de l'Electricité
OS	l'Opérateur du Système Electrique
OM	L'opérateur marché
SDA	SONELGAZ Distribution d'Alger
SDE	SONELGAZ Distribution Est.
SDC	SONELGAZ Distribution Centre
SDO	SONELGAZ Distribution Ouest.
CREG	Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz
CEEG	Compagnie de l'Engineering de l'Electricité et du Gaz.
SKTM	Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida

DA	Dinar Algérien
KWh	Kilo Watt Heures
Km	Kilomètre
DE	dispatching économique
MW	Mégawatt
GW	Gigawatt
GES	gaz à effet de serre
GWA	Global Wind Atlas
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine L'éolienne à axe Vertical
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine L'éolienne à axe Horizontal
CSA	Crow Search Algorithm
KW	Kilowat
MADA	Machine asynchrone double alimentée.

symboles	
$C_i$	Fonction du coût au niveau de génération $i$
$a_i, b_i \text{ et } c_i$	Coefficients de la fonction coût relative à chaque unité de production $i$
$N_g$	Nombre de générateur
$P_{gi}$	Puissance générée de l'unité $i$
$PD$	Puissance demandée totale
$PL$	Pertes totales

## Liste des acronymes et symboles

(min)	Puissance active minimale du générateur i
(max)	Puissance active maximale du générateur i
$\beta_{ij}, \beta_{ij}, \beta_{00}$	Coefficients des Pertes
$a_{in,n}etc_{in}$	Coefficients de coût de l'unité avec le combustible
$\rho$	Densité de l'air
S	Surface balayée par le rotor de l'éolienne
$V_v$	Vitesse de vent
$C_p$	Coefficient de puissance de l'éolienne ou le rendement aérodynamique de la turbine
$P_v$	puissance du vent
$C_{P_{opt}}$	Rendement optimal aérodynamique de la turbine
$\lambda$	La vitesse réduite
R	Résistance électrique.
$\Omega$	vitesse de rotation de la turbine
$P_m$	Puissance mécanique
$\Omega_1$	vitesse de rotation avant multiplicateur
R	rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale
$V_1$	Vitesse du vent respectivement en amont de l'éolienne
W	puissance éolienne incorporé dans le dispatching économique
$W(P_D)_{min}$	limite inférieure de la puissance éolienne
$W(P_D)_{max}$	limite supérieure de la puissance éolienne
WC	le coût d'énergie éolienne
$WC(PD)_{min}$	le coût limite inférieur pour l'intégration de l'énergie éolienne



$WC(PD)_{\max}$	le coût limite supérieur pour inclure l'énergie éolienne
$\mu$	Indicateur du niveau de sécurité du système
R	Risque
$W_{av}$	l'énergie éolienne disponible à partir des fermes éoliennes
$C_w$	le coefficient du coût de pénalité pour ne pas utiliser toute l'énergie éolienne disponible
TOC	le coût opérationnel total
$fl$	Indique la portée de vol
AP	Indique la probabilité de prise de conscience
<i>itermax</i>	Nombre maximal d'itérations
$N_{pop}$	Taille de population
$r$	Nombre aléatoire avec une répartition uniforme entre 0 et 1
$\$/h$	Dollar par heure
$\Delta P$	Bilan de puissance

# *Introduction générale*



## *Introduction générale*

L'énergie électrique nous accompagne dans notre vie quotidienne à tous les niveaux. Elle est nécessaire pour les simples citoyens que pour les industriels dans tous les pays du monde. Néanmoins, la production de cette énergie électrique présente des défis sur le plan économique et environnemental. Le défi sur le plan économique concerne la diminution des ressources fossiles utilisées dans la production de cette énergie électrique, tandis que le défi sur le plan environnemental est lié au dégagement des gaz toxiques et les gaz à effet de serre, où les compagnies de production de l'énergie électrique sont obligées à réduire leur niveau de génération à cause du protocole mondiale de Kyoto 1997 (relative à la protection de l'environnement). Pour ces raisons, l'utilisation des énergies renouvelables représente une alternative intéressante qui pourra dans le futur remplacer les centrales électriques traditionnelles. Parmi ces énergies, on cite celle qui est basée sur l'énergie éolienne, c'est l'une des solutions viable. Elle présente des avantages potentiels pour produire l'électricité gratuitement, et réduire la consommation de réserves du carburant non renouvelable, ce qui permet de réduire les émissions des gaz toxiques. Malgré les avantages de l'intégration des sources à énergie renouvelables dans le réseau, le taux d'intégration de ces sources influe considérablement sur la stabilité du réseau électrique à cause de la non-homogénéité des générateurs de puissance électrique, ce qui constitue un défi sur le plan de sécurité des réseaux électriques.

Dans ce mémoire de fin d'étude nous examinerons l'impact de l'incorporation de l'énergie éolienne dans le réseau électrique. Sur le plan économique : la répartition optimale de la puissance active générée (à partir des centrales classiques et les sources à énergie renouvelables) avec un minimum cout de production, ce processus de gestion optimale s'appelle le dispatching économique. Une autre étude sur le plan de sécurité des réseaux électriques s'intéresse à la minimisation du risque d'intégration de l'énergie éolienne en déterminant le taux d'intégration de cette énergie et en gardant la sécurité du réseau (stabilité du réseau) dans les limites acceptables. Une analyse détaillée sera fournie sur les effets de l'intégration de l'énergie éolienne sur le dispatching économique et sur la sécurité du réseau en fonction du taux d'intégration prédéfini par les opérateurs des réseaux électriques.

Ces problématiques nous ont poussées pour adopter une méthode d'optimisation méta-heuristique à cause de la complexité du problème traité. Une méthode d'optimisation choisit

qui est simple, facile à implémenter et basée sur le comportement social et l'intelligence du corbeau pour la recherche et le vol de la nourriture des autres individus de l'essaim des corbeaux nommé algorithme de recherche de corbeau (Crow Search Algorithm - CSA). Cette méthode a été proposée en 2016 par Alireza Askarzadeh et elle a été utilisée pour résoudre le problème de dispatching économique pour la première fois en 2017 [DOU17] et pour la première fois dans ce mémoire pour l'objectif d'étudier le dispatching économique et le risque d'intégration d'énergie éolienne.

Pour exécuter le programme assurant les tâches de cet algorithme, on a utilisé MATLAB 2013 installé sur un ordinateur équipé par un  $\mu$ .processeur de type Intel®core (I3) de fréquence 1.10 GHz et une RAM de 4 Go.

Afin de répondre à toutes les problématiques citées au-dessus, ce projet de fin d'étude est divisé en quatre chapitres comme suit :

- le premier chapitre présentera dans un premier temps un aperçu général sur le système d'énergie électrique et ses principales fonctions qui sont : production-transport-consommation. De plus nous soumettrons un bref résumé sur le marché d'énergie électrique notamment celui de l'Algérie. Nous verrons aussi le problème d'optimisation particulièrement le dispatching économique sa formulation et sa résolution considérant différentes méthodes.
- pour le deuxième chapitre qui est intitulé l'intégration d'énergie éolienne au réseau électrique nous verrons en bref les différentes énergies renouvelables en allouant une grande partie à l'énergie éolienne traitant ses avantages, ses inconvénients et l'impact d'intégration de l'énergie éolienne sur un réseau électrique conventionnel.
- Dans le troisième chapitre on présentera la méthode de recherche du corbeau (CSA), son inspiration, son mécanisme et ses paramètres d'optimisation.
- Le dernier chapitre sera consacré à la partie de simulation pour l'application de l'algorithme de recherche du corbeau (CSA) pour résoudre le problème de dispatching économique sans et avec l'intégration de l'énergie éolienne sur un réseau électrique de test IEEE30 bus avec six (06) unités de production d'énergie électrique.

Enfin nous scellerons ce mémoire de fin d'étude par une conclusion générale et des perspectives pouvant servir à des idées de base à des futurs travaux.

# *Chapitre I :*

## *Marché d'énergie électrique et dispatching économique*



## Chapitre I : Marché d'énergie électrique et dispatching économique

### I.1 Introduction :

L'énergie électrique est une partie intégrante de l'économie des pays grâce à son rôle domestique et industriel qui ne peut être plus négligé. Le marché d'énergie électrique constitue l'un des principaux supports économiques de n'importe quel pays sur lequel s'articule la plus part des transactions de fourniture de l'énergie électrique. Il est nécessaire d'exploiter le système d'énergie électrique avec le minimum du coût tout en respectant la répartition de la puissance active demandée. C'est dans ce cadre que ce présent chapitre s'inscrit pour présenter le système d'énergie électrique, le marché d'électricité et le problème de dispatching économique plus particulièrement en Algérie avec l'exposition de la formulation du problème de dispatching économique et sa formulation comme un problème d'optimisation suivi par quelques méthodes de résolution classiques et méta-heuristiques.

### I.2 Le système d'énergie électrique et ses composants :

Un système électrique est formé par l'ensemble des parties principales, la première partie est les centres de production d'énergie électrique « les différents types des centrales électriques » puis les lignes qui assurent le transport de cette énergie fournie « réseaux de transport » et enfin les centres des consommations « les différents charges ou les clients » tout en respectant les conditions pour les raisons technico-économiques. Le schéma descriptif de ce système est illustré sur la Figure I.1.

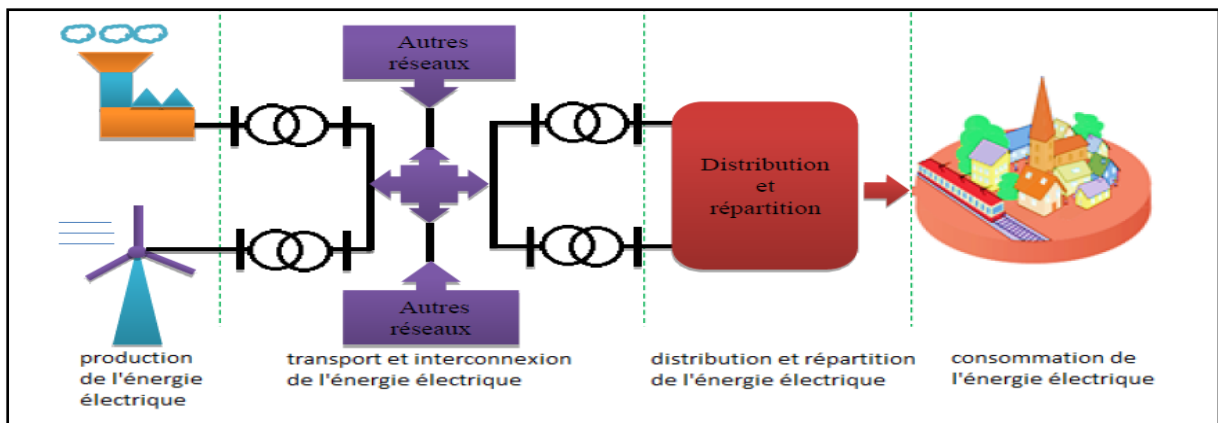


Figure I- 1 Organisation du réseau électrique [BEN KIL 14]

### I.2.1 Production de l'énergie électrique :

C'est la transformation des énergies convertibles en énergie électrique, les unités de productions sont diversifiées et classés selon le type de source d'énergie convertie (énergie fossile, énergie renouvelable) la capacité de production (la puissance sortie de la centrale électrique) et le temps de réponse (temps de réaction).

#### I.2.1.a La centrale à turbine à gaz :

La turbine à gaz, aussi appelée turbine à combustion, est une machine thermique qui connaît actuellement un essor croissant, compte tenu de ses excellentes performances (rendement supérieur à 35 % utilisée seule, et à 55 % en cycle combiné). Dans sa forme la plus simple et la plus répandue cette machine est composée de trois éléments (Figure I. 2) :

- 1) Un compresseur qui sert à comprimer l'air ambiant à une pression comprise dans les machines modernes entre 10 et 30 bars environ.
- 2) Une chambre de combustion, dans laquelle un combustible injecté sous pression est brûlé avec l'air préalablement comprimé.
- 3) Une turbine, généralement axiale, dans laquelle sont détendus les gaz à haute température sortant de la chambre de combustion. Une partie significative (60 à 70 %) du travail récupéré sur l'arbre de la turbine sert à entraîner le compresseur [BEN KIL 14]

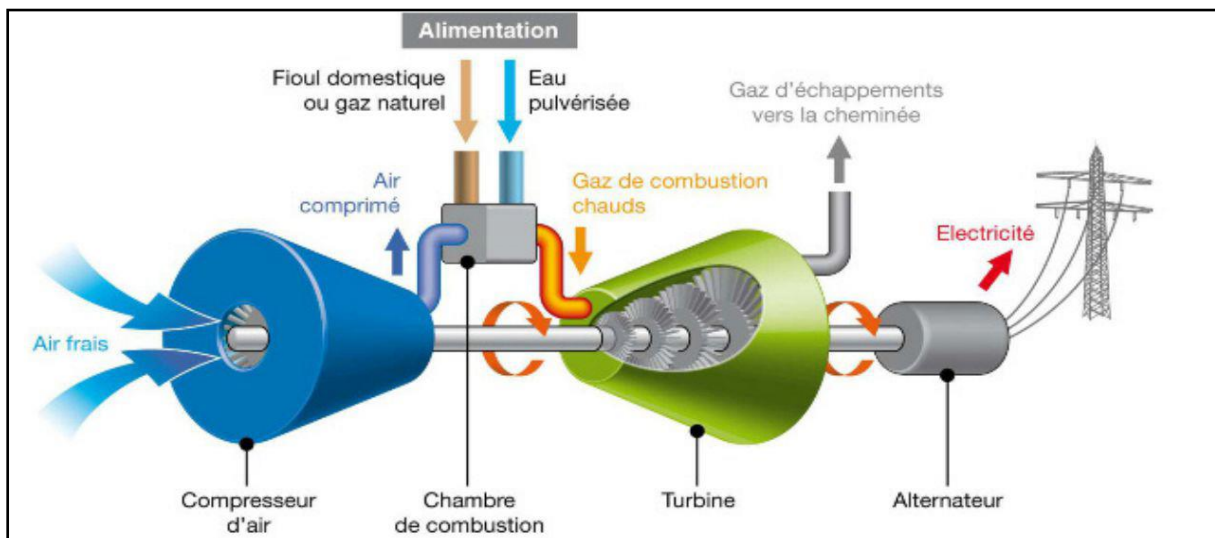


Figure I- 2 Schéma de principe de fonctionnement d'une turbine à gaz [BEN KIL 14]

#### Exemple de centrale à turbine à gaz en Algérie willaya de BISKRA :

La centrale électrique à cycle simple Oumeche 2 -Biskra- 456,89 MW rattaché au pôle de production TV/TG EST s'inscrit dans le cadre du plan d'urgence pour développer le parc de

production par une puissance additionnelle de 1600 MW. Le site de la centrale Oumeche 2 se situe à 60 Km au Sud de la wilaya de Biskra et occupe une superficie de 17,5 Hectare. Il a pour objectif :

- ✓ de répondre à la demande croissante d'énergie.
- ✓ d'assurer la continuité et la qualité de service.
- ✓ d'assurer la sécurité de l'alimentation en énergie électrique de la région.
- ✓ D'assurer un appoint au réseau national interconnecté.

La centrale est composée essentiellement de [DOC19] :

- Deux (02) turbines à gaz type SGT5-4000F Siemens d'une puissance globale de 456.89MW.
- Un Système d'Alimentation en gaz naturel, et un système d'alimentation en fuel.
- Système de protection incendie.
- Bâtiment administratif, bâtiment électrique et divers locaux.
- Station d'eau déminéralisée et système traitement d'eau.

#### *1.2.1.b Les centrales nucléaires :*

Les centrales nucléaires basées sur la fission d'atome d'uranium qui produit une très grande quantité de chaleur. Cette dernière fait augmenter la température de l'eau qui circule autour du réacteur, cette eau chaude chauffe à son tour l'eau du circuit secondaire qui se transforme en vapeur et qui va faire tourner une turbine qui entraîne un alternateur. Dans le 3ème circuit à la sortie de la turbine la vapeur du 2ème circuit est transformée en eau grâce à condensateur de la vapeur d'eau et qui peut être aussi refroidie dans les aéro-réfrigérants. (Figure I.3)

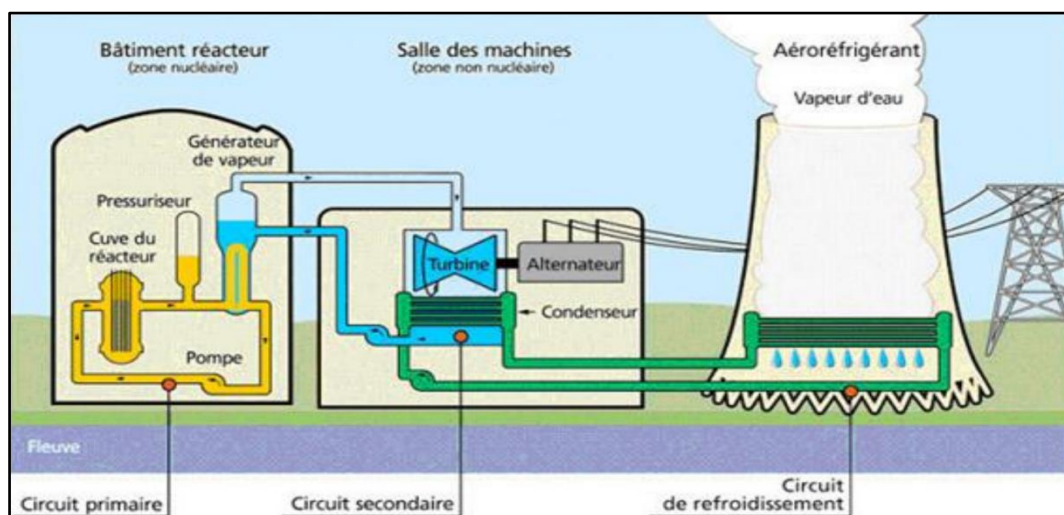


Figure I- 3 Fonctionnement d'une centrale nucléaire [BEN KIL 14]



### ***I.2.1.c Les centrales à énergie renouvelable :***

Les centrales d'énergie renouvelable transforment une énergie primaire renouvelable (énergie éolienne, énergie solaire, énergie hydraulique ...), pour produire de la chaleur ou de l'électricité. Ces centrales produisent de l'énergie sans aucun coût de combustible primaire.

### **I.2.2 Réseaux du transport :**

Les réseaux des transports sont des réseaux à THT pour raison économique notamment, afin de minimiser des pertes en ligne. Ils sont caractérisés par des transferts de puissance importants avec les moins chutes de tension et les moins pertes. Un réseau de transport doit être exploité selon les limites de fonctionnement autorisées. Ces limites ou contraintes du réseau sont exprimées par des valeurs maximales ou minimales sur certaines variables du réseau (fréquence, écoulement de puissance sur les lignes ou transformateurs, niveau de tension, etc.). Si ces limites sont dépassées, le réseau risque de devenir instable. [OUL14]

### **I.2.3 La consommation de l'énergie électrique :**

La consommation d'électricité correspond à un appel de puissance active sur le réseau pour une période de temps bien déterminée. L'électricité est consommée par des différents types de consommateurs (résidentiels, commerciaux et industriels), étant donné la pluralité de leurs utilisations individuelles de l'énergie électrique, elle varie à chaque moment. [SAG 07]

Connaître la consommation de l'électricité d'une période future est important pour l'exploitation du système électrique. Pour ce faire, une multitude de variables sont traditionnellement utilisées pour expliquer et prédire le niveau de consommation d'électricité : la température, l'heure de la journée, le jour de la semaine (jour ouvrable, week-end), le prix, etc. L'impact de la plupart de ces variables est lié aux conditions climatiques, aux habitudes de consommation, aux rythmes de vie et au pays considéré. [SLI 09]

### **I.2.4 Fluctuation de la consommation de l'énergie électrique :**

Les différentes utilisations individuelles de l'énergie électrique, à chaque moment, se traduisent par de fortes fluctuations de la consommation dans le temps. Cependant, ces fluctuations ont un certain caractère cyclique au cours de la journée, de la semaine, et de l'année [SAG 07]. Alors elle oblige les compagnies d'électricité à prévoir trois classes de centrales de génération :

1. Les centrales de base : de grande puissance qui débitent leur pleine capacité en tout temps. Les centrales nucléaires sont particulièrement aptes à remplir ce rôle.

2. Les centrales intermédiaires : de puissance moyenne qui réagissent rapidement aux fluctuations de la demande. C'est le cas des centrales hydrauliques dont le débit est facilement contrôlable.

3. Les centrales de pointe : de puissance moyenne qui ne débitent leur pleine capacité que pendant de courtes périodes. Elles sont plus chères que celle des centrales de base, c'est pourquoi les compagnies d'électricité encouragent les usagers à limiter leur charge de pointe.

