



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

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Electrotechnique
Réseau électrique

Réf. :

Présenté et soutenu par :
YAHIA Bouthaina

Le : dimanche 7 juillet 2019

Méthode de recherche du corbeau améliorée et appliquée au dispatching économique

Jury :

Dr	BECHA Habiba	MCB	Université d'appartenance	Président
Dr	AMRANI Ishaq	MAA	Université d'appartenance	Examineur
Dr	SALHI Ahmed	MCA	Université d'appartenance	Rapporteur

Année universitaire : 2018 - 2019

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث 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 : Réseau électrique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme :

MASTER

Thème

**Méthode de recherche du corbeau améliorée et
appliquée au dispatching économique**

Présenté par :

YAHIA Bouthaina

Avis favorable de l'encadreur :

Dr. SALHI Ahmed

Avis favorable du Président du Jury

Dr. Becha Habiba

Cachet et signature

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث 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 : Réseau électrique

Thème :

Méthode de recherche du corbeau améliorée et appliquée au dispatching économique

Proposé et Dirigé par : **Dr. SALHI Ahmed**

RESUMES (Français)

Résumé :

Le problème de dispatching économique (DE) joue un rôle important dans la planification et l'exploitation des réseaux électriques qui consiste à répartir la puissance générée totale sur les différentes centrales électriques pour satisfaire à la puissance demandée totale d'une manière que le coût total de production soit minimal. Les méthodes classiques pour résoudre ce problème ont prouvé leur incapacité de traiter les contraintes pratiques des générateurs comme l'effet d'ouverture des vannes et l'effet de rampe. Les méthodes métaheuristiques ont été appliquées pour surmonter les problèmes rencontrés lors de l'application des méthodes classiques, parmi ces méthodes on peut citer la Méthode de Recherche du Corbeau (CSA) récemment appliquée pour résoudre le problème de dispatching économique. Pour améliorer les performances de CSA, nous proposons dans ce mémoire l'application de l'algorithme de Recherche du Corbeau Améliorée (CSA_Amélioré) basé sur l'amélioration de la capacité d'exploitation de CSA, son efficacité a été vérifiée en appliquant deux réseaux test six et quinze unités de production.

Mot -clés : Dispatching économique, Méthodes métaheuristiques, Algorithme de Recherche du Corbeau, effet de rampe, effet d'ouverture des vannes.

اهداء

الى الذي وهبني كل ما يملك حتى احقق له اماله الى من كان يدعيني قدما نحو الامام
لنيل المبتغى الى من احمل اسمه بكل افتخار الى الذي سهر على تعليمي بتضحيات جسام
مترجمة في تفديسه للعلم، الى مدرستي الاولى في الحياة، ارجو من الله ان يمد في عمرك
لترى ثمارا قد حان قطافها بعد طول انتظار وستبقى كلماتك نجوم اهتدي بها اليوم وفي
الغد والى الابد

أبي الغالي على قلبي أطل الله في عمره

الى ملاكي في الحياة الى معني الحب والى معني الحنان والتفاني الى بسمه الحياة وسر
الوجود الى من كان دعاءها سر نجاحي وحنانها بلسم جراحي الى أغلي الحبايب

امى الحبيبة

الى زهرة ودلوعة البيت الى من أرى التفاؤل في عينها والسعادة في ضحكتها
الى شعلة الذكاء والنور والى وجهك المفعم بالبراءة

اختى العزيزة أسماء

كما أهدي ثمرة جهدي لأستاذي الكريم الدكتور: **طالبي احمد** الذي كلما
سألت عن معرفة زودني بها وكلما طلبت كمية من وقته الثمين وفره لي بالرغم من
مسؤولياته المتعددة؛ الى كل أساتذة قسم الهندسة الكهربائية؛
الى كل شخص وقف معي وساندني على طول مسيرتي الدراسية والى جميع طلبة دفعة
جوبلية 2019



Remerciement

Je remercie Allah, le tout puissant, le miséricordieux, de m'avoir appris ce Que j'ignorais, de m'avoir donné la santé et tout dont je necessitais pour l'accomplissement de ce mémoire.

*Je remercie beaucoup L` encadreur, Dr : **SALHI Ahmed**, pour son Encadrement, ses directives et sa disponibilité.*

*Je remercie également ma famille et tous mes amies pour leur soutien et encouragement continus et leur aide moral sans retenue tout au long de mes études et plus spécialement mon père **Ahmed** et ma mère **Rachida** et ma sœur **Asma**.*

*Je remercie les membres du jury **BECHA Habiba** et **AMRANI Ishak** de l'intérêt dont ils font preuve à mon égard pour lire ce mémoire et en assistant à ma soutenance*

Je souhaite également remercier l'ensemble des enseignants du département d'électrotechnique de Biskra et particulièrement ceux qui on participe à notre formation.

Merci!

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Classification des tensions en domaine.....	8
Tableau IV.1 : Résultats de simulation de 6 unités de production.	48
Tableau IV.2 : Répartition optimale des puissances générées - 06 unités.....	48
Tableau IV.3 : Résultats de simulation de 6 unités de production	50
Tableau IV.4 : Répartition optimale des puissances générées - 06 unités.....	51
Tableau IV.5 : Comparaison des coûts pour CSA et CSA _Améliorée pour le réseau test 6 unités de production.	53
Tableau IV.6 : Comparaison des résultats obtenus par CSA _Améliorée avec CSA pour un réseau 06 unités.	53
Tableau IV.7 : Résultats de simulation par différentes méthodes.	55
Tableau IV.8 : Résultats de simulation de 15 unités de production.	56
Tableau IV.9 : Résultats de simulation de 15 unités de production.	58
Tableau IV.10 : Comparaison des coûts pour CSA et CSA_ Améliorée pour le réseau test 15 unité de production.....	60
Tableau IV.11 : Comparaison des résultats obtenus par CSA et CSA _Améliorée	60
Tableau IV.12 : Résultats de simulation par différentes méthodes.	63

Liste des figures

Figure I.1: Exemple d'organisation du réseau électrique.....	5
Figure I.2: les Sources d'énergie électrique	6
Figure I.3: Centrales thermiques à flamme	6
Figure I.4: Centrale hydraulique	7
Figure I.5: Centrale nucléaire.....	7
Figure I.6: les structures topologiques des réseaux d'énergie électrique.....	10
Figure I.7: fluctuation journalière de la charge en Algérie	11
Figure I.8: le Modèle «Poolco ».....	14
Figure II.1: Différents critères du problème d'optimisation.....	17
Figure II.2: Schéma de classification des méthodes d'optimisation.....	18
Figure II.3: Minimum local et minimum global	21
Figure II.4: Représentation simplifiée d'une approche méta-heuristique.....	22
Figure II.5: Caractéristique entrée –sortie d'une unité de production	26
Figure II.6: Courbe typique de l'accroissement du coût de combustible	27
Figure II.7: Courbe de coût d'une unité thermique alimentée par trois types de combustible ...	28
Figure II.8: Courbe de coût du combustible d'une unité thermique avec des zones de fonctionnements prohibées.....	29
Figure II.9: Courbe de coût du combustible d'une unité thermique avec trois vannes d'admission de vapeur.....	30
Figure III.1: Diagramme d'état 1 dans CSA (a) $fl < 1$ et (b) $fl > 1$	36
Figure III.2: Pseudo code du CSA proposé	36
Figure III.3 : Organigramme de l'algorithme CSA pour l'optimisation	41
Figure III.4 : Organigramme de l'algorithme CSA _Améliorée pour l'optimisation.....	45
Figure IV.1: Répartition optimale de la puissance active générée – 06 unités de production.	49
Figure IV.2: Caractéristique de convergence de l'algorithme CSA pour un réseau 06 unités ...	49
Figure IV.3: Répartition optimale de la puissance active générée – 06 unités de production.	51
Figure IV.4: Caractéristique de convergence de l'algorithme CSA_ améliorée pour un réseau 06 unités	52
Figure IV.5: Comparaison des convergences du CSA avec CSA_ Améliorée pour un réseau 06 unités (30 essais).	54
Figure IV.6: Répartition optimale de la puissance active générée – 15 unités.	57
Figure IV.7: Caractéristique de convergence de l'algorithme CSA pour un réseau 15 unités. ...	57
Figure IV.8: Répartition optimale de la puissance active générée – 15 unités	58

Figure IV.9: Caractéristique de convergence de l’algorithme CSA_ Améliorée pour un réseau 15 unités.	59
Figure IV.10: Comparaison des convergences du CSA avec CSA_ Améliorée pour un réseau 15 unités (30 essais)	61

Liste des Symboles et Acronymes

Acronymes	
HT	Haut tension
THT	Très haut tension
BT	Base tension
MT	Moyenne tension
SPE	Sonelgaz Production Electricité
IPP	Producteurs indépendants d'électricité
GRTE	Gestionnaire du Réseau de Transport Électrique
OS	Opérateur du Système Électrique
OM	Opérateur du marché
SDA	Sonelgaz Distribution d'Alger
SDC	Sonelgaz Distribution Centre
SDE	Sonelgaz Distribution Est
SDO	Sonelgaz Distribution Ouest
CSP	Contrat de Service Public
CREG	Commission de régulation de l'électricité et du gaz
CSC	Consommation spécifique de chaleur
OCF	Optimisation par colonies de fourmis
CSA	Crow Search Algorithm
CSA Améliorée	Crow Search Algorithm améliorée
DE	Dispatching économique
<i>fitness</i>	Fonction objectif
Symboles	
W	Watt
C_i	Fonction du coût au niveau de génération i
a_i, b_i 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 .
P_D	Puissance demandée totale
P_L	Pertes totales
$P_{gi(\min)}$	Puissance active minimale du générateur i
$P_{gi(\max)}$	Puissance active maximale du générateur i
$\beta_{ij}, \beta_{ij}, \beta_{00}$	Coefficients des Pertes
λ	Le multiplicateur de Lagrange associé à la contrainte de l'équilibre des puissances actives.
L	Fonction de coût augmentée
$a_{i,k}, b_{i,k}$ et $c_{i,k}$	Coefficients de coût de l'unité avec le combustible
UR_i	Limite de rampe supérieure
DR_i	Limite de rampe inférieure.
Btu/h	British Thermal Unit par hour
MW	Méga Watt
\$/MWh	Dollar par méga watt heure
\$/h	Dollar par heure
fl	Indique la portée de vol
AP	Indique la probabilité de prise de conscience
$iter_{max}$	Nombre maximal d'itérations
N	Taille de population

pb	Probabilité de choix de la solution
r	Nombre aléatoire avec une répartition uniforme entre 0 et 1

Résumé

Le problème de dispatching économique (DE) joue un rôle important dans la planification et l'exploitation des réseaux électriques qui consiste à répartir la puissance totale demandée sur les différentes centrales électriques d'une manière que le coût total de production soit minimal. Les méthodes classiques pour résoudre ce problème ont prouvé leur incapacité de traiter les contraintes pratiques des générateurs comme l'effet d'ouverture des vannes et l'effet de rampe. Les méthodes métaheuristiques ont été appliquées pour surmonter les problèmes rencontrés lors de l'application des méthodes classiques, parmi ces méthodes on peut citer la Méthode de Recherche du Corbeau (CSA) récemment appliquée pour résoudre le problème de dispatching économique. Pour améliorer les performances de CSA, nous proposons dans ce mémoire l'application de l'algorithme de Recherche du Corbeau Améliorée (CSA_Amélioré) basé sur l'amélioration de la capacité d'exploitation de CSA, son efficacité a été vérifiée en appliquant deux réseaux test six et quinze unités de production.

Mot -clés : Dispatching économique, Méthodes métaheuristiques, Algorithme de Recherche du Corbeau, effet de rampe, effet d'ouverture des vannes.

ملخص

مسألة التوزيع الاقتصادي تلعب دورًا مهمًا في تخطيط وتشغيل الشبكات الكهربائية، والتي تتلخص في توزيع الطاقة الإجمالية المطلوبة على مختلف المحطات الكهربائية بحيث تكون التكلفة الإجمالية للإنتاج في حد أدنى ممكن. لقد أثبتت الطرق التقليدية لحل هذه المسألة عدم قدرتها على التعامل مع القيود العملية للمولدات مثل تأثير فتح الصمامات وتأثير الانتقال النسبي للإنتاج من مستوى إستطاعة إلى آخر. تم تطبيق طرق شبه عشوائية للتغلب على المشاكل التي نواجهها أثناء تطبيق الطرق التقليدية، ومن بين هذه الطرق يمكننا أن نذكر طريقة بحث الغراب المطبقة مؤخرًا لحل مشكلة التوزيع الاقتصادي. لتحسين أداء خوارزمية بحث الغراب، نقترح في هذه المذكرة تطبيق خوارزمية بحث الغراب المحسنة بناءً على تحسين القدرة الاستغلالية لبحث الغراب، تم التحقق من الكفاءة من خلال تطبيقها على شبكتي إختبار ستة وخمسة عشر وحدة إنتاج.

الكلمات المفتاحية: التوزيع الاقتصادي، طرق شبه عشوائية، خوارزمية بحث الغراب، تأثير فتح الصمامات

	Page
Titres	
Dédicace.....	I
Remerciement	II
Liste des Tableaux	III
Liste des figures	IV
Liste des Symboles et Acronymes	VI
Résumé.....	VIII
Sommaire	IX
Introduction.....	1

CHAPITRE I

MARCHÉ D'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

I.1. Introduction	4
I.2. Système d'énergie électrique et son organisation.....	5
I.2.1. Production de l'énergie électrique	5
I.2.1.1. Les centrales thermiques	6
I.2.1.2. Les Centrales hydrauliques	6
I.2.1.3. Les centrales nucléaires.....	7
I.2.2. Caractéristiques principales des moyens de production	8
I.2.3. Classification des réseaux d'énergie électrique	8
I.2.3.1. Selon la tension nominale	8
I.2.3.2. Selon la fonction.....	8
I.2.3.3. Selon la structure topologique.....	9
I.3. La fluctuation de la consommation	10
I.4. Marché d'énergie électrique	11
I.4.1. Acteurs et activités du marché de l'électricité	11
I.4.1.1. Les principaux acteurs du marché de production de l'électricité en Algérie	12
I.4.2. Les marchés financiers et le prix de l'électricité	13
I.5. Sonelgez (CRGE)	14
I.6. Conclusion.....	15

CHAPITRE II

RÉSOLUTION DES PROBLÈME DE DISPATCHING ÉCONOMIQUE

II.1. Introduction	16
II. 2. Problème d'optimisation	16
II.2.1. Fonction Objective	16
II.2.2. Variables de décision.....	16
II.2.3. Contraintes.....	16
II.3. Classification des problèmes d'optimisation	17
II.3.1. Méthodes d'optimisation exacte (classique).....	18
II.3.1.1. Méthode du gradient	18
II.3.1.2. Méthode de Newton.....	19
II.3.1.3. Méthode du point intérieur.....	20
II.3.2. Inconvénients des méthodes classiques.....	20
II.3.3. Méthodes d'optimisation approchées	20
II.3.3.1. Méthodes heuristiques	20
II.3.3.2. Méthodes métaheuristique	20
II.4. Organisation générale des méthodes métaheuristique	23
II.5. Dispatching économique	24
II.5.1. Formulation du problème de dispatching économique.....	24
II.5.1.1. Fonction objective du coût.....	24
II.5.1.2. Bilan de puissance.....	24
II.5.2. Formulation mathématique du problème de dispatching économique.....	24
II.5.2.1. Contrainte d'égalité.....	25
II.5.2.2. Contrainte d'inégalité.....	25
II.5.2.3. Critère d'optimalité du dispatching économique.....	25
II.6. Modélisation des caractéristiques entrée – sortie des générateurs	26
II.7. Contraintes pratiques des centrales électriques.....	27
II.7.1. Caractéristiques avec plusieurs types de combustible.....	27
II.7.2. Contrainte des zones de fonctionnement prohibées	28
II.7.3. Contraintes d'effets d'ouverture des vannes	29

II.7.4. Contraintes due à l'effet rampe	30
II.8. Conclusion.....	30

CHAPITRE III

MÉTHODE DE RECHERCHE DU CORBEAU ET SA VERSION AMÉLIORÉE

III.1. Introduction.....	32
III.2. Comportement des corbeaux	32
III.2.1. Spécifications connues sur les corbeaux	32
III.3. Algorithme de recherche des corbeaux dédié à l'optimisation.....	33
III.4. Algorithme de recherche du corbeau	33
III.5. L'influence de la portée de vol <i>fl</i>	35
III.6. La méthodologie de la CSA pour l'optimisation.....	36
III.6.1. Organigramme de l'algorithme de recherche du corbeau CSA pour l'optimisation	38
III.7. Algorithme de recherche du corbeau améliorée	41
III.8. La méthodologie de la CSA _Améliorée pour l'optimisation.....	42
III.8.1. Organigramme de l'algorithme de recherche du corbeau améliorée (CSA _Améliorée) pour l'optimisation.....	43
III.9. Conclusion	46

CHAPITRE IV

SIMULATION ET RÉSULTATS DE VALIDATION

IV.1. Introduction	47
IV. 2. Simulation et les résultats de validation	47
IV.3. Tests d'application : Minimisation du coût total de production de l'énergie électrique.....	47
IV.3.1. Application de l'algorithme CSA sur le réseau de 6 unités de production ..	48
IV.3.1.1. Choix des paramètres de CSA.....	48
IV.3.1.2. Résultats de simulations.....	48

IV.3.2. Application de l’algorithme CSA _Amélioré sur le réseau de 6 unités de production.....	50
IV.3.2.1. Choix des paramètres de CSA _Améliorée.....	50
IV.3.2.2. Résultats de simulations.....	50
IV.3.3. Application de l’algorithme CSA sur le réseau de 15 unités de production	56
IV.3.3.1. Choix des paramètres de CSA.....	56
IV.3.3.2. Résultats de simulations.....	56
IV.3.4. Application de l’algorithme CSA _Amélioré sur le réseau de 15 unités de production.....	58
IV.3.4.1. Résultats de simulations.....	58
IV.4. Conclusion	63
Conclusion générale.....	64
Références bibliographiques.....	65
Annexe	68

Introduction générale

L'industrialisation et la croissance de la population sont les premiers facteurs qui ont contribué à l'augmentation sans cesse de la consommation de l'énergie électrique. Afin d'assurer un équilibre constant entre la production et la consommation, il a été nécessaire d'augmenter de plus en plus le nombre de centrales électriques.

La bonne exploitation des réseaux électriques nécessite d'améliorer la gestion de l'énergie électrique où l'énergie produite à partir des centrales électriques doit être réparti d'une façon optimale, les recherches scientifiques dans le domaine des réseaux électriques sont orientées vers la meilleure répartition économique de l'énergie électrique afin de minimiser les frais de production tout en satisfaisant les contraintes de fonctionnement liées à tous les composants du système énergétique ce qui est connu sous le nom de dispatching économique.

La formulation mathématique du dispatching économique se traduit par une formulation du problème d'optimisation et la résolution de ce problème s'oriente vers la répartition de la puissance active générée totale sur les différentes centrales électriques alimentant le réseau électrique pour avoir le minimum coût total de production (comme fonction objectif) en satisfaisant les contraintes de fonctionnement (d'égalités et d'inégalités).

Dans les littératures, Le problème de dispatching économique a été résolu en utilisant plusieurs méthodes conventionnelles. Ces méthodes sont basées sur la programmation linéaire ou non linéaire. Comme la méthode itérative de Lambda et la méthode du gradient. Malheureusement, ces méthodes peuvent converger vers des minimums locaux et ne sont pas convenables pour un problème réel à cause de la non-linéarité des caractéristiques des générateurs (centrales thermiques) avec l'inclusion des zones de fonctionnement interdites, la discontinuité de la courbe de la fonction coût non-convexe ou non-régulière et les incertitudes portées aux contraintes de fonctionnement. Pour surmonter tous ces problèmes, on fait recours aux méthodes méta heuristiques.

L'apparition des méthodes évolutionnaires (méta-heuristiques) constituées une alternatif, ces méthodes sont fondées sur une recherche stochastique probabiliste guidé par un processus algorithmique inspiré de la nature et la théorie de l'éthologie chez les sociétés des animaux et des insectes. Ces méthodes ne sont pas basées sur les propriétés mathématiques de la fonction objectif à envisager comme la continuité, la

dérivabilité...etc., les algorithmes évolutionnaires à savoir les algorithmes génétiques (AG), les algorithmes d'optimisation par essaims de particules (PSO), la colonie artificielle des abeilles (ABC)...etc.

Nous avons constaté que différentes approches ont été élaborées pour résoudre le problème de dispatching économique, parmi ces méthodes nous sommes intéressés à l'algorithme de recherche du corbeau (CSA), cette méthode a été développée par Alireza Askarzadeh en 2016 basé sur le comportement intelligent des corbeaux pour la recherche et le vol de la nourriture des autres individus de l'essaim des corbeaux. Cette méthode a été utilisée pour résoudre le problème de dispatching économique pour la première fois en 2017 [DOU17].

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre de la résolution du problème de dispatching économique (DE), en utilisant l'algorithme de Recherche du Corbeau amélioré ou modifié (pour améliorer la qualité de solution de DE). La contribution originale de cette mémoire est la suivante : nous avons proposé une stratégie d'optimisation par la Méthode de Recherche du Corbeau améliorée (CSA -améliorée) basées sur le méta heuristique et pour vérifier et valider la performance de cette méthode en utilisant deux types de réseaux électriques 06-unités et 15-unités de production. Les résultats de simulation sont validés en comparant la méthode CSA de base avec la méthode (CSA_Améliorée). Afin de donner une validation significative aux résultats obtenus ; nous proposons de faire une comparaison avec des autres méthodes d'optimisation méta-heuristiques appliquées dans les littératures.

Le travail effectué dans notre mémoire est divisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre, nous présentons le système d'énergie électrique et son Organisation, et les différentes centrales de production et leurs parties liées à la stratégie de fonctionnement des différentes centrales électriques et les principaux acteurs du marché de production de l'électricité en Algérie.

Le deuxième chapitre a illustré le concept du problème d'optimisation, plus particulièrement le problème de dispatching économique et les méthodes de résolution de ce problème qui a été classées en deux catégories méthodes classiques et méta-heuristique. Et quelques définitions et formulation de base du problème de dispatching économique (DE) pour minimiser le coût total de production des centrales électriques avec leurs contraintes pratiques.