### **I.3 Marché d'énergie électrique :**

Le marché de l'électricité est un marché assez différent de ceux auxquels le consommateur est habitué. Dans la représentation classique du marché des biens, plusieurs producteurs sont en concurrence pour vendre leurs produits (par des grossistes ou directement) à des chaînes de distribution ou à des commerçant qui les revendent ensuite aux consommateurs. Il y a donc une cascade de ventes successives. Cela n'est pas possible pour l'électricité car elle ne se stocke pas. Il faut, minute par minute, « approvisionner » le réseau électrique en quantité égale à ce que les utilisateurs « consomment ». Il y a un problème permanent d'équilibrage du réseau, équilibrage qui doit être anticipé pour éviter toute coupure. Cela implique qu'il y ait un acteur unique qui gère le réseau, en planifie et en assure l'équilibre. Tant qu'un opérateur transportait et distribuait l'électricité qu'il produisait pour l'essentiel, ce problème était résolu par lui seul mais le fonctionnement du marché de l'électricité a été profondément transformé par l'ouverture du marché à la concurrence. [ZIA18]

#### **I.3.1 Acteurs et activités du marché de l'électricité :**

Le marché de l'électricité peut être décomposé en quatre activités qui sont chacune nécessaires pour l'alimentation (trois activités physiques et une commerciale) des clients finaux en électricité :

- 1- la production de l'électricité.
- 2- le transport de l'électricité.
- 3-la distribution de l'électricité.
- 4- la commercialisation de l'électricité [DID09]

La figure ci-dessous schématise cette décomposition, et la relation entre les principaux éléments du marché d'électricité"

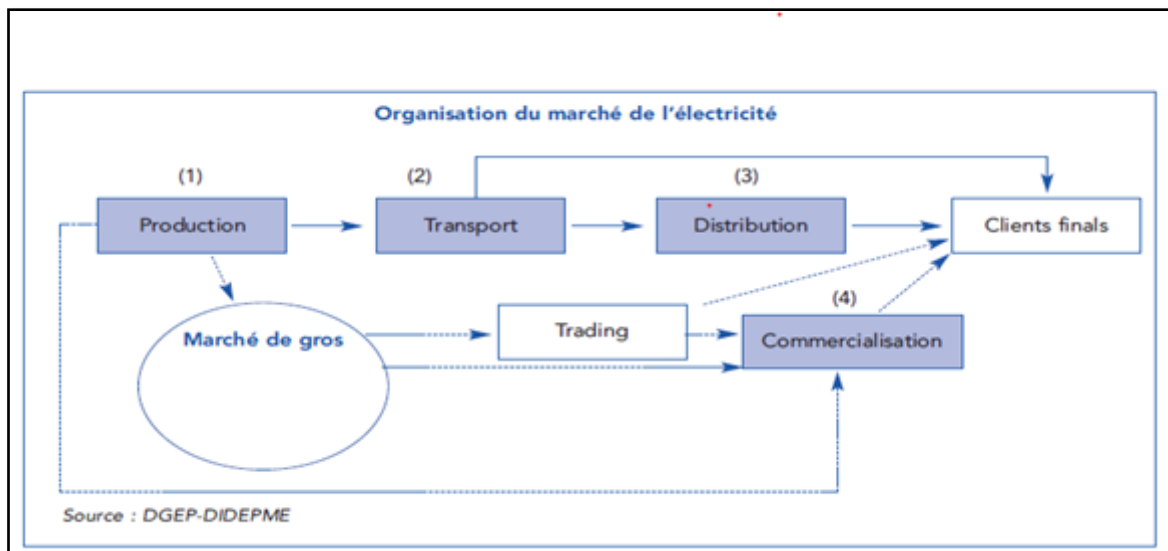


Figure I- 4 Organisation du marché d'électricité [DID09]

### I.3.2 Libération du marché de l'électricité :

La dérégulation du marché de l'électricité a impliqué une séparation entre la production, le transport et la distribution de l'énergie électrique. Avec l'ouverture à la concurrence et l'apparition des marchés de gros de l'électricité, les prix devraient progressivement remplacer la planification centralisée et piloter les investissements décentralisés en capacité de production. Les prix jouent désormais un rôle fondamental. Ils sont censés à renseigner les participants sur le moment, la quantité et aussi le type d'unités qu'il faut construire. [ZIA18]

L'Algérie est parmi les pays dont le marché d'électricité n'est pas encore dérégulé, ce qui peut être justifié par la domination du groupe SONELGAZ sur la plupart des actions du marché.

### I.3.3 Les principaux acteurs du marché d'électricité en Algérie :

#### I.3.3.a Production de l'électricité :

Le parc de production national est constitué des centrales électriques de la Société Algérienne de Production de l'Électricité (SPE), et de Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida (SKTM) indiqué sur la Figure I-5 qui est une filiale de Sonelgaz, ainsi que des sociétés en partenariat avec Sonelgaz :

- Kahrama Arzew entrée en service en 2005.

- ShariketKahraba Skikda « SKS » entrée en service en 2006.

- ShariketKahrabaBerrouaghia « SKB » (Médéa) entrée en service en 2007.
- ShariketKahrabaHadjretEnnouss « SKH » entrée en service en 2009.
- ShariketKahrabaTerga « SKT » entrée en service en 2012.
- ShariketKahraba de KoudietEdraouch « SKD » entrée en service en 2013. **[MIN 20]**

La capacité de production additionnelle nationale sera de 18 749 MW dont :

- 10 977 MW décidés pour le Réseau Interconnecté Nord sur la période 2018 – 2023
- 272 MW décidés pour le Pôle In Salah Adrar Timimoune sur la période 2018 – 2020
- 7500 MW en capacité additionnelle sur la période 2024 – 2028

Le montant de l'investissement pour la période 2018-2028 est de 1 530 Milliards DA.

**[SON 20]**

#### *1.3.3.b Transport de l'électricité :*

L'activité de transport de l'électricité est régie par la loi n°02-01 au 05 février 2002 relative à l'électricité et à la distribution du gaz par canalisations. Sa gestion est assurée par la « Société Algérienne de Gestion du Réseau de Transport de l'Electricité, dénommée GRTE», en tant que gestionnaire unique du réseau. **[CREG20]**

#### *1.3.3.c Gestion et control du réseau électrique :*

Le fonctionnement et le control du réseau électrique est assuré par l'Opérateur du Système Electrique (OS) [figure I- 5]. Il veille en particulier à l'équilibre permanent entre consommation et production, à la sécurité, à la fiabilité et à l'efficacité de l'alimentation électrique. L'opérateur du système ne peut exercer des activités d'achat ou de vente d'énergie électrique **[CREG20]**.

L'opérateur marché (OM) : chargé de la gestion de l'équilibre offre / demande d'électricité. Son rôle est essentiellement de recueillir les offres de vente, les offres d'achat, et de faire l'adéquation entre ces offres et de communiquer à tous les acteurs du marché les résultats de cette adéquation. Il s'agit d'une organisation de marché de type Bourse Volontaire. **[KHA 14]**  
L'exploitation, la maintenance et le développement du réseau de transport de l'électricité sont assurés aussi par GRTE [Figure I- 5]. **[CREG20]**

La figure I-5 représente les métiers du groupe de sonelgaz.

CEEG : Compagnie de l'Engineering de l'Electricité et du Gaz Spa.

SPE : Assure la production et la commercialisation de l'électricité.

GRTE : Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité.

OS : L'Opérateur du Système Electrique.

GRTG : Société Algérienne de Gestion du Réseau de Transport du Gaz Spa.

SDC : Société Algérienne de Distribution de l'Electricité et du Gaz Spa.

SKTM: Shariket Kahraba wa Taket Moutadjadida Spa. [SON 20].



**Figure I- 5 Les métiers du groupe SONELGAZ [SON 20]**

#### ***1.3.3.d Distribution de l'électricité :***

Les principales entreprises de distribution sont :

SDA : SONELGAZ Distribution d'Alger.

SDE : SONELGAZ Distribution Est.

SDC : SONELGAZ Distribution Centre.

SDO : SONELGAZ Distribution Ouest.

#### ***1.3.3.e Commercialisation de l'électricité :***

Pour les clients éligibles le prix est déterminé dans le contrat commercial et Le CREG (Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz) qui détermine le tarif d'utilisation du

réseau de transport par ces clients chaque année. Les entreprises de distribution alimentent les clients non éligibles et ces deniers payent selon le tarif déterminé par le CREG.

Parce que le marché d'électricité en Algérie est dominé par SONELGAZ, on peut voir globalement ses actions d'un point de vue statistique approximative actuellement (2020), d'après le site de cette entreprise. [Figure I-6]

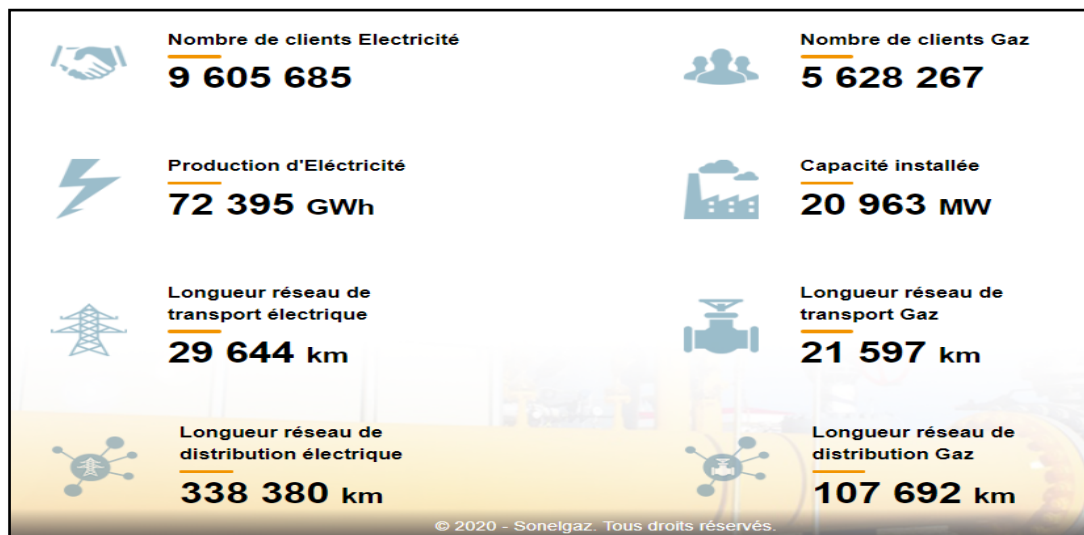


Figure I- 6 Chiffres clés sur SONELGAZ [SON 20]

L'objectif principal d'un marché d'électricité est de satisfaire le client par une bonne qualité d'énergie électrique et une continuité de service alors pour se réalise ces dernier il faut assurer la stabilité du réseau en tout instant pour éviter toute coupure, et cela pour attirer le maximum des clients et tout ça avec un coût moins cher le plus possible.

Pour assurer les objectifs précédents, il est nécessaire de faire une étude pour aboutir à un état optimal du réseau électrique appelée le dispatching économique considéré comme un problème d'optimisation.

#### I.4 Définition d'un problème d'optimisation :

Un problème d'optimisation est défini comme la recherche, dans un espace de solutions, d'une solution optimale quantifiée par une fonction objectif. Cette quantification conduit à vouloir maximiser ou minimiser la fonction objective du problème [PEI16]. Les problèmes d'optimisation avec plus qu'une fonction objectif, appelés multi-objectifs, peuvent être résolus par de nombreuses méthodes, parmi ces dernières, ceux qui sont basées sur la dominance de Pareto.

### I.4.1 Formulation standard d'un problème d'optimisation

Un problème d'optimisation mono-objectif est formulé sous la forme suivante :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Minf} (x) \\ g(x)=0 \\ h(x)\leq 0 \end{array} \right. \quad (\text{I.1})$$

$g(x)$  : Contraintes d'égalité ;

$h(x)$  : Contraintes d'inégalité

#### I.4.1.a La fonction objectif :

C'est le nom donné à la fonction  $f$  (on l'appelle aussi fonction de coût ou critère d'optimisation). C'est cette fonction que l'algorithme d'optimisation doit l'optimiser (trouver un optimum). Cette fonction dite « Objective » peut être un coût (à minimiser), un profit (à maximiser) ou une production (à maximiser). Les fonctions objectives sont diverses selon le problème à optimiser.

#### I.4.1.b Variables de décision :

Elles sont regroupées dans le vecteur. C'est en faisant varier ce vecteur que l'on recherche un optimum de la fonction  $f$ , elles peuvent être des variables de contrôle.

#### I.4.1.c Contraintes :

Les contraintes représentent les conditions sur les variables de décision qui doivent les satisfaire. Ces contraintes sont souvent des contraintes d'inégalité ou d'égalité et permettent en général de limiter l'espace de recherche et le respect des conditions techniques du problème à traiter. [NAI13]

### I.5 Résolution du problème d'optimisation :

Les méthodes de résolution d'un problème d'optimisation peuvent être classées en 02 catégories :

- ✓ Méthodes exactes (classiques).
- ✓ Méthodes approchées.

#### I.5.1 Méthodes exactes :

Ces méthodes s'appellent les méthodes classiques ou conventionnelles. Elles permettent de résoudre des problèmes non linéaires et sont basées sur une hypothèse forte : la connaissance

de la dérivée de la fonction objective en chacun des points de l'espace et plusieurs méthodes similaires sont utilisées comme la méthode du gradient qui est la plus ancienne, la méthode de Newton et la méthode du point intérieur [NAI13].

**1.5.1.a Méthode du gradient :**

Dans le cas le plus général, afin de trouver un optimum d'une fonction, le parcours le plus simple est de suivre la ligne de plus forte pente. Du point de vue mathématique, la pente d'une fonction correspond à la dérivée de cette dernière. Si on est dans le cas d'une fonction suffisamment dérivable à plusieurs variables, la dérivée est un vecteur qui est appelé : le gradient de la fonction dont les éléments de ce vecteur correspondent aux dérivées partielles de la fonction par rapport à ses variables.

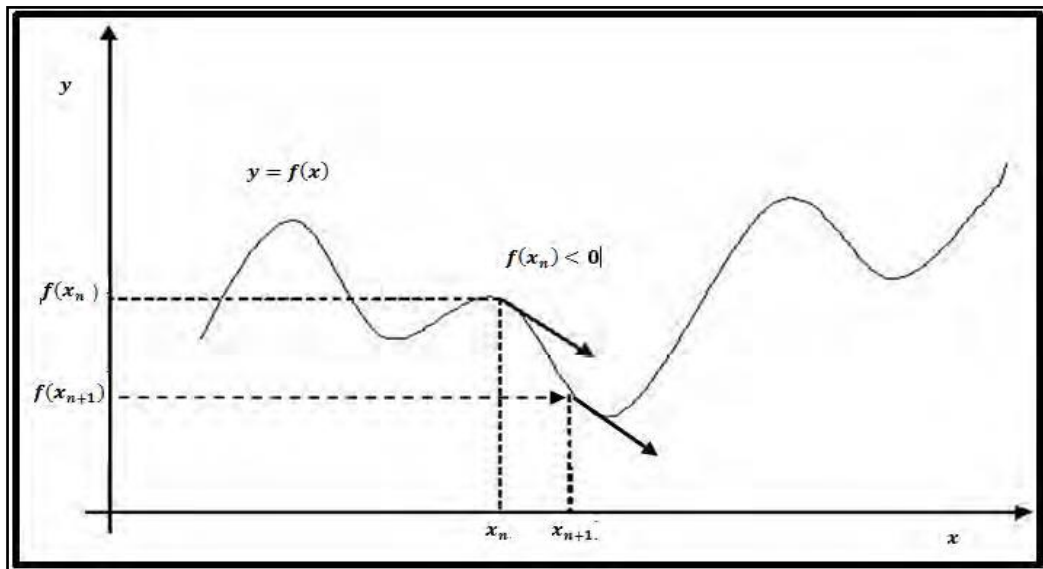
Soit la fonction  $f(x)$  dérivable au moins une seule fois, le principe ici est de partir d'un point Aléatoire  $x_0$  puis de se déplacer dans la direction de la plus forte pente. En appliquant un certain nombre d'itérations, l'algorithme converge vers une solution  $x_n$  qui est un minimum global. Les nouvelles valeurs seront calculées par l'expression suivante [LAB 13] :

$$x_{n+1} = x_n - \eta f'(x_n) \tag{I.2}$$

$\eta$  : est une valeur "bien" choisie réelle non nulle.

On remarque que  $x_{n+1}$  est d'autant plus éloigné de  $x_n$  que la pente de la courbe en  $x_n$  est grande. On peut décider d'arrêter l'itération lorsque cette pente est suffisamment faible (en dimension 2 par exemple, un minimum correspond à une pente nulle).

La figure suivante montre le fonctionnement de la méthode de gradient



**Figure I- 7 Méthode de gradient [LAB 13]**



La figure I- 8 représente le vecteur gradient et la convergence de la méthode vers une solution qui est un minimum local.

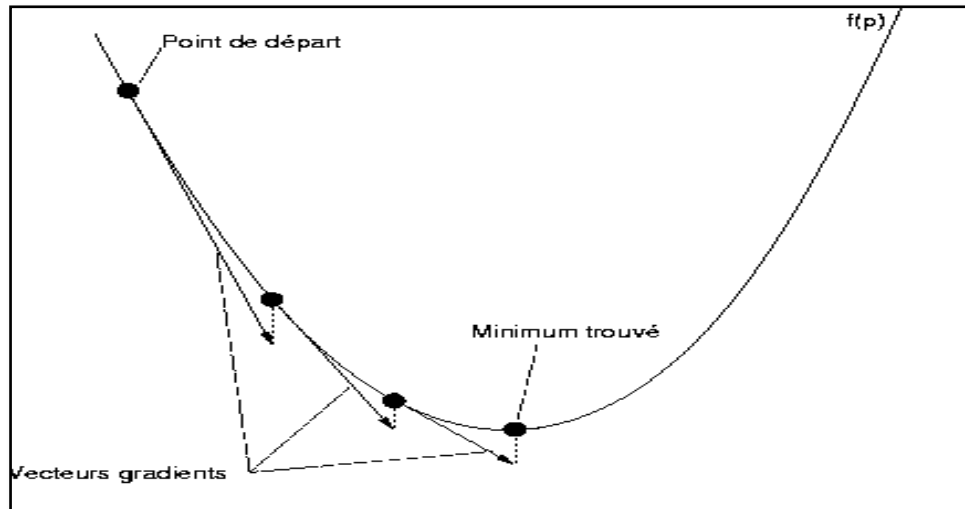


Figure I- 8 Le vecteur gradient [LAB 13]

Lorsqu'il devient nécessaire d'obtenir des solutions, non forcément exactes, pour des problèmes de grande taille dans des temps impartis restreints, il devient nécessaire d'utiliser les méthodes dites approchées.

### I.5.2 Méthodes approchées :

#### I.5.2.a Méthodes heuristiques :

Le mot heuristique vient du grec qui signifie « je trouve » d'où le célèbre Eurêka d'Archimède. Une heuristique, ou méthode approximative, est un algorithme qui fournit rapidement une solution réalisable, pas nécessairement optimale, pour un problème d'optimisation [BOU 13]. Elle exploite les propriétés structurelles d'une solution et tente de la rendre rapidement une solution.

#### I.5.2.b Méthodes Méta-heuristiques :

Le mot méta-heuristique est dérivé de la composition de deux mots grecs : méta du signifiant «au-delà» ou «à un plus haut niveau» et heuristique [BOU 13]. La majorité des méta-heuristiques sont inspirées des systèmes naturels. Nous pouvons citer à titre d'exemple : les algorithmes génétiques qui sont inspirés des principes de la biologie, les algorithmes basés sur l'intelligence d'essaim comme l'algorithme d'optimisation par essaim de particules,

l'algorithme de colonies de fourmis, l'algorithme de colonies d'abeille et ces algorithmes sont distingués par :

- ✓ Elles n'exigent pas d'hypothèse par rapport à l'espace d'état (continuité, dérivabilité)
- ✓ Elles n'exigent pas la présence de modèle mathématique du problème à optimiser
- ✓ pas de risque de tomber sur un optimum local.
- ✓ Il y a toujours une solution [NAI13]

#### *1.5.2.c Optimisation par colonie des fourmis (ACO) :*

Le terme colonies de fourmis est un terme générique représentant une classe d'algorithmes, initiée par l'algorithme « Système de Fourmis » (Ant System). Cet algorithme se base sur le comportement de communication particulier des fourmis. Lorsqu'elles explorent un environnement, les fourmis construisent un chemin en déposant une substance volatile, la phéromone. Les suivantes « lisent » cette information grâce à leurs antennes et choisiront probablement le chemin possédant la plus forte concentration de phéromone. [PEI16]

#### *1.5.2.d Optimisation par essaims particulaires (PSO) :*

L'optimisation par essaim particulaire (PSO) «Particle Swarm Optimization» est un algorithme proposé par Kennedy et Eberhart en 1995. Il s'inspire du comportement social des animaux évoluant en essaim (par exemple : les vols groupés des oiseaux). L'essaim de particules correspond à une population d'agents simples, appelés particules. Chaque particule est considérée comme une solution du problème, où elle possède une position  $x_i$  et une vitesse de déplacement  $v_i$ . De plus, chaque particule possède une mémoire lui permettant de se souvenir de sa meilleure performance (en position et en vitesse) et de la meilleure performance atteinte par les particules de l'essaim. [HAD18]

### **1.6 Dispatching économique :**

Les centrales électriques connectées au réseau sont appelées à produire suffisamment de puissance pour répondre à la demande des charges. Cette demande varie considérablement durant les journées et les saisons, et les coûts de production d'énergie diffèrent aussi d'une centrale à une autre, selon le type et l'efficacité. Par conséquent, il est indispensable de répartir la capacité de génération d'une manière à satisfaire la demande avec un minimum de

coût. Le problème de répartition des charges sur les différentes unités de production est appelé dispatching économique. [HAM 17]

### I.6.1 Formulation du problème du dispatching économique :

La formulation de dispatching économique consiste à minimiser le coût total de production de l'énergie à partir des centrales électriques en minimisant le coût total de carburant :

$$\text{Min } C_T = \sum_{i=1}^{N_g} C_i(P_{gi}) \quad (\text{I.3})$$

Tout en respectant des contraintes d'égalité et d'inégalité.

#### I.6.1.a Caractéristique Coût- Puissance d'une unité de production :

Le coût en fonction de la puissance générée d'une unité productrice *i* est présenté sous une forme quadratique (Figure I-9) par l'équation suivante :

$$C_i(P_{gi}) = a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2 \quad (\text{I.4})$$

Cette fonction reflète le besoin de minimiser le coût total de la production des puissances actives. On suppose que le coût individuel de chaque centrale de production dépend uniquement de la génération de la puissance active.

Le problème du dispatching économique se forme par une fonction objective s'écrit comme suit est :

$$\text{Min } C_T(P_{gi}) = \sum_{i=1}^{N_g} a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2 \quad (\text{I.5})$$

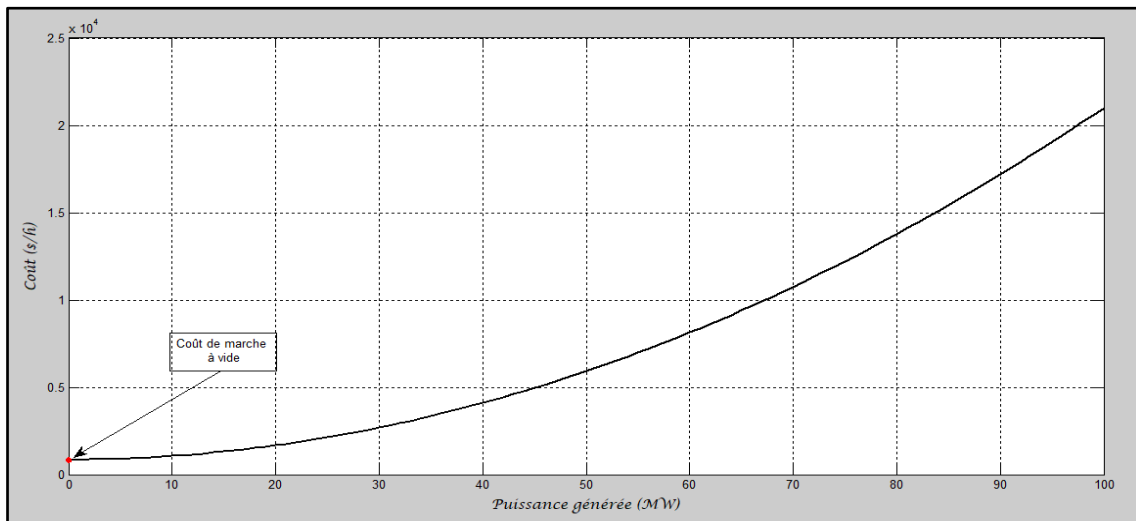


Figure I- 9 Caractéristique coût (\$/h) en fonction de puissance générée (MW)

### *1.6.1.b Les contraintes d'égalité :*

L'équilibre permanent entre la production et la consommation d'électricité est nécessaire pour produire une tension et une fréquence uniforme dans tout le réseau, par conséquent l'énergie électrique doit pouvoir maintenir l'équilibre de puissance (la totalité des puissances générées doit être égale la somme des puissances consommées plus les pertes). C'est Le bilan de puissance qui est la contrainte la plus importante à satisfaire pour assurer une bonne gestion des réseaux électriques en termes de qualité d'énergie et coût de production minimal.

$$\sum_{i=1}^{N_g} P_{gi} = P_D + P_L \quad (I.6)$$

$$P_L = \sum_{i=1}^{N_g} \sum_{j=1}^{N_g} P_{gi} \cdot \beta_{ij} P_{gj} + \sum_{j=1}^{N_g} \beta_{0i} P_i + \beta_{00} \quad (I.7)$$

Avec :

$N_g$  : Le nombre des unités de production.

$P_{gi}$  : La puissance générée de l'unité  $i$ .

$P_D$  : La puissance demandée totale.

$P_L$  : Les pertes totales.

$\beta_{00}, \beta_{0i}, \beta_{ij}$  : Coefficients des pertes.

### *1.6.1.c Les contraintes d'inégalité :*

$$P_{gi(min)} \leq P_{gi} \leq P_{gi(max)} \quad (I.8)$$

Avec :

$P_{gi(min)}$  : Puissance active minimale générée par l'unité.

$P_{gi(max)}$  : Puissance active maximale générée par l'unité.

### *1.6.1.d Les contraintes pratiques :*

#### **Influence du changement du combustible :**

Il y a des unités de génération qui fonctionnent par plusieurs types de combustible, le changement du combustible utilisé, influe sur la caractéristique du coût en fonction de la puissance générée. (Figure I-10) [HAM 19]

Le système d'équation suivant exprime le coût de puissance générée pour différents combustibles :

$$C_i(P_{gi}) = \begin{cases} a_{i1} + b_{i1}P_{gi} + c_{i1}P_{gi}^2 & 1^{\text{er}} \text{ combustible} \\ a_{i2} + b_{i2}P_{gi} + c_{i2}P_{gi}^2 & 2^{\text{ème}} \text{ combustible} \\ a_{in} + b_{in}P_{gi} + c_{in}P_{gi}^2 & n^{\text{ième}} \text{ combustible} \end{cases} \quad (\text{I.9})$$

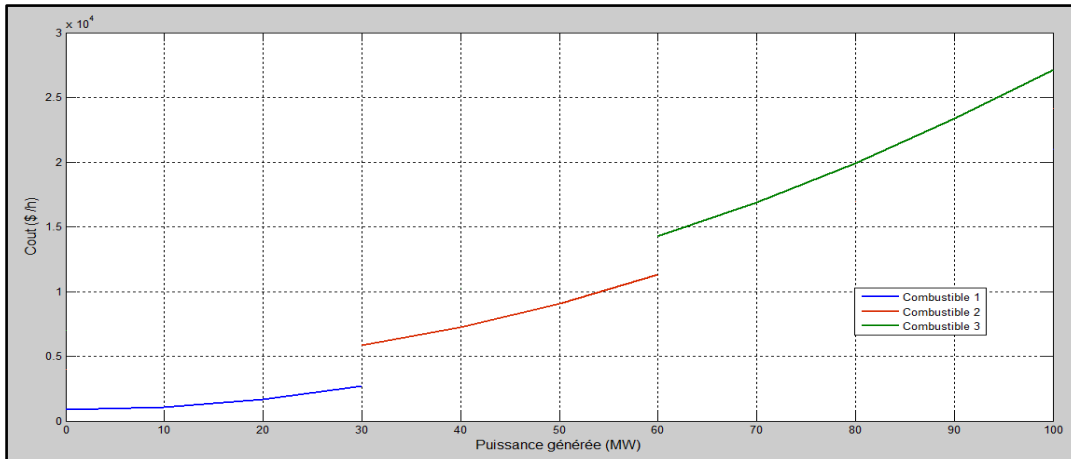


Figure I- 10 La caractéristique Coût=f (puissances) pour plusieurs combustibles

**Effet d'ouverture et fermeture des vannes :**

L'ouverture et la fermeture des vannes provoquent brusquement une augmentation des pertes, ce qui ajoute des ondulations dans la courbe du cout de combustible. On exprime l'effet de l'ouverture et la fermeture des vannes en ajoutant un terme sinusoïdale à la forme quadratique du coût de combustible : La figure I.11 montre la courbe du coût typique d'une unité thermique à cinq vannes d'admission gaz naturel/autre combustible.

$$F_i(p) = a_i + b_iP_{gi} + c_iP_{gi}^2 + |e_i \cdot \sin(f_i \cdot (P_{gimin} - P_{gi}))| \quad (\text{I.10})$$

Avec :

$a_i, b_i, c_i, e_i$  et  $f_i$ : Coefficients du coût de l'unité de production  $i$ .

A, B, C, D, E : nombre des vannes. [ZIA18]

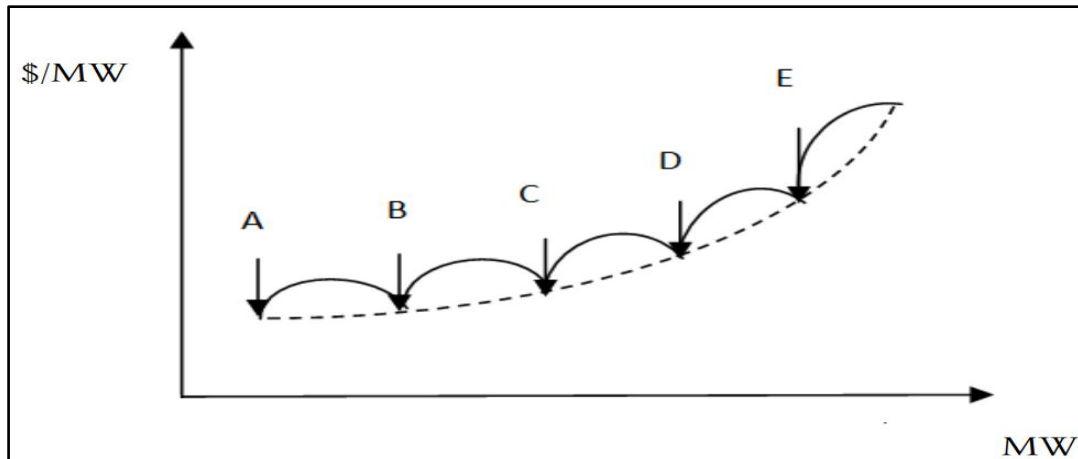


Figure I- 11 Effet d'ouverture et fermeture des vannes sur le caractéristique coût =f (Pg) [ZIA18]

**Les zones interdites :**

Elles sont les zones dans lesquelles le fonctionnement est indésirable à cause des problèmes dans les éléments de l'unité de production, comme la vibration au niveau des paliers de l'arbre du turbo-alternateur. L'interdiction du fonctionnement dans les intervalles des zones interdites peut être exprimée mathématiquement par le système des inégalités suivant :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_{gi}^{min} \leq P_{gi} \leq P_{gi,1}^l \\ P_{gi,k-1}^U \leq P_{gi} \leq P_{gi,k}^l \quad k = 2,3,4 \dots ni \\ P_{gi,ni}^U \leq P_{gi} \leq P_{gi}^{max} \end{array} \right. \quad (I.11)$$

Avec :

$ni$  : Le nombre des zones interdites.

$P_{gi,k}^l$  et  $P_{gi,k}^U$  : Les bornes inférieure et supérieure de la zone interdite k. [HAM19].

Cette interdiction peut être exprimée aussi graphiquement à travers la caractéristique du coût en fonction de puissance présentée sur la (Figure I-12) :

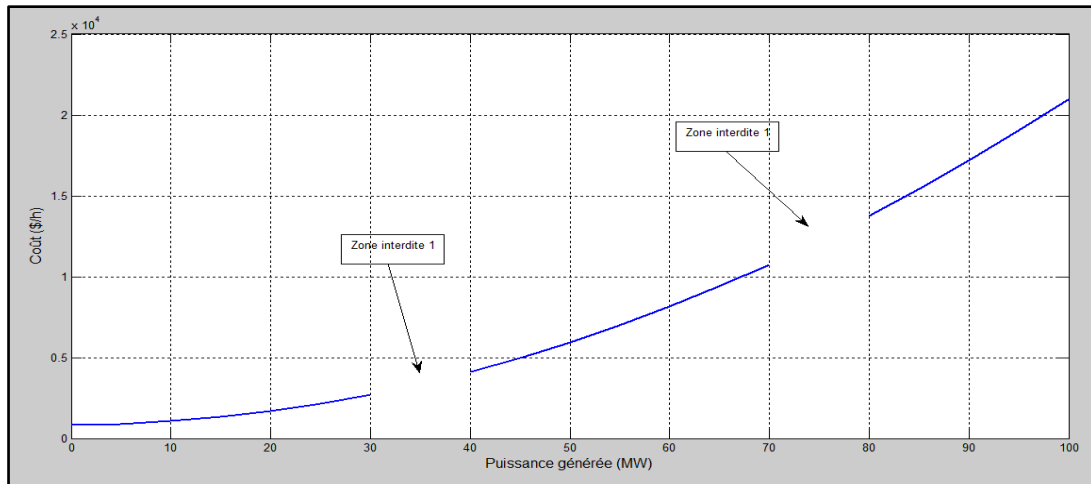


Figure I- 12 La caractéristique du coût d'une unité génératrice à deux zones interdite

### I.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté le système électrique qui permet d'acheminer l'énergie électrique à produite par les centrales vers les consommateurs (charge, clients) en respectant à tout instant l'équilibre entre l'offre et la demande ; en passant vers le marché d'énergie électrique notamment celui de l'Algérie en concluant la dominance presque totale sur ce dernier par SONELAGZ. Puis on a vu le concept du problème d'optimisation, plus particulièrement le problème de dispatching économique (DE) et les méthodes exactes (classiques) et approchées (heuristique et méta-heuristiques) pour résoudre ce problème. Comme on a traité la minimisation du coût total de production des centrales électriques avec leurs contraintes pratiques qu'on les a expliqués à partir de la caractéristique (coût en fonction de puissance générée) obtenu en utilisant le logiciel MATLAB 2013.

Le dispatching économique sert à réduire le coût total de génération de l'énergie électrique des différentes unités de production en satisfaisant les contraintes de fonctionnement et parce que ce dernier dépend directement du coût de l'énergie primaire (gaz par exemple), on doit chercher si on peut le minimiser en intégrant une autre source de production qui base sur une énergie primaire renouvelable comme l'énergie éolienne et cela exige l'étude de son influence sur le système électrique. On va traiter cette étude dans le chapitre suivant.

# *Chapitre II :*

*Intégration d'énergie éolienne dans le  
réseau électrique*





## *Chapitre II : Intégration d'énergie éolienne dans le réseau électrique*

### **II.1 Introduction :**

La demande d'électricité augmente avec le temps au niveau national et international, et l'énergie primaire (gaz, charbon, pétrole ...) utilisée pour la produire, va terminer un jour, ce qui nécessite la recherche, l'amélioration, l'adaptation et l'utilisation d'une énergie remplaçante qui se renouvèle après chaque utilisation, c'est l'énergie renouvelable.

C'est quoi cette énergie ? Quelles sont ses types ? Qu'est-ce qu'une énergie éolienne ? Dans ce chapitre on va répondre à ces questions et étudier l'évolution de l'énergie renouvelable au niveau de notre pays et au niveau du monde en concentrant sur le type éolien et son influence lors de son intégration au réseau électrique.

### **II.2 Énergies renouvelables :**

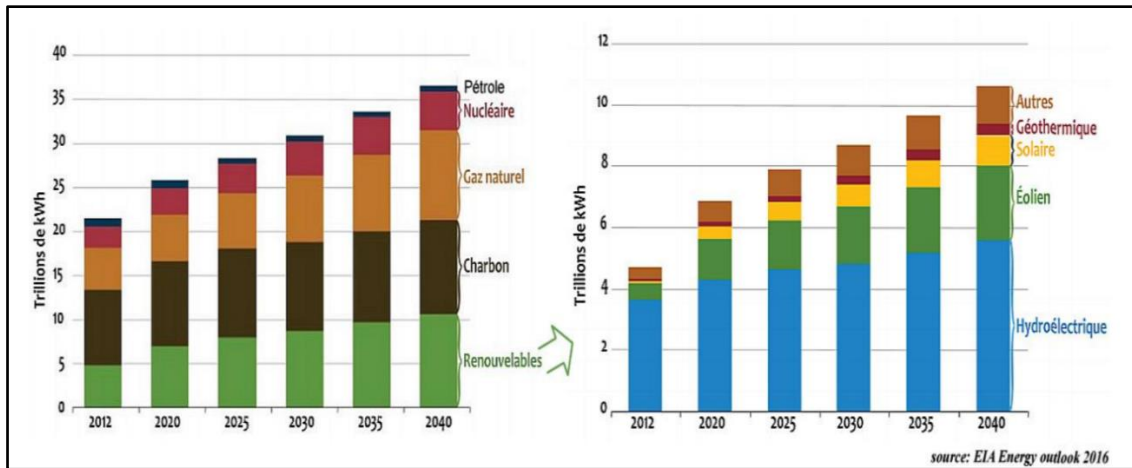
#### **II.2.1 Définition :**

Une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. C'est le cas de l'énergie du soleil, du vent, des cours d'eau de la terre, de la biomasse à l'échelle de la durée de vie de l'humanité, ce n'est pas le cas pour les combustibles fossiles et nucléaires. L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle, elles ont été exploitées par l'homme depuis l'aube de l'humanité, bois de feu, traction animale, bateau à voile, moulin à vent. [ABD12]

#### **II.2.2 Evolution de puissance des énergies renouvelables :**

##### **II.2.2.a Au monde :**

La figure II.1 présente le développement de production d'électricité à la base des sources fossiles (gaz, pétrole, charbon , énergie nucléaire) et renouvelables (hydroélectrique, solaire, géothermique et éolienne), on remarque une augmentation continue et presque régulière dans l'évolution des deux types d'énergie, ainsi que l'électricité produite à travers les sources fossiles atteignant  $17.10^{18}$  KWh cette année 2020 est grande par rapport à celle produite par les sources renouvelables qui atteint  $7.10^{18}$  KWh dans la même année. Le développement remarquable aussi de l'énergie renouvelable retourne à son gratuite, propreté ... comme l'énergie éolienne qui est responsable sur la production d'environ 1.7 milliard de milliard de KWh d'électricité en 2020, près de 2 trillion de KWh en 2024.

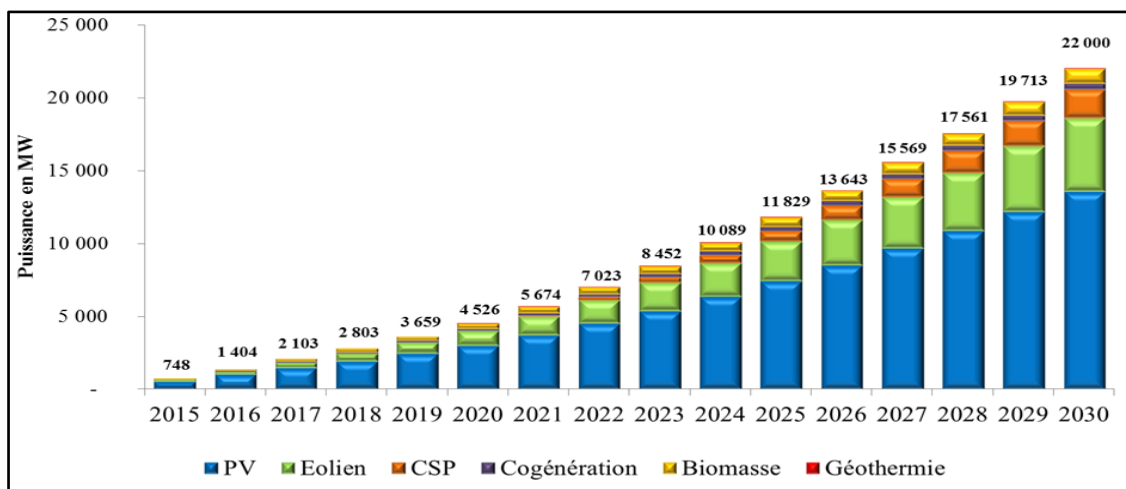


**Figure II- 1 Evolution et Prévisions de développement de la production d'énergie électrique (a) mondiale En générale, (b) Par énergies renouvelables [TOM & THE 19]**

### II.2.2.b En Algérie :

La consistance du programme en énergies renouvelables à réaliser pour le marché national sur la 2ème période 2015-2030 est de 22 000 MW, répartie par filière comme suit :

(Figure II.2)



**Figure II- 2 Programme algérien d'énergie renouvelable [MIN 20]**

### II.2.3 Type d'énergie renouvelable :

Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables les plus utilisées sont :

#### II.2.3.a L'énergie solaire : thermique et photovoltaïque :

Le soleil reste jusqu'à présent la plus importante source d'énergie malgré la distance considérable qui le sépare de la terre ( $150 \times 10^6$  de kilomètres). La puissance émise par le

soleil sous forme de rayonnement est estimé à  $90 \times 10^{15}$  GW, alors que la couche terrestre n'arrive à recevoir que  $180 \times 10^6$  GW. Arrivant à la terre, cette densité de puissance atteinte  $1 \text{ kW/m}^2$  pour un site situé au niveau de la mer.

L'Algérie est parmi les pays les mieux dotés en ressources solaires au monde. Elle dispose d'environ 3200 heures d'ensoleillement par an, bénéficiant d'une situation climatique favorable à l'application des techniques solaires.[BOU14]

**- Énergie solaire photovoltaïque :**

La conversion directe du rayonnement lumineux en électricité par des capteurs Cellule photovoltaïque, Les panneaux photovoltaïques composés de cellules à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons.[ABD12]

**-Le solaire thermique à concentration :**

CSP (Concentrated Solar Power) sont des systèmes qui génèrent l'électricité de l'énergie solaire en convertissant la chaleur produite par la lumière solaire concentrée sur une petite surface. Généralement, la concentration effectuée par des collecteurs (miroirs) qui ont une forme plane ou parabolique [MER et ALL 18].Ce type des énergies renouvelables utilisent les fluides caloporteurs comme l'eau liquide, Les sels fondus, Les nano-fluides... à haute température et produire de la vapeur qui va entraîner une turbine à vapeur.

**II.2.3.b Énergie géothermique :**

La production d'électricité d'origine géothermique consiste à utiliser le fluide géothermique contenu dans des réservoirs profonds pour actionner une turbine qui entraîne à son tour un alternateur, qui produit un courant électrique.[HAC17]

**II.2.3.c Énergie hydraulique :**

Cette énergie produite par une chute d'eau entre deux niveaux, l'un étant plus élevé que l'autre est fournie par des roues à eau ou des turbines hydrauliques [NAI13] qui sert à entraîner une génératrice électrique.

**II .2.3.d Énergie biomasse :**

On utilise la combustion de la biomasse (résidus alimentaires, bois, feuilles, cadavres d'animaux, êtres vivants du sol) qui génère de la chaleur pour obtenir la vapeur à partir de l'eau, cette dernière fournit de l'énergie mécanique (rotation) à la turbine qui assure par son rôle la rotation du rotor de la génératrice électrique est alors la production d'électricité

## II.3 Énergie éolienne :

### II.3.1 Historique :

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier lieu par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau.

En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Age utilisés tout d'abord pour mouliner le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés. Dès le XIV siècle, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. [NAI13]. La figure II.3 représente la première éolienne.



Figure II- 3 Eolienne de Charles.F.Brush (Etats-Unis, 1888) [ZER 15]

### II.3.2 Définition :

L'énergie éolienne est la force produite par le mouvement des particules d'air (vent) utilisée directement par sa conversion en énergie mécanique pour faire déplacer un voilier ou exploiter une éolienne de pompage, ou indirectement par la conversion de cette énergie mécanique en énergie électrique à travers une génératrice.

On doit signaler que l'énergie éolienne est d'origine solaire car le rayonnement du soleil crée la différence de température et de pression dans l'atmosphère, c'est le phénomène responsable de génération des vents, alors l'énergie éolienne est renouvelable.

### II.3.3 Synthèse des avantages et des inconvénients de l'éolien :

#### II.3.3.a Avantages :

- Sa matière première est « renouvelable » le vent est inépuisable et gratuit.
- Elle ne génère, lorsqu'elle n'est pas assistée par une énergie fossile auxiliaire, aucun gaz à effet de serre (GES) en production.
- Sa souplesse d'utilisation en fait une ressource d'appoint durant les pics de consommation.
- Elle est en grande partie recyclable (acier, béton) et est facilement démontable après sa durée de vie (estimée à une vingtaine d'années pour les éoliennes terrestres).
- La technologie est simple et éprouvée. [ABD16]

#### II.3.3.b Inconvénients :

- L'énergie est intermittente (le vent est pratiquement imprévisible et l'éolienne ne fonctionne que dans une plage étroite de vitesse du vent)
- Elle peut induire une nuisance sonore pour les riverains à une distance inférieure à 1500 mètres, selon l'académie de médecine. Alors, l'immobilier se déprécie à proximité d'un parc d'éoliennes.
- L'éolien offshore pose des problèmes de maintenance. En effet, on ne peut pas intervenir par bateau, lorsque les vagues sont supérieures à 1,5 mètre.
- En cas d'explosion, on peut retrouver des débris de pales à plusieurs centaines de mètres de distance. [ABD16]

### II.3.4 Evolution d'énergie éolienne :

#### II.3.4.a Au monde :

**La capacité éolienne terrestre :** devrait augmenter pour atteindre 1787GW d'ici 2030 dans le cas principal prévu. Les installations annuelles mondiales devraient être augmenté sur la période de prévision jusqu'à 5044 GW en 2050.