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le troisième chapitre est axé sur une présentation en détail de la méthode d'optimisation proposée CSA et sa version améliorée CSA- améliorée et en détaillé les mécanismes des deux algorithmes (CSA) et (CSA Améliorée) et leur paramètre.

Dans le quatrième chapitre est présenté l'application de la méthode de recherche du corbeau CSA de base et sa version améliorée CSA améliorée sur deux réseaux test, réseau électrique contient six unités de production et l'autre quinze unités de production.

Chapitre 1

Marché d'énergie électrique

I.1. Introduction

L'électricité est utilisée dans plusieurs secteurs de notre vie quotidienne. Au cours des années l'électricité a amélioré les conditions de vies de l'homme contemporain. Commençons par la santé qui a connu un énorme progrès grâce à la radiographie, l'échographie, les appareils médicaux...et encore l'éclairage, les communications, le transport, le chauffage, la climatisation...etc. L'énergie électrique doit se produire dans les meilleures conditions et doit se consommer par les centres de consommation qui se trouvent à des grandes distances des points de production où la liaison se fait avec les réseaux électriques.

Les réseaux électriques ont pour fonction d'interconnecter les centres de production tels que les centrales hydrauliques, thermiques... avec les centres de consommation (villes, usines...) mais leur exploitation pose des nombreux problème d'ordre technico-économique pour cela on doit garantir à tout instant l'équilibre entre l'offre et la demande(problème de conduite) et le minimum de et les meilleurs conditions de sécurité (des personnes et des infrastructure) et la meilleurs qualité de service (respecter les normes de qualité des grandeurs électrique).

Pour c'est objectif, ce chapitre traite le système d'énergie électrique et son organisation, et la description des éléments nécessaires pour garantir l'équilibre entre l'offre et la demande.

I.2. Système d'énergie électrique et son organisation

Le rôle du réseau dans le système électrique pour garantir un approvisionnement Sûr et Économique de l'énergie est essentiel. Il n'est techniquement pas possible que ce rôle soit assuré par un type unique de réseau qui relierait moyens de production et utilisateurs. Une bonne solution consiste à établir une hiérarchie de trois catégories de réseaux dont les fonctions sont différentes et qui se distinguent par le niveau de tension de leurs lignes ou le niveau de puissance qui transite [ABB16].

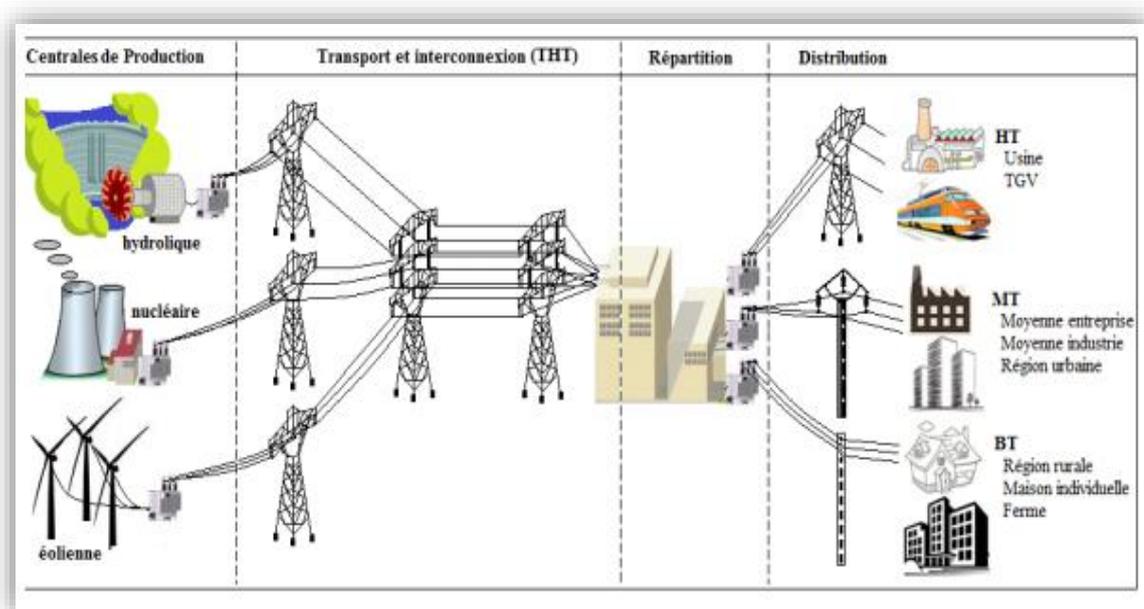


Figure I.1: Exemple d'organisation du réseau électrique.

I.2.1. Production de l'énergie électrique

Qu'on plus précisément définir comme la conversion de l'énergie primaire (potentielle) en énergie électrique avec des sources diverses :

- ✓ Nucléaire
- ✓ Combustibles carbonés essentiellement fossiles
- ✓ Énergie dite renouvelables (solaire, éolienne, géothermique...).

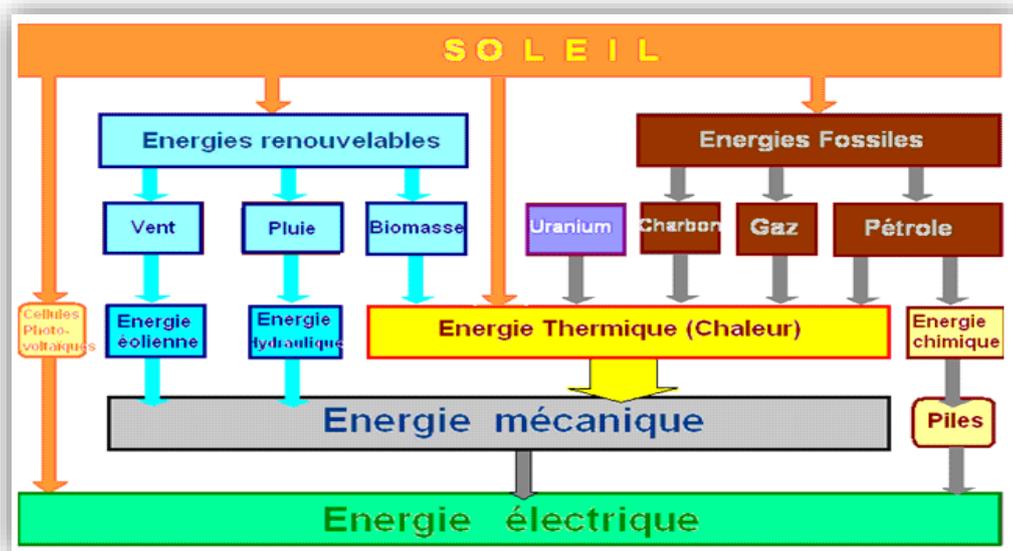


Figure I.1: les Sources d'énergie électrique.

I.2.1.1. Les centrales thermiques

Les centrales thermiques produisent l'électricité à partir de la chaleur qui se dégage de la combustion du charbon, du mazout ou du gaz naturel. On la trouve souvent près d'une rivière ou d'un lac, car d'énormes quantités d'eau sont requises pour refroidir et condenser la vapeur sortant des turbines. La combustion dégage une grande quantité de chaleur utilisée pour chauffer de l'eau dans la chaudière (ou générateur de vapeur). On dispose alors de vapeur d'eau sous pression. Cette vapeur sous pression fait tourner à grande vitesse une turbine qui entraîne elle-même un alternateur qui produit une tension alternative sinusoïdale. A la sortie de la turbine la vapeur est refroidie pour se transformer en eau, puis renvoyée dans la chaudière (Figure I.3) [HTT15].

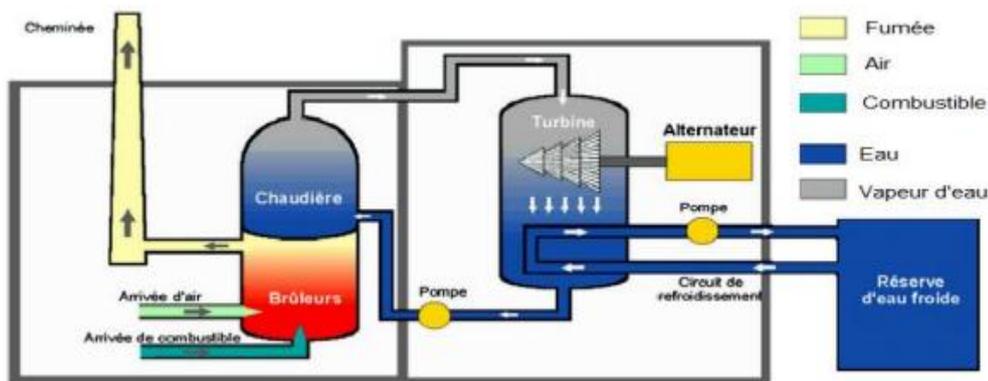


Figure I.2: Centrales thermiques à flamme.

I.2.1.2. Les Centrales hydrauliques

Les centrales hydroélectriques convertissent l'énergie de l'eau en mouvement en énergie

Électrique. L'énergie provenant de la chute d'une masse d'eau est tout d'abord transformée dans une turbine hydraulique en énergie mécanique. Cette turbine entraîne un alternateur dans lequel l'énergie mécanique est transformée en énergie électrique (Figure I.4) [BEN14].

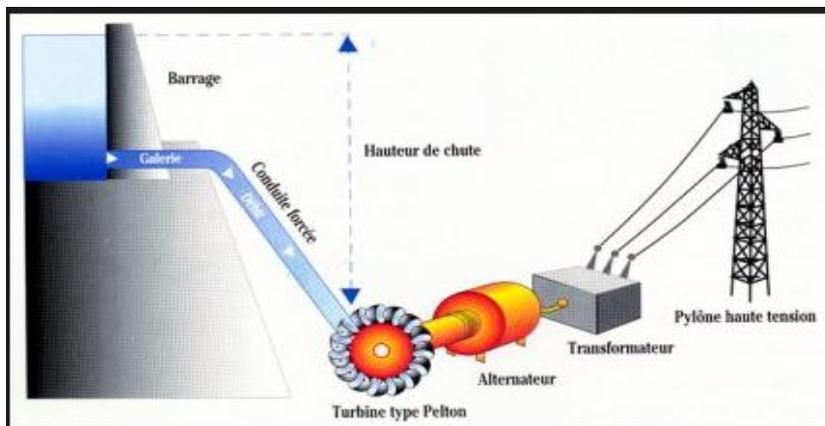


Figure I.3: Centrale hydraulique.

I.2.1.3. Les centrales nucléaires

Les centrales nucléaires Ces centrales utilisent également des cycles de conversion Thermodynamique, néanmoins leur "chaudière" est un réacteur nucléaire. L'énergie nucléaire obtenue à la suite de réactions de fission de l'uranium et du plutonium est la source de chaleur utilisée. Elles produisent environ 15% de l'électricité mondiale. Les centrales nucléaires produisent des déchets radioactifs et présentent un risque d'accident. Une centrale nucléaire est identique à une centrale thermique, sauf que la chaudière brûlant le combustible fossile est remplacée par un réacteur contenant le combustible nucléaire en fission (Figure I.5) [BEN14].

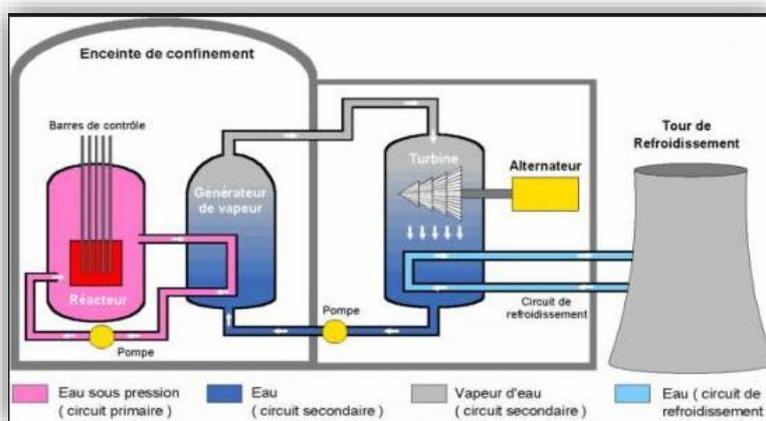


Figure I.4: Centrale nucléaire.

I.2.2. Caractéristiques principales des moyens de production

Sept (07) paramètres ont été retenus pour caractériser chaque système de production :

- Source d'énergie
- Puissance fournie
- Rendement
- Durée de vie
- Coût de production
- Surface exigée
- Disponibilité des systèmes
- Emission de CO2

I.2.3. Classification des réseaux d'énergie électrique

I.2.3.1. Selon la tension nominale

La nouvelle norme en vigueur en France **UTE C 18-510** définit les niveaux de tension alternative comme suit [CHR97] :

Tableau I.1 : Classification des tensions en domaine.

Domaine de tension	Valeur de La tension composée
HTB	Supérieur à 50kV
HTA	Comprise entre 1kV et 50kV
BTB	Comprise entre 500Vet 1kV
BTA	Comprise entre 50 V et 500V
TBT	Inférieur ou égale à 50V

I.2.3.2. Selon la fonction

Le réseau électrique est organisé en quatre étages :

A. Le réseau de transport et d'interconnexion

A haute (HT) et très haute tension (THT), Il est destiné à transporter des quantités importantes D'énergie sur de longues distances [REZ09]. Pour Le rôle principal est la liaison entre les grands centres de consommation (gros consommateurs et distributeurs) et les moyens de productions [MAR07]. Il constitue l'ossature principale pour l'interconnexion des grands centres de production. Ce réseau peut être assimilé au réseau autoroutier. Ses lignes atteignent des milliers de kilomètres [REZ09].

B. Le réseau de distribution

A moyen (MT) et basse tension (BT), Les réseaux de distribution sont destinés à acheminer l'électricité à l'échelle locale, c'est-à-dire directement vers les consommateurs de plus faible puissance.

En milieu urbain très dense comme en zone rurale à habitat dispersé. C'est dire que la Conception de ces réseaux varie d'un pays à l'autre et que les solutions adoptées sont nombreuses dans le monde. Toutefois, ils ont deux caractéristiques communes :

- a. structure maillée à plusieurs niveaux de tension pour des raisons techniques et économiques : niveau HT, MT et BT.
- b. topologie radiale ou arborescente à partir des postes de transformation HT/MT, ou des postes MT/BT, où ils trouvent leur alimentation [ABB16].

C. La consommation

La consommation d'électricité correspond à un appel de puissance active sur le réseau Pour une période de temps bien déterminée [MAR07]. 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 [MOS13].

L'électricité est consommée par des différents types de consommateurs (résidentiels, commerciaux et industriels). La consommation d'électricité se caractérise par :

- Ses fortes fluctuations.
- La difficulté de la prévoir de manière exacte [LAB13]

I.2.3.3. Selon la structure topologique

On appelle structure topologique d'un réseau d'énergie électrique, l'architecture avec laquelle les différents postes de ce dernier sont interconnectés. Les réseaux électriques peuvent être organisés selon plusieurs types de structures dont les plus importantes sont les suivantes [LAI18] : réseaux radiaux bouclés et réseaux maillés.

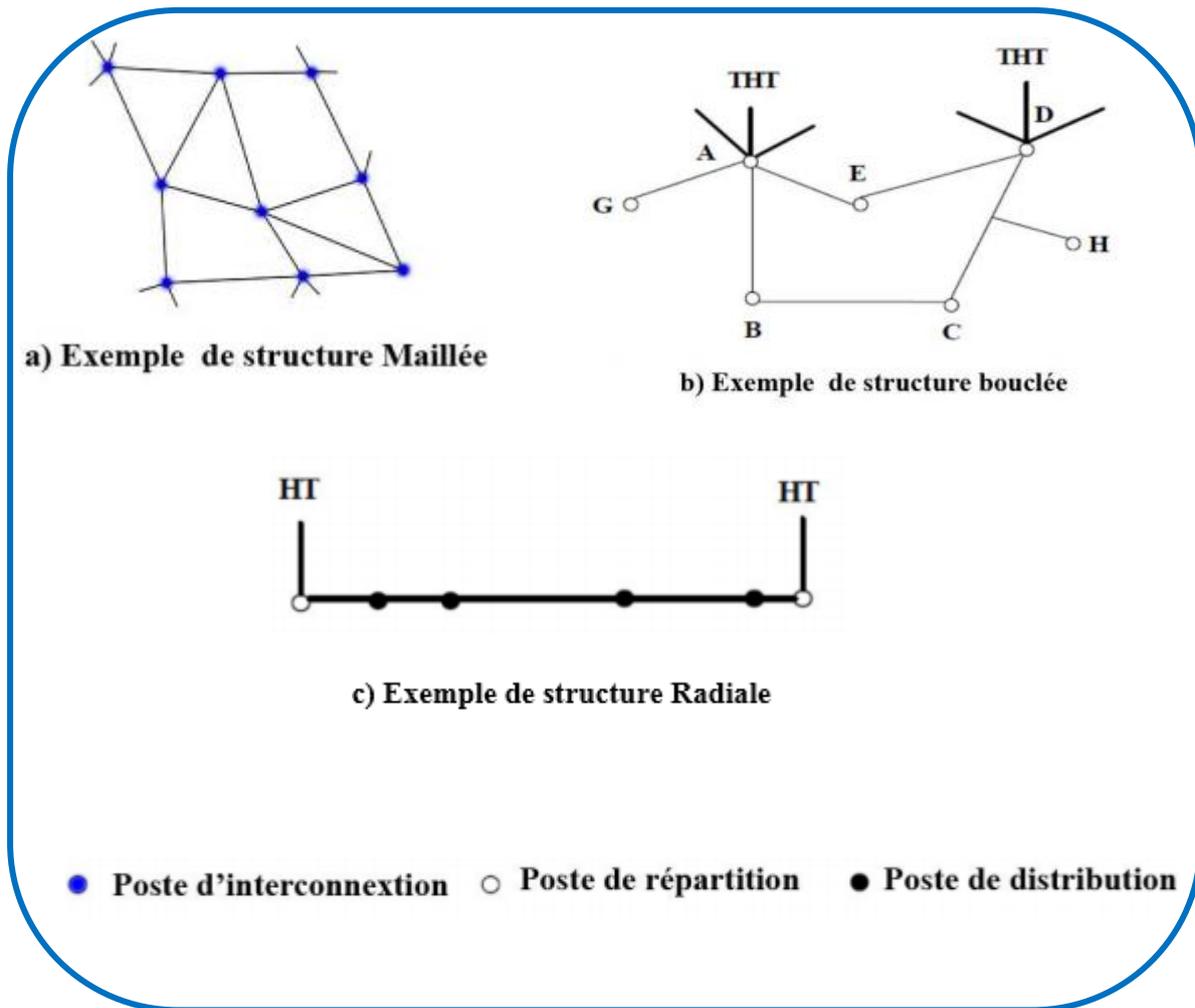


Figure I.5: les structures topologiques des réseaux d'énergie électrique

I.3. La fluctuation de la consommation

La consommation d'électricité varie en permanence en fonction des multiples Variations De consommations qui interviennent « sans préavis » sur l'ensemble du système. 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 [MAR07].

La figure (I.7) représente la fluctuation de la charge en fonction de temps en Algérie :

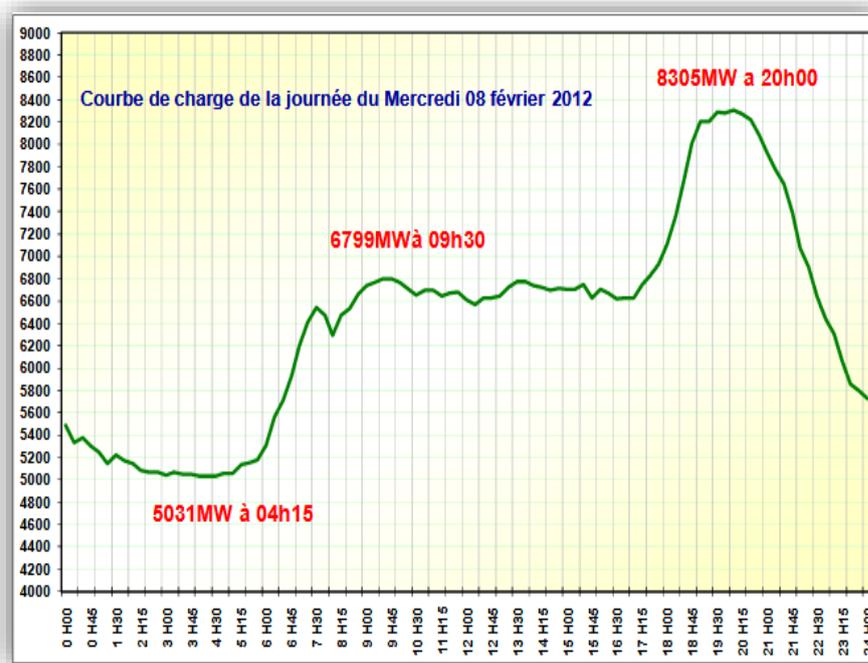


Figure I.6: fluctuation journalière de la charge en Algérie.

I.4. Marché d'énergie électrique

Le marché classique d'électricité revient à fournir l'électricité au client (consommateur) Grâce à un seul producteur. 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 à des 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 [DID09]. Pour résoudre ces problèmes et avec l'évolution économique et industrielle, l'exigence des clients en augmente ce qui pousse à la création d'un nouveau marché appelé marché dérégulé ou le client à la liberté de choisir son fournisseur.

I.4.1. 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 finals en électricité :

- La production de l'électricité,
- Le transport de l'électricité,

- La distribution de l'électricité,
- La commercialisation de l'électricité [DID09].

I.4.1.1. Les principaux acteurs du marché de production de l'électricité en Algérie

A. Les producteurs

- Actuellement, l'Algérie compte sept (7) opérateurs pour la production de l'électricité :

- Sonelgaz Production Electricité (SPE) qui détient 40% de la production nette.

Producteurs indépendants d'électricité (IPP) qui représentent 54% de la production nette et qui se sont répartis entre :

- Sharikat Kahraba Skikda (SKS)
- Sharikat Kahraba Oua Ma Arzew (KAHRAMA)
- Sharikat Kahraba Berrouaghia (SKB)
- Sharikat Kahraba hadjrat Ennous (SKH)
- Sharikat Kahraba Terga (SKT)
- Sharikat Kahraba Koudiet Eddraouche (SKD).

Comme on trouve aussi quelques producteurs autonomes qui produisent environ 6% de la production totale.

B. Gestionnaires et les opérateurs du réseau électrique

- Un Gestionnaire du Réseau de Transport Électrique (GRTE) : Les infrastructures de transport sont sous la responsabilité du GRTE, il est chargé de l'exploitation, de la maintenance et du développement du réseau.
- Un Opérateur du Système Électrique (OS) (Dispatching) : La conduite du système est assurée par l'OS chargé de la coordination du système de production -transport de l'électricité et veille en particulier à l'équilibre permanent entre l'offre et la demande. Son rôle est avant tout d'assurer la sécurité de fonctionnement du réseau interconnecté.
- Un opérateur du 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.

C. Les distributeurs

Quatre (04) Entreprises régionales de Distribution :

- Sonelgaz Distribution d'Alger (SDA)

- Sonelgaz Distribution Centre (SDC)
- Sonelgaz Distribution Est (SDE)
- Sonelgaz Distribution Ouest (SDO)

Actuellement, la Sonelgaz est le seul fournisseur d'électricité (produite par Sonelgaz ou par des producteurs indépendants), activité qu'elle exerce à travers de ses filiales de distributions. Cependant, la régulation permet par décret, l'approvisionnement des clients éligibles par des fournisseurs indépendants. C'est le cas de la centrale hybride (gaz naturel -CSP) de Hassi R'mel qui commercialisera son produit à la Sonatrach. [BEN14].

D. Les clients

Tous les clients non éligibles sont alimentés par les sociétés de distribution à des conditions tarifaires fixées par la commission de régulation de l'électricité et du gaz (CREG). Pour ce qui est des clients éligibles les prix sont fixés dans les contrats commerciaux, Le Tarif d'utilisation du réseau transport électrique par les clients éligibles est fixé annuellement par la CREG.

I.4.2. Les marchés financiers et le prix de l'électricité

A libéralisation du secteur électrique a entraîné l'émergence de nouveaux marchés et services financiers nécessaires pour faciliter le commerce, dont les fonctions étaient, avant, intégrées dans l'organisation monopolistique. L'organisation de ces marchés (market design) a été étudiée aux Etats-Unis, où, dans les années quatre-vingt-dix W. Hogan avaient créé un modèle nommé «Poolco» qui a servi comme référence pour la construction de marchés concurrentiels dans les pays nordiques et aux Etats-Unis. «Poolco» définit un ensemble de règles concernant le négoce d'électricité. Les producteurs soumettent leurs offres pour différentes périodes, en général pour chaque heure. Toute offre est accompagnée d'un prix représentant le niveau minimum que chaque producteur est prêt à accepter pour chaque période. Le pool centralise l'ensemble des offres et définit un ordre d'efficacité économique. La dernière offre acceptée, nécessaire pour couvrir le niveau de demande, définit le prix du marché [STA09].

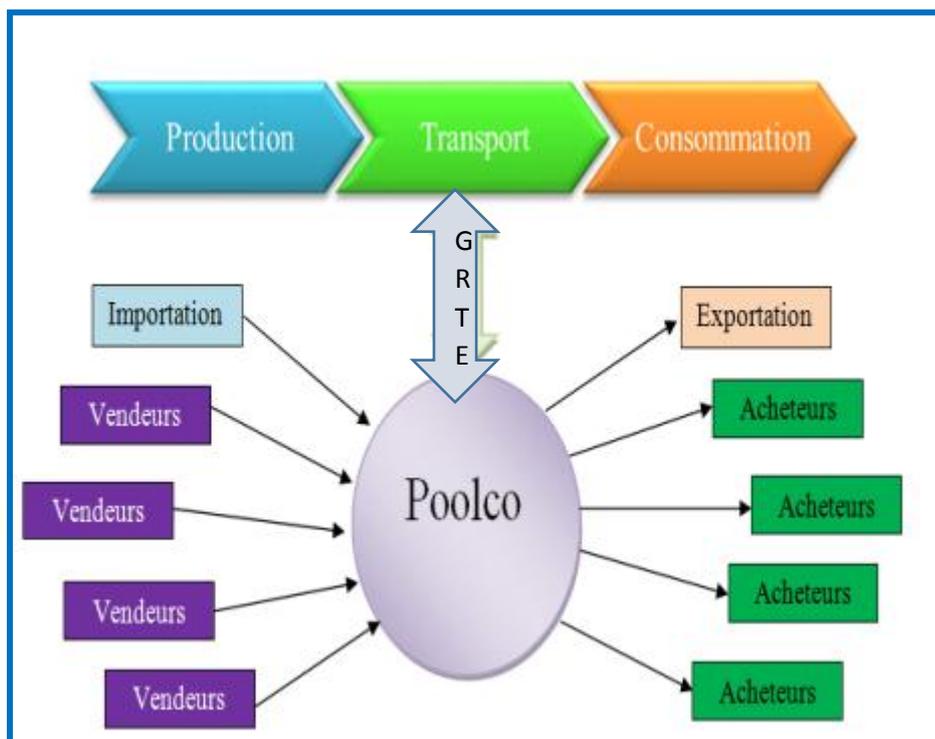


Figure I.7: le Modèle «Poolco »

I.5. Sonelgez (CRGE)

La Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz (CREG) a été instituée par la loi n°02-01 du 5 février 2002 et installée le 24 janvier 2005, relative à l'électricité et à la distribution du gaz par canalisations. Elle est dirigée par un comité de direction composé d'un président et de trois membres nommés par décret présidentiel, sur proposition du ministre chargé de l'énergie. Son rôle est de veiller au fonctionnement concurrentiel et transparent des marchés de l'électricité et du gaz en Algérie, dans l'intérêt des consommateurs et des opérateurs.

La CREG est investie de trois missions principales :

- Réalisation et contrôle du service public de l'électricité et de la distribution du gaz par canalisations.
- Conseil auprès des pouvoirs publics en ce qui concerne l'organisation et le fonctionnement du marché de l'électricité et du gaz.
- Surveillance et contrôle du respect des lois et des règlements relatifs au marché de l'électricité et au marché national du gaz.

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre on a fait une présentation générale du système d'énergie électrique et son organisation :

- ✓ L'organisation technique du réseau qui reflète fidèlement la segmentation suivant les niveaux de tension et la structure topologique. Et selon la fonction qui contient à quatre parties : la production, le transport, la distribution et la consommation d'électricité,
- ✓ L'organisation économique qui joue un rôle majeur dans l'équilibre offre / demande grâce à L'ouverture de marché d'électricité afin d'assurer à la fois une exploitation sûre du réseau de transport, et améliorer l'efficacité économique et technique et aussi augmenter le rendement de l'économie nationale par les bénéfices d'échanges.

Le problème le plus important dans l'industrie d'électricité est de réduire au maximum le coût de la production de l'énergie électrique générée par l'ensemble des centrales interconnectées. Ce problème peut être résolu par un outil mathématique d'optimisation. Ce dernier problème est le sujet du deuxième chapitre décrivant l'importance de dispatching économique.

Chapitre II

Résolution du problème de dispatching
économique

II.1. Introduction

L'économie de production de l'énergie électrique à partir des centrales électriques représente un défi pour les sociétés productrices, dans ce cas il est nécessaire de chercher le moindre coût total de production de l'énergie électrique. Puisque le coût de production de l'énergie à partir d'une centrale est en fonction de la puissance active de sortie, l'opérateur système cherche une répartition optimale de la puissance active générée à partir de toutes les centrales pour arriver au moindre coût total, ce qui rend ce problème un problème d'optimisation et qui est connu sous le nom du dispatching économique tout en satisfaisant les contraintes de fonctionnement du réseau électrique.

Ce chapitre présente l'aspect général d'un problème d'optimisation avec le traitement des différentes méthodes de résolution et la formulation du problème de dispatching économique (DE). La résolution d'un tel problème présente des difficultés qui font l'objet de nombreux travaux en utilisant diverses méthodes d'optimisation, pour cela nous aborderons quelques méthodes conventionnelles et autres évolutionnaires qui décrivent un ensemble des algorithmes.

II. 2. Problème d'optimisation

Un problème d'optimisation revient simplement à la recherche de l'optimum (minimum ou maximum) d'une fonction f donnée, en respectant certaines conditions préalablement imposées (contraintes).

II.2.1. Fonction Objective

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 va devoir optimiser (trouver un optimum). Cette fonction dite « Objective » peut être un coût (minimiser), profit (maximiser), production (maximiser). Les fonctions objectives sont diverses selon le problème à optimiser.

II.2.2. 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.

II.2.3. Contraintes

Les contraintes représentent des 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.

Figure (II.1) résume les différents critères qui entrent dans la classification des problèmes d'optimisation :

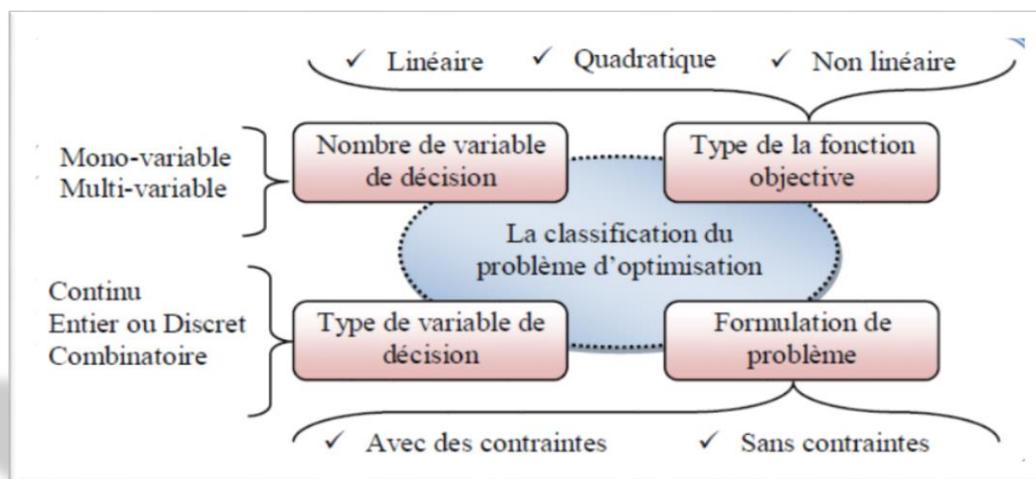


Figure II.1: Différents critères du problème d'optimisation.

II.3. Classification des problèmes d'optimisation

Les méthodes d'optimisation peuvent être réparties en deux catégories :

- Méthodes exacte (classique).
- Méthodes approchées.

La figure (II.2) présente une classification des méthodes d'optimisation largement utilisés par les experts pour résoudre les différents problèmes d'optimisation complexes liés aux différents domaines de technologie.

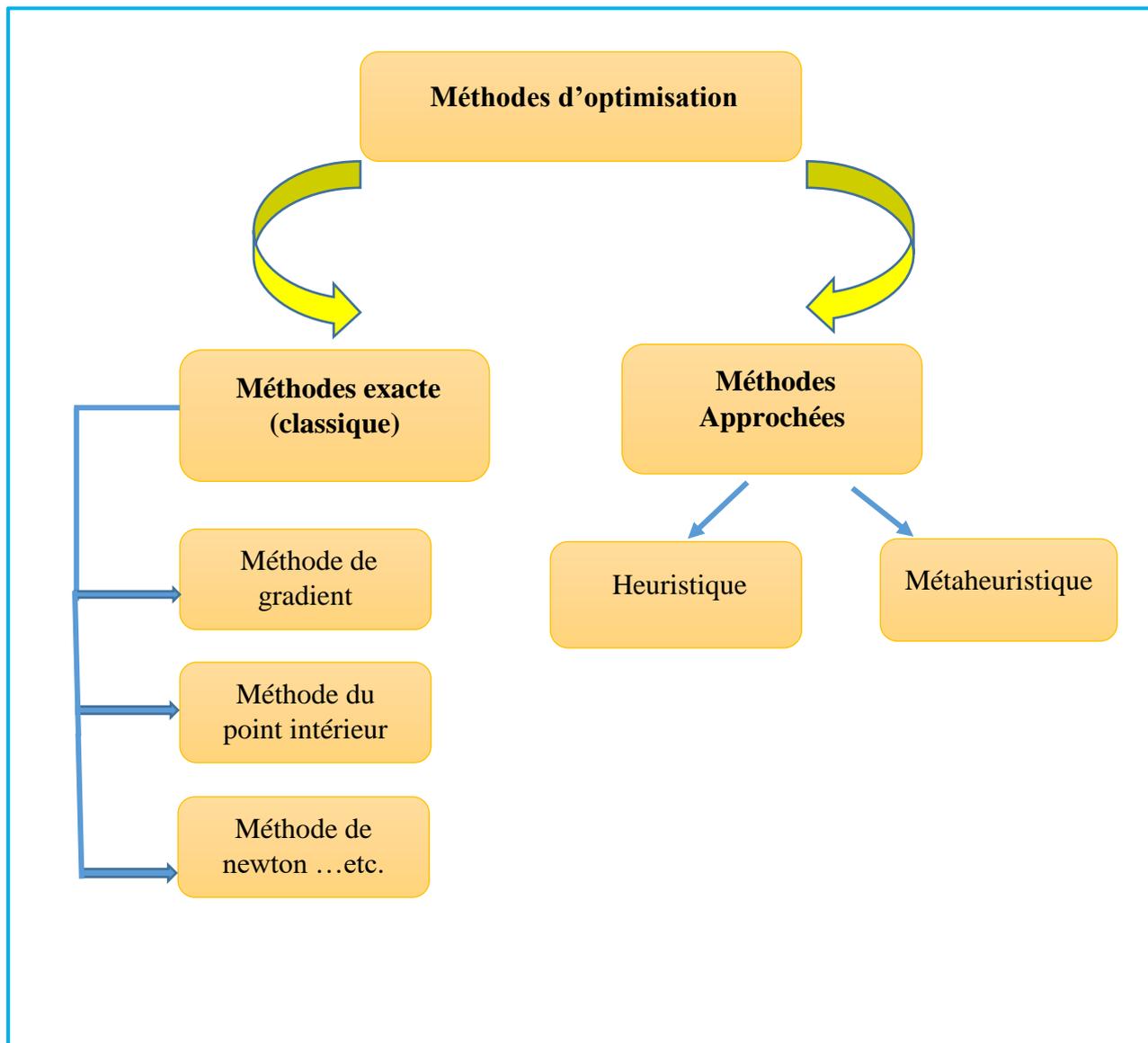


Figure II.2: Schéma de classification des méthodes d'optimisation.

II.3.1. Méthodes d'optimisation exacte (classique)

Pour résoudre le problème d'optimisation, il existe plusieurs méthodes mathématiques applicables lorsque certaines conditions mathématiques sont satisfaites [LAI18], alors nous présentons les principales méthodes :

II.3.1.1. Méthode du gradient

Les méthodes du gradient, connues aussi par les méthodes de descente, sont des méthodes itératives basées sur la recherche du minimum d'une fonction en suivant la ligne de plus grande pente associée à la fonction objective. La direction de descente associée à cette ligne est donnée par le gradient de la fonction objectif. L'idée est donc de minimiser une fonction objective $f(x)$ à travers une suite de points destinées à converger vers la solution optimale du problème [SAY10].

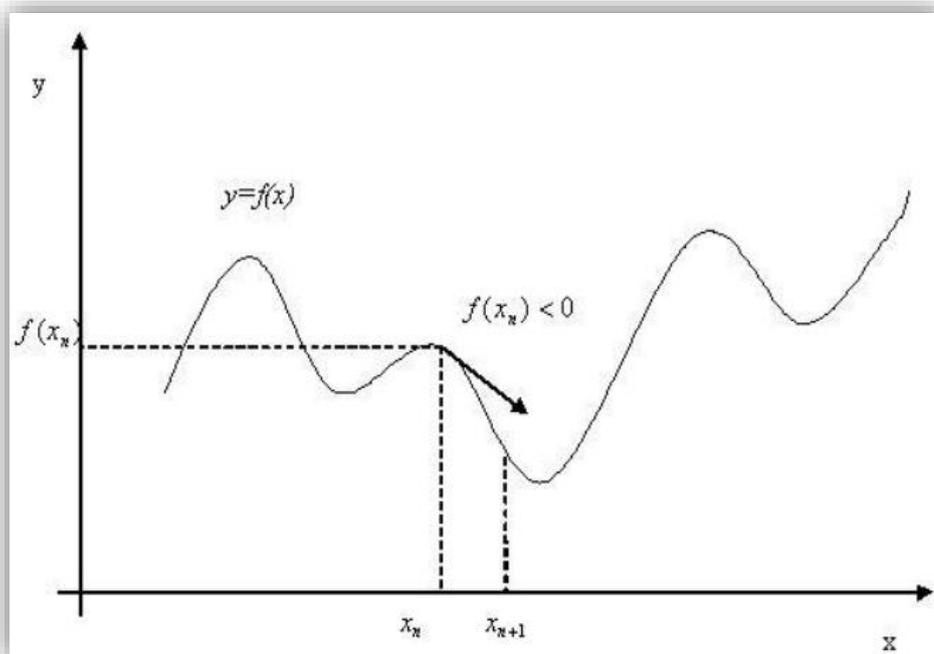
Soit une fonction (suffisamment dérivable) dont on recherche un minimum. La méthode du gradient construit une suite qui doit en principe s'approcher du minimum. Pour cela, on part d'une valeur quelconque et l'on construit la suite [DRA10] :

$$x_{n+1} = x_n - \rho \dot{f}(x_n)$$

ρ : Est une valeur "bien" choisie réelle non nulle.

$$\text{On a } f(x_{n+1}) = f(x_n - \rho \dot{f}(x_n)) \approx f(x_n - \rho (\dot{f}(x_n))^2)$$

D'après le théorème des approximations finies si $\rho \dot{f}(x_n)$ est "suffisamment" petit. On voit que, sous réserve de la correction de l'approximation $f(x_{n+1})$ est inférieur à $f(x_n)$.



On remarque qu'est d'autant plus éloigné de que la pente de la courbe en 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).

II.3.1.2. Méthode de Newton

La méthode de Newton est une méthode très puissante à cause de sa convergence rapide au voisinage de la solution. Cette propriété est spécialement utile pour les applications dans les systèmes électriques. En effet, une estimation initiale proche de la solution est facile à obtenir.

Un lagrangien augmenté a été formulé initialement, l'ensemble des dérivées premières de lagrangien augmenté par rapport aux variables de contrôle donne l'ensemble des équations non-linéaire, que doivent être résolu par la méthode de newton [DOU17].

II.3.1.3. Méthode du point intérieur

A l'origine, les méthodes de type (point intérieur) ont été conçues pour résoudre les problèmes de programmation non linéaire, des recherches plus approfondies sur ces méthodes ont montré qu'elles donnaient de très bonnes performances en termes de vitesse de convergence pour les problème de grande échelle, l'algorithme présenté dans cette section est connu sous le nom d'« algorithme primal-dual » est l'un des plus utilisé. Le principe de cette méthode est de rajouter à la fonction objective une fonction logarithmique « barrière » incluant des contraintes et qui décroît progressivement au fil de l'optimisation pour tend vers 0[SLI09].

II.3.2. Inconvénients des méthodes classiques

- ✚ L'inclusion des zones de fonctionnement interdites.
- ✚ La discontinuité de la courbe de la fonction coût non convexe ou non régulière et les incertitudes portées aux contraintes de fonctionnement.
- ✚ Leurs convergences vers les optimums locaux.
- ✚ La fonction optimiser n'est pas différentiable.

II.3.3. Méthodes d'optimisation approchées

L'utilisation de méthodes exactes n'est pas toujours possible pour un problème donné à cause d'un certain nombre de contraintes, telles que le temps de calcul souvent important ou bien la difficulté qui se distingue à partir de certaines fonctions objectives. Pour faire face à ces contraintes, nous utilisons des méthodes approchées, ces méthodes sont souvent classées en deux catégories : des méthodes heuristiques et des méthodes méta heuristiques [LAI18].

II.3.3.1. Méthodes heuristiques

Une heuristique est une méthode approchée simple, rapide et dédiée à un problème donné. Elle exploite les propriétés structurelles d'une solution et tente de la rendre rapidement une solution admissible par des critères de décision déduits de la connaissance du problème. Aucune garantie quant à l'optimalité de la solution trouvée ne peut être fournie [GAS08].

II.3.3.2. Méthodes métaheuristique

Les métaheuristiques sont un ensemble d'algorithmes d'optimisations visant à résoudre les problèmes d'optimisations difficiles. Elles sont souvent inspirées par des systèmes naturels, qu'ils

soient pris en physique (cas du recuit simulé), en biologie de l'évolution (cas des algorithmes génétiques) ou encore en éthologie (cas des algorithmes de colonies de fourmis ou de l'optimisation par essaims de particules).

Ces algorithmes sont basés sur l'exploration aléatoire probabiliste d'une ou plusieurs régions de l'espace de recherche, cette exploration aléatoire guidée parfois par des fonctions probabilistes permet d'éviter les optimums locaux lors de l'exploration contrairement aux méthodes déterministes qui se bloque en général dans un optima local ou bien si la fonction objective présente certaine complexité mathématique grandissante.

Le principe des méta-heuristique est de minimiser ou de maximiser une fonction objective. Leur avantage est de trouver un minimum global à un problème de minimisation et de ne pas rester bloqué sur un minimum local [LAI18].

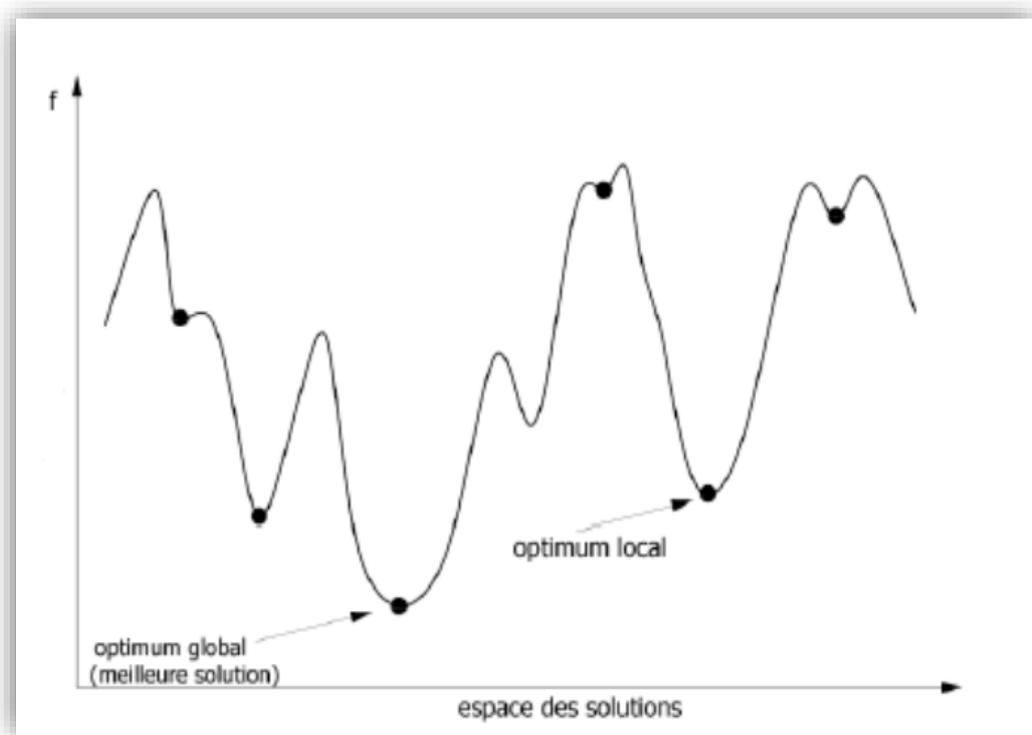


Figure II.3 : Minimum local et minimum global.