**La capacité éolienne offshore :** devrait augmenter pour atteindre 228 GW d'ici 2030 dans le cas principal prévu. Les installations annuelles mondiales devraient être augmenté sur la période de prévision jusqu'à 1000 GW en 2050.[IEA20]

La croissance de La capacité éolienne offshore diminue par rapport à la terrestre, en raison de plusieurs facteur dont les plus importants le cout d'investissement est plus chère à celle de terrestre et la difficulté d'entretien en mer en cas de fortes vagues.

La figure II.4 montre l'évolution de production mondiale d'énergie éolienne et sa prévision.

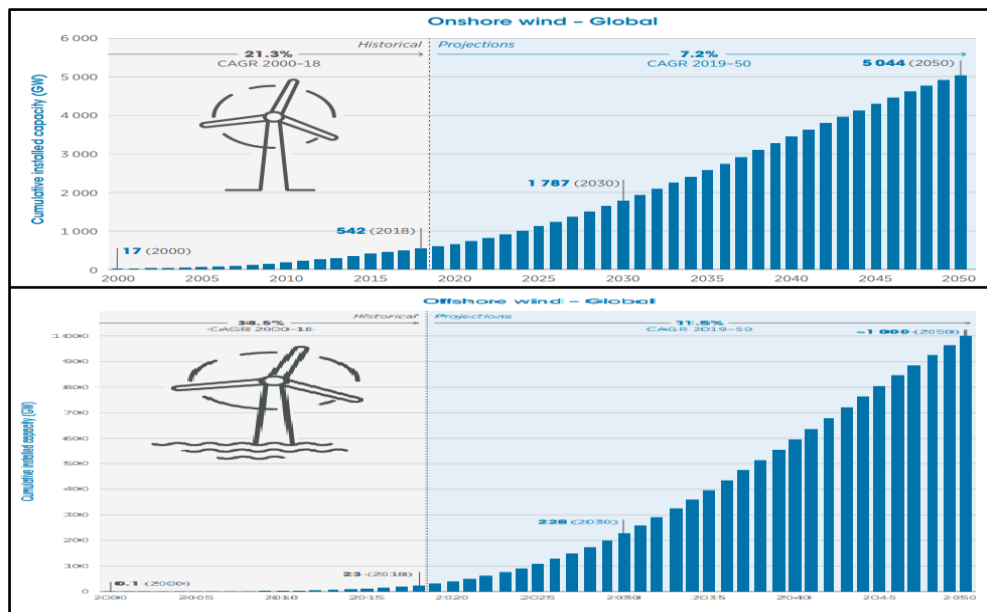


Figure II- 4 Evolution de production mondiale d'énergie éolienne (En haut : Offshore/En bas : Onshore) [IEA 20]

#### II.3.4.b Gisement éolien en Algérie :

À travers le site Global Wind Atlas [GWA 20], on a extrait les vitesses du vent en Algérie. Il est clair d'après l'image captée que la région convenable pour installer des parcs éoliens est la désert, surtout le centre de cette dernière où la vitesse du vent peut atteindre 8 m/s pour une altitude de 8m/s seulement. La figure II.5 illustre le gisement du vent en Algérie.

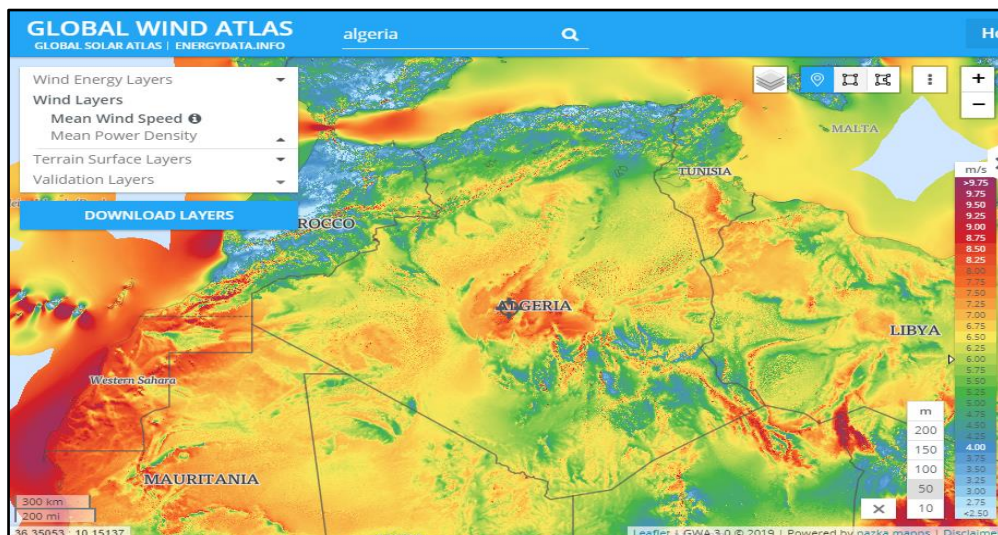


Figure II- 5 La vitesse du vent (en m/s) à 50 mètres d'altitude [GWA 20]

### II.3.5 Structure d'une éolienne :

Les éoliennes peuvent être classées en deux types en fonction de l'orientation de leurs Axes de rotation :

- L'éolienne à axe Vertical (Vertical Axis Wind Turbine VAWT).
- L'éolienne à axe Horizontal (Horizontal Axis Wind Turbine HAWT).

Aujourd'hui, presque toutes les éoliennes connectées au réseau sont tripale et à axe horizontal.

En général, une éolienne est constituée par des éléments mécaniques et électriques qui sont illustrés dans la Figure II.6. Chacune de ces parties doit être bien étudiée et modélisée de façon à obtenir un meilleur rendement et une bonne fiabilité du système. Une éolienne contient les éléments suivants :

**La tour ou le mât :** Supporte les principaux éléments de l'éolienne : la nacelle et le rotor. Il est généralement un tube d'acier pour apporter la solidité nécessaire de l'ensemble. Elle doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité, mais sa taille augmente avec celle de l'éolienne. Plus le rotor est haut et plus le rendement de l'éolienne sera bon.

**Le rotor :** c'est l'élément mécanique qui transforme la force cinétique du vent captée par les pâles en rotation, ensuite transformée en électricité dans la nacelle. Généralement, il est composé de trois pâles et placé devant la nacelle.

**La nacelle :** regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent (LSS : Low Speed Shaft) et rapide (HSS : High Speed Shaft), roulements, multiplicateur. Le frein à disque et le frein aérodynamique qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur est généralement une machine synchrone ou asynchrone.

**Le système d'orientation des pâles :** sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique).

**Le multiplicateur :** sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice électrique. [CHI 17]

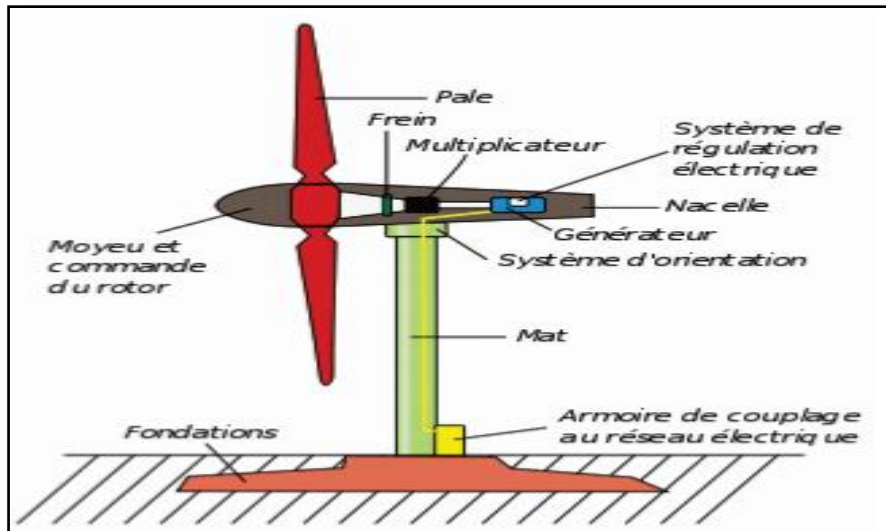


Figure II- 6 Structure générale d'une éolienne [CHI 17]

### II.3.6 Principe de conversion :

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.7).

[NAI 13]

Cette conversion se fait en trois (02) étapes (figure II.7) :

- ✓ La conversion d'une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ; cette conversion se fait au niveau de la turbine éolienne.
- ✓ La conversion de cette énergie mécanique en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

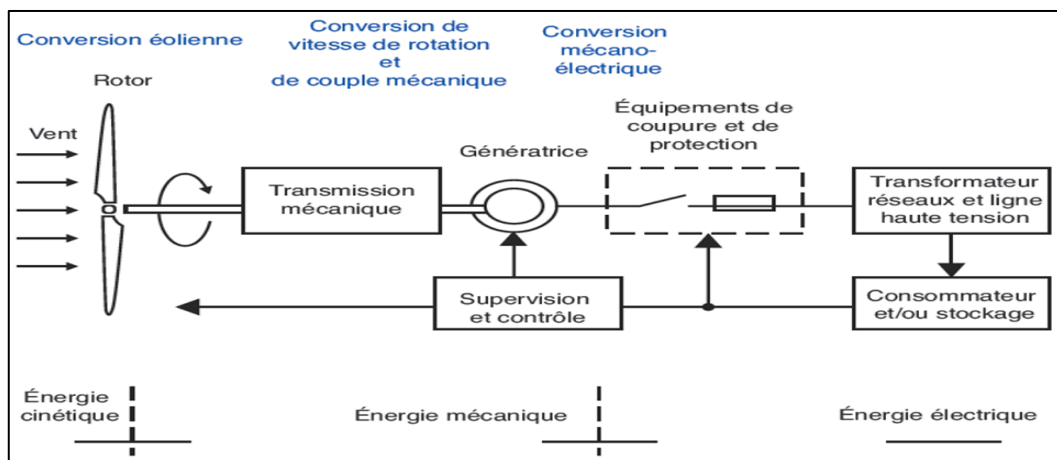


Figure II- 7 Conversion de l'énergie cinétique du vent [CHI 17]



### II.3.6.a Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique :

#### Loi de Betz :

A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active  $S$  de la voilure, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active  $S$  de l'éolienne est donnée par :[NAI 13]

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_v^3 = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot r^2 \cdot V_v^3 \quad (\text{II.1})$$

$\rho$ : Densité de l'air  $1.225 \text{kg.m}^{-3}$  à la pression atmosphérique et à  $15^\circ\text{C}$ .

$S$ : Surface balayée par le rotor de l'éolienne

$V_v$ : Vitesse de vent(en m/s).

$C_p$  : Coefficient de puissance de l'éolienne ou le rendement aérodynamique de la turbine éolienne.

Selon la loi d'Albert Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité, la puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de Betz :

$$P_{max} = \frac{16}{27} P_v = 0.59 \cdot P_v = C_p \cdot P_v \quad (\text{II.2})$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde. De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini par :

$$C_{opt} = \frac{P_{max}}{P_v} = \frac{2 \cdot P_{max}}{\rho \cdot S \cdot V_v^3} = 0.59 \quad (\text{II.3})$$

En réalité, jusqu'à présent, seulement 60 à 70% de cette puissance maximale théorique peut être exploitée par les engins les plus perfectionnés. Ce rendement, appelé coefficient puissance  $C_p$  de l'éolienne, est propre à chaque voilure. Ce coefficient lie la puissance éolienne à la vitesse du vent :

$$C_p = \frac{2 \cdot P_{max}}{\rho \cdot S \cdot V_v^3} \quad (\text{II.4})$$

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne une grandeur spécifique est utilisée :

La vitesse réduite  $\lambda$ , qui représentant le rapport entre la vitesse du vent et la vitesse de rotation avant le multiplicateur.

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V_v} \quad (\text{II.5})$$

$R$ : Résistance électrique.

$\Omega$ : vitesse de rotation de la turbine.

### *II.3.6.b Production d'énergie mécanique :*

La vitesse du vent  $V_v$  appliquée sur les pales de la turbine provoque sa rotation en donnant Une puissance mécanique sur l'arbre de la turbine donnée par l'équation.[CHI 17]

$$P_m = \frac{1}{2} C_P \cdot \lambda \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot v^3 \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$R$  : Résistance électrique

$$\lambda = \frac{\Omega_1 \cdot R}{V_1} \quad (\text{II.7})$$

$\Omega_1$  : vitesse de rotation avant multiplicateur et  $R$  : rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.

$V_1$  : Vitesse du vent respectivement en amont de l'éolienne

### *II.3.6.c Conversion de l'énergie mécanique produite en énergie électrique :*

Dans l'exploitation de l'énergie éolienne on peut utiliser les différents générateurs : Générateur asynchrone « à cage d'écureuil, double alimenté (MADA) ou synchrone (à rotor bobiné ou aimant permanent)».

## **II.3.7 Caractéristiques d'une éolienne :**

### *II.3.7.a Puissance produite en fonction de la taille des pales :*

Face à l'augmentation de la consommation d'énergie électrique mondiale, les constructeurs ont la tendance de produire des turbines éoliennes de plus en plus puissantes et donc de plus grandes tailles, puisque la puissance captée par la turbine est fonction du carré du rayon du rotor (Figure II.8). Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories :

- Éoliennes de petite puissance : inférieure à 40kW.
- Éoliennes de moyenne puissance : de 40kW à quelques centaines de kW.
- Éoliennes de forte puissance : supérieure à 1MW. [CHI 17]

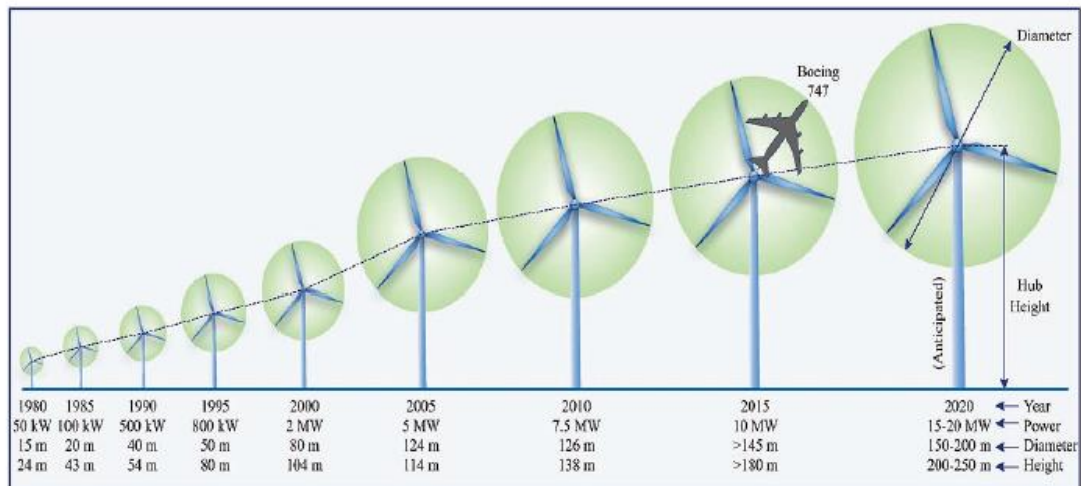


Figure II- 8 Evolution de la puissance d'une éolienne en fonction de sa taille [CHI 17]

### II.3.7.b Puissance produite en fonction de la vitesse du vent :

Un système aérogénérateur est généralement caractérisé par une courbe de puissance semblable à celle donnée par la figure II.9 lorsque le vent incident n'est pas suffisamment fort (moins de 3m/s, zone I), la turbine est verrouillée par des freins mécaniques pour éviter des coûts de production trop élevés (rendement trop faible). La production d'énergie électrique se fait dans les zones II et III. Pour des vents moyens (entre 3 et 9m/s) la turbine est contrôlée pour obtenir un coefficient de puissance ( $C_p$  maximale de manière à extraire le maximum de puissance du vent). [TOM & THE 19]

Dans la zone IV et pour des vents extrêmes ( $> 20\text{m/s}$ ), des freins mécaniques arrêtent la génération d'électricité pour limiter les risques d'emballement et de bris mécaniques car l'augmentation des vitesses de vent implique une chute brusque de force portante qui assure le mouvement du rotor causée par les turbulences créées en arrière des pales.

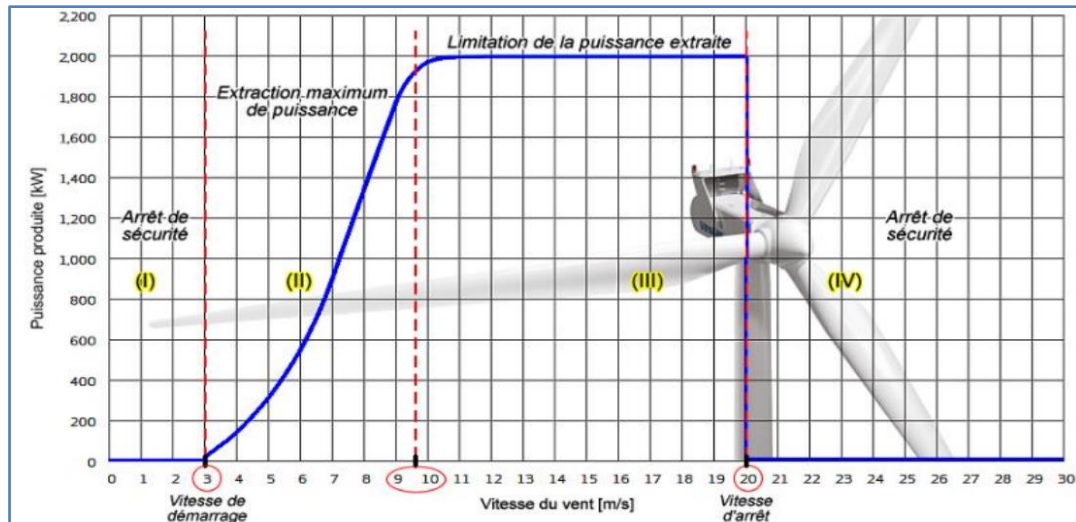


Figure II- 9 Courbe de puissance d'une turbine éolienne (cas du système V110-2.0 MW du constructeur Vestas)[TOM & THE 19]

### II.3.8 Impact de l'intégration des éoliennes sur le réseau électrique :

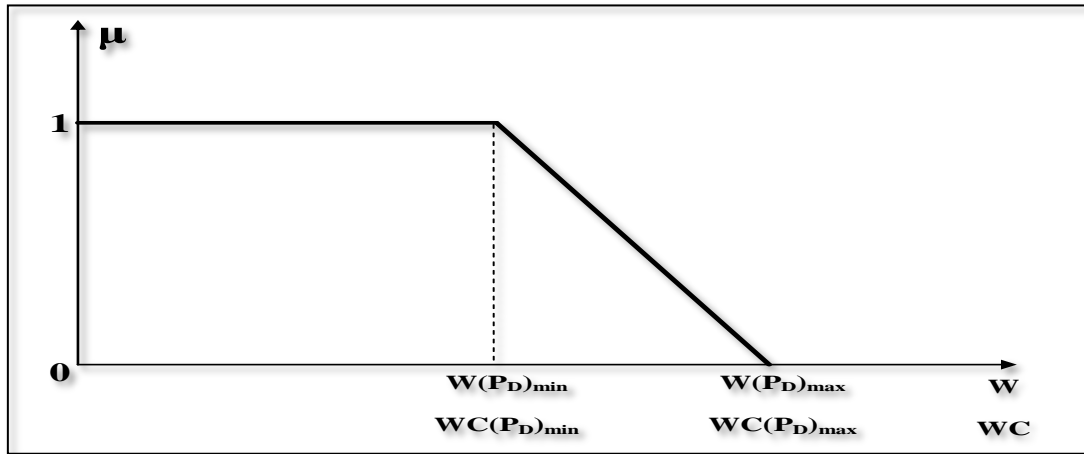
Bien que l'intégration de l'énergie éolienne soit bénéfique pour la réduction de la consommation des réserves de carburants fossiles et des gaz toxiques émis par les centrales classiques, elle a un effet néfaste sur la stabilité et par conséquent sur la sécurité de bon fonctionnement du réseau électrique. Cela est dû à la nature intermittente de l'énergie éolienne.

#### II.3 .8.a Impact sur le coût de production :

L'énergie éolienne devient un acteur important du marché de l'électricité, elle peut avoir une influence significative sur les prix de l'électricité. Le prix de production de l'énergie éolienne devient de plus en plus moins cher d'une année à une autre et cela contribue considérablement à la réduction du prix de production d'énergie électrique chez le producteur et du prix de la facture de consommation d'électricité chez l'abonné.

La vitesse du vent est normalement très fluctuante et donc la puissance électrique qui en dérive est également difficile à prévoir. En raison de ses caractéristiques imprévisibles et variables, l'intégration de l'énergie éolienne dans les systèmes de production thermique traditionnels suscitera inévitablement le souci de l'exploitant sur la sécurité du système. Une définition floue de la pénétration du vent est un moyen viable de représenter le niveau de pénétration de l'énergie éolienne, car il est généralement difficile de déterminer la quantité optimale d'énergie éolienne à intégrer dans les réseaux électriques conventionnels. Comme le

montre la figure II. 10, une fonction d'appartenance  $\mu$  (après fuzzification) concernant la pénétration de l'énergie éolienne est définie comme l'indicateur de niveau de sécurité.