Dans la figure (II.4), les métaheuristique (MH) tentent de trouver l'optimum global (OG) d'un problème d'optimisation difficile $f(x)$ (avec par exemple des discontinuités (DC)), sans être piégé par les optima locaux (OL) [LAI18].

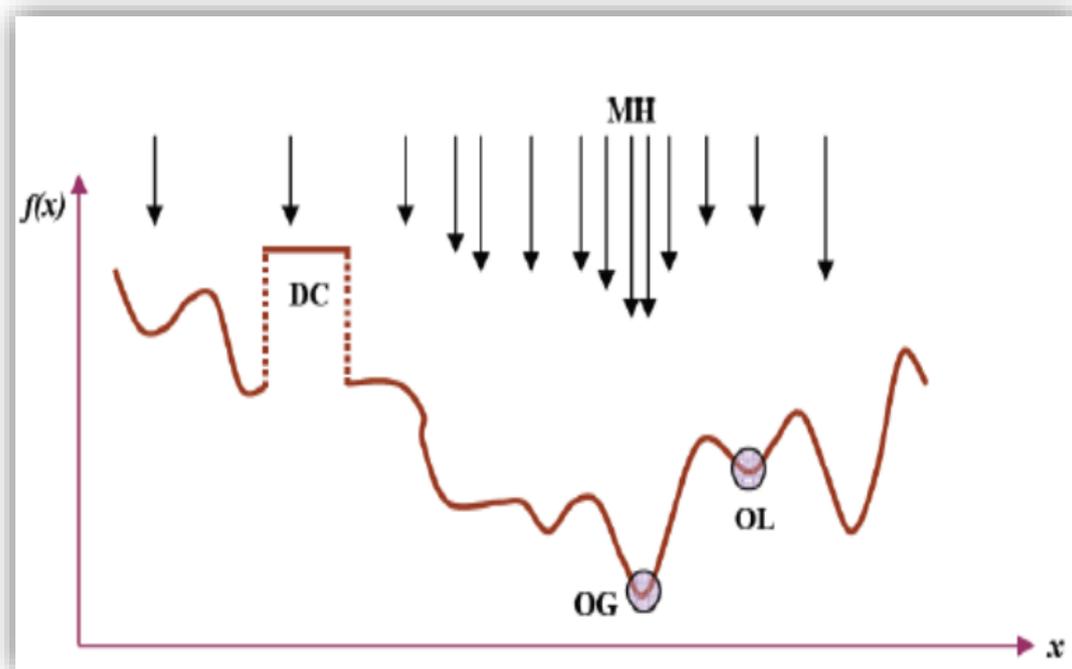


Figure II.4: Représentation simplifiée d'une approche méta-heuristique.

A. Algorithmes génétiques

Le principe fondamental d'un algorithme génétique consiste à représenter l'évolution naturelle d'organismes (individus), générations après générations, en respectant les phénomènes d'hérédité et la loi de survie énoncés par Darwin. Selon ces principes, au sein d'une population d'individus, seuls les plus forts, c'est-à-dire les mieux adaptés au milieu naturel, survivent et peuvent donner une descendance. Dans un algorithme génétique, un individu (une solution) est caractérisé par une structure de données qui représente son empreinte génétique. Les opérateurs génétiques de croisement et de mutation sont des procédures qui agissent sur les structures de données associées aux individus et doivent permettre de parcourir l'espace de solutions du problème [SAL13].

B. Optimisation par colonies de fourmis

La première version de l'OCF nommée " Ant System " est basée sur des études du comportement collectif des fourmis dans la recherche de la nourriture [BOU15]. Les algorithmes de colonies de fourmis sont nés à la suite d'une constatation : les insectes sociaux en général, et les fourmis en particulier, résolvent naturellement des problèmes relativement complexes [DOU17].

L'optimisation par colonies de fourmis s'inspire du comportement des fourmis lorsque celles-ci sont à la recherche de nourriture. Les fourmis en se déplaçant déposent des phéromones, substances olfactives et volatiles. Chaque fourmi se dirige en tenant compte des phéromones qui sont déposées par les autres membres de la colonie. Les fourmis choisissent leur chemin de manière probabiliste. Comme les

phéromones s'évaporent progressivement, le choix probabiliste que prend une fourmi pour choisir son chemin évolue continuellement [DOU17].

C. Optimisation par les essaims de particules

Cette méta-heuristique d'optimisation stochastique a été proposée en 1995 par James Kennedy socio-psychologue et Russell Eberhart ingénieur électricien. Elle est basée sur les « interactions sociales » entre des « agents » appelés « particules », dans le but d'atteindre un objectif donné dans un espace de recherche commun où chaque particule a une certaine capacité de mémorisation et de traitement de l'information [MAR16].

D. Optimisation par la Colonie Artificiel des Abeilles

L'optimisation par colonie d'abeilles est une famille très récente des Métaheuristique. Son principe est basé sur le comportement des abeilles réelles dans la vie pour l'exploration de la nourriture. L'abeille qui cherche à manger, appelée « éclaireuse », se trouve devant une tâche formidable. Elle quitte la ruche, cherche dans de vastes zones et vole de longues distances, elle doit donc reconnaître les bonnes sources de nourriture et avant que les abeilles butineuses retournent à la ruche, elle doit enregistrer sa position par rapport à la ruche et dépose une odeur spéciale sur leur source de nourriture. Une fois qu'une source de nourriture a été localisée et marquée, elle doit retourner à la ruche pour informer les autres ouvrières de sa découverte. Pour cela, elle doit utiliser des informations sur la direction de la ruche même si, pour arriver où elle est, elle fait tout un circuit. Après, elle doit communiquer aux autres ouvrières la direction et la distance de la source de nourriture par rapport à la ruche, et elle doit donner certaines indications sur sa qualité. Ceci doit être fait de la façon la plus économique possible. Elle doit donc attirer l'attention des autres ouvrières, qui peuvent déjà être occupées à autre choses ou avoir reçu des messages d'autres abeilles [SAL13].

II.4. Organisation générale des méthodes métaheuristique

D'une manière générale, les méta- heuristiques s'articulent autour de trois notions :

- ✚ **Diversification /exploration** : désigne les processus visant à récolter de l'information sur le problème à optimiser.
- ✚ **L'intensification/exploitation** : vise à utiliser l'information déjà récoltée pour définir et parcourir les zones intéressantes de l'espace de recherche.
- ✚ **La mémoire** : est le support de l'apprentissage, qui permet à l'algorithme de ne tenir compte que des zones où l'optimum global est susceptible de se trouver, évitant ainsi les optimums locaux [REZ09].

II.5. Dispatching économique

Le dispatching économique est un problème d’optimisation statique qui consiste à répartir la puissance active demandée entre les différentes centrales du réseau électrique, de sorte à exploiter ce dernier de la manière la plus économique possible (minimiser le coût). Cette répartition doit évidemment respecter les contraintes de fonctionnement du système énergétique : Bilan de puissance et les limites de production des centrales.

II.5.1. Formulation du problème de dispatching économique

II.5.1.1. Fonction objective du coût

Le coût de production d’une centrale est généralement modélisé par une fonction polynomiale du second degré en fonction de p_g comme il est donné dans l’éq (II.1) [MIM09].

$$C_i(p_{gi}) = a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2 \tag{II.1}$$

a_i, b_i et c_i : Sont les coefficients de la fonction coût relative à chaque unité de production i , on les détermine à l’aide des méthodes d’interpolation comme par exemple celles de Lagrange, de Newton ou des Moindres Carrés [SAL13] [MIM09].

II.5.1.2. Bilan de puissance

Le bilan de puissance 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. Le bilan de puissance représente l’équilibre entre la production (des machines synchrones) et la demande (les charges). La défaillance de cet équilibre entraîne une perte de stabilité des machines synchrones ce qui influe considérablement sur la qualité d’énergie fournie aux consommateurs. Les unités de production sont équipées de plusieurs systèmes à savoir le système de contrôle, de commande, de communication et de protection qui fonctionnent en coordination pour assurer l’équilibre en temps réel entre la production et la demande.

II.5.2. Formulation mathématique du problème de dispatching économique

Le problème de dispatching économique optimal est donné sous une forme standard d’optimisation avec contraintes d’égalités et d’inégalités comme suit [LAI18] :

$$\begin{cases} \text{Min } C_i(P_{gi}) = \sum_{i=1}^{Ng} (a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2) \\ g(x) = 0 \dots \dots \dots (1) \\ h(x) \leq 0 \dots \dots \dots (2) \end{cases} \tag{II.2}$$

(1) : contrainte d’égalité

(2) : contrainte d’inégalité

II.5.2. 1. Contrainte d'égalité

C'est la contrainte d'équilibre de la demande et de génération [SAL13]

$$\sum_{i=1}^{Ng} P_{gi} = P_D + P_L \quad (\text{II.3})$$

$$\text{Avec : } P_L = \sum_{i=1}^{Ng} \sum_{j=1}^{Ng} P_{gi} \beta_{ij} P_{gj} + \sum_{i=1}^{Ng} \beta_{0i} P_i + \beta_{00} \quad (\text{II.4})$$

Tel que :

Ng : 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.

avec $\beta_{ij}, \beta_{0i}, \beta_{00}$ Sont les coefficients des pertes

II.5.2.2. Contrainte d'inégalité

C'est la puissance générée P_{gi} est limitée par une borne inférieure $P_{gi(\min)}$ et une borne supérieure $P_{gi(\max)}$.

$$P_{gi(\min)} \leq P_{gi} \leq P_{gi(\max)} \quad (\text{II.5})$$

$P_{gi(\min)}$: La puissance active minimale du générateur i .

$P_{gi(\max)}$: La Puissance active maximale du générateur i .

II.5.2.3. Critère d'optimalité du dispatching économique

Le critère pour le fonctionnement optimal est obtenu en introduisant la fonction auxiliaire suivante :

$$L = \sum_{i=1}^{Ng} C_i(P_{gi}) + \lambda * (\sum_{i=1}^{Ng} P_{gi} - P_L - P_D) \quad (\text{II.6})$$

L : la fonction de coût augmentée (ou la fonction de Lagrange).

λ : Le multiplicateur de Lagrange associé à la contrainte de l'équilibre des puissances actives.

II.6. Modélisation des caractéristiques entrée – sortie des générateurs

Trois types de caractéristiques ont une influence sur l'exploitation d'une centrale électrique à court terme : son coût de production, ses contraintes techniques et sa fiabilité. Le plus important de ces trois caractéristiques est le coût variable de production [LAI18].

Pour les centrales thermiques, le coût du combustible est évalué en utilisant des valeurs de consommation spécifique de chaleur (une quantité d'énergie thermique nécessaire pour produire de l'électricité) de la centrale et le prix du combustible. La valeur de consommation spécifique de chaleur (CSC) est proportionnelle à l'inverse du rendement énergétique, plus la CSC est grande, moins la centrale est performante [LAI18].

La caractéristique entrée –sortie d'une unité thermique est représentée par un graphe qui relie le taux du combustible à l'entrée (en Btu/h) avec la puissance électrique à la sortie (en MW) de l'unité. La forme de cette courbe est déterminée sur la base des données collectées à partir des essais effectués sur l'unité génératrice [SAY10].

La caractéristique qui en résulte et que nous montrons dans la figure (II.5) est connue sous le nom de courbe de coût du combustible, pour représenter cette dernière caractéristique on adopte une fonction quadratique selon l'équation (II.1).

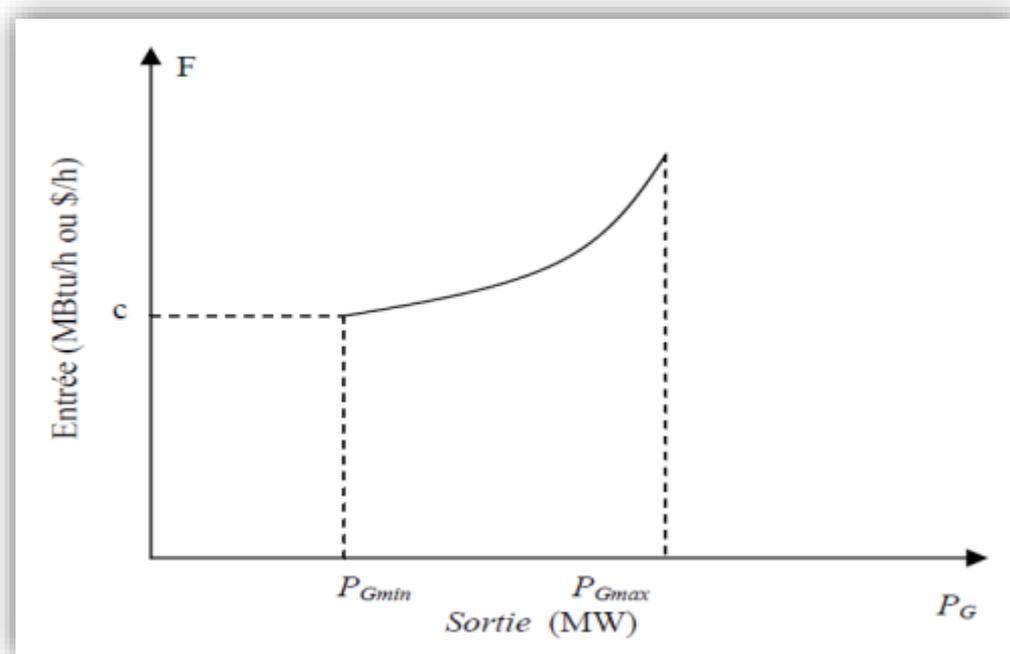


Figure II.5 : Caractéristique entrée –sortie d'une unité de production.

Une autre caractéristique importante des unités thermiques, légèrement utilisée dans les études du fonctionnement des systèmes électro-énergétique est la courbe de l'accroissement du coût de combustible. Cette caractéristique est obtenue en dérivant la courbe de coût du combustible qui est exprimée en (\$/MWh).

L'accroissement du coût de combustible représente le coût supplémentaire du combustible en (\$/h) pour augmenter la puissance active de l'unité de 1MW ; ou le gain en coût (en \$/h) pour

diminuer la puissance active de l'unité de 1MW. La figure (II.6) montre une caractéristique typique de l'accroissement du coût de combustible pour une unité de génération thermique [SAY10].

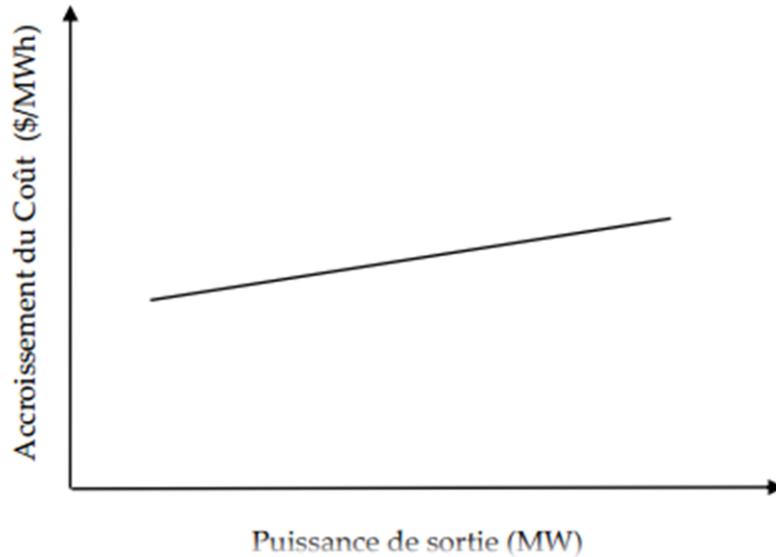


Figure II.6 : Courbe typique de l'accroissement du coût de combustible.

II.7. Contraintes pratiques des centrales électriques

II.7.1. Caractéristiques avec plusieurs types de combustible

Parfois, les unités thermiques sont capables de fonctionner avec plusieurs types de combustibles, dans ces conditions, la caractéristique de coût est constituée de plusieurs morceaux de fonctions quadratiques et qui s'écrivent comme suit [MOS13] :

$$C_i(P_{gi}) = \begin{cases} a_{i,1} + b_{i,1}P_{gi} + c_{i,1}P_{gi}^2 \text{ combustible 1} & P_{gi(\min)} \leq P_{gi} \leq P_{gi,1(\max)} \\ a_{i,2} + b_{i,2}P_{gi} + c_{i,2}P_{gi}^2 \text{ combustible 2} & P_{gi,1(\min)} \leq P_{gi} \leq P_{gi,2(\max)} \\ a_{i,k} + b_{i,k}P_{gi} + c_{i,k}P_{gi}^2 \text{ combustible } k & P_{gi,k-1(\min)} \leq P_{gi} \leq P_{gi(\max)} \end{cases} \quad (\text{II.7})$$

Où $a_{i,k}$, $b_{i,k}$ et $c_{i,k}$ sont les coefficients de coût de l'unité i avec le combustible k . Ce modèle est communément appelé « modèle quadratique par morceaux ». Le combustible le plus économique est représenté par le morceau inférieur à la courbe.

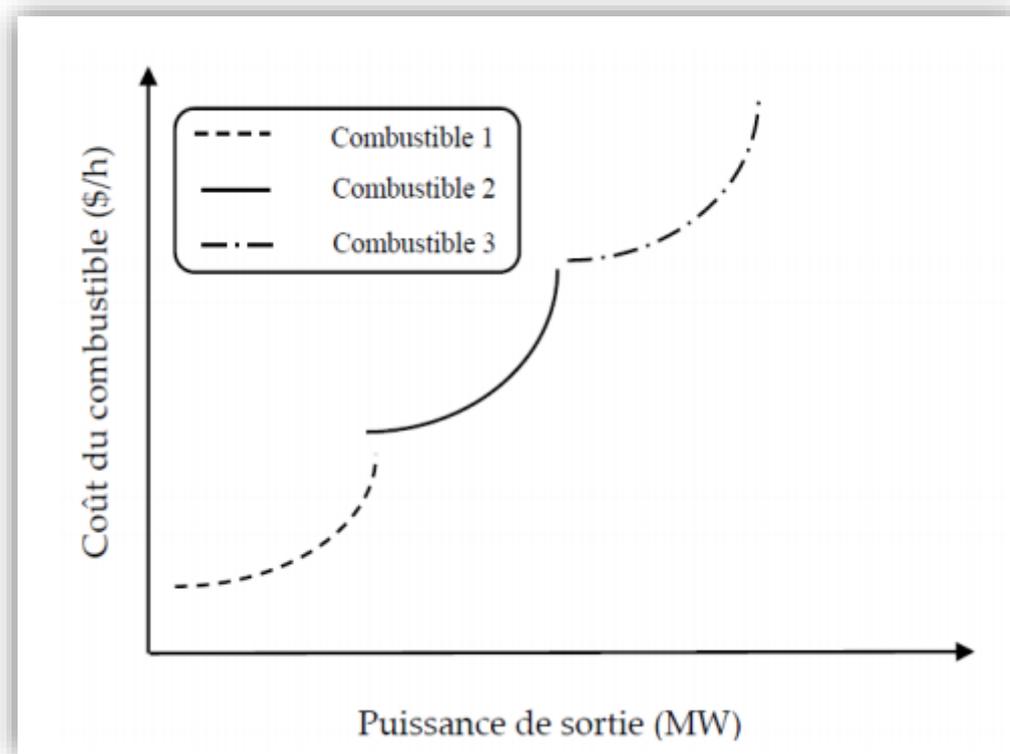


Figure II.7: Courbe de coût d'une unité thermique alimentée par trois types de combustible.

II.7.2. Contrainte des zones de fonctionnement prohibées

Généralement, on admet que la puissance fournie par les unités thermiques peut être ajustée d'une manière continue dans le domaine de fonctionnement du générateur ($P_{gi(\min)} \leq P_{gi} \leq P_{gi(\max)}$). Dans la pratique, les unités thermiques peuvent avoir des régions de fonctionnement indésirables pour des problèmes liés à l'instabilité ou des limitations physiques de fonctionnement au niveau des composantes des machines, ces régions créent des discontinuités au niveau de la courbe de coût du combustible, étant donné que l'unité doit fonctionner à l'intérieur de certaines plages spécifiées (Figure II.8), ce type de fonction est caractérisé par un espace de solution non convexe [SAY10].

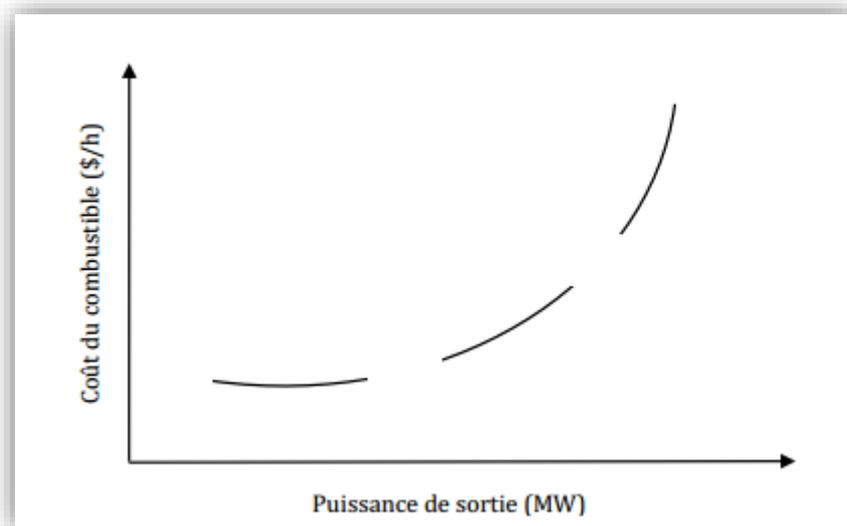


Figure II.8: Courbe de coût du combustible d'une unité thermique avec des zones de fonctionnements prohibées.