**Figure II- 10 Représentation floue du niveau de sécurité en termes de pénétration du vent [LIN & CHA06]**

Mathématiquement, elle peut être représentée selon l'équation II.8 :

$$\mu = \begin{cases} 1 & W \leq W(P_D)_{min} \\ \frac{W(P_D)_{max} - W}{W(P_D)_{max} - W(P_D)_{min}} & W(P_D)_{min} \leq W \leq W(P_D)_{max} \\ 0 & W \geq W(P_D)_{max} \end{cases} \quad (II.8)$$

Où :

$W$  : puissance éolienne incorporé dans le dispatching économique

$W(P_D)_{min}$  : limite inférieure de la puissance éolienne pour l'intégration de l'énergie éolienne au-dessous de laquelle le système est considéré en sécurité

$W(P_D)_{max}$  : limite supérieure de la puissance éolienne pour l'intégration de l'énergie éolienne au-dessus duquel le système est considéré comme non sécurisé en raison des fluctuations du vent.

La fonction d'appartenance définie ci-dessus (équation II.8) peut également être représentée en termes de coût de fonctionnement pour l'incorporation de l'énergie éolienne de la façon suivante :

$$\mu = \begin{cases} 1 & W_c \leq W_c(P_D)_{min} \\ \frac{W_c(P_D)_{max} - W_c}{W_c(P_D)_{max} - W_c(P_D)_{min}} & W_c(P_D)_{min} \leq W_c \leq W_c(P_D)_{max} \\ 0 & W_c \geq W_c(P_D)_{max} \end{cases} \quad (II.9)$$

Où :

$W_c$ : est le coût de fonctionnement de l'énergie éolienne dans le dispatching économique

$W_c(P_D)_{min}$ : est le coût limite inférieur pour l'intégration de l'énergie éolienne, en dessous duquel système est considéré comme sécurisé

$W_c(P_D)_{max}$ : est le coût limite supérieur pour inclure l'énergie éolienne, au-dessus duquel le système est considéré comme non sécurisé en raison de la perturbation du vent.

De façon similaire, les deux termes  $WC(PD)_{min}$  et  $WC(PD)_{max}$  dépendent de la demande de charge totale pour le dispatching économique. Des études de sensibilité sont également réalisées pour illustrer l'impact des différentes fourchettes admissibles de la pénétration de l'énergie éolienne ainsi que des coûts de fonctionnement variables de l'énergie éolienne sur les solutions finales obtenues [LIN & CHA06].

### *II.3 .8.b Impact sur sécurité du système électrique :*

La pénétration du vent est définie comme l'indicateur de niveau de sécurité. Il peut être exprimé mathématiquement par les équations (II.8) et (II.9). Plus la valeur de la fonction d'appartenance est grande, plus le système deviendra plus sécurisé. Si la pénétration de l'énergie éolienne est limitée à un certain niveau, le système peut être considéré comme sécurisé. Dans le cas contraire, si une pénétration excessive de l'énergie éolienne est introduite dans le réseau électrique, le système peut devenir peu stable et par conséquent peu sécurisé. Ainsi, nous définissons une fonction qui doit être minimisée afin d'assurer la sécurité du système : [LIN & CHA06]

$$R(\mu) = \frac{1}{\mu} \quad (II.10)$$

$\mu$  : indique le niveau de sécurité du système

Avec :  $0 \leq \mu \leq 1$

Le coût de l'énergie éolienne peut être représenté en termes de la valeur de la fonction d'appartenance  $\mu$  qui indique le niveau de sécurité du système

$$W_c(P_g, \mu) = C_W(W_{av} - (P_D + P_L - \sum_i^{N_g} P_{gi})) - \mu \cdot \Delta W_c + W_{cmax} \quad (II.11)$$

$$\Delta W_c = W_{cmax} - W_{cmin} \quad (II.12)$$

Où :

$N_g$  : Nombre de générateur

$W_{av}$ : L'énergie éolienne disponible à partir des fermes éoliennes

$C_W$ : Le coefficient du coût de pénalité pour ne pas utiliser toute l'énergie éolienne disponible

$P_D$  : La puissance demandée totale au niveau de la charge

$P_L$ : Les pertes actives totales de transmission

Ainsi, le coût opérationnel total TOC peut être calculé comme :

$$TOC(P_g, \mu) = C_t(P_g) + W_c(P_g, \mu) \quad (II.13)$$

$C_t(P_g)$ : Le coût total de production à partir des centrales conventionnelles.

$W_c(P_g, \mu)$  : Le coût total de production à partir des fermes éoliennes. [LIN& CHA06]

## II.9 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a exposé brièvement la production de l'électricité à partir des énergies renouvelables en concentrant sur celle qui se base sur l'énergie éolienne et l'impact de son intégration dans le réseau électrique et les différentes caractéristiques d'une turbine éolienne concernant la puissance produite en fonction de la taille des pales et en fonction de la vitesse du vent. D'après ce chapitre on peut conclure que l'intégration d'énergie éolienne influe considérablement sur le prix de production d'énergie électrique et le risque du taux de pénétration ou d'intégration d'énergie éolienne sur la stabilité du réseau électrique. Selon la représentation floue du niveau de sécurité en termes de pénétration du vent, on peut conclure qu'il y a une relation conflictuelle entre le coût de production d'énergie électrique et le risque d'intégration.

# *Chapitre III:*

## *Algorithme de recherche du corbeau*





### Chapitre III : Algorithme de recherche du corbeau

#### III.1 Introduction :

Parmi les nouvelles méthodes d'optimisation récemment développée est la méthode de recherche du corbeau appelée en anglais Crow Search Algorithm (CSA) qui est inspirée des comportements intelligents d'un corbeau pour chaparder de la nourriture des autres individus de son essaim. Dans ce chapitre on va présenter le principe sur lequel se base cette méthode pour inspirer le déroulement de l'algorithme d'optimisation, l'influence de ses paramètres et l'illustration de son organigramme étape par étape.

#### III.2 Comportement des corbeaux :

Le corbeau est une espèce des oiseaux largement répandu dans la nature (genre d'oiseau corvus). Il possède le plus gros cerveau par rapport à leur taille corporelle. Sur la base d'un rapport cerveau-corps, leur cerveau est légèrement inférieur à celui d'un cerveau humain [FUT 20]. Il est considéré parmi les animaux les plus intelligents du monde. En formant des essaims, les corbeaux montrent des exemples remarquables d'intelligence et donnent des très bons résultats aux tests d'intelligence. Ils peuvent mémoriser les visages, utiliser des outils, communiquer de manière sophistiquée, cacher et puis récupérer la nourriture au fil des saisons.[DEM 20]. Aussi le coran montre la capacité du corbeau de cacher quelque chose (sous la terre par exemple), mentionnée dans le 31<sup>ème</sup> verset de sourate AL-MA-IDA, qui explique comment cet oiseau intelligent a montré au fils du premier homme la méthode pour enterrer son frère mort.

قال الله تعالى:

{فَبَعَثَ اللَّهُ غُرَابًا يَبْحَثُ فِي الْأَرْضِ لِيُرِيَهُ كَيْفَ يُورِي سَوْءَةَ أَخِيهِ قَالَ يَا وَيْلَتَا أَعَجَزْتُ أَنْ أَكُونَ مِثْلَ

هَذَا الْغُرَابِ فَأُوَارِي سَوْءَةَ أَخِي فَأَصْبَحَ مِنَ النَّادِمِينَ}سورة المائدة - الآية 31

(Allah envoya un corbeau qui se mit à gratter la terre pour lui montrer comment enfouir la dépouille de son frère. Il dit : « Malheur à moi ! Suis-je donc incapable d'être comme ce corbeau et d'enfouir le cadavre de mon frère ? » Il se retrouva alors du nombre de ceux que rongent les remords.)

Sourate AL-MA-IDAHA (la table servie) – 31<sup>ème</sup> verset

### III.3 Inspiration du comportement des corbeaux pour l'optimisation :

Dans un essaim de corbeaux, il existe un comportement qui présente de nombreuses similitudes avec un processus d'optimisation. Selon ce comportement, les corbeaux cachent leurs excès de nourriture dans certaines positions (cachettes) de l'environnement naturel et les récupèrent quand cela est nécessaire.

Pour cela, les corbeaux se suivent les uns aux autres pour connaître la cachette et voler de la nourriture une fois que le propriétaire qui cache sa nourriture est parti. Trouver une source de nourriture cachée par un corbeau n'est pas un travail facile car si un corbeau en trouve un autre qui le suit, il essaye de le tromper en allant à une autre position de l'environnement.

C'est l'idée principale sur laquelle se base de l'algorithme de recherche du corbeau pour la conception du processus d'optimisation dans ce chapitre.

### III.4 Algorithme de recherche du corbeau :

Askarzadeh a proposé en 2016 un nouvel algorithme méta-heuristique d'optimisation basé sur le comportement social du corbeau nommé Crow Search Algorithm (CSA). L'idée de l'algorithme CSA est basée sur le processus de stockage de l'excès de nourriture décrit dans le paragraphe ci-dessus [ABD17].

Les principes de l'algorithme CSA sont énumérés comme suit :

- ✓ Les corbeaux vivent sous forme des essaims.
- ✓ Les corbeaux mémorisent la position de leurs cachettes.
- ✓ Le corbeau suit un autre pour trouver la cachette de nourriture afin de la chaparder
- ✓ Les corbeaux protègent leurs cachettes contre le vol.

On suppose qu'il existe un environnement de dimension  $d$ , y compris un certain nombre des corbeaux, le nombre du corbeau (taille de l'essaim  $N$ ) et la position du corbeau  $i$  au moment (itération)  $iter$  dans l'espace de recherche est spécifié par un vecteur  $\mathbf{x}^i$ .

$\mathbf{x}^{i,iter}$  ( $i = 1, 2, \dots, N$ ;  $iter = 1, 2, \dots, itermax$ ) où  $\mathbf{x}^{i,iter} = [x_1^{i,iter}, x_2, x_d^{i,iter}]$

Avec  $iter_{max}$  est le nombre maximal des itérations. Chaque corbeau à un mémoire dans laquelle la position de sa cachette est mémorisée. A l'itération  $iter$ , la position de la cachette du corbeau  $i$  est notée par  $\mathbf{m}^i$ , c'est la meilleure position que le corbeau ait obtenue jusqu'à l'itération courante. En effet, en mémoire de chaque corbeau la position de sa meilleure

expérience a été mémorisée. Les corbeaux se déplacent dans l'environnement et cherchent pour des meilleures sources de nourriture (cachettes).[ASK 16]

Supposons qu'à l'itération  $iter$ , le corbeau  $j$  veut visiter sa cachette en place  $m_j$ . A cette itération, le corbeau  $i$  décide de suivre le corbeau  $j$  pour s'approcher de sa cachette. Dans ce cas deux états pourraient s'arriver :[ASK 16]

**État 1** : Le corbeau  $j$  ne sait pas que le corbeau  $i$  le suit. En tant que résultat, le corbeau  $i$  s'approchera de la cachette du corbeau  $j$ . Dans ce cas, la nouvelle position du corbeau  $i$  est obtenue comme suit :

$$x^{i+1} = x^{i,iter} + r_i \times fl^{i,iter} \times (m_j^{iter} - x^{i,iter}) \quad si : r_j \geq AP^{j,iter} \quad (III.1)$$

**État 2** : le corbeau  $j$  sait que le corbeau  $i$  le suit. En conséquence, afin de protéger sa cachette contre le vol, le corbeau  $j$  va tromper le corbeau  $i$  en allant à une autre position de l'espace de recherche en générant une solution aléatoire faisable. Dans ce cas, la nouvelle position peut être exprimée comme une position aléatoire :

$$x^{i+1} = x_{min}^i + rand \times (x_{max}^i - x_{min}^i) \quad si : r_j < AP^{j,iter} \quad (III.2)$$

Avec :

$fl^{i,iter}$  : Indique la portée de vol du corbeau  $i$  à l'itération  $iter$ .

$AP^{j,iter}$  : indique la probabilité de prise de conscience du corbeau  $j$  à l'itération  $iter$ .

$r_j$  et  $rand$  : sont des nombres aléatoires avec une répartition uniforme entre 0 et 1.

$x_{min}^i$  : la position minimale du corbeau  $i$

$x_{max}^i$  : la position maximale du corbeau  $i$

Les algorithmes méta-heuristiques devraient fournir un bon équilibre entre diversification et l'intensification. Pour l'algorithme CSA, l'intensification et la diversification sont principalement contrôlées par le paramètre de probabilité de conscience (AP). Par diminution de la valeur probabiliste de la conscience, l'algorithme CSA tend à mener la recherche sur une région locale ou la bonne solution courante se trouve dans cette région. En conséquence, l'utilisation de petites valeurs de (AP) augmente l'intensification. D'autre part, en augmentant la probabilité de conscience (AP), la probabilité de la recherche dans le voisinage des bonnes solutions actuelles augmente aussi et l'algorithme de CSA tend à explorer l'espace de recherche à l'échelle globale (randomisation). En conséquence, l'utilisation de grandes valeurs de AP augmente la diversification. [ASK 16]

### III.5 L'influence de la portée du vol $fl$ :

La figure (III.1) montre le schéma de l'état (1) et l'effet  $fl$  sur la capacité de recherche. Les petites valeurs de  $fl$  conduisent à une recherche locale (à proximité de  $x_i$ ) et les grandes valeurs à une recherche globale (loin de  $x_i$ ), comme le montre la figure (III.1.a). Si la valeur de  $fl$  est inférieure à 1, la position suivante du corbeau  $i$  est sur la ligne en rouge discontinue entre  $x_i$  et  $m^j_{er}$ . Comme l'indique la figure (III 1.b), si la valeur de  $fl$  est supérieure à 1, la position suivante du corbeau  $i$  se trouve sur la ligne en vert continue qui dépasse  $m^j_{er}$ .

[ASK 16]

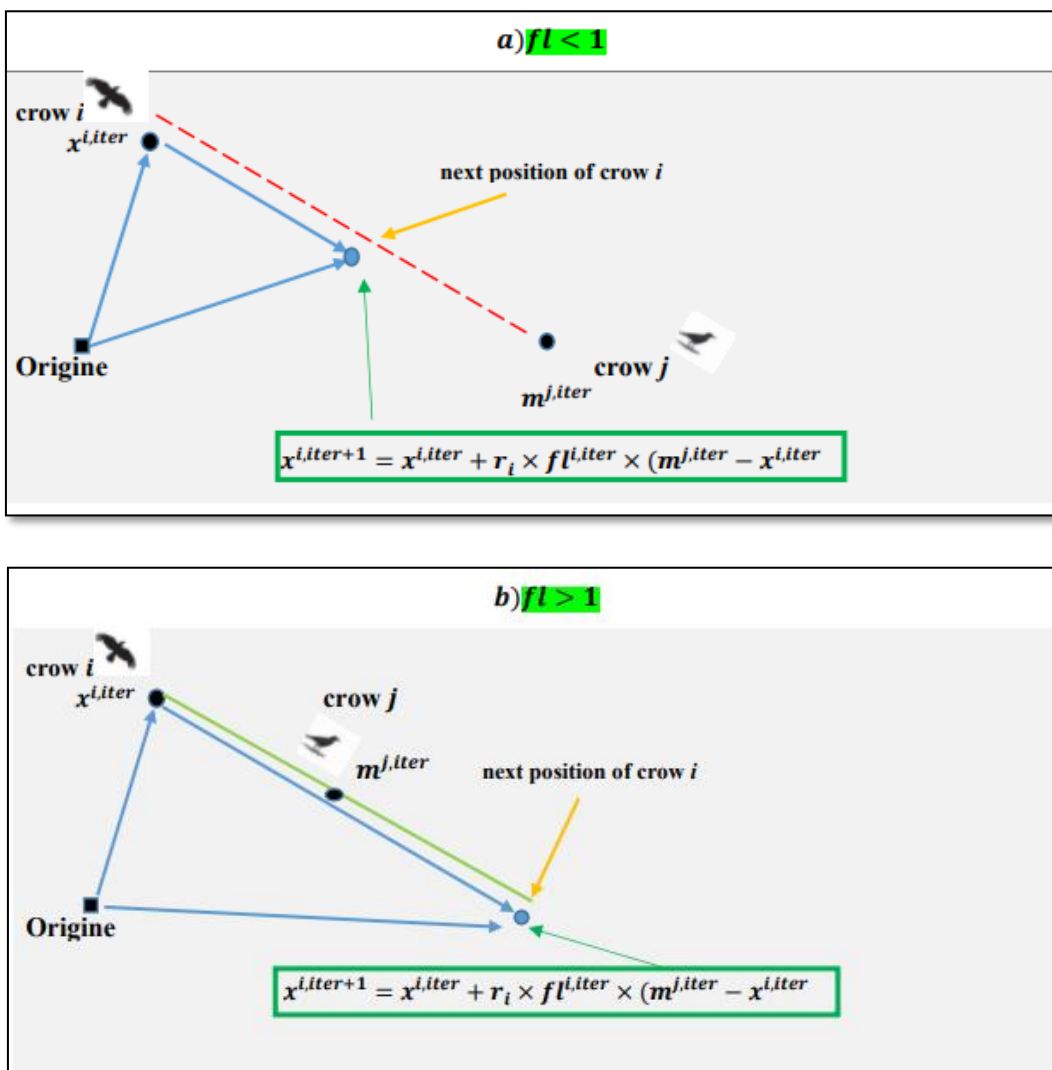


Figure III- 1 Diagramme des états dans CSA (a)  $fl < 1$  et (b)  $fl > 1$  [ASK 16]

La figure III.2 décrit le pseudo code de l'algorithme CSA :

```

Randomly initialize the position of a flock of  $N$  crows in the search space
Evaluate the position of the crows
Initialize the memory of each crow
while  $iter < iter_{max}$ 
  for  $i = 1 : N$  (all  $N$  crows of the flock)
    Randomly choose one of the crows to follow (for example  $j$ )
    Define an awareness probability
    if  $r_j \geq AP^{j,iter}$ 
       $x^{i,iter+1} = x^{i,iter} + r_i \times fl^{i,iter} \times (m^{j,iter} - x^{i,iter})$ 
    else
       $x^{i,iter+1} = a$  random position of search space
    end if
  end for
  Check the feasibility of new positions
  Evaluate the new position of the crows
  Update the memory of crows
end while

```

Figure III- 2 Pseudo code du CSA proposé [ASK 16]

### III.5 La méthodologie de la CSA pour l'optimisation :

L'algorithme de CSA peut être illustré selon les étapes suivantes :

#### Étape 1 : Initialiser le problème et les paramètres de l'algorithme

Définir le problème de l'optimisation, les variables de décision et les contraintes. Ensuite, les paramètres réglables du CSA :

- ✓ Taille de l'essaim de corbeaux (**Npop**)
- ✓ Nombre maximal d'itérations (**iter<sub>max</sub>**)
- ✓ La portée du vol (**fl**)
- ✓ Probabilité de conscience (**AP**)

#### Étape 2 : Initialiser la position et la mémoire des corbeaux

$N$  corbeaux sont positionnés au hasard dans un espace de recherche de  $d$ -dimensions comme des membres de l'essaim. Chaque corbeau indique une solution réalisable du problème et  $d$  est le nombre de variables de décision.

$$Corbeaux = \begin{pmatrix} x_1^1 & x_2^1 \cdots & x_d^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^N & x_2^N \cdots & x_d^N \end{pmatrix} \quad (III.3)$$

Le mémoire de chaque corbeau est initialisé puisque à l'itération initiale, les corbeaux n'ont aucune expérience, on suppose qu'ils ont caché leurs aliments à leurs positions initiales.

$$Mémoires = \begin{pmatrix} m_1^1 & m_2^1 \cdots & m_d^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_1^N & m_2^N \cdots & m_d^N \end{pmatrix} \quad (III.4)$$

### **Étape 3 : Évaluer la fonction fitness (fonction objectif)**

Pour chaque corbeau, la qualité de sa position est calculée en introduisant les valeurs des variables de décision dans la fonction objective.

### **Étape 4 : Générer une nouvelle position**

Les corbeaux génèrent une nouvelle position dans l'espace de recherche de la manière suivante : on suppose que le corbeau  $i$  veut générer une nouvelle position. Pour ce but, ce dernier choisit au hasard un des corbeaux (par exemple corbeau  $j$ ) et le suit pour découvrir la position des aliments cachés par ce corbeau ( $m_j$ ). La nouvelle position du corbeau  $i$  est obtenue par l'équation (III.2), ce processus est répété pour tous les corbeaux.

### **Étape 5 : Vérifier la faisabilité de nouvelles positions**

La faisabilité de la nouvelle position de chaque corbeau est vérifiée. Si la nouvelle position d'un corbeau est faisable. Le corbeau met à jour sa position. Sinon, le corbeau reste dans la position actuelle et ne passe pas à la nouvelle position générée.

### **Étape 6 : Évaluer la fonction fitness des nouvelles positions**

La valeur de la fonction fitness de la nouvelle position de chaque corbeau est calculée.