II.7.3. Contraintes d'effets d'ouverture des vannes

Dans les centrales à vapeur, plusieurs vannes à vapeur sont utilisées dans les turbines pour contrôler la puissance de sortie des générateurs. L'ouverture de la vanne de vapeur va entraîner une augmentation soudaine de la perte et causerait des ondulations dans la courbe entrée-sortie et entraîner par conséquent une fonction de coût non lisse. Si l'effet de la vanne de vapeur est pris en compte dans les centrales, le coût en fonction de leur génération prendrait une forme non lisse en raison des effets mécaniques associés. La figure (II.9) montre la courbe de coût typique d'une unité thermique avec trois vannes d'admission de vapeur [MOS14].

Cette influence est généralement modélisée en ajoutant un terme sinusoïdal à la fonction quadratique relative à l'équation (II.1). Par conséquent, on aboutit à l'équation (II.8) en prenant en compte l'effet de la soupape de vapeur d'entrée comme il est exprimée par l'équation :

$$C_i(P_{gi}) = a_i + b_i P_{gi} + c_i P_{gi}^2 + |d_i \sin(e_i (P_{gi(min)} - P_{gi}))| \quad (II.8)$$

a_i, b_i, c_i et d_i sont les coefficients de coût de l'unité génératrice i .

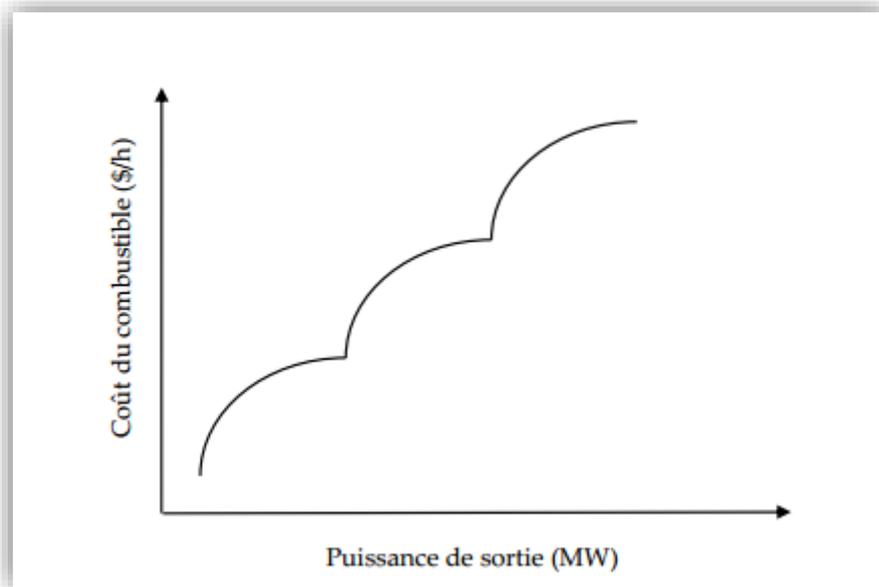


Figure II.9: Courbe de coût du combustible d'une unité thermique avec trois vannes d'admission de vapeur.

II.7.4. Contraintes due à l'effet rampe

Généralement, l'unité de production ne peut fonctionner de manière stable qu'à partir d'un niveau de production minimal (capacité minimale de production) et jusqu'à un niveau maximal de production (capacité maximale de production). L'inertie propre des moyens de production limite la vitesse à laquelle les unités de production peuvent changer leur niveau de production [DIH17]. La vitesse maximale de changement du niveau de production pour une période de temps donné appelée contrainte de rampe [LAI18].

$$\max(P_{gi}^{min}, P_{gi}(t-1) - DR_i) \leq P_{gi}(t) \leq \min(P_{gi}^{max}, P_{gi}(t-1) + UR_i) \quad (II.9)$$

UR_i : Limite de rampe supérieure.

DR_i : Limite de rampe inférieure.

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, on a illustré le concept du problème d'optimisation, plus particulièrement le problème de dispatching économique et les méthodes de résolution de ce problème qui ont été classées en deux catégories : les méthodes exactes (classiques) et les méthodes approchées (méta-heuristique). Les méthodes classiques de résolution ne sont pas convenables pour un problème réel à cause des problèmes complexes (le dispatching économique présente les difficultés des contraintes pratiques des générateurs), pour surmonter tous ces problèmes, on a fait recours aux

méthodes méta heuristiques. Nous avons défini et formulé le problème de dispatching économique (DE) pour minimiser le coût total de production des centrales électriques avec leurs contraintes pratiques.

Dans le chapitre suivant, nous allons traiter une nouvelle méta-heuristique inspirée de la nature basée sur le comportement intelligent du corbeau appelé algorithme de recherche du corbeau (CSA).

Chapitre III

Méthode de recherche du corbeau et sa
version améliorée

III.1. Introduction

Les méthodes de recherche conventionnelles ont longtemps été appliquées pour résoudre les problèmes d'optimisation. Bien que ces méthodes trouvent des résultats prometteurs dans de nombreux problèmes réels, ils peuvent échouer dans plusieurs problèmes de conception complexes.

Dans les problèmes de conception réels, le nombre des variables de décision peut être très grand et son effet sur la fonction objective peut être très compliqué. La fonction objective peut se piéger dans de nombreux optima locaux, alors que le décideur s'intéresse à l'optimum global. De tels problèmes ne peuvent pas être traités par les méthodes conventionnelles. A cet effet, les chercheurs se sont orientés vers le développement de nouvelles techniques d'optimisation appelées méta-heuristiques, plus efficaces inspiré de la nature et des comportements des animaux pour la découverte de nouvelles solutions qui s'adaptent au contraintes des problèmes traités.

Les algorithmes méta-heuristique ont montré des performances prometteuses pour résoudre la plupart des problèmes d'optimisation complexe du monde réel qui sont extrêmement non linéaires et multimodaux. Pour cette raison, ce chapitre explique une nouvelle approche basée sur une méta-heuristique récente appelée algorithme de recherche de corbeau (Crow Search Algorithm-CSA) et sa version améliorée (CSA_Améliorée), proposé pour la résolution du problème de dispatching économique.

III.2. Comportement des corbeaux

III.2.1. Spécifications connues sur les corbeaux

A. Les corbeaux sont parmi les animaux les plus intelligents

De tous les oiseaux, il s'agit de ceux qui ont le cerveau le plus développé. On considère que les corbeaux ont l'intelligence d'un enfant de 2 à 5 ans. Dans la nature, plusieurs éthologues ont rapporté avoir vu des corbeaux utiliser des outils comme des branches pour faire certaines choses. On a aussi vu des corbeaux sauvages pousser des pierres sur des personnes essayant de grimper jusqu'à leurs nids, voler du poisson en tirant la ligne d'un pêcheur, De même, on observe assez fréquemment que les corbeaux ont recours à la feinte ou au bluff. Par exemple, si un corbeau sait qu'un autre corbeau l'observe tandis qu'il cache de la nourriture, il peut très bien faire semblant de déposer la nourriture à un endroit, pour ensuite la cacher autre part.

B. Les corbeaux communiquent par signes

Il se trouve que les corbeaux font entre eux des signaux non-vocaux extrêmement sophistiqués. Alors que la majorité des oiseaux communiquent vocalement (en chantant ou en

piaillant) pour s'envoyer des informations simples (défense du territoire ou parade nuptiale), les corbeaux sont capables de faire des gestes pour communiquer, comme une sorte de langue des signes.

C. Les corbeaux sont extrêmement adaptables

Du point de vue de l'évolution, il faut croire que les corbeaux ont toutes les cartes en main, ils sont capables de vivre dans une grande variété d'habitats, de la neige au désert en passant par les montagnes ou encore les forêts. Leur régime alimentaire est omnivore et très varié : ils peuvent consommer du poisson, de la viande, des graines, des fruits, des carcasses d'animaux, et de déchets [NAT16].

III.3. Algorithme de recherche des corbeaux dédié à l'optimisation

L'optimisation dans le modèle de l'essaim CSA, est une technique utilisée pour explorer l'espace de recherche et de simuler le comportement intelligent du corbeau pour trouver l'ensemble des variables pour la solution optimale du problème d'optimisation avec les meilleures performances.

Les corbeaux cachent leur surplus de nourriture dans certaines positions (cachettes) de l'environnement et récupèrent la nourriture stockée quand c'est nécessaire. Les corbeaux sont des oiseaux avides puisqu'ils se suivent pour obtenir de meilleures sources de nourriture. Trouver une source de nourriture cachée par un corbeau n'est pas un travail facile car si un corbeau en trouve une autre qui le suit, il essaye de le tromper en allant dans une autre position de l'environnement [ASK16].

Pour cette approche d'optimisation, la fonction objective et les contraintes proposées sont présentés, l'environnement est un espace de recherche, chaque position du corbeau de l'environnement correspond à une solution réalisable, la qualité de la source de nourriture est une fonction objective (fonction fitness) et la meilleure source de nourriture de l'environnement est la solution globale du problème. Sur la base de ces similitudes, l'algorithme CSA tente de simuler le comportement intelligent des corbeaux pour trouver la solution aux problèmes d'optimisation [ASK16].

III.4. Algorithme de recherche du corbeau

L'algorithme CSA a été récemment proposé par Askarzadeh comme un nouvel algorithme d'optimisation méta-heuristique basé sur le comportement social des corbeaux, l'idée de la CSA est motivée par le processus de stockage de l'excès de nourriture caché par le corbeau qui le place puis le restaure dans le temps si c'est nécessaire. On sait que le corbeau est un oiseau très intelligent qui observe les autres qui sont entrain de cacher leur nourriture et les en vole une fois

qu'ils partent [ABD17], les principes de l'algorithme méta-heuristique qui est basé sur l'évolution de la population des corbeaux sont énumérés comme suit :

- Les corbeaux vivent sous forme des essaims.
- Les corbeaux mémorisent la position de leurs cachettes.
- Les corbeaux se suivent pour faire le vol.
- 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 $x^{i,iter}$.

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

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 montrée par $m^{i,iter}$, 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).

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

État 1 : le corbeau j ne sait pas que le corbeau i le suit. Comme résultat, le corbeau i s'approcherai de la cachette du corbeau j . Dans ce cas, la nouvelle position du corbeau i est obtenue comme suit :

$$x^{i,iter+1} = x^{i,iter} + r_i \times fl^{i,iter} \times (m^{j,iter} - x^{i,iter}) \quad (III.1)$$

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. Les états 1 et 2 peuvent être exprimés comme suit :

$$x^{i,iter+1} = \begin{cases} x^{i,iter} + r_i \times fl^{i,iter} \times (m^{j,iter} - x^{i,iter}) & r_j \geq AP^{j,iter} \\ \text{une position aléatoire} & \text{sinon} \end{cases} \quad (III.2)$$

$fl^{i,iter}$: 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 $iter$.

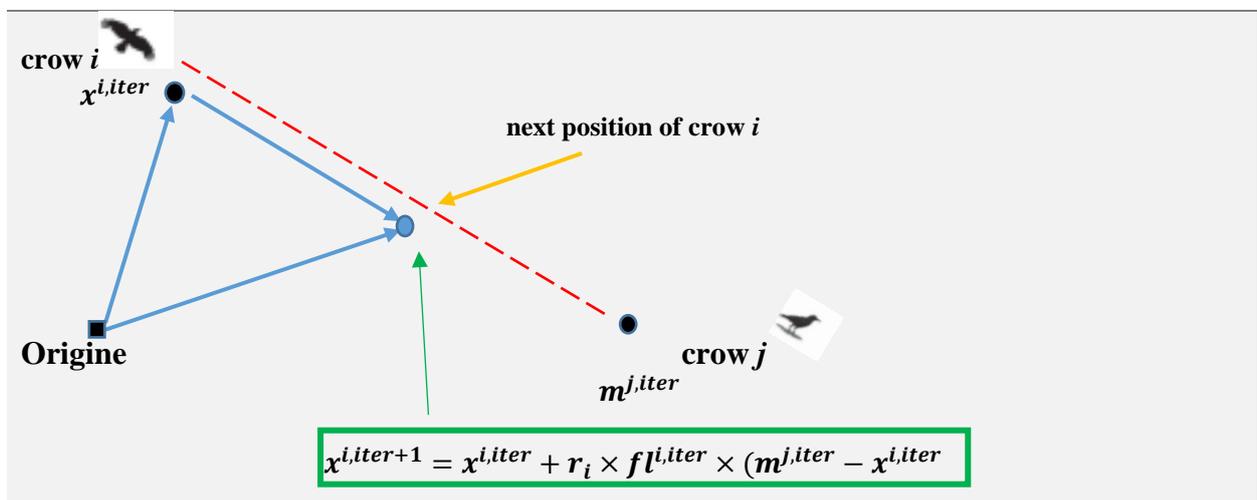
r_i : est un nombre aléatoire avec une répartition uniforme entre 0 et 1

Les algorithmes métaheuristiques devraient fournir un bon équilibre entre diversification et intensification. En 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 actuelle se trouve dans cette région. En conséquence, l'utilisation de petites valeurs de (AP), augmente l'intensification. D'autre part, l'augmentation de la probabilité de conscience (AP), la probabilité de la recherche dans le voisinage des bonnes solutions actuelle diminue 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.

III.5. L'influence de la portée de 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 $x^{i,iter}$) et les grandes valeurs à une recherche globale (loin de $x^{i,iter}$). 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 $x^{i,iter}$ et $m^{j,iter}$. 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 $m^{j,iter}$.

a) $fl < 1$



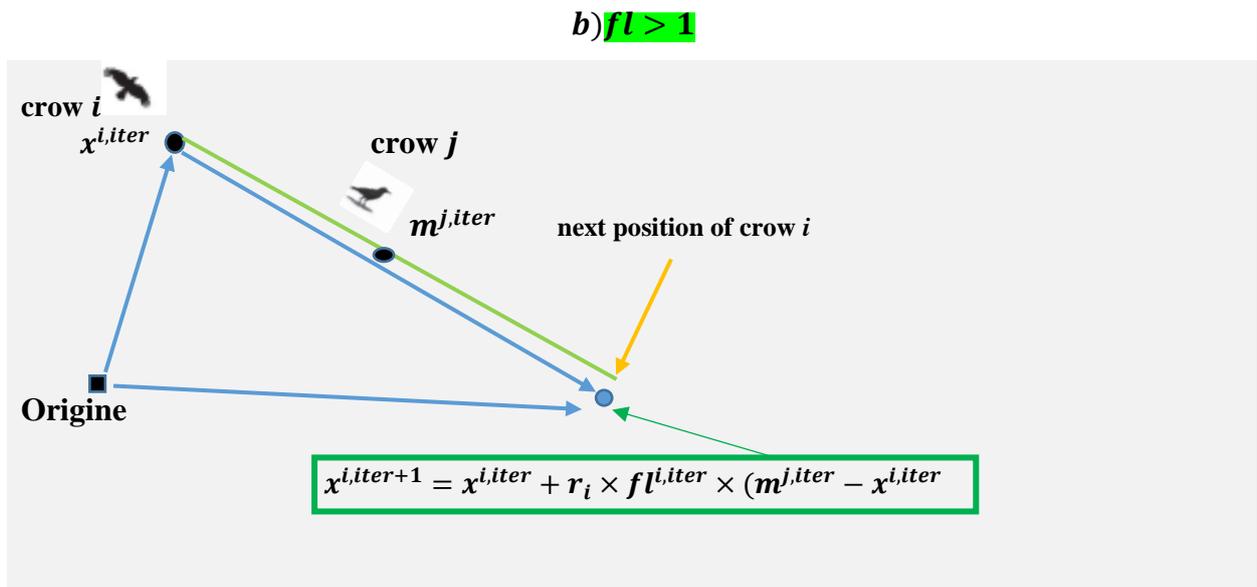


Figure III.1 : Diagramme d'état 1 dans CSA (a) $fl < 1$ et (b) $fl > 1$

La figure (III.2) représente le pseudo code du 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
       $x^{i,iter+1} = a \text{ random position of search space}$ 
    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.

III.6. La méthodologie de la CSA pour l'optimisation

La procédure étape par étape pour la mise en œuvre de l'algorithme de CSA est décrite comme suit :

Étape 1 : Initialiser le problème et les paramètres réglables

Le problème de l'optimisation, les variables de décision et les contraintes sont définis. Ensuite, les paramètres réglables du CSA :

- Taille du corbeau (N)

- Nombre maximal d'itérations ($iter_{max}$)
- La portée de vol (fl)
- Probabilité de conscience (AP)

Étape 2 : Initialiser la position et la mémoire des corbeaux

N corbeau 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.

$$\text{Corbeaux} = \begin{pmatrix} x_1^1 & x_2^1 \dots & x_d^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_1^N & x_2^N \dots & x_d^N \end{pmatrix} \tag{III.3}$$

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.

$$\text{Mémoire} = \begin{pmatrix} m_1^1 & m_2^1 \dots & m_d^1 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_1^N & m_2^N \dots & m_d^N \end{pmatrix} \tag{III.4}$$

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

Les corbeaux mettent à jour leur mémoire comme suit :

$$m^{i,iter+1} = \begin{cases} x^{i,iter+1} & \text{if } f(x^{i,iter+1}) \text{ est meilleure que } f(m^{i,iter}) \\ m^{i,iter} & \text{sinon} \end{cases} \quad (III.5)$$

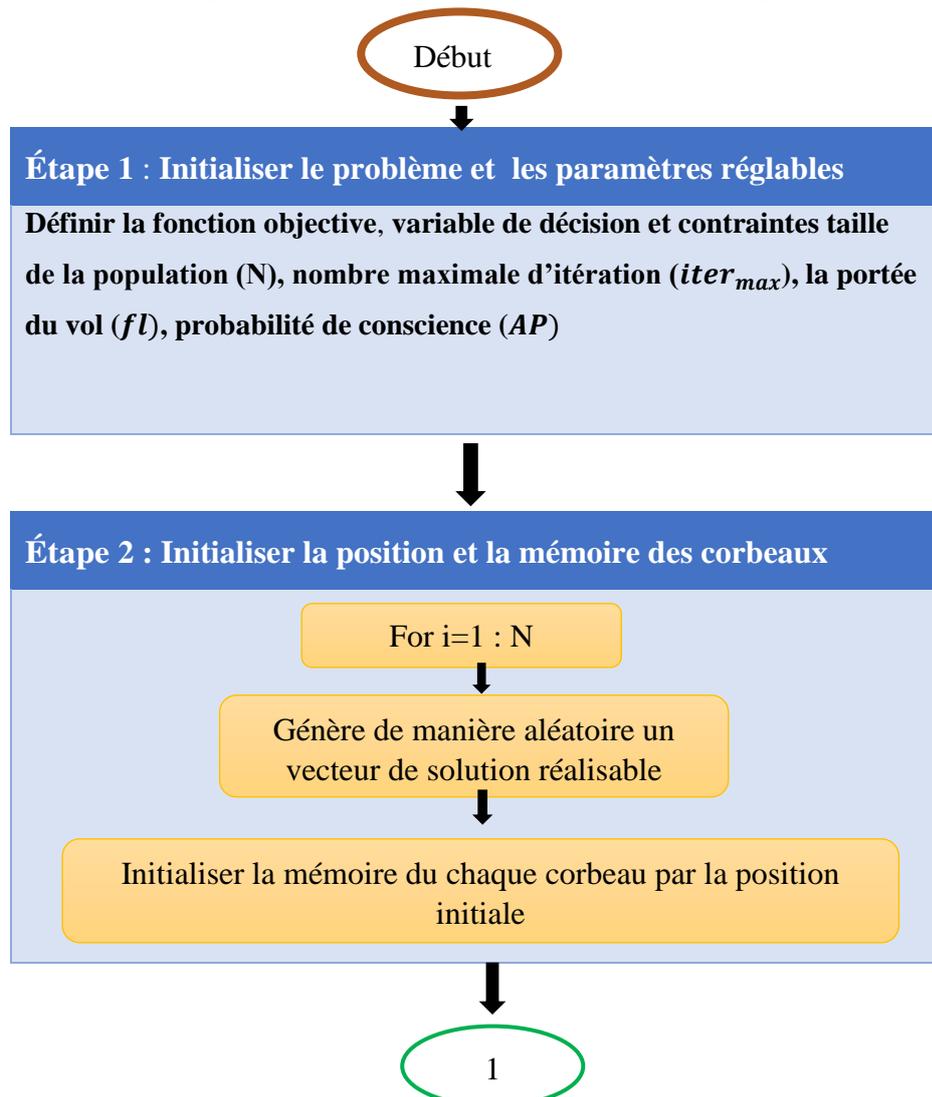
Ou $f(.)$ désigne la valeur de la fonction objective.