### **Étape 7 : Mettre à jour la mémoire**

Le corbeau  $i$  met à jour la mémoire comme suit :

$$m^{i+1} = x^{i,iter+1} \quad \text{si} \quad f(x^{i,iter+1}) \text{ est meilleure que } f(m^{i,iter}) \quad (\text{III.5})$$

Sinon, il garde la mémoire précédente

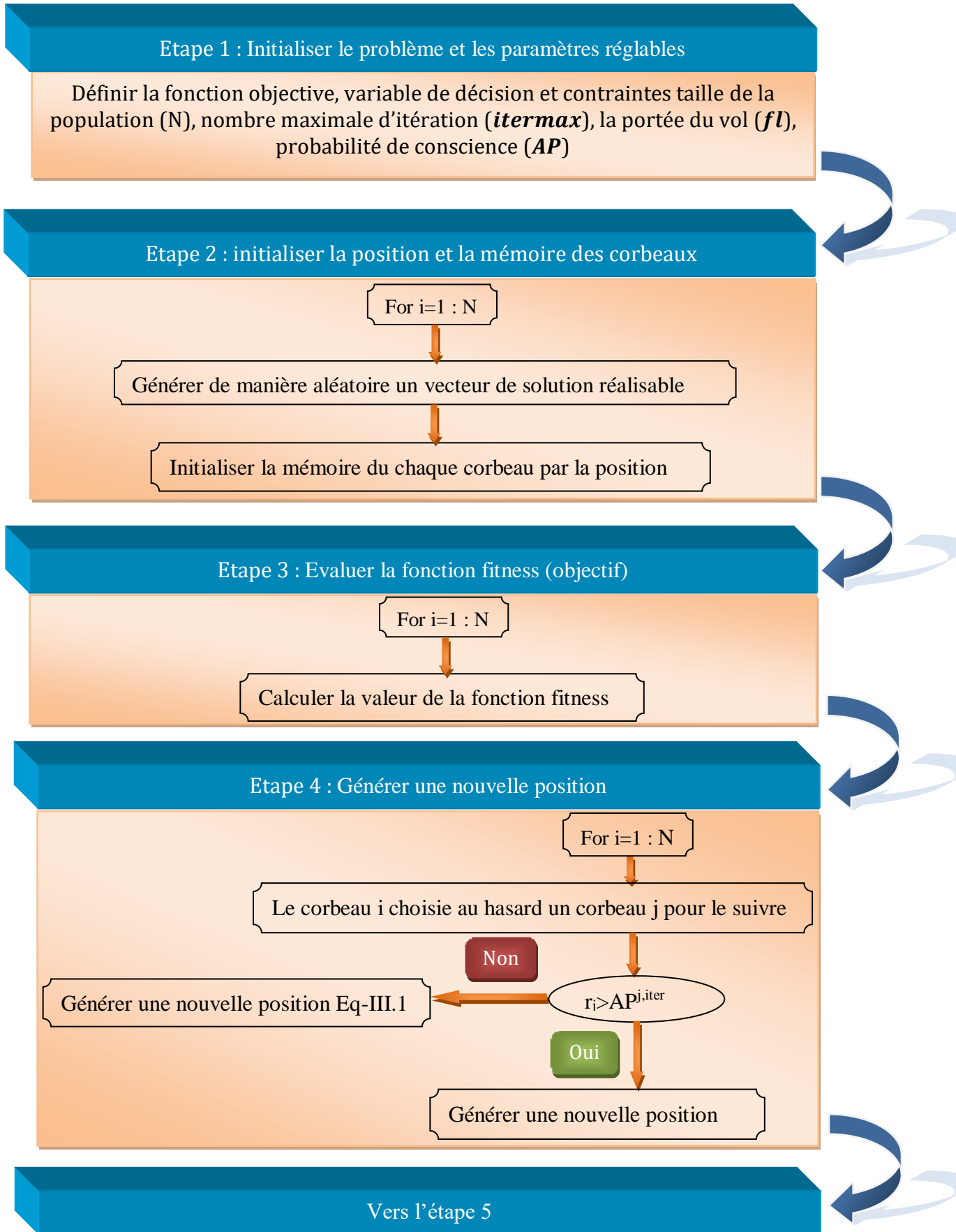
Où  $f(.)$  désigne la valeur de la fonction objective.

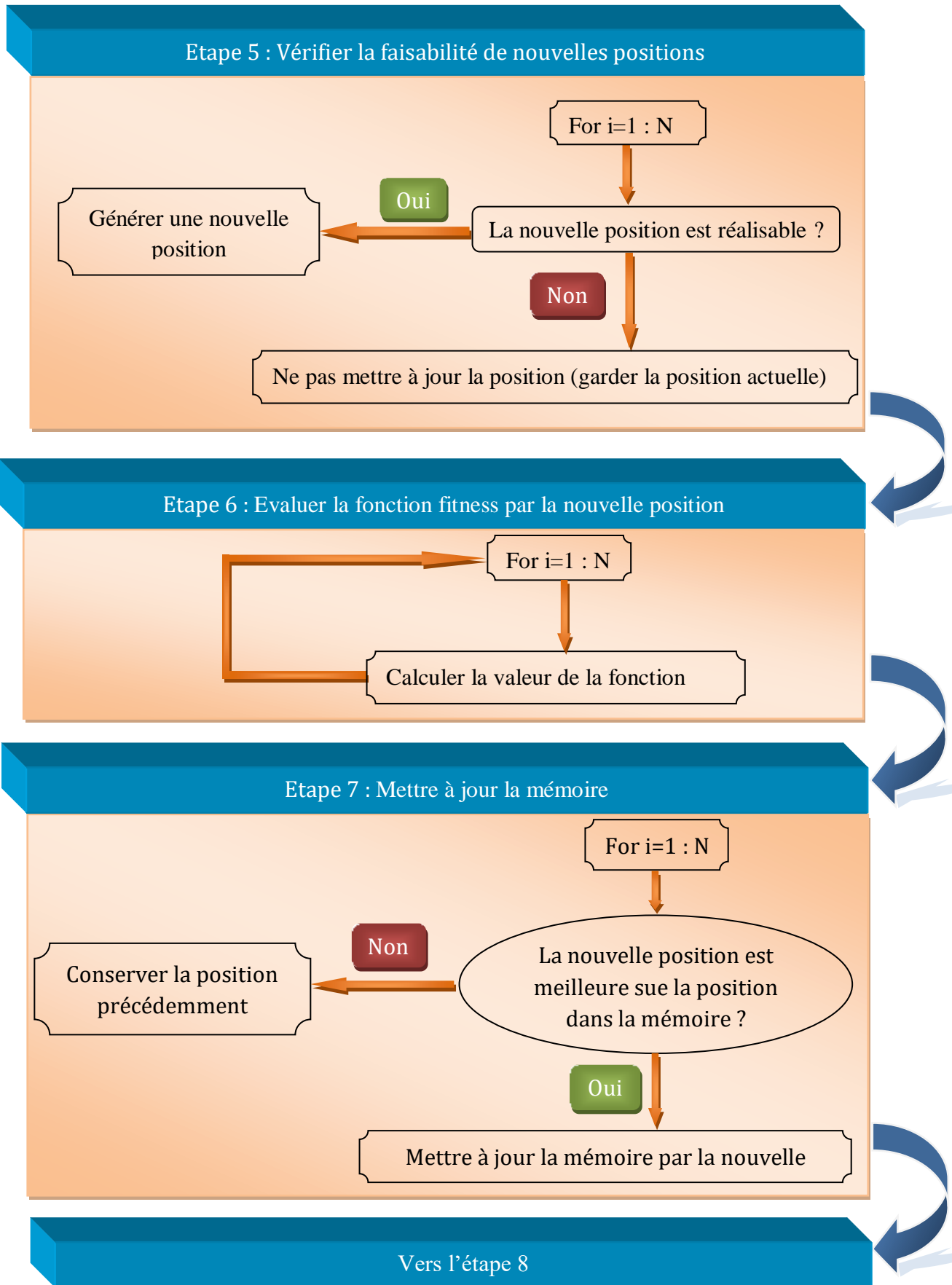
On voit que si la valeur de la fonction fitness de la nouvelle position d'un corbeau est meilleure que la valeur de la fonction fitness de la position mémorisée, le corbeau met à jour sa mémoire par la nouvelle position.

### **Étape 8 : Vérifier le critère d'arrêt**

Les étapes 4-7 sont répétées jusqu'à ce que le nombre maximal des itérations  $iter_{max}$  soit atteint. Lorsque le critère d'arrêt est atteint, la meilleure position de la mémoire en termes de valeur de la fonction objective est rapportée comme la solution du problème d'optimisation [ASK 16].

III.5.1 Organigramme de l'algorithme de recherche du corbeau CSA pour l'optimisation :







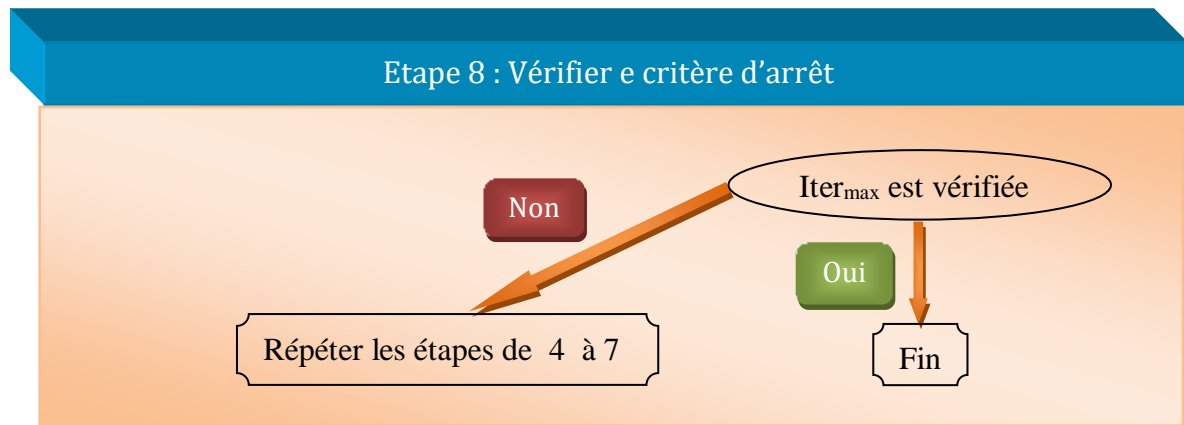


Figure III- 3 Organigramme de l'algorithme CSA pour l'optimisation [ASK 16]

### III.6 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté l'algorithme de recherche de corbeau (CSA), basé sur le comportement d'intelligence des corbeaux. CSA est une technique basée sur la population qui fonctionne sur la base de stockage de l'excès de la nourriture dans des cachettes par les corbeaux et les récupèrent lorsque cela est nécessaire. L'algorithme de recherche du corbeau (CSA) est une nouvelle méthode méta-heuristique qui présente quatre paramètres ajustables la population de l'essaim des corbeaux, la portée du vol, la probabilité de conscience et le nombre des itérations maximale. C'est une technique prometteuse pour l'application sur plusieurs problèmes d'optimisation et plus particulièrement sur le dispatching économique avec l'intégration de l'énergie éolienne comme il est décrit dans le chapitre suivant.

# *Chapitre IV :*

*Intégration de l'énergie éolienne :  
applications et simulation*



**Chapitre IV : Intégration de l'énergie éolienne : applications et simulation**

**IV.1 Introduction :**

Dans ce chapitre, nous essayons de résoudre le problème de dispatching économique sans et avec intégration de l'énergie éolienne en utilisant l'Algorithme de Recherche du Corbeau (CSA) et ce problème est résolu au profit de l'économie de génération de l'énergie électrique. Nous considérons aussi l'impact de l'intégration de l'énergie éolienne sur la sécurité du réseau en optimisant la fonction risque qui reflète l'instabilité du réseau vis-à-vis de l'intégration de l'énergie éolienne. Le réseau de test utilisé est celui d'IEEE 30 JB à six (06) unités de production d'énergie électrique. Le problème d'optimisation pour chaque cas est mono-objectif considérant les contraintes de fonctionnement du système énergétique.

Pour exécuter le programme assurant les tâches de l'algorithme (CSA), on a utilisé MATLAB 2013a installé sur un ordinateur équipé par un  $\mu$ .processeur de type Intel@core (I3) de fréquence 1.10 GHz et une RAM de 4 Go.

**IV.2 Stratégie de travail :**

La figure (IV.1) résume la stratégie et la méthodologie du travail réalisé pour résoudre les problèmes d'optimisation suivants en utilisant l'algorithme de recherche du corbeau (CSA) :

- ✓ Minimisation de la fonction du coût sans l'intégration d'énergie éolienne.
- ✓ Minimisation de la fonction du coût avec l'intégration d'énergie éolienne.
- ✓ Minimisation de la fonction du risque d'intégration de l'énergie éolienne.

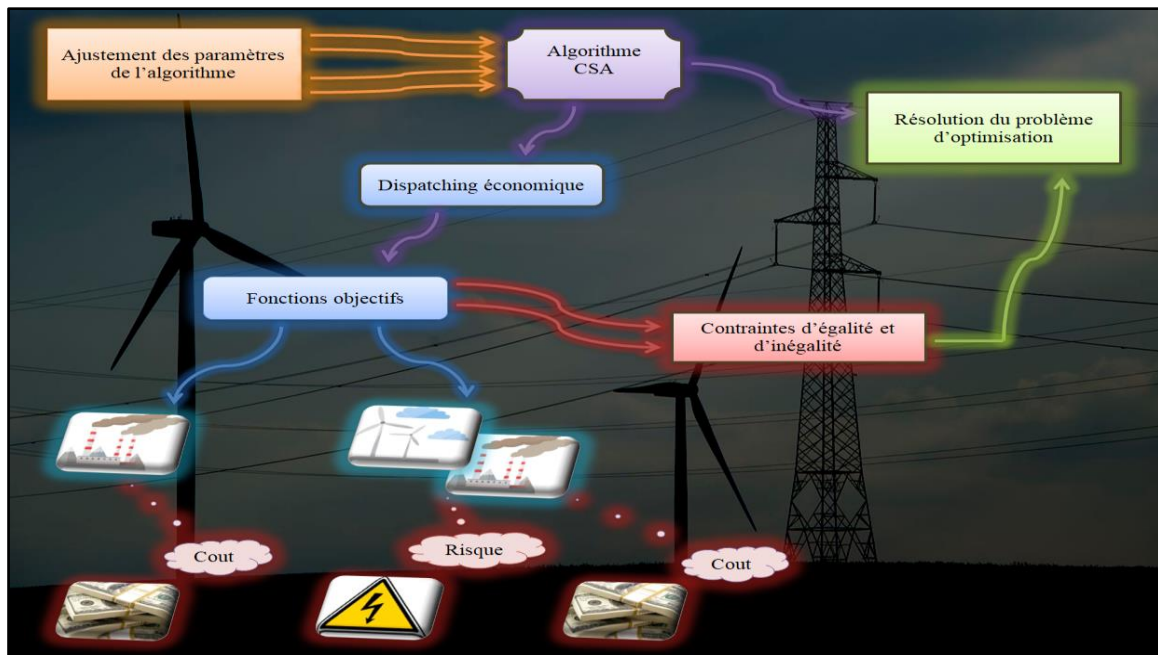


Figure IV- 1 Schéma présentant la stratégie du travail

### IV. 3 Présentation du réseau électrique étudié :

Pour les différentes applications de notre travail, on a choisi le modèle de réseau électrique IEEE30 bus avec six (06) unités de production et une puissance demandée totale  $P_{dt}=2.834pu$ . Les limites minimale et maximale de la puissance active générée pour chaque centrale électrique sont données dans la Figure (IV.2) en unités relatives (p.u). Les coefficients de coût des centrales électriques du réseau électrique- 06unités de production sont illustrés dans le Tableau (IV.1). La figure IV. 3 montre le schéma unifilaire du réseau test IEEE 30 JB.

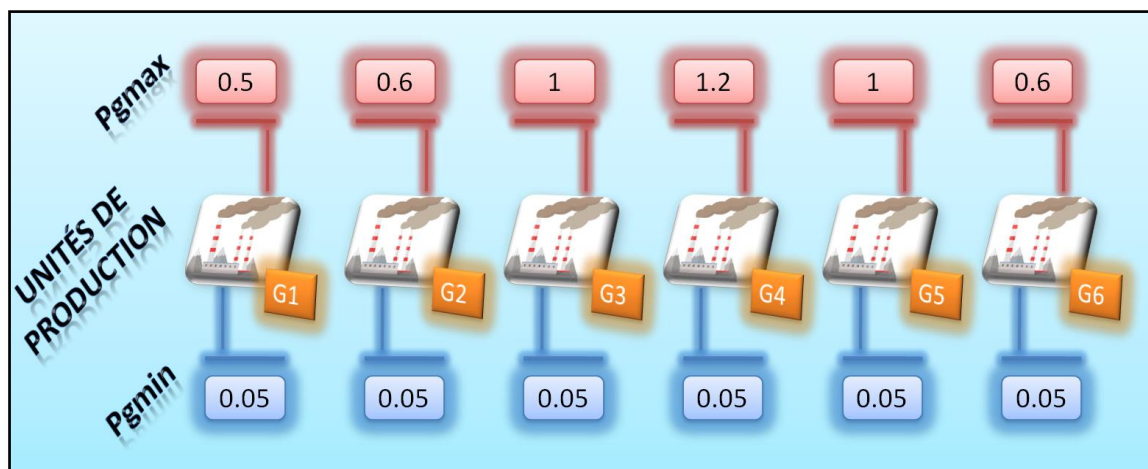


Figure IV- 2 La configuration du réseau électrique de 6 unités de production

Tableau IV- 1 Les coefficients de la fonction du coût de chaque générateur

Générateurs	Les coefficients de coût de la centrale $i$		
	$a_i$	$b_i$	$c_i$
01	10	200	100
02	10	150	120
03	20	180	40
04	10	100	60
05	20	180	40
06	10	150	100

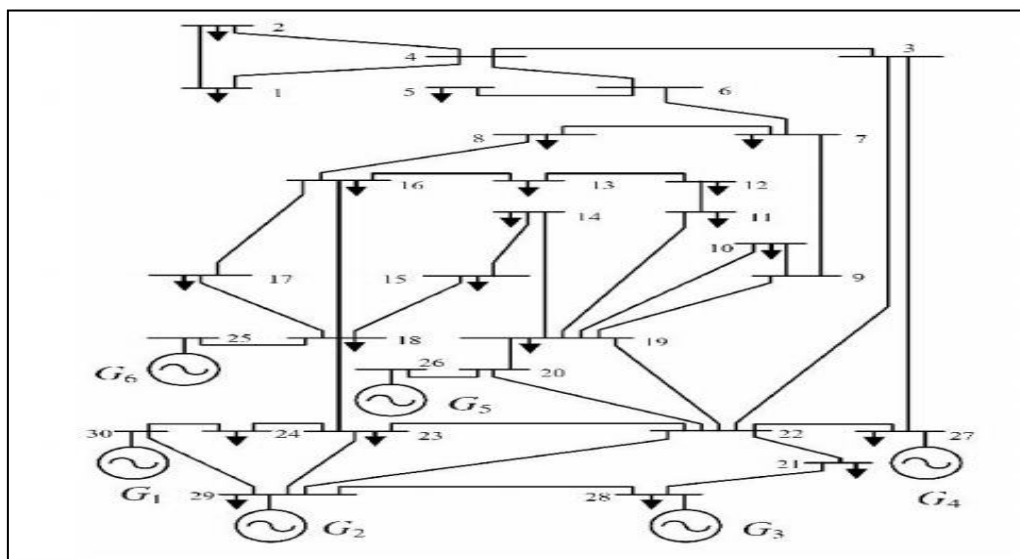


Figure IV- 3 Schéma unifilaire du réseau test IEEE 30 JB

**Remarque :**

La base de données (Coefficient du coût, Les limites de la puissance active, Matrice carrée  $\beta_{ij}$  la puissance demandée total) pour le réseau 6 unités de production sont dans l'annexe.

#### IV.4 Cas d'étude de Dispatching économique :

Dans cette section, on va appliquer l'algorithme de recherche du corbeau (CSA) pour l'objectif de minimiser le coût de production d'énergie électrique qui est un problème d'optimisation mono-objectif sans et avec l'intégration de l'énergie éolienne.

La forme quadratique de la fonction objective à minimiser représentant le coût total de la production de l'énergie électrique (à partir des centrales électriques classiques) est exprimé par la formulation du problème de dispatching économique dans l'équation (I.4).

##### IV.4.1 Résolution du problème de dispatching économique sans intégration de l'énergie éolienne :

###### IV.4.1.a Choix des paramètres de CSA :

On a exécuté le programme de l'algorithme de CSA avec les paramètres suivants:

- ✓ La Taille de l'essaim des corbeaux (nombre de population):  $N_{pop}=100$ .
- ✓ Nombre des itérations maximale :  $itermax=300$ .
- ✓ La portée du vol :  $fl=0.8$ .
- ✓ Probabilité de conscience :  $AP=0.2$ .
- ✓ Nombre de variables de décision (Nombre des générateurs)  $N_g=6$ .
- ✓ La puissance demandé total  $Pdt=2.834$  p.u.

###### IV.4.1.b Simulation et résultats :

Après l'exécution du programme de CSA on a obtenu les résultats correspondants à la solution optimale qui donne le coût total de génération mentionnée sur le tableau ci-dessous :

Tableau IV- 2 Résultats d'optimisation du coût de production – Réseau 06 unités

Variables	valeurs
$P_{g1}$ (p.u)	0.1238
$P_{g2}$ (p.u)	0.2981
$P_{g3}$ (p.u)	0.6007

<b>Pg4 (p.u)</b>	0.9451
<b>Pg5 (p.u)</b>	0.5158
<b>Pg6 (p.u)</b>	0.3722
<b>Puissance générée totale : pg<sub>i</sub>(p.u)</b>	2.8564
<b>Les pertes actives totales : PL(p.u)</b>	0.0224
<b><math>\Delta P = \sum (P_{gi}) - Pl - P_{dt}</math> (p.u)</b>	$0.7747 \times 10^{-3}$
<b>Coût total de production (\$/h)</b>	605.4847
<b>Temps de convergence (sec)</b>	190.929324

**Interprétation :**

Après l'application de la méthode CSA pour optimiser le coût total de production de l'énergie électrique, on obtient le coût total minimal 605.4847 \$/h qui correspond aux puissances générées optimales, aux pertes actives de transmission totales de 0.0224 p.u et une puissance totale optimale produite de 2.8564 p.u. Le bilan de puissance (contrainte d'égalité) est vérifiée par  $\Delta P = 0.7747 \times 10^{-3}$  dans le tableau IV.2. Les puissances générées optimales sont dans les limites prédéfinies données dans le Tableau IV.3 (respectant les contraintes d'inégalité) et schématisé sur la figure IV.3.

**Tableau IV- 3 Répartition optimale de la puissance générée -contrainte d'inégalité-**

<b>Ng</b>	<b>01</b>	<b>02</b>	<b>03</b>	<b>04</b>	<b>05</b>	<b>06</b>
<b>pg<sub>min</sub> (PU)</b>	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
<b>pg<sub>i</sub> (PU)</b>	0.1238	0.2981	0.6007	0.9451	0.5158	0.3722
<b>pg<sub>max</sub>(PU)</b>	0.5	0.6	1	1.2	1	0.6

La figure (IV.4) illustre les puissances actives pour les 6 générateurs qui sont dans leurs limites de fonctionnement (minimales et maximales).