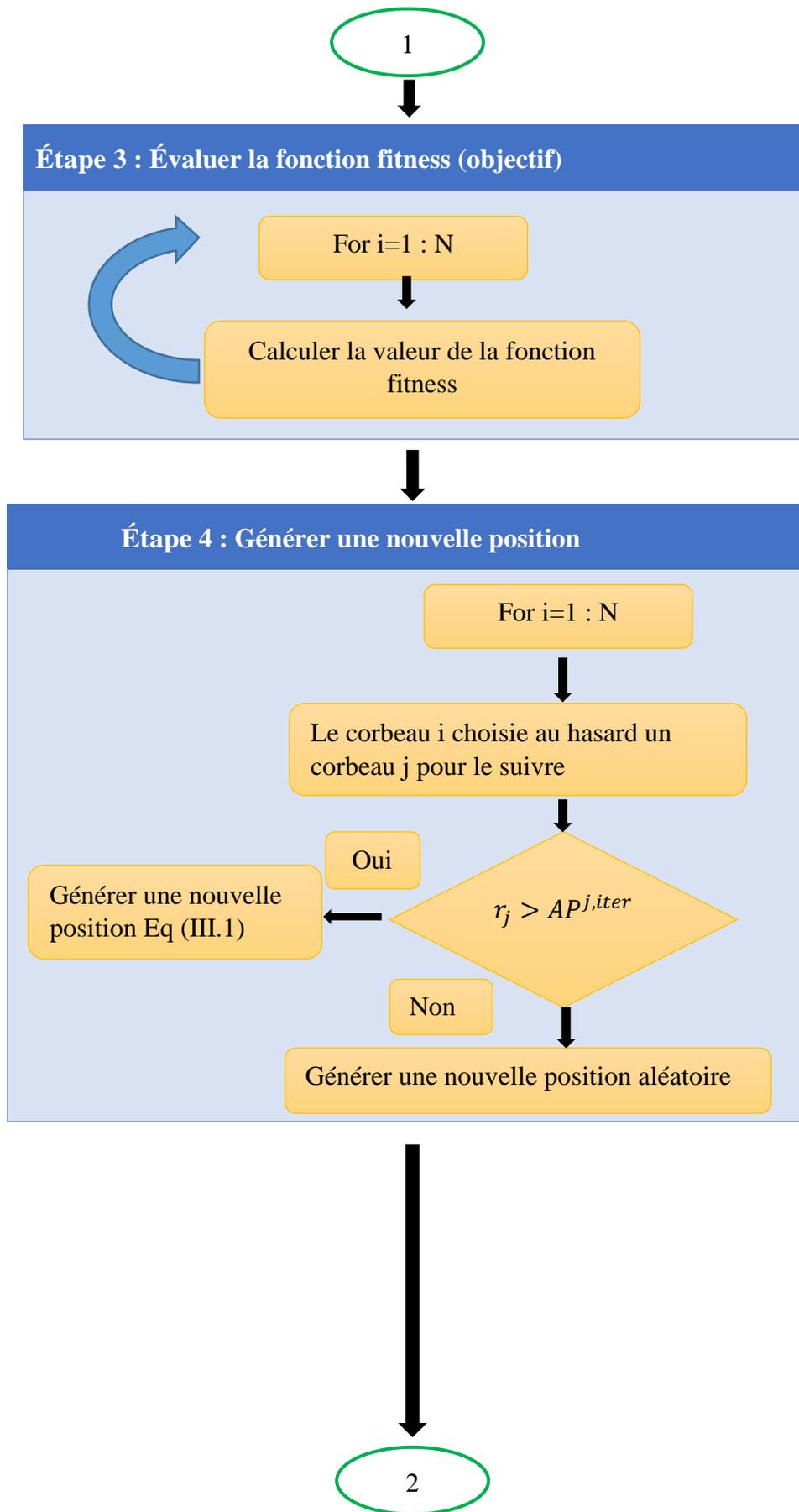
On voit que si la valeur de la fonction fitness de la nouvelle position d'un corbeau est meilleure que la valeur de la fonction fitness de la position mémorisée, le corbeau met à jour sa mémoire par la nouvelle position.

Étape 8 : Vérifier le critère d'arrêt

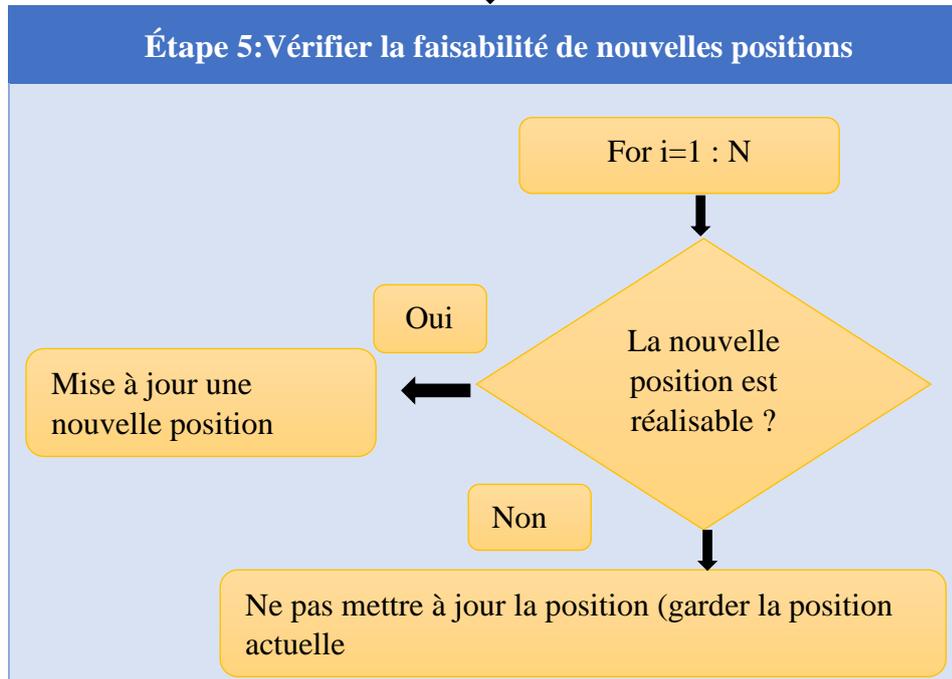
Les étapes 4-7 sont répétées jusqu'à ce que l'itération $iter_{max}$ soit atteinte. Lorsque le critère d'arrêt est atteint, la meilleure position de la mémoire en termes de valeur de fonction objectif est rapportée comme la solution du problème d'optimisation.

III.6.1. Organigramme de l'algorithme de recherche du corbeau CSA pour l'optimisation

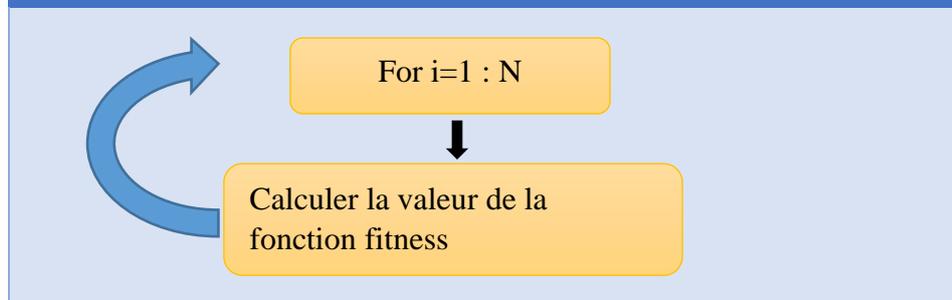




2



Étape 6 : Évaluer la fonction fitness par la nouvelle position



3

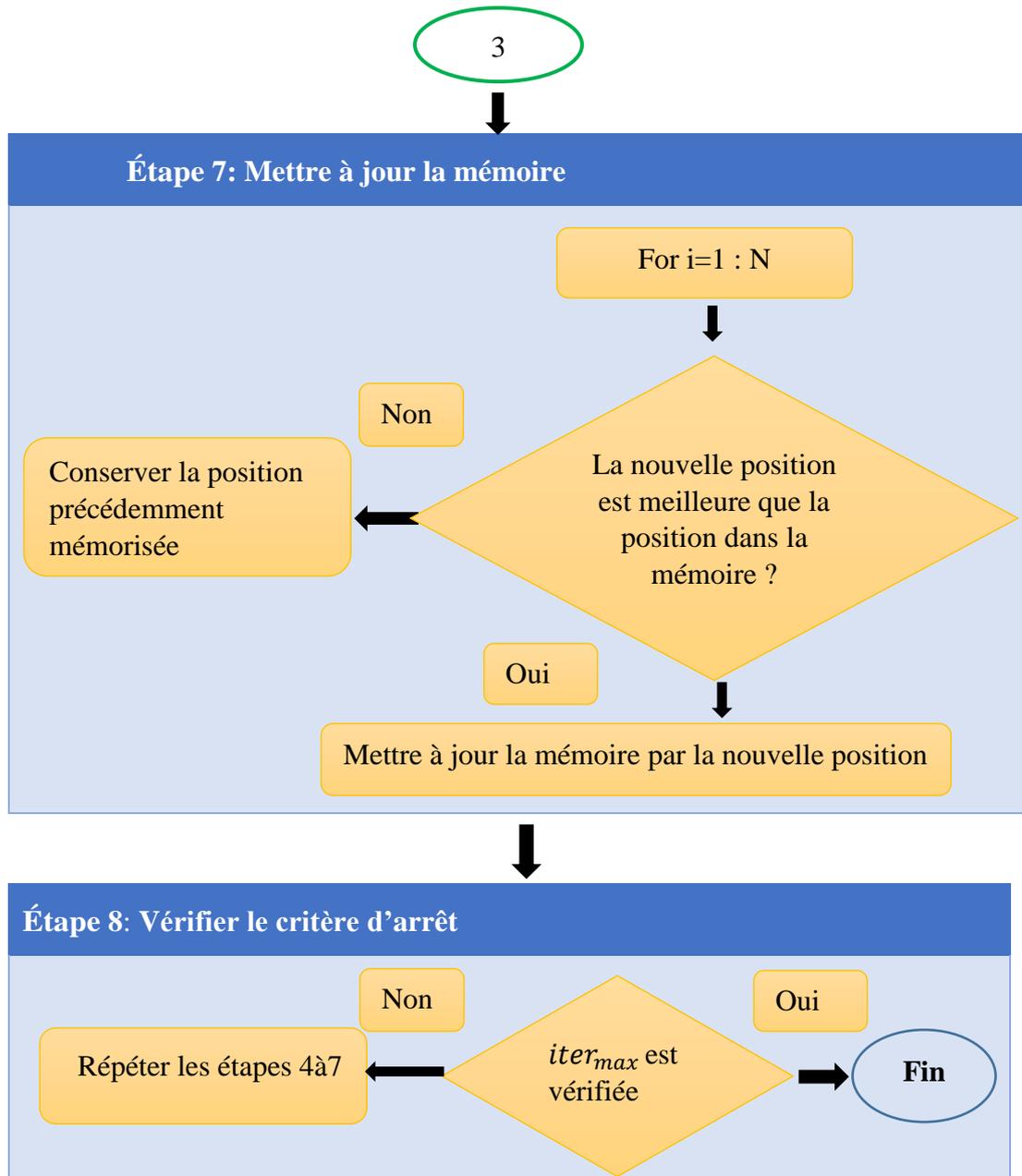


Figure III.3 : Organigramme de l’algorithme CSA pour l’optimisation.

III.7. Algorithme de recherche du corbeau améliorée

Supposons qu'à l'itération (*iter*), le corbeau *i* choisit le corbeau *k* pour explorer la cachette de ce dernier selon la qualité de sa source de nourriture, cela en utilisant ses propres expériences sans tenir compte de la portée du vol avec la probabilité de choix $pb(k)$.

$$pb(k) = \frac{fitness(k)}{\sum_{i=1}^N fitness(i)} \tag{III.6}$$

Dans ce cas, deux états pourraient arriver :

État 1 : le corbeau i choisit le corbeau k avec une probabilité $pb(k)$ grande (parmi les corbeaux qui comportent des meilleures qualités de nourriture dans leurs cachettes) pour le suivre. Dans ce cas, la nouvelle position du corbeau i est obtenue comme suit :

$$x^{i,iter+1} = x^{i,iter} + ra_i \times (m^{k,iter} - x^{i,iter}) \text{ si } ri < pb(k) \quad (III.7)$$

ra_i : est une valeur aléatoire entre 0 et 1.

État 2 : Le corbeau i choisit le corbeau k avec une probabilité $pb(k)$ faible (le corbeau k n'a pas une meilleure qualité de nourriture dans sa cachette). En conséquence, le corbeau i se base sur la position du corbeau k pour changer de position dans le but d'intercepter un autre corbeau pour le suivre :

$$x^{i,iter+1} = x^{k,iter} + ra_i \times (m^{i,iter} - x^{k,iter}) \text{ si } ri > pb(k) \quad (III.8)$$

Par conséquent, les états 1 et 2 peuvent être exprimés comme suit :

$$x^{i,iter+1} = \begin{cases} x^{i,iter} + ra_i \times (m^{k,iter} - x^{i,iter}) & \text{si } r_i < pb(k) \\ x^{k,iter} + ra_i \times (m^{i,iter} - x^{k,iter}) & \text{sinon} \end{cases} \quad (III.9)$$

$pb(k)$: la probabilité de choix de la solution k

III.8. La méthodologie de la CSA _Améliorée pour l'optimisation

Les étapes de l'algorithme CSA_ améliorée de 1 à 7 sont les mêmes que celles décrites dans la section III. 6.

Étape 8 : Évaluer la fonction fitness

Les fitness de toutes les solutions sont calculés

Étape 9 : Calculer la probabilité de choix

Le corbeau i choisit un corbeau k aléatoirement pour le suivre, la probabilité de choix $pb(k)$ est calculée selon l'équation (III.6).

Étape 10 : Générer une nouvelle position

Les nouvelles positions sont générées selon l'équation (III.9).

Étape 11 : 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 12 : Évaluer la fonction fitness des nouvelles positions

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

Étape 13 : Mettre à jour la mémoire

Les corbeaux mettent à jour leur mémoire comme suit :

$$m^{i,iter+1} = \begin{cases} x^{i,iter+1} & \text{if } f(x^{i,iter+1}) \text{ est meilleure que } f(m^{i,iter}) \\ m^{i,iter} & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

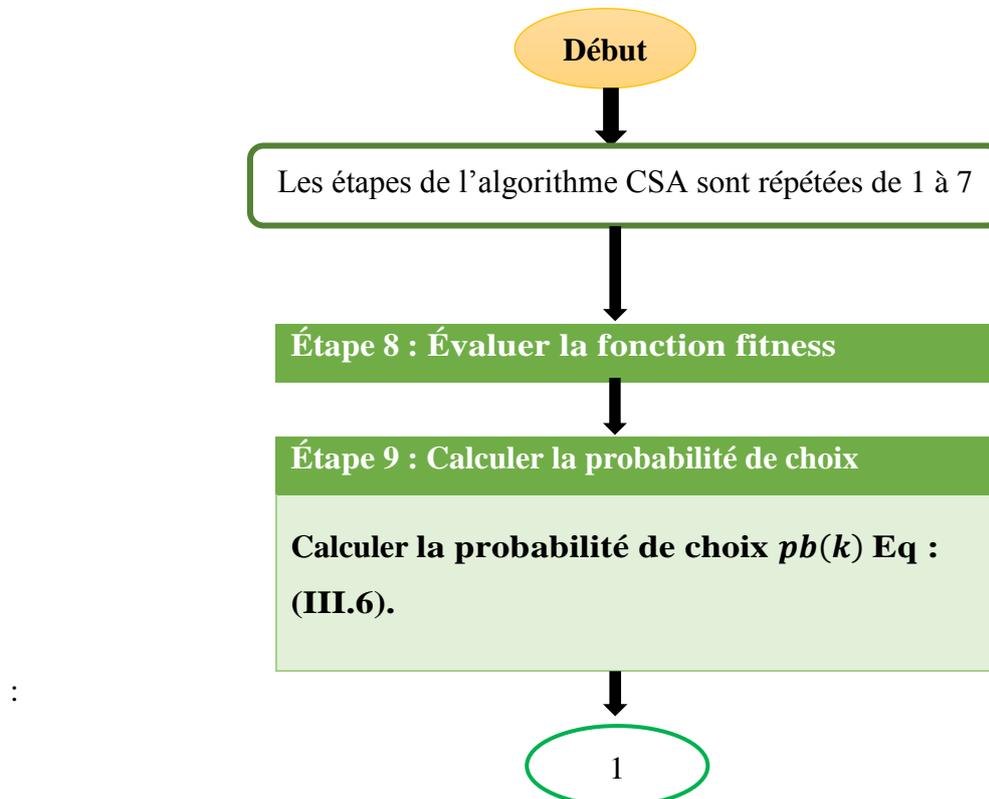
Ou $f(\cdot)$ désigne la valeur de la fonction objective.

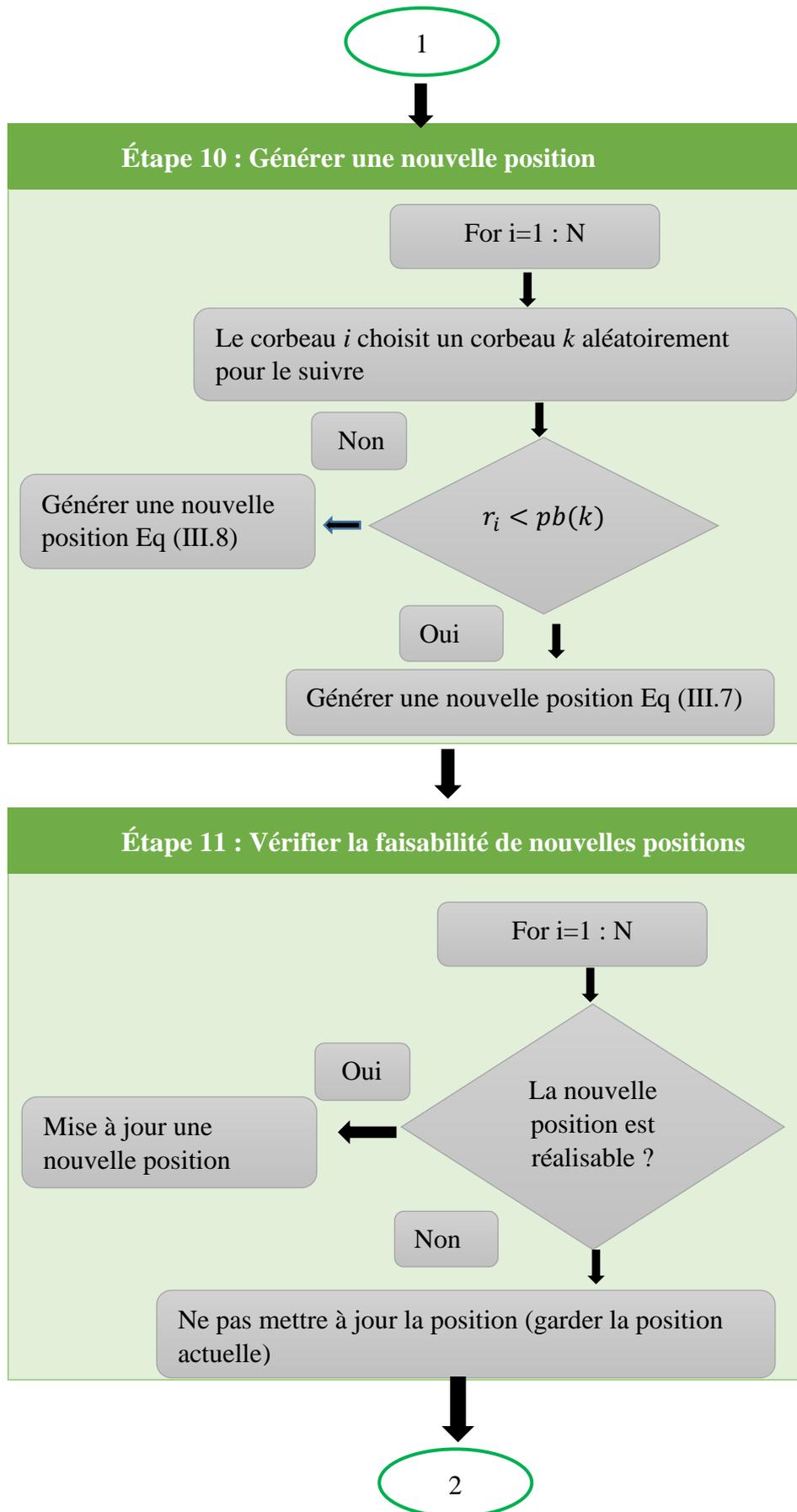
On voit que si la valeur de la fonction fitness de la nouvelle position d'un corbeau est meilleure que celle de la position mémorisée, le corbeau met à jour sa mémoire par la nouvelle position sinon le corbeau conserve la position précédemment mémorisée.

Étape 14 : Vérifier le critère d'arrêt

Les étapes 4-13 sont répétées jusqu'à ce qu'iter_max soit atteint. Lorsque le critère d'arrêt est atteint, la meilleure position de la mémoire en termes de valeur de fonction objectif est rapportée comme la solution du problème d'optimisation.

III.8.1. Organigramme de l'algorithme de recherche du corbeau améliorée (CSA améliorée) pour l'optimisation





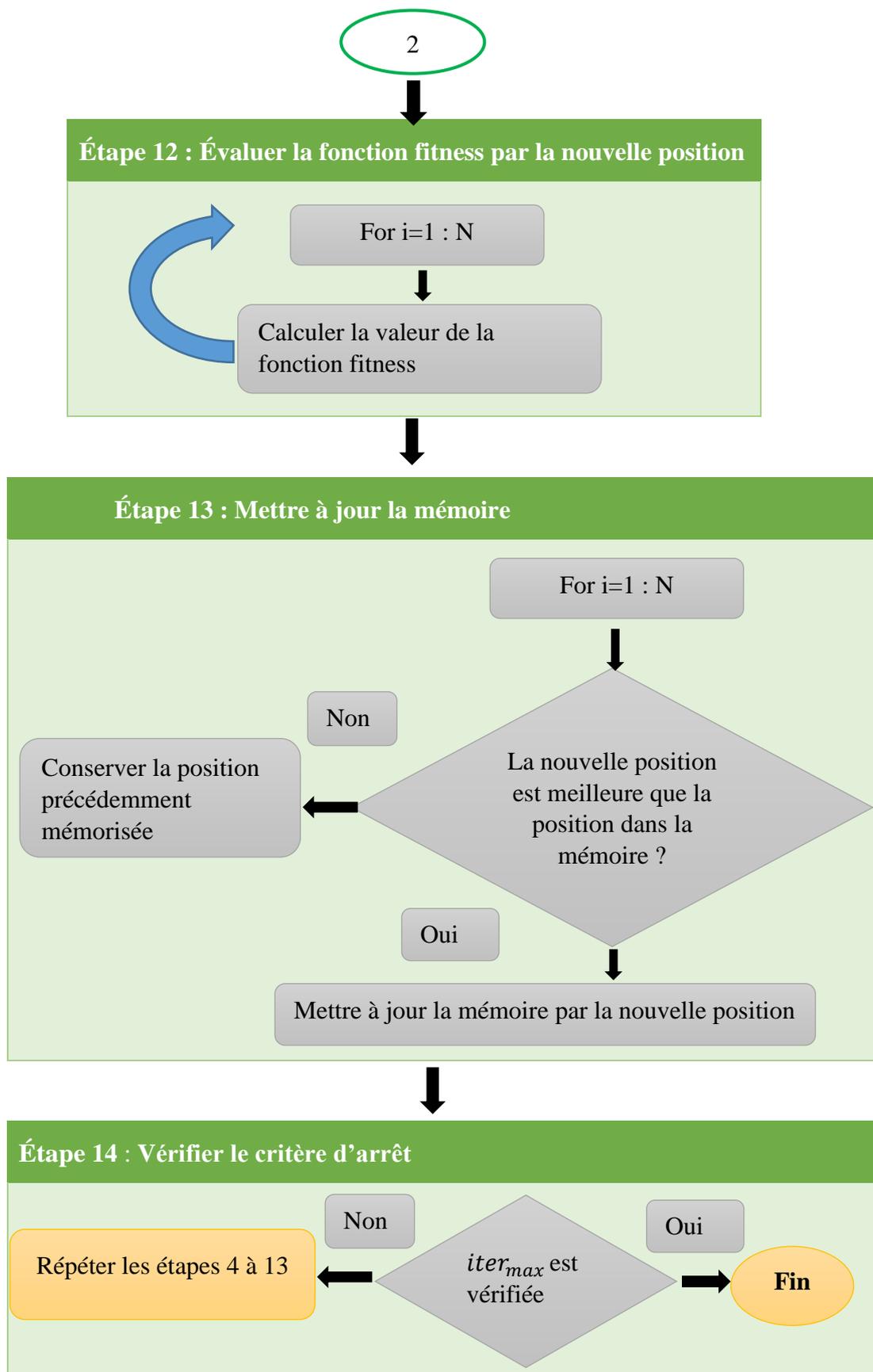


Figure III.4 : Organigramme de l’algorithme CSA _Améliorée pour l’optimisation.

III.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté tout d'abord une vue générale sur le comportement des corbeaux et on a détaillé les mécanismes de l'algorithme CSA et CSA _améliorée et leurs paramètres.

Pour mettre en œuvre avec succès un algorithme CSA simple, il faut choisir avec soin les trois paramètres suivants : Taille de la population (N), nombre maximale d'itération (***iter_{max}***), la portée du vol (***fl***) et la probabilité de conscience (***AP***).

Un ensemble des tests se fera dans le prochain chapitre pour prouver la performance de cette méthode dans la résolution du problème de dispatching économique sur deux réseaux électriques de test.

Chapitre IV

Simulation et résultats de validation

IV.1. Introduction

Pour mettre en évidence l'efficacité de la méthode de Recherche du Corbeau améliorée (CSA_ Améliorée), nous procédons dans ce chapitre à la résolution du problème de dispatching économique pour deux types de réseaux électriques 06-unités et 15-unités de production. Les résultats de simulation sont validés en appliquant les deux méthodes CSA de base et CSA_ Améliorée. Une comparaison des résultats de simulation avec des autres méthodes dans l littérature a été accompli en considérant les mêmes contraintes pratiques des générateurs et les mêmes réseaux de test.

L'algorithme proposé a été développée sous l'environnement Matlab 2013 version 8.1 en utilisant un ordinateur doté d'un processeur Intel ® core 1.70 GHz et une mémoire vive de 4GO.

IV. 2. Simulation et les résultats de validation

Le problème de dispatching optimal de la puissance active a été résolu par l'application de la méthode de CSA et sa version améliorée CSA_ Améliorée.

Après la compréhension et l'implémentation de l'algorithme CSA et sa version améliorée CSA_ Améliorée dans le code de calcul, une simulation a été exécuté avec l'introduction des données du réseau de test. Deux réseaux électriques sont étudiés, Le premier est un réseau à petite échelle de système à 6 unités de production et le second est un réseau à moyenne échelle de système à 15 unités de production.

IV.3. Tests d'application : Minimisation du coût total de production de l'énergie électrique

Les tests ont été consacré à l'application de l'algorithme CSA pour la minimisation du coût total de production de l'énergie électrique. Dans ces tests, nous intéressons à l'application des deux algorithmes méta-heuristique tel que l'algorithme CSA de base et la nouvelle variante de l'algorithme par la version améliorée (CSA _Améliorée), les résultats trouvés confirment l'importance de l'amélioration du processus d'optimisation de point de vue qualité de solution pour le CSA _Améliorée.

Remarque

- À cause de la nature méta-heuristique des méthodes proposées, on trouve à chaque exécution d'un algorithme, les valeurs optimales sont différentes de celle d'une autre exécution.
- La base de données (Coefficient du coût, Les limites de la puissance active, Matrice carrée β_{ij} , vecteur ligne β_{0i} , un scalaire β_{00} , la puissance demandée total) pour le réseau 6 unités de production et 15 unités de production est dans l'annexe.

IV.3.1. Application de l'algorithme CSA sur le réseau de 6 unités de production

IV.3.1.1. Choix des paramètres de CSA

Nous avons fixé les paramètres de l'algorithme de CSA comme suit :

- La Taille du corbeau : $N=100$
- Nombre d'itération maximale : $iter_{max}=200$
- La portée de vol : $fl=0.8$
- Probabilité de conscience : $AP=0.2$

IV.3.1.2. Résultats de simulations

A. Solution optimale et vérification de la contrainte d'égalité

La contrainte d'égalité $p_{gi} - p_{Dt} - p_l = 0$ est vérifiée qui montre dans le Tableau ci-dessous :

Tableau IV.1 : Résultats de simulation de 6 unités de production.

La puissance active totale générée (MW)	1275.7643
Le coût total (\$/h)	15446.1773
Les pertes actives totales (MW)	12.7643
La contrainte d'égalité (MW)	-0.0355

B. Vérification de la contrainte d'inégalité

La figure (IV.1) et le tableau (IV. 2) montrent la répartition optimale de la puissance active générée par la méthode CSA, la contrainte d'inégalité $p_{gi}(min) \leq p_{gi} \leq p_{gi}(max)$ est vérifiée.

Tableau IV.2 : Répartition optimale des puissances générées - 06 unités

N_g	Unité 1	Unité 2	Unité 3	Unité 4	Unité 5	Unité 6
p_{gmin} (MW)	100	50	80	50	50	50
p_{gi} (MW)	454.7008	170.2953	256.8640	125.5964	178.1666	90.1057
p_{gmax} (MW)	500	200	300	150	200	120

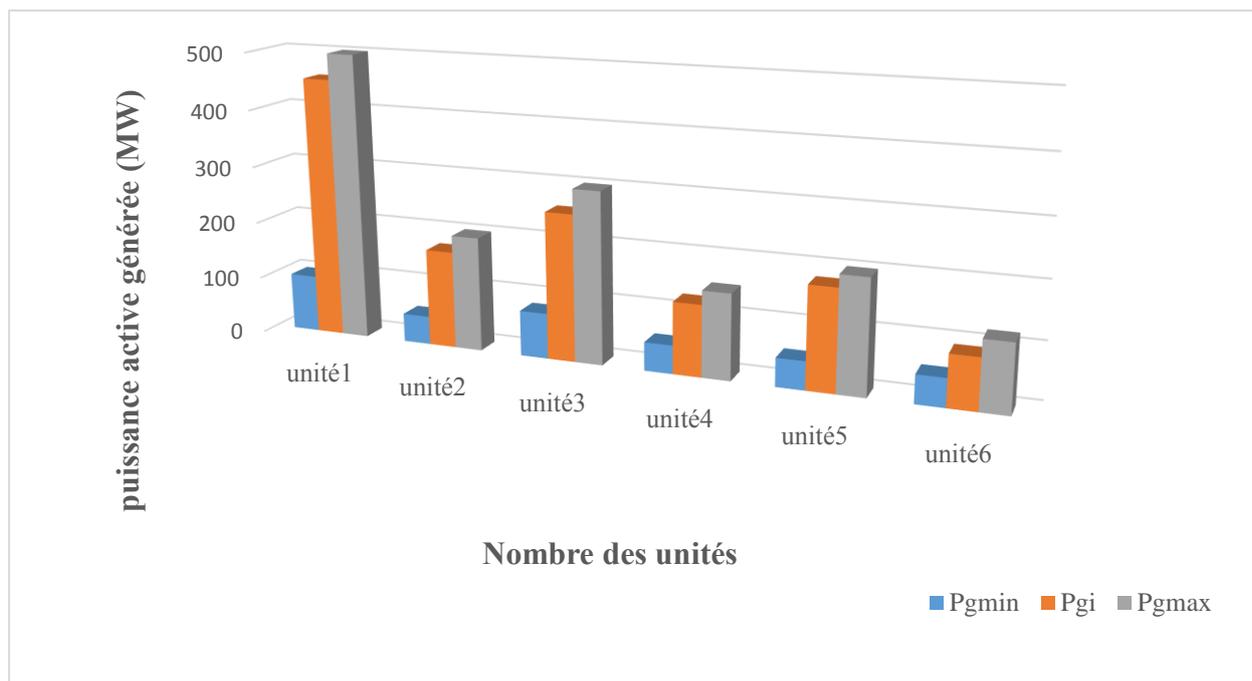


Figure IV.1: Répartition optimale de la puissance active générée – 06 unités de production.

C. Convergence de l’algorithme CSA pour la résolution du DE

La variation du coût total de génération est représentée dans la figure (IV.2), cette figure représenté la caractéristique de convergence de l’algorithme CSA et montre la performance en termes de convergences de la technique de l’algorithme CSA.

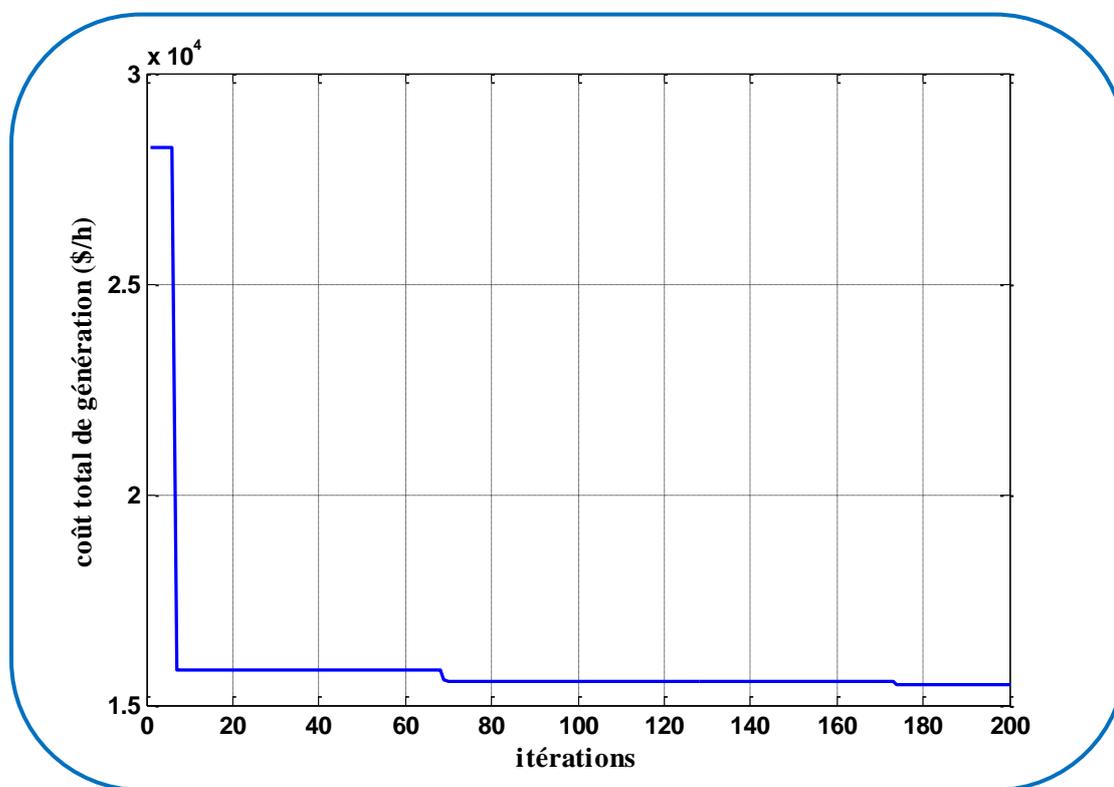


Figure IV.2: Caractéristique de convergence de l’algorithme CSA pour un réseau 06 unités

Interprétation des résultats

La figure (IV.2) illustre la caractéristique de convergence de l'algorithme de CSA qui montre l'évolution de la fonction coût total du combustible (fonction objectif) en fonction des nombres des itérations. On remarque que l'algorithme CSA converge vers la meilleure solution dans un nombre des itérations 180, donc nous notons qu'une vitesse de convergence rapide est assignée pour cette application vers la meilleure solution.

On note dans la figure (IV.1) que les puissances actives pour les 6 générateurs sont dans leurs limites de fonctionnement (minimales et maximales).

IV.3.2. Application de l'algorithme CSA _Amélioré sur le réseau de 6 unités de production

IV.3.2.1. Choix des paramètres de CSA _Améliorée

Pour vérifier et valider les performances de la méthode CSA _Améliorée, une étude comparative est proposée. Il s'agit d'une comparaison élaborée entre la méthode CSA et CSA _Améliorée, à cette fin, nous avons donné les mêmes paramètres pour le CSA_ Améliorée et le CSA de base.

IV.3.2.2. Résultats de simulations

A. Solution optimale et vérification de la contrainte d'égalité

La contrainte d'égalité $p_{gi} - p_{Dt} - p_l = 0$ est vérifiée qui montre dans le Tableau ci-dessous :

Tableau IV.3 : Résultats de simulation de 6 unités de production

La puissance active totale générée (MW)	1275.3541
Le coût total (\$/h)	15443.4948
Les pertes actives totales (MW)	12.3541
La contrainte d'égalité (MW)	$-2.7 \cdot 10^{-3}$

B. Vérification de la contrainte d'inégalité

La figure (IV.3) et le tableau (IV. 4) montrent la répartition optimale de la puissance active générée par la méthode CSA_ améliorée, la contrainte d'inégalité $p_{gi}(min) \leq p_{gi} \leq p_{gi}(max)$ est vérifiée.

Tableau IV.4 : Répartition optimale des puissances générées - 06 unités.

N_g	Unité 1	Unité 2	Unité 3	Unité 4	Unité 5	Unité 6
P_{gmin} (MW)	100	50	80	50	50	50
P_{gi} (MW)	449.6131	176.0002	260.7597	136.7458	158.4035	93.8291
P_{gmax} (MW)	500	200	300	150	200	120

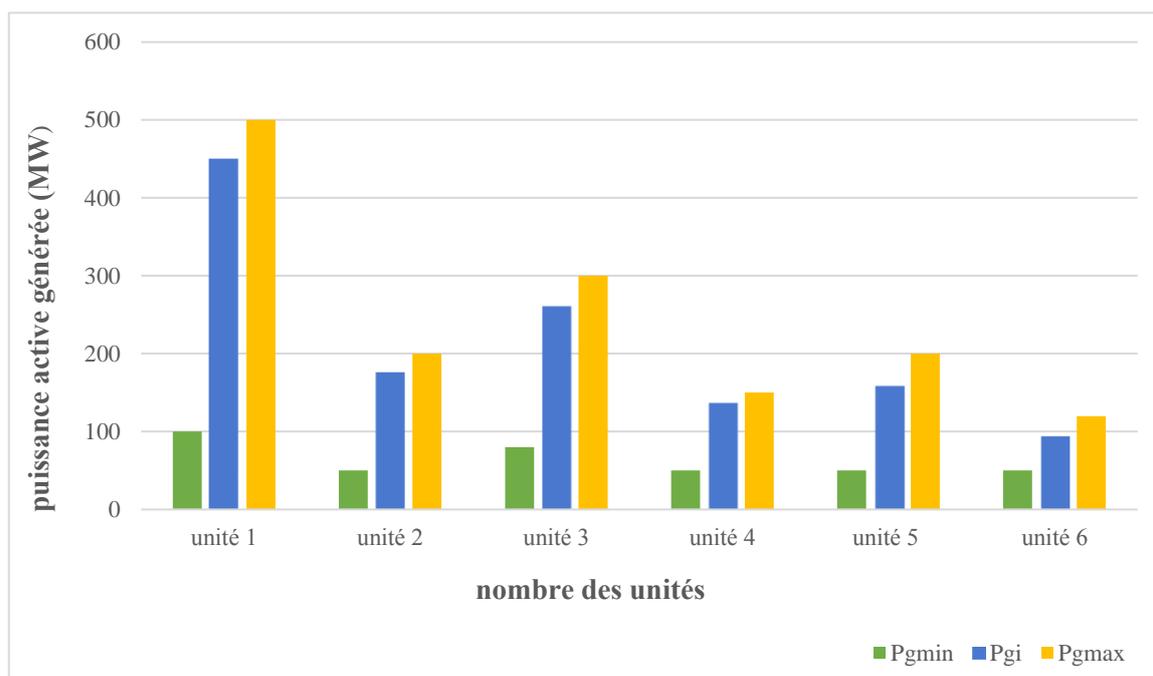


Figure IV.3:Répartition optimale de la puissance active générée – 06 unités de production.

C. Convergence de l’algorithme CSA_ Améliorée pour la résolution du DE

La variation du coût total de génération en fonction des nombres des itérations est représentée dans la figure (IV.4), cette dernière montre la convergence de l’algorithme CSA_ Améliorée et décrit les performances en termes de convergences de la technique de l’algorithme CSA_ Améliorée.

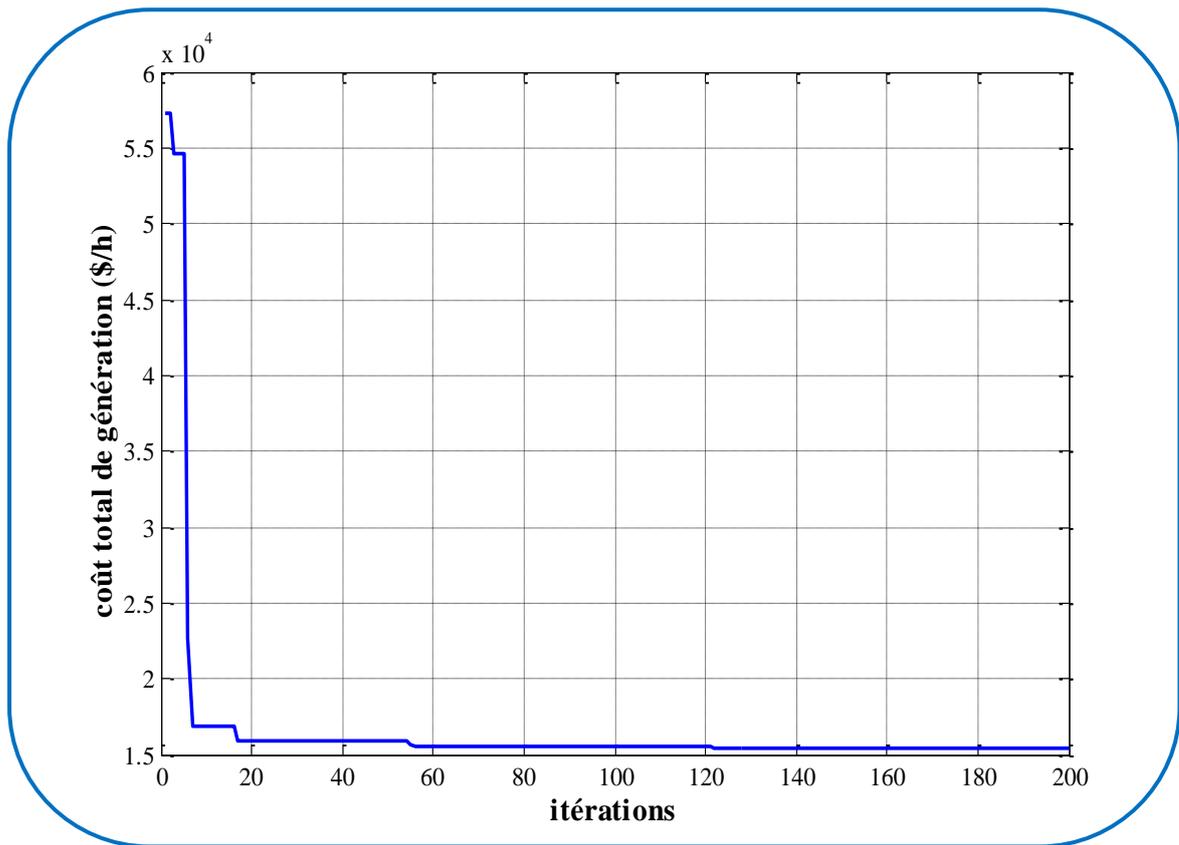


Figure IV.4: Caractéristique de convergence de l'algorithme CSA_ améliorée pour un réseau 06 unités

Interprétation des résultats

La figure (IV.4) illustre la caractéristique de convergence de l'algorithme de CSA qui montre l'évolution de la fonction coût total du combustible (fonction objectif) en fonction des nombres des itérations. On remarque que l'algorithme CSA converge vers la meilleure solution dans un nombre des itérations 60, donc nous notons qu'une vitesse de convergence rapide est assignée pour cette application vers la meilleure solution.

On note dans la figure (IV.3) que les puissances actives pour les 6 générateurs sont dans leurs limites de fonctionnement (minimales et maximales).

D. Comparaison entre CSA et CSA _Améliorée

Après l'exécution de 30 essais (30 runs de l'algorithme) et après la convergence des algorithmes CSA et CSA_ Améliorée nous obtenons la valeur optimale (minimale) du coût total de production (pour chaque essai). Nous obtenons aussi la valeur minimale, moyenne et maximale des 30 essais. Le tableau (IV.5) montre la comparaison du coût optimal minimale, coût optimal moyen et coût optimal maximal des 30 essais. On remarque que l'algorithme de CSA_ Améliorée donne des meilleurs résultats que l'algorithme de CSA.

Tableau IV. 5: Comparaison des coûts pour CSA et CSA _Améliorée pour le réseau test 6 unités de production.

Coût total de génération (\$/h)			
	Min	Moyenne	Max
CSA	15446.1773	15455.7210	15485.7162
CSA _Améliorée	15443.4948	15452.6891	15474.1338

Les résultats obtenus en utilisant l’algorithme CSA sont comparés à ceux obtenus en utilisant l’algorithme CSA _Améliorée cette étude comparative est rapportée dans le tableau (IV.6) qui montre la répartition optimale de la puissance active générée de chaque centrale et les pertes actives dans les lignes de transmission, le coût optimal total.

Tableau IV.6: Comparaison des résultats obtenus par CSA _Améliorée avec CSA pour un réseau 06 unités.