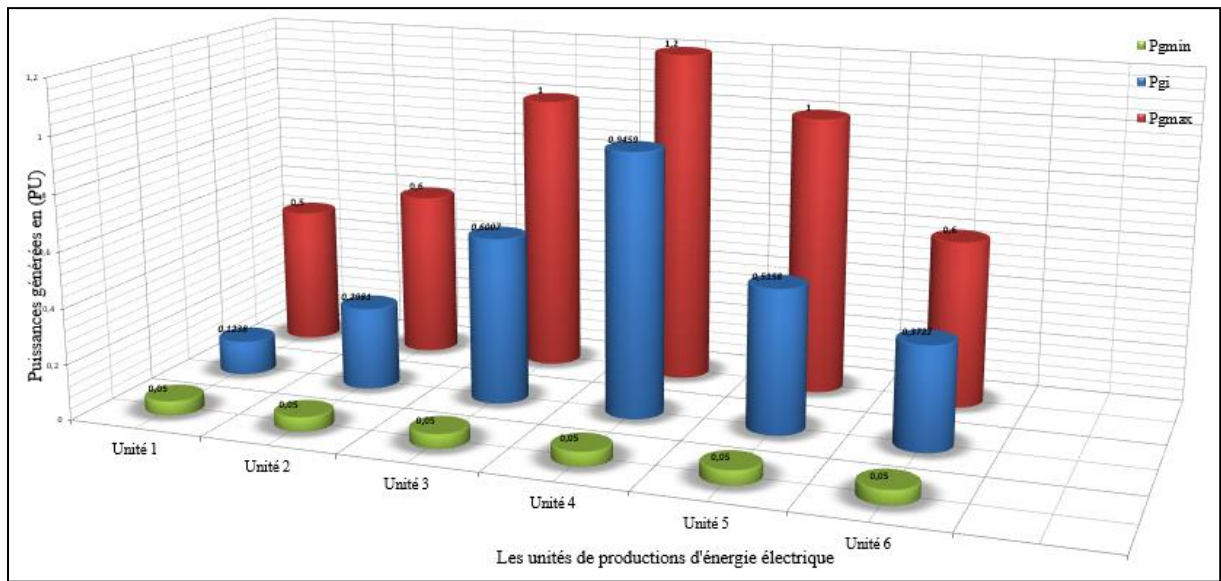


Figure IV- 4 Répartition optimale des puissances générées pour 06 unités

#### IV.4.1.c Convergence de l'algorithme CSA pour la résolution du Dispatching économique :

L'évolution de la fonction objective (coût total de production) en fonction des nombres des itérations de l'algorithme CSA est donnée sur la figure (IV.5).

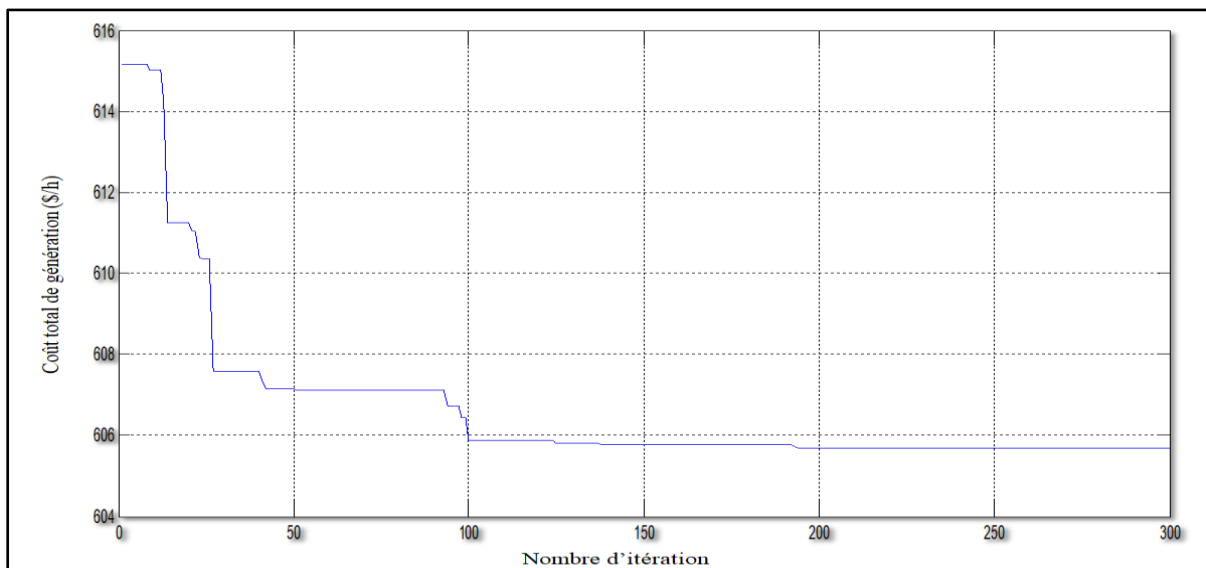


Figure IV- 5 Caractéristique de convergence de l'algorithme CSA pour un réseau 06 unités



### **Interprétation :**

D'après la figure IV. 5 qui montre la caractéristique de convergence de l'algorithme CSA pour un réseau de 06 unités de production d'énergie électrique sans l'intégration d'énergie éolienne, on remarque que le coût converge vers la meilleure solution **605.4847 \$/h** dans un nombre des itérations égale à **200**. Il est à signaler que le temps d'exécution égale à **190.929324 seconds**.

#### **IV.4.2 Cas d'étude de dispatching économique avec l'intégration de l'énergie éolienne :**

Dans cette section, on fait la résolution de Dispatching Economique (DE) en considérant l'intégration de l'énergie éolienne. La description de l'impact de l'énergie éolienne sur l'économie et la sécurité du réseau est décrite dans le chapitre 2 section II. 3. 7.

Le taux de pénétration de l'énergie éolienne est limité entre 10% et 20% pour des mesures d'économie et de sécurité.

##### **IV.4.2.a Choix des paramètres de CSA et les données relatives au problème :**

On a exécuté le programme de l'algorithme de CSA avec les paramètres suivants:

- ✓ La Taille de l'essaim des corbeaux (nombre de population):  **$N_{pop}=100$** .
- ✓ Nombre des itérations maximale : ***itermax* =150**.
- ✓ La portée du vol : ***fl*=0.8**.
- ✓ Probabilité de conscience : ***AP*=0.2**.
- ✓ Nombre de générateur  **$N_g=7$**  (06 unités de production thermique+une source éolienne).
- ✓ La puissance demandée totale :  **$P_{dt}=2.834p.u.$**
- ✓ La puissance minimale de l'énergie éolienne  **$W_{min}=0.1*P_{dt}$**  (10% de la puissance demandée).
- ✓ La puissance maximale de l'énergie éolienne  **$W_{max}=0.2*P_{dt}$**  (20% de la puissance demandée).
- ✓ indicateur de niveau de sécurité :  **$\mu$**  (taux de pénétration de l'énergie éolienne).
- ✓ l'énergie éolienne disponible au niveau des fermes éoliennes :  **$W_{av}=0.5668p.u.$**

- ✓ le coefficient du coût de pénalité pour ne pas utiliser toute l'énergie éolienne disponible est donné par  $cwp=20 \text{ \$/p.u.}$

*IV.4.2.b Simulation et résultats :*

Le tableau IV.4 résume toutes les valeurs correspondantes à la solution optimale obtenue par l'exécution de l'algorithme CSA :

**Tableau IV- 4 Résultats de simulation de Dispatching Economique pour 06 unités de production thermiques avec l'intégration d'énergie éolienne.**

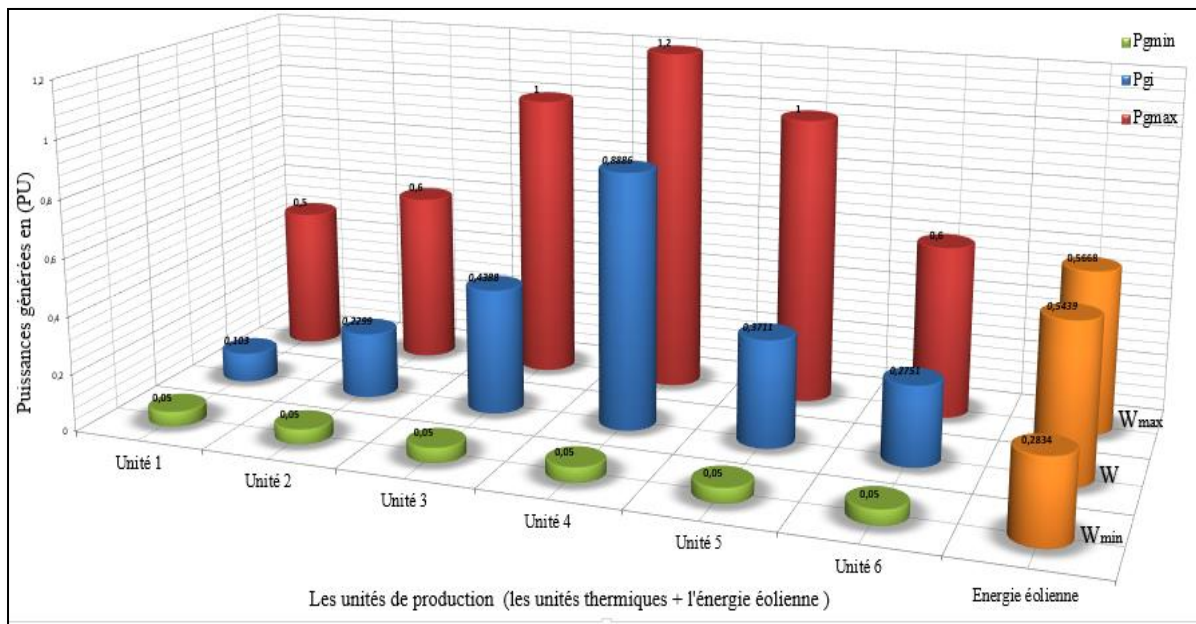
Variable de la solution optimale	valeurs
<b>Pg1 (p.u)</b>	0.1030
<b>Pg2(p.u)</b>	0.2299
<b>Pg3(p.u)</b>	0.4388
<b>Pg4(p.u)</b>	0.8886
<b>Pg5(p.u)</b>	0.3711
<b>Pg6(p.u)</b>	0.2751
<b>Puissance éolienne générée : W(p.u)</b>	0.5439
<b>Puissance générée totale : <math>pg_t</math>(p.u)</b>	2.8504
<b>Les pertes actives totales : PL(p.u)</b>	0.0164
<b><math>\Delta P = \text{sum}(Pg_i) + W - PL - Pdt</math> (p.u)</b>	$2.6444 \times 10^{-04}$
<b>Indicateur du niveau de sécurité : <math>\mu</math></b>	0.0808
<b>Fonction risque</b>	19.8465
<b><math>W_c</math>(\$/h)</b>	27.1955
<b>TOC (\$/h)</b>	514.2638
<b>Ct(\$/h)</b>	486.6105 (\$/h)

<b>Temps de convergence (sec)</b>	733.8281
-----------------------------------	----------

Le tableau IV.5 donne les puissances actives générées optimales avec leurs limites maximales et minimales. Tandis que la figure IV.5 illustre les puissances actives pour les 06 générateurs des centrales thermiques et la puissance active optimale de la source éolienne (avec la disponibilité minimale et maximale de la puissance active qui est due à l'intermittence du vent).

**Tableau IV- 5 Répartition optimale de la puissance générée par les centrales thermiques (avec l'intégration d'énergie éolienne).**

Centrale	01	02	03	04	05	06
$P_{g_{min}}$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
$P_g$	0.1030	0.2299	0.4388	0.8886	0.3711	0.2751
$P_{g_{max}}$	0.5	0.6	1	1.2	1	0.6



**Figure IV- 6 Répartition optimale des puissances générées pour 6 unités de production d'énergie électrique et de la puissance éolienne.**

### Interprétation :

Après l'implémentation du programme de CSA pour minimiser le coût de production d'énergie électrique avec l'intégration d'énergie éolienne, on obtient les résultats liés à la solution optimale montrée sur le tableau IV. 5. A travers ces derniers résultats, on a approuvé que l'ajout d'énergie éolienne dans le réseau électrique réduit le prix de la production d'énergie électrique à partir des centrales classiques. Sans intégration de l'énergie éolienne, la solution optimale du coût de production est de 605.4847 (\$/h), tandis que avec l'intégration de l'énergie éolienne le coût est considérablement réduit atteignant le 514.2638 (\$/h). En prenant en considération le coefficient du coût de pénalité pour ne pas utiliser toute l'énergie éolienne disponible égale à  $c_{wp}=20$ (\$/h) avec une puissance éolienne générée optimale égale à 0.5439 p.u considérant une puissance éolienne disponible égale à  $W_{av}=0.5668$ p.u. Alors on peut obtenir le coût de pénalité égale à 0.4580 (\$/h). Ce coût représente 0.089% du coût total alors il est clair que ce dernier est négligeable par rapport au coût total de production de l'énergie électrique. Le bilan de puissance est vérifié par la valeur de  $\Delta P=2.6444 \times 10^{-04}$  reflétant la vérification de la contrainte d'égalité (la répartition optimale des puissances générées vérifie que la somme des puissances générées à partir des centrales classiques 2.8504 p.u plus la puissance éolienne optimale 0.5439 p.u moins les pertes actives totales 0.0164 p.u est égale à la puissance demandée totale 2.834 p.u).

De plus, une comparaison entre les deux coûts de production de l'énergie éolienne  $W_c$  et le coût de production à partir des centrales classiques  $C_t$  montre que ce dernier est **18 fois** plus grand que  $W_c$ . Le coût total optimal de fonctionnement **TOC** est de **514.2638 (\$/h)** (avec intégration de l'énergie éolienne) est réduis de **15%** par rapport à celui **605.4847 (\$/h)** (cas sans intégration de l'énergie éolienne) avec intégration de l'énergie éolienne de **19.19%**.

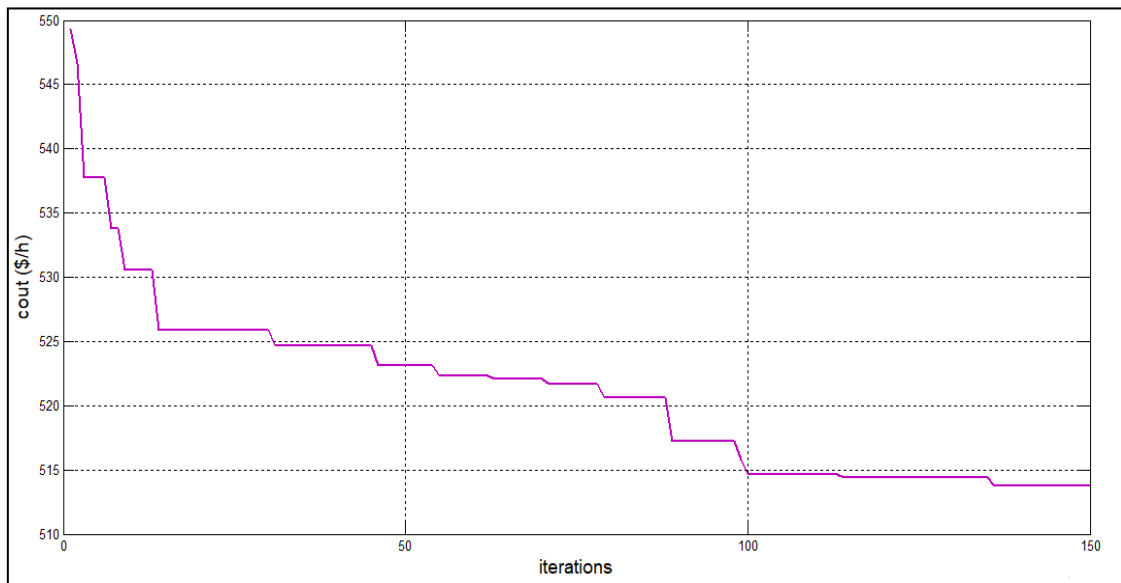
La valeur du risque maximale spécifiée est égale à **20** et après notre exécution du programme nous avons obtenu une valeur très proche de cette dernière qui est de **19.8465**. Avec un indicateur de niveau de sécurité  $\mu=0.0808$  qui est presque nul. Nous pouvons donc conclure que l'intégration d'une puissance des éoliennes élevée dégrade la sécurité du système énergétique (le système devient moins stable).

Après ces résultats et ces interprétations, on peut conclure que l'intégration d'énergie éolienne dans le réseau électrique réduit les dépenses de la production d'énergie électrique mais malheureusement augmente le risque d'instabilité du système. Ce qui nous pousse à

étudier dans la partie suivante une autre fonction objectif qui doit être minimisée afin d'assurer la sécurité du système, c'est la fonction risque d'intégration de l'énergie éolienne.

#### IV.4.2.c La convergence de l'algorithme CSA avec l'intégration d'énergie éolienne :

La variation de la fonction du coût et la convergence de l'algorithme CSA en fonction des nombres des itérations sont illustrées dans La figure (IV.7).



**Figure IV- 7** Caractéristique coût en fonction d'itérations de l'algorithme CSA pour un réseau 06 unités avec l'intégration d'énergie éolienne

#### Interprétation :

La figure (IV.7) montre la diminution continue du coût de production arrivant au coût minimal (dit coût optimal) et cela à l'itération **136** avec un temps d'exécution égal à **733.8281sec**, ce qui explique la convergence de l'algorithme appliqué (CSA) vers la meilleure solution.

#### IV.5 Cas d'étude du risque d'intégration de l'énergie éolienne :

Dans cette section on va appliquer l'algorithme de recherche du corbeau (CSA) pour l'objectif de minimiser le risque d'intégration d'énergie éolienne car cette dernière influe sur la sécurité de système électrique, ce problème représente un problème d'optimisation mono-objectif avec l'intégration d'énergie éolienne.

La fonction à minimiser représentant le risque d'intégration d'énergie éolienne est exprimée par :

$$R(u) = \frac{1}{u} \quad (\text{IV.1})$$

#### IV.5.1 Choix des paramètres de CSA :

Les paramètres choisis dans cette partie sont les mêmes que ceux présentés dans la section précédente. On a exécuté le programme de l'algorithme de CSA avec les mêmes paramètres.

#### IV.5.2 Simulation et résultats:

Les résultats de simulation pour l'optimisation de la fonction risque utilisant l'algorithme CSA sont exposés dans le Tableau IV.6.

**Tableau IV- 6 Résultats de simulation de la minimisation de la fonction risque pour 06 unités de production d'énergie électrique classiques avec l'intégration d'énergie éolienne.**

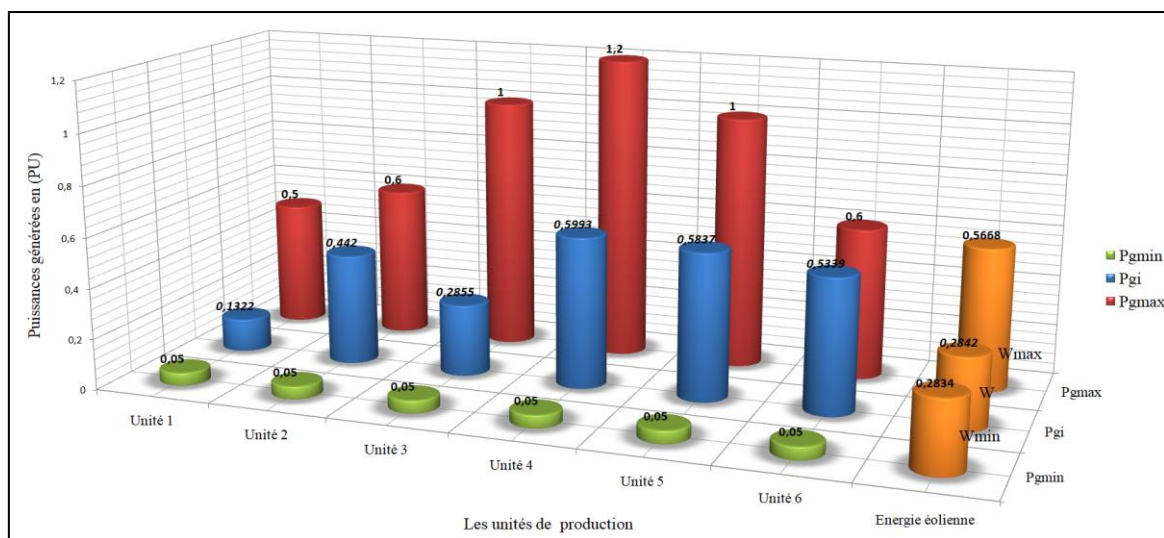
Variable	valeurs
<b>Pg1 (p.u)</b>	0.1322
<b>Pg2 (p.u)</b>	0.4420
<b>Pg3 (p.u)</b>	0.2855
<b>Pg4 (p.u)</b>	0.5993
<b>Pg5 (p.u)</b>	0.5837
<b>Pg6 (p.u)</b>	0.5339
<b>Puissance générée éolienne : W (p.u)</b>	0.2842
<b>Puissance générée totale : pg<sub>t</sub> (p.u)</b>	2.8608
<b>Les pertes actives totales : PL (p.u)</b>	0.0269
<b><math>\Delta P = \text{sum}(Pgi) + W - PL - P</math> (p.u)</b>	$5.2299 \times 10^{-06}$
<b>Indicateur du niveau de sécurité : <math>\mu</math></b>	0.9971
<b>Fonction risque</b>	1.0044

<b>Wc(\$/h)</b>	14.2107
<b>TOC (\$/h)</b>	581.2204
<b>Ct(\$/h)</b>	561.3580
<b>Temps de convergence (sec).</b>	15.5000

Le tableau IV.7 donne la répartition optimale de la puissance générée active par les centrales thermiques (en présence des fermes éoliennes) avec les limites minimales et maximales et la figure IV.7 illustre la même répartition avec la puissance éolienne (avec la puissance éolienne minimale et maximale disponible).

**Tableau IV- 7 Répartition optimale de la puissance générée active par les centrales thermiques (en présence des fermes éoliennes) avec les limites minimales et maximales.**

Ng	01	02	03	04	05	06
<b>Pgmin</b>	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
<b>Pg</b>	0.1322	0.4420	0.2855	0.5993	0.5837	0.5339
<b>pgmax</b>	0.5	0.6	1	1.2	1	0.6



**Figure IV- 8 Répartition optimale des puissances générées pour 6 unités de production d'énergie électrique avec la puissance éolienne optimale**

### Interprétation :

Après l'implémentation du programme de CSA pour l'objectif de minimisation de la fonction risque d'intégration d'énergie éolienne, on aboutit aux résultats liés à la solution optimale affichés sur le tableau IV.6. On constate que la valeur de l'indicateur de niveau de sécurité  $\mu=0.9971$  qu'il est presque égale à 1 et le risque d'intégration d'énergie éolienne égale à **1.0044**. Cela explique que la faible quantité de la puissance éolienne intégrée  $W=0.2842$  p.u correspond à un coût total de production d'énergie électrique **581.2204 \$/h** élevé pour satisfaire la puissance demandée. On a une augmentation du coût de pénalité à **5.6520 (\$/h)** de ne pas utiliser toutes l'énergie éolienne disponible. La solution optimale correspondante à la minimisation de la fonction risque vérifie le bilan de puissance reflétant la vérification de la contrainte d'égalité  $\Delta P=5.2299 \times 10^{-06}$  et les contraintes d'inégalité sont vérifiées selon le **tableau IV.7** (respectant les limites de génération de la puissance active des centrales thermiques). La puissance active générée totale égale à **2.8608** p.u avec des pertes actives totales de **0.0269** p.u et une puissance éolienne **0.2842** p.u vérifient la contrainte d'égalité pour couvrir les besoins de consommation avec une puissance demandée totale  $P_{dt}=2.834$  p.u et avec un prix de production d'énergie électrique **581.2204 (\$/h)**.

Un indicateur du niveau de sécurité  $\mu$  de **0.9971** correspond à une faible puissance active éolienne injecté dans le réseau **0.2842** p.u (taux d'intégration de 10.02%) et une valeur de la fonction risque **1.0044** et donc une sécurité supérieure du réseau électrique.

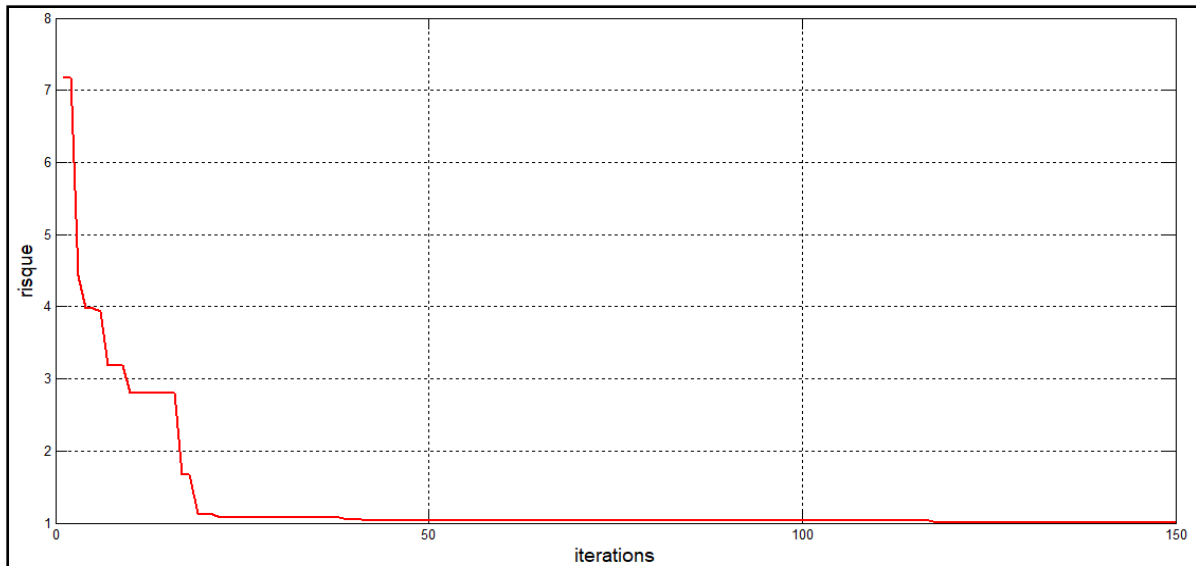
De plus, une comparaison entre les deux coûts  $W_C$  et  $C_t$  montre que le cout de production d'énergie électrique à partir des centrales électriques classiques est **32 fois** plus grand que celui donné par les fermes éoliennes.

Le coût total optimal de fonctionnement **TOC** est de **581.2638 (\$/h)** (avec intégration de l'énergie éolienne) est réduis de **4%** par rapport à celui **605.4847 (\$/h)** (cas sans intégration de l'énergie éolienne) avec intégration de l'énergie éolienne de **10.02%** et cela au profit de la sécurité du réseau électrique.

#### IV.5.3 Convergence de l'algorithme CSA pour la minimisation de la fonction risque :

La variation de la fonction objective risque et sa convergence utilisant l'algorithme CSA est en fonction des nombres des itérations qui sont illustrées dans la figure (IV.9).





**Figure IV- 9** Caractéristique de convergence de l’algorithme CSA pour un réseau de 06 unités avec l’intégration d’énergie éolienne

**Interprétation :**

La figure (IV.9) montre la convergence de l’algorithme CSA pour la minimisation de la fonction risque et pour un réseau de 06 unités de production d’énergie électrique (avec l’intégration d’énergie éolienne) vers la meilleure solution dans un nombre des itérations **119** avec un temps d’exécution égale à **15.5 sec**.

**IV.5.4 Etude comparative :**

Le Tableau IV.8 exprime une analyse comparative entre l’optimisation mono-objective pour chaque fonction objective (coût de production d’énergie électrique et la fonction risque).

**Tableau IV- 8** Résultats correspondants à l’étude comparative

Variables	Minimisation de la fonction objectif	
	Cout de production	Fonction risque
<b>Pg1 (p.u)</b>	0.1030	0.1322
<b>Pg2 (p.u)</b>	0.2299	0.4420
<b>Pg3 (p.u)</b>	0.4388	0.2855
<b>Pg4 (p.u)</b>	0.8886	0.5993

<b>Pg5 (p.u)</b>	0.3711	0.5837
<b>Pg6 (p.u)</b>	0.2751	0.5339
<b>Puissance éolienne générée W (p.u)</b>	0.5439	0.2842
<b>Puissance générée totale : <math>pg_t</math> (p.u)</b>	2.8504	2.8608
<b>Les pertes actives totales : PL (p.u)</b>	0.0164	0.0269
<b><math>\Delta P = \text{sum}(Pgi) + W - PL - P</math> (p.u)</b>	$2.6444 \times 10^{-04}$	$5.2299 \times 10^{-06}$
<b>Indicateur du risque : <math>\mu</math></b>	0.0808	0.9971
<b>Fonction risque</b>	19.8465	1.0044
<b>Wc (\$/h)</b>	27.1955	14.2107
<b>TOC (\$/h)</b>	514.2638	581.2204
<b>Ct(\$/h)</b>	486.6105	561.3580

En se basant sur le **tableau IV. 8** et en optimisant le coût de production d'énergie électrique, il est clair que le coût de fonctionnement total optimal a été réduit à **514.2638** (\$/h) exprimant un indicateur du risque de **0.0808** et donc une fonction de risque élevé de **19.8465**. Un coût de production d'énergie électrique réduit est économiquement meilleur mais au détriment d'un risque élevé correspondant à une instabilité du réseau électrique. Dans ce cas, nous avons un taux de pénétration de la puissance éolienne presque maximale et W égale à **0.5439 p.u.** avec un pourcentage de **19.19%**.

Par contre lorsqu'on optimise (en minimisant) la fonction risque comme une fonction objectif, le coût de fonctionnement total augmente à **561.3580** (\$/h) par rapport au premier cas avec un indicateur de risque de **0.9971** donnant une valeur optimal de la fonction risque de **1.0044**. Cela traduit une bonne sécurité du système énergétique au détriment de l'aspect économique avec coût élevé de **561.3580** (\$/h). Dans ce cas, nous avons un taux de pénétration de la puissance éolienne presque minimale et W égale à **0.2824 p.u.** avec un pourcentage de **9.96%**.

Il est nécessaire de signaler que l'amélioration (minimisation) du coût de production (coût de fonctionnement total) correspond à un grand taux de pénétration de la puissance éolienne et par conséquent un taux de risque d'instabilité plus élevé. Par contre, l'amélioration (minimisation) de la fonction risque correspond à un faible taux de pénétration de la puissance éolienne et par conséquent un coût de production (coût de fonctionnement total) élevé. Donc les deux fonctions risque et coût de production sont deux fonctions conflictuelles.

### **IV.6 Conclusion :**

Dans ce chapitre on a adopté et appliqué une méthode méta-heuristique nommée algorithme de recherche du corbeau CSA pour l'objectif de résoudre le problème de dispatching économique avec et sans l'intégration d'énergie éolienne sur un réseau test IEEE30 bus avec six (06) unités de production d'énergie électrique, prenant en considération la vérification des contraintes d'égalité et d'inégalité. Le problème de dispatching économique avec intégration de l'énergie éolienne a été traité pour deux objectifs : l'objectif économique en minimisant la fonction coût de production de l'énergie électrique (en décrivant l'impact de l'intégration de l'énergie éolienne sur la stabilité et la sécurité du réseau électrique) et l'objectif de sécurité en minimisant la fonction risque (en décrivant l'impact de la réduction de l'intégration de l'énergie éolienne sur l'économie de production de l'énergie électrique dans le réseau électrique).

# *Conclusion générale*



### *Conclusion générale*

Le travail présenté dans ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la résolution du problème de dispatching économique en considérant l'intégration de l'énergie éolienne. Cette énergie éolienne autant qu'énergie renouvelable est de grande importance que se soit sur le plan économique en réduisant l'épuisement des ressources fossiles (pétrole, charbon, gaz) ou sur le plan environnemental en réduisant la production à partir des centrales classiques (et par conséquent réduction du dégagement des gaz toxiques et à les gaz effet de serre). Bien que l'intégration de l'énergie éolienne dans les réseaux est bénéfique sur le plan économique mais elle présente un effet néfaste sur la stabilité du réseau électrique. Plus que le taux d'intégration de l'énergie éolienne est grande, plus que le système énergétique devient plus sensible aux perturbations électriques (réduction du niveau de sécurité du réseau électrique).

L'impact de l'intégration de l'énergie éolienne sur les deux cotés économique et de sécurité a été étudié et analysé dans ce mémoire considérant la résolution du problème de dispatching économique qui est un problème d'optimisation en limitant le taux d'intégration de l'énergie éolienne (entre 10% et 20% de la puissance demandée totale). La résolution de ce problème a été faite avec une méthode d'optimisation méta-heuristique appelée Algorithme de Recherche du Corbeau (CSA) considérant un réseau test IEEE 30 JB comportant 06-unités de production de l'énergie. Trois problèmes d'optimisation ont été traités :

- Problème d'optimisation sans intégration de l'énergie éolienne et avec la minimisation d'une fonction objectif qui est le cout total de production de l'énergie électrique à partir des centrales classiques.
- Problème d'optimisation avec intégration de l'énergie éolienne et avec la minimisation d'une fonction objectif qui est le cout total de production de l'énergie électrique à partir des centrales classiques et des parcs éoliens.
- Problème d'optimisation avec intégration de l'énergie éolienne et avec la minimisation d'une fonction objectif qui est la fonction risque qui décrit la sécurité du réseau en fonction du taux d'intégration de l'énergie éolienne.

A partir des résultats dégagés, nous pouvons conclure que :

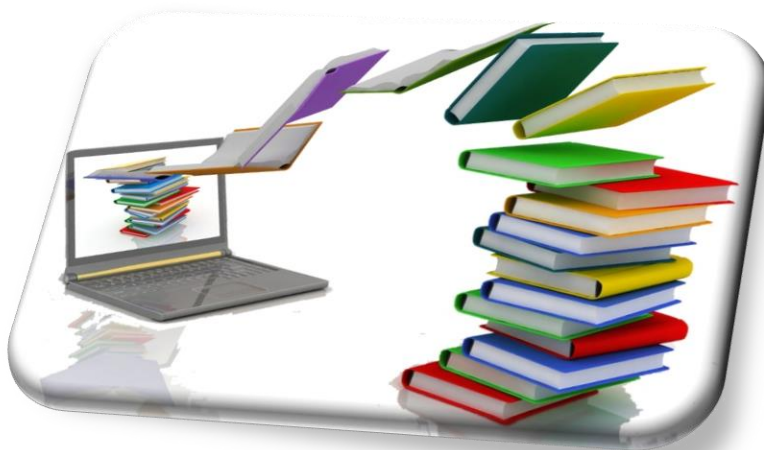
- ✓ L'intégration de l'énergie éolienne est de grande importance sur le plan économique (réduction du coût de production d'énergie à partir des centrales classiques) en

réduisant l'épuisement des réserves fossiles et les dégagements des gaz à effet de serre.

- ✓ L'intégration de l'énergie éolienne a un effet néfaste sur le plan de la sécurité du réseau électrique (augmentation du risque d'instabilité du réseau avec l'augmentation du taux d'intégration de l'énergie éolienne).
- ✓ La résolution de chaque problème mono-objectif que ce soit celle de minimisation de la fonction coût de production ou la minimisation de la fonction risque a montré que les deux fonctions objectifs sont des fonctions conflictuelles.
- ✓ La minimisation de chaque fonction objectif (fonction coût de production ou fonction risque) est accomplie au détriment de l'autre fonction objectif.
- ✓ La méthode d'optimisation méta-heuristique CSA a prouvé sa capacité de surmonter la complexité des contraintes traitées pour chaque problème d'optimisation, elle a montré aussi une simplicité d'implémentation.

A cause de l'aspect conflictuel entre les deux fonctions objectifs coût total de production de l'énergie et fonction risque, nous proposons comme perspective la minimisation des deux fonctions simultanément, ce qui ramène le problème d'optimisation à un problème multi-objectif. Comme nous proposons d'ajouter un autre problème qui est le problème environnemental (minimisation de la fonction émission des gaz à partir des centrales classiques) et étudier le rapport de ce problème avec le problème économique et le problème de sécurité.

# *Bibliographie*



*Bibliographie*

**A**

[**ABD17**]: ABDELAZIZ, Almoataz Y. et FATHY, Ahmed, «A novel approach based on crow search algorithm for optimal selection of conductor size in radial distribution networks», Engineering Science and Technology, an International Journal, 2017, vol. 20, no 2, pp. 391-402.

[**ABD12**] : ABDELHAMID Lilia, «Contribution à l'Amélioration des Performances des Générateurs Eoliens - Evaluation de l'Impact des Energies Renouvelables sur l'Environnement», thèse de doctorat, Université Hadj Lakhdar de Batna, 26/04/2012.

[**ABD16**] : H. Abderrezek \* et K. Gasmi, «Les énergies renouvelables, un pilier de développement de l'agriculture algérienne - Cas de l'énergie éolienne», Revue des Energies Renouvelables Vol. 19 N°3 (2016)pp. 497 – 508.

[**ASK 16**]: A.Askarzadeh, « A novel meta-heuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm», Ordinateurs et structures, 169 (2016), pp. 1-12.

**B**

[**BEN KIL14**] : BEN KILANI Khadija «Réseaux Électriques de Puissance», École nationale d'ingénieurs de Tunis, cours, 2013-2014.

[**BOU19**] : BOURZAMI Arif, « Contribution à l'étude de la stabilité des grands réseaux électriques dans un marché de l'électricité dérégulé en présence des sources d'énergie renouvelable par la logique floue », thèse de doctorat université ferhat abbas - setif. 1 décembre 2019.

[**BOU 13**] : BOUSSAID ilhem, «perfectionnement de méta-heuristiques pour l'optimisation continue» école doctorale mathématiques et sciences et technologies de l'information et de la communication (mstic), université Houari Boumediene, 29 juin 2013.



**C**

[CHI 17] : CHIKHA Saïd, «Contribution à l’optimisation de la commande prédictive des convertisseurs statiques intégrés dans les chaînes de conversion d’énergie éolienne» thèse de doctorat, Université Larbi Ben M’hidi-Oum El Bouaghi, Soutenu le 03/07/2017.

[CREG20] : Page du site de la Commission de Régulation d’Electricité et du Gaz disponible sur : <https://www.creg.dz/index.php/operateur/operateur-du-systeme-electrique/le-systeme-electrique> , consulté le [20/05/2020].

**D**

[DEM 20] : Page du site du de motivateur disponible sur <https://www.demotivateur.fr/article-buzz/9-choses-fascinantes-et-meconnues-a-savoir-sur-les-corbeaux-ces-magnifiques-oiseaux-qui-souffrent-malheureusement-d-une-mauvaise-reputation--3888> consulté le 17-4-2020.

[DID09] : DIDIER, Michel et KOLÉDA, Gilles, « Evaluation socio-économique du programme de production d’électricité éolienne et photovoltaïque», Coe-Rexecode : Centre d’observation économique et de recherche pour l’expansion de l’économie et le développement des entreprises, 2009.

[DOC19] : DOCUMENTS,« technique de la centrale de production d’énergie électrique Biskra chegga de Sonelgaz ‘SPE’ », en 2019.

[Dou17] : DOUIDA Nedjmeddine, «Algorithme de recherche du corbeau dédié à l’optimisation appliqué au dispatching économique», mémoire de master à université de Biskra, 2017.

**F**

[FUT 20] : Page du site de futura science disponible sur : <https://www.futura-sciences.com/planete/actualites/animaux-corbeaux-sont-ils-plus-intelligents-grands-singes-67993/> consulté le 17-4-2020.

**G**

[GWA 20] :Global Wind Atlas disponible sur le site : <https://globalwindatlas.info/> consulté le 16-04-2020.

H

[HAC 17] : HACHEMI Ammar, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un Système hybride dédié au pompage », thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra 2017.

[HAD18] : HADJI Slimane, « Optimisation de la conversion énergétique pour les systèmes à énergie Photovoltaïque », Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas Sétif 1, 2018,

[HAM 19] : HAMED Mostefa, «Contribution à l'optimisation multi objective Dynamique du coût et l'émission de gaz considérant les contraintes pratiques et de sécurités», thèse de doctorat, Université Mohamed Khider de Biskra, Soutenu le : 24 / 10 / 2019.

[HAM17] : HAMOUDI Farid, « Réseaux de transport et de distribution électrique », Département de Génie Électrique, Université Abderrahmane Mira- Bejaia, Cours universitaire. Année universitaire 2016/2017.

I

[IEA20] : international energy agency disponible sur le site <https://www.iea.org/reports/renewables-2019/power> , consulté le 14/04/2020.

K

[KHA 14] : KHADRAOUI Fahima, «la place de l'Algérie sur le marché euro – méditerranéen de l'électricité : bilan et perspectives», mémoire de magister, université M'hamed bougara-boumerdes, 2013/2014.

L

[LAB 13] : LABED Imen, «Dispatching Economique Dans un Système De Puissance Electrique Par L'intelligence Artificielle», Mémoire Présenté en vue de l'obtention du diplôme de magister, Université de Constantine, Soutenu le : 02/12/2013.

[**LIN& CHA06**]: L. Wang ET C. Singh, « tradeoff between risk and cost in economic dispatch including wind power penetration using particle swarm optimization»,International Conference on Power System Technology,2006.

**M**

[**MER et ALL18**] : H .Merarda \*1, M.Aksas, T. Arrif1, A. Belaid1, R. Khelifi1, B. BEZZA1, A. Gamal, «développement des héliostats dans les centrales solaires à tour au cours des dernières années »Le 5ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, 47133, Ghardaïa, Algeria24 - 25 Octobre 2018.

[**MIN 20**] : Site du ministère Algérienne de l'énergie disponible sur le site <https://www.energy.gov.dz/?rubrique=electricite-et-gaz> , consulté le 04/05/2020.

**N**

[**NAI 13**] : NAIMI Djemai, «Optimisation de l'intégration des ressources énergétiques décentralisées(RED) aux réseaux de distribution dans un marché de l'électricité dérégulé»,thèse de doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra ,2013.

**O**

[**OUL14**] : OULD NAGI Ahmed, «optimisation de l'écoulement de puissance par algorithmes : ag et pso-tvac», mémoire de master en réseaux électriques, université de Biskra, 2013 / 2014.

**P**

[**PEI16**] : PEIO Loubière, « Amélioration des méta-heuristiques d'optimisation `à l'aide de l'analyse de sensibilité », Thèse de doctorat, Mathématique et sciences et technologie de l'Information et de la Communication (MSTIC), L'université Paris-Est, 2016.

**S**

[**SAG 07**] : SAGUAN Marcelo, «L'Analyse économique des architectures de marché électrique. L'application au market design du temps réel»,Thèse de Doctorat, Faculté Jean Monnet École Supérieure D'Électricité, Université Paris-Sud, en Sciences Economiques ,11 avril 2007.

**[SLI09]** : SLIMANI Linda, «Contribution à l'application de l'optimisation par des méthodes méta-heuristiques à l'écoulement de puissance optimal dans un environnement de l'électricité dérégulé», Thèse de Doctorat, université de Batna, 2008/2009.

**[SON20]** : Page du site de l'entreprise SONELAGZ disponible sur <https://www.sonelgaz.dz/fr/835/plan-de-developpement-2018-2028>, consulté le 08/05/2020.

### T

**[TOM & THE 19]** : Tommy Andy, theuboutameghe ph. D, «Contribution à la mise en œuvre et à la commande d'un micro réseau de cogénération modulaire (injection de puissance et stabilisation de fréquence)», thèse de doctorat, université du Québec, décembre 2019.

### Z

**[ZIA18]** : ZIANE Ismail, « Contribution à l'application de l'optimisation multi-objective par la méthode de recuit simulé au dispatching dynamique », Thèse de doctorat, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2018.

# *Annexe*



Annexe

## Base de données de 6générateurs

Les coefficients qui représentent la configuration du réseau électrique -6 unités de production et les limites minimales et maximales de la puissance active sont donnés dans le tableau suivant.

**Tableau 1 : Configuration du réseau électrique de 6 unités de production**

Générateurs	Les coefficients de la fonction coût			Les limites de la puissance générée	
	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$P_{g_{min}}$	$P_{g_{max}}$
G1	10	200	100	0.05	0.5
G2	10	150	120	0.05	0.6
G3	20	180	40	0.05	1
G4	10	100	60	0.05	1.2
G5	20	180	40	0.05	1
G6	10	150	100	0.05	0.6

**Matrice carrée  $\beta_{ij}$** 

$B_{ij} = [0.1382 \ -0.0299 \ 0.0044 \ -0.0022 \ -0.001 \ -0.0008;$

$-0.0299 \ 0.0487 \ -0.0025 \ 0.0004 \ 0.0016 \ 0.0041;$

$0.0044 \ -0.0025 \ 0.0182 \ -0.0070 \ -0.0066 \ -0.0066;$

$-0.0022 \ 0.0004 \ -0.0070 \ 0.0137 \ 0.0050 \ 0.0033;$

$-0.0010 \ 0.0016 \ -0.0066 \ 0.0050 \ 0.0109 \ 0.0005;$

$-0.0008 \ 0.0041 \ -0.0066 \ 0.0033 \ 0.0005 \ 0.0005].$