Variables du système	CSA	CSA_ Améliorée
Pg1	454.7008	449.6131
Pg2	170.2953	176.0002
Pg3	256.8640	260.7597
Pg4	125.5964	136.7458
Pg5	178.1666	158.4035
Pg6	90.1057	93.8291
Puissance générer totale (MW)	1275.7643	1275.3541
Les pertes actives totales (MW)	12.7643	12.3541
Le coût total (\$/h)	15446.1773	15443.4948
$\Delta P = \sum(Pgi) - Pl - Pdt$ (MW)	$-3.55 \cdot 10^{-2}$	$-2.7 \cdot 10^{-3}$
Le temps d’exécution (seconds)	2.403660	10.012837

E. Convergence de l’algorithme CSA et CSA _Améliorée pour la résolution du DE

Dans ce qui suit, nous avons évalué la fonction du coût total de génération pour les deux algorithmes.

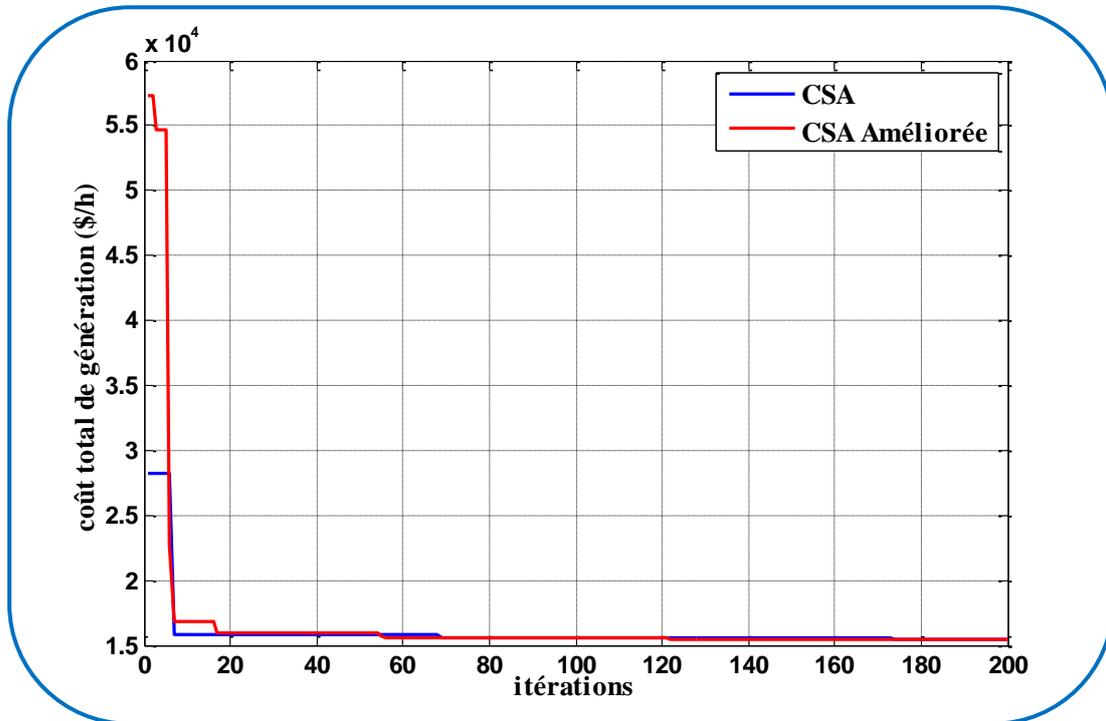


Figure IV.5 : Comparaison des convergences du CSA avec CSA_ Améliorée pour un réseau 06 unités (30 essais).

Interprétation des résultats

La figure (IV.5) représente les variations de la fonction du coût total de génération (fonction objectif) en fonction des nombres des itérations qui montrent visuellement que l’algorithme de CSA initialement commence avec une solution meilleure que celle de l’algorithme CSA_ Améliorée. Malgré ça, l’algorithme CSA_ Améliorée converge vers une solution meilleure que celle de l’algorithme CSA, ce qu’il explique que la méthode CSA_ Améliorée est plus performante et converge vers des solutions meilleures que celles du CSA. Cela prouve la bonne qualité de la solution de CSA_ Améliorée par rapport l’algorithme CSA.

Les résultats de tableau (IV.6) montre que le coût total optimal trouvé par la méthode CSA_ Améliorée qui est égale 15443.4948 (\$/h) et de valeur réduite par rapport à celle trouvée par l’algorithme CSA qui est de l’ordre 15446.1773 (\$/h). Les pertes actives dans les lignes de transmission trouvé par CSA qui de l’ordre 12.7643MW sont supérieures à celles trouvé par CSA_ Améliorée de l’ordre 12.3541MW, l’erreur de calcul pour la contrainte d’égalité de CSA_ Améliorée est plus petite que CSA, ce qui explique l’efficacité de l’algorithme CSA_ Améliorée.

Les puissances optimales générées ne dépassent pas les limites de fonctionnement des générateurs, ça veut dire que la contrainte d'inégalité est vérifiée.

F. Comparaison des résultats obtenus CSA et CSA _Améliorée par les autres méthodes

Pour avoir une bonne appréciation de notre solution, nous avons comparé la méthode (CSA) et sa version améliorée (CSA _Améliorée) avec les autres méthodes métaheuristiques : optimisation par les essaims de particules (PSO)[NOM08], algorithme génétique (AG)[NOM08], Evolution Différentielle (DE)[NOM08] et système immunitaire artificielle (AIS)[PAN07], Ces résultats sont montrés dans le Tableau (IV.7). Pour l'évaluation de chaque méthode, nous avons utilisé les variables du système.

Tableau IV.7: Résultats de simulation par différentes méthodes.

Variable du système	CSA	CSA _Améliorée	PSO	AG	DE	AIS
Pg1	454.7008	449.6131	447.497	474.807	447.744	458.2904
Pg2	170.2953	176.0002	173.322	178.636	173.407	168.0518
Pg3	256.8640	260.7597	263.475	262.209	263.411	262.5175
Pg4	125.5964	136.7458	139.059	134.283	139.076	139.0604
Pg5	178.1666	158.4035	165.476	151.904	165.364	178.3936
Pg6	90.1057	93.8291	87.128	74.181	86.944	69.3416
Les pertes actives(MW)	12.7643	12.3541	12.958	13.002	12.957	12.6550
Puissance générer total (MW)	1275.7643	1275.3541	1275.960	1276.030	1275.947	1275.655
Coût total (\$/h)	15446.1773	15443.4948	15450.000	15459.000	15449.766	15448.0
$\Delta P = \sum(P_{gi}) - P_l - P_{dt}$ (MW)	$-3.55 \cdot 10^{-2}$	$-2.7 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-3}$	$8 \cdot 10^{-3}$	$-1 \cdot 10^{-2}$	0

Interprétation des résultats

D'après le tableau (IV.7), on remarque premièrement que le coût optimal constaté par la méthode CSA_ Améliorée est égale 15443.4948 (\$/h), il est meilleur par rapport à celui fourni par les autres méthodes (CSA, PSO, AG, DE, AIS) d'ordre 15446.1773, 15451.0, 15451.0, 15478.7, 15448.0 respectivement, et les pertes total dans les lignes de transmission de la méthode CSA_ Améliorée est de l'ordre 12.3541 MW et la contrainte d'équilibre de puissance est $-2.7 \cdot 10^{-3}$ MW

sont inférieures à celles des autres méthodes. La puissance générée totale à partir des centrales du système électrique contient six unités de production est 1275 MW.

Nous avons constaté que notre méthode de CSA _Améliorée a présenté des meilleures performances par rapport aux autres méthodes présentées dans les littératures. CSA améliorée a présenté une meilleure capacité d'exploitation de l'espace de recherche par rapport au CSA de base.

IV.3.3. Application de l'algorithme CSA sur le réseau de 15 unités de production

IV.3.3.1. Choix des paramètres de CSA

Nous avons fixé les paramètres de l'algorithme de CSA comme suit :

- La Taille du corbeau : **N=200**
- Nombre d'itération maximale : **$iter_{max} = 300$**
- La portée de vol : **$fl=0.8$**
- Probabilité de conscience : **$AP=0.2$**

IV.3.3.2. Résultats de simulations

A. Solution optimale et vérification de la contrainte d'égalité

La contrainte d'égalité $p_{gi} - p_{Dt} - p_l = 0$ est vérifiée qui montre dans le Tableau ci-dessous :

Tableau IV.8: Résultats de simulation de 15 unités de production.

La puissance active totale générée (MW)	2663.8326
Le coût total (\$/h)	33023.6508
Les pertes actives totales (MW)	33.8326
La contrainte d'égalité (MW)	0.02833

B. Vérification de la contrainte d'inégalité

La figure (IV.6) montre la répartition optimale de la puissance active générée par la méthode CSA, La contrainte d'inégalité $p_{gi}(min) \leq p_{gi} \leq p_{gi}(max)$ est vérifiée.

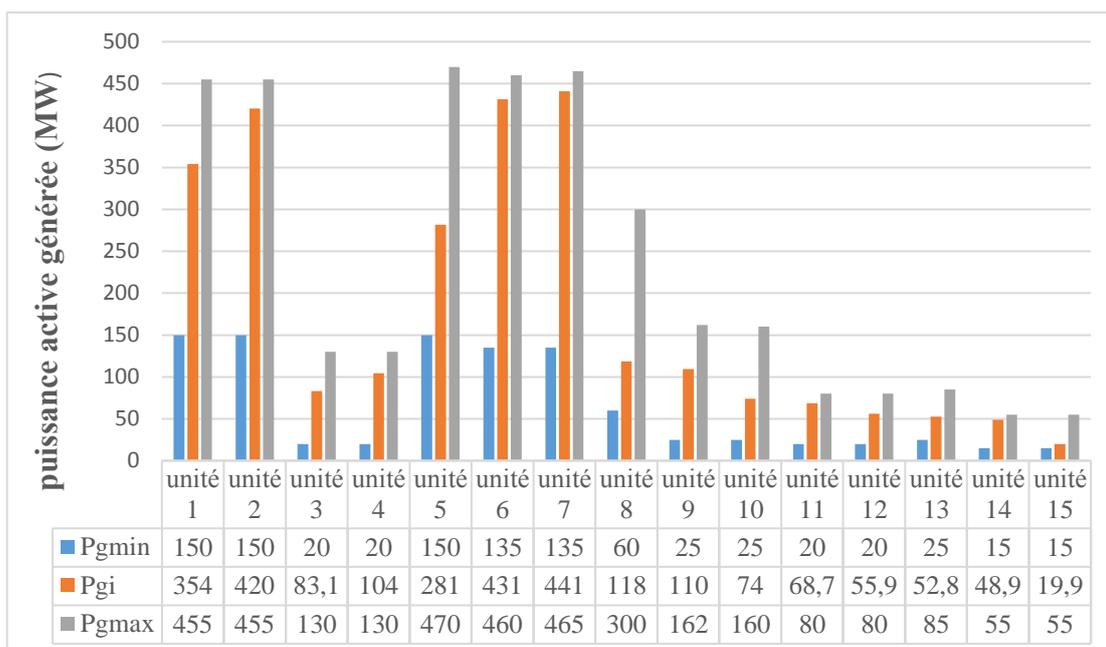


Figure IV.6: Répartition optimale de la puissance active générée – 15 unités.

C. Convergence de l'algorithme CSA pour la résolution du DE

La figure (IV.7) illustre l'évolution du coût de production en fonction du nombre des itérations.

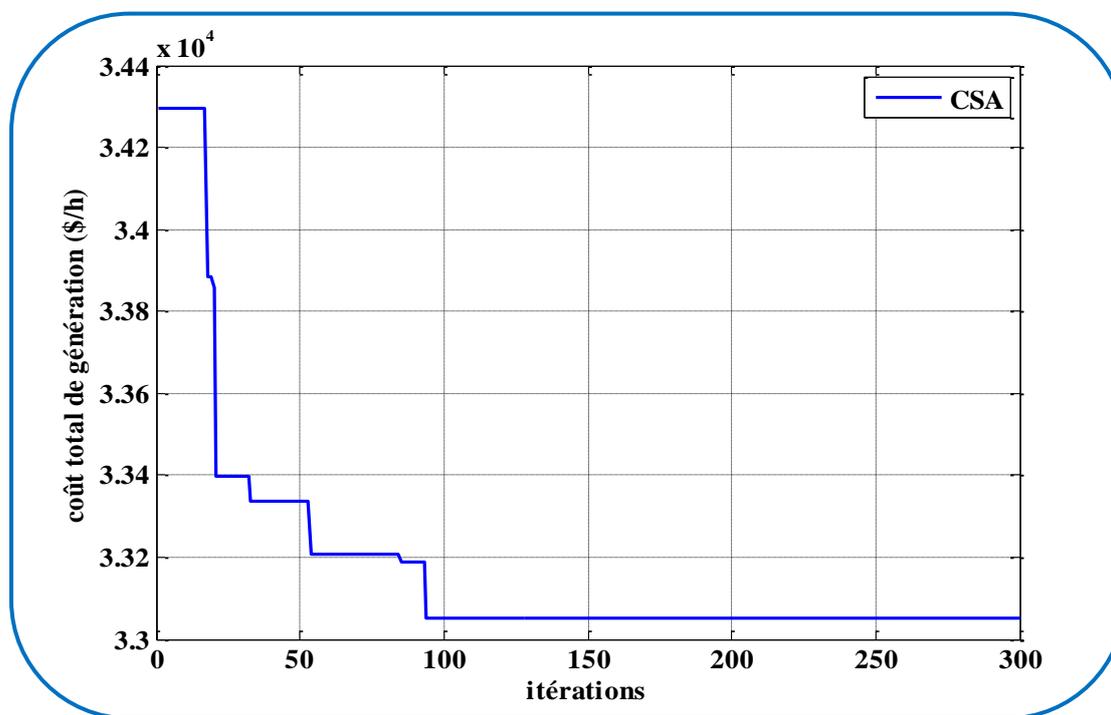


Figure IV.7: Caractéristique de convergence de l'algorithme CSA pour un réseau 15 unités.

Interprétation des résultats

La figure (IV.7) montre la caractéristique de convergence de l’algorithme CSA qui montre l’évolution de la fonction totale de coût de génération (fonction objectif) en fonction des nombres des itérations. On remarque que la vitesse de convergence est assignée à l’itération 100 vers la meilleure solution optimale.

On note dans la figure (IV.6) que les puissances actives pour les 15 générateurs sont dans leurs limites de fonctionnement (minimales et maximales).

IV.3.4. Application de l’algorithme **CSA _Amélioré** sur le réseau de 15 unités de production

Les paramètres de AP , fl , $iter_{max}$ et N réglés à 0.2, 0.8, 300 et 200 respectivement.

IV.3.4.1. Résultats de simulations

A. Solution optimale et vérification de la contrainte d’égalité

La contrainte d’égalité $p_{gi} - p_{Dt} - p_l = 0$ est vérifiée qui montre dans le Tableau ci-dessous :

Tableau IV.9: Résultats de simulation de 15 unités de production.

La puissance active totale générée (MW)	2663.8620
Le coût total (\$/h)	32927.4387
Les pertes actives totales (MW)	33.8620
La contrainte d’égalité (MW)	-0.0381

B. Vérification de la contrainte d’inégalité

La figure (IV.8) montre la répartition optimale de la puissance active générée par la méthode CSA_ Améliorée, La contrainte d’inégalité $p_{gi}(min) \leq p_{gi} \leq p_{gi}(max)$ est vérifiée.

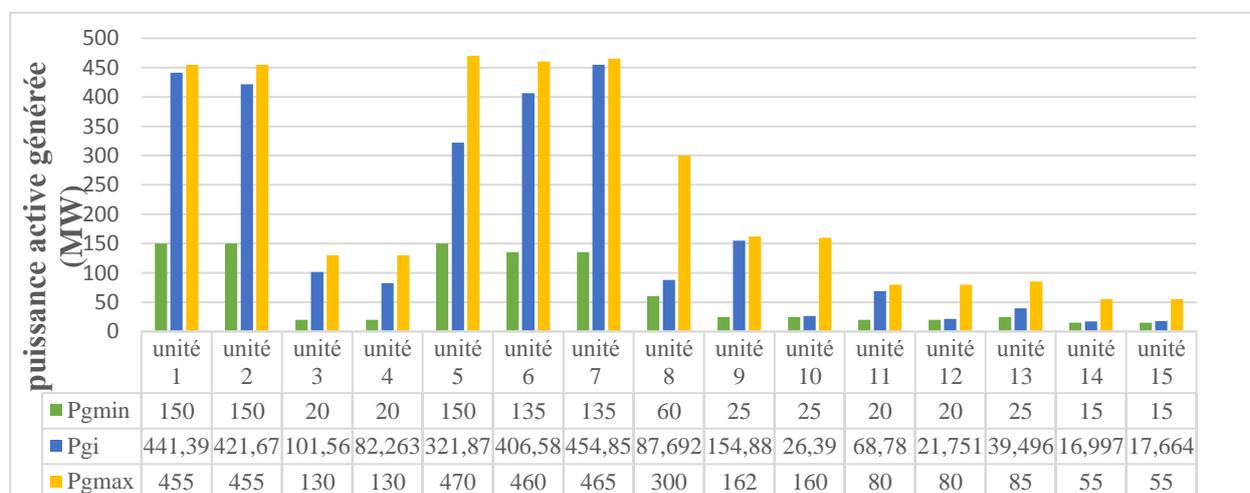


Figure IV.8 : Répartition optimale de la puissance active générée – 15 unités

C. Convergence de l’algorithme CSA_ Améliorée pour la résolution du DE

La variation du coût total de génération est représentée dans la figure (IV.9), cette figure représenté la caractéristique de convergence de l’algorithme CSA_ Améliorée.

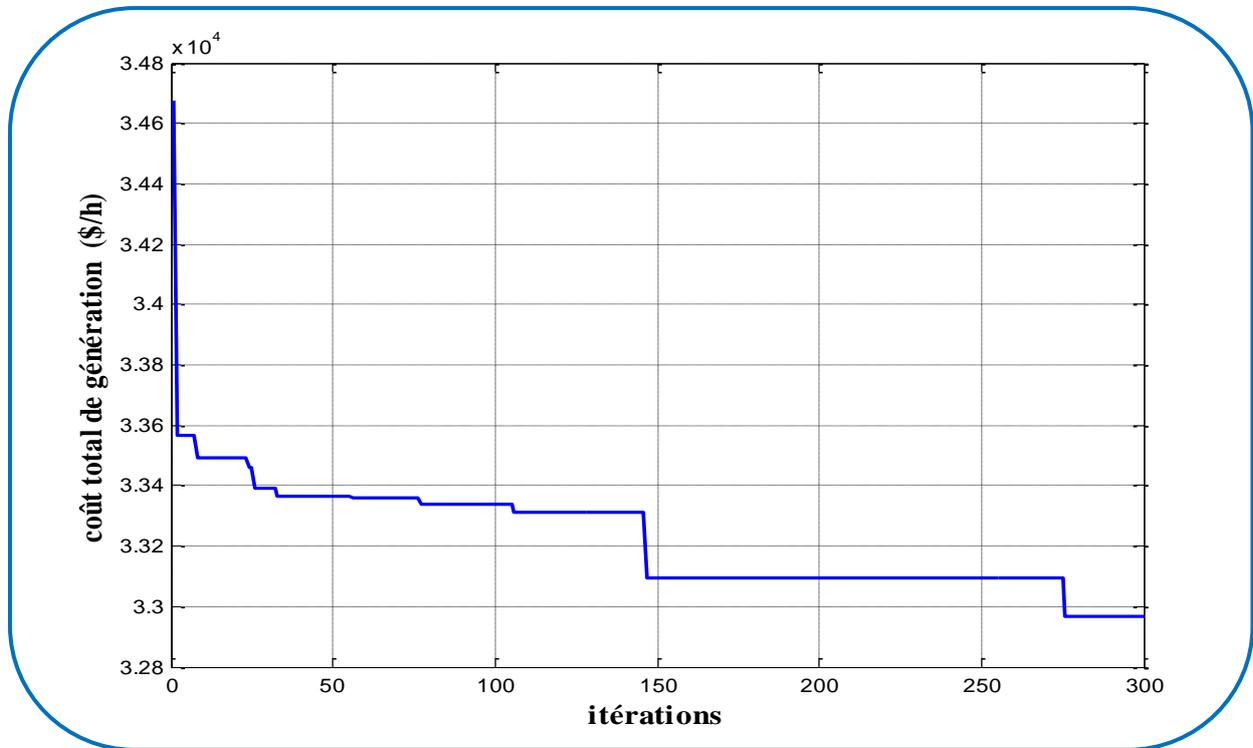


Figure IV.9 : Caractéristique de convergence de l’algorithme CSA_ Améliorée pour un réseau 15 unités.

Interprétation des résultats

La figure (IV.9) illustre la caractéristique de convergence de l’algorithme CSA_ Améliorée qui montre l’évolution de la fonction coût total du combustible (fonction objectif) en fonction des nombres des itérations. On remarque que l’algorithme CSA converge vers la meilleure solution dans un nombre des itérations 275, donc nous notons qu’une vitesse de convergence rapide est assignée pour cette application vers la meilleure solution.

On note dans la figure (IV.8) que les puissances actives pour les 15 générateurs sont dans leurs limites de fonctionnement (minimales et maximales).

D. Comparaison entre CSA et CSA_ Améliorée

Les paramètres de AP , fl , $iter_{max}$ et N pour les deux algorithmes CSA et CSA_ Améliorée est réglés à 0.2, 0.8, 300 et 200 respectivement. Après la convergence des deux algorithmes. Nous obtenons la valeur minimale, moyenne et maximale des 30 essais. Le tableau (IV.10) montre la comparaison du coût optimal minimal, coût optimal moyen et coût optimal

maximal des 30 essais. On a obtenu des bons résultats de l'algorithme CSA _Améliorée par rapport à celui de l'algorithme CSA.

Tableau IV.10 : Comparaison des coûts pour CSA et CSA_ Améliorée pour le réseau test 15 unité de production.

Coût total de génération (\$/h)			
	Min	Moyenne	Max
CSA	33023.6508	33204.2221	33305.8017
CSA_ améliorée	32927.4387	33149.7571	33270.6651

Les résultats obtenus en utilisant l'algorithme CSA sont comparés à ceux obtenus en utilisant l'algorithme CSA _Améliorée cette étude comparative est rapportée dans le tableau (IV.11) qui montre la répartition optimale de la puissance active générée de chaque centrale par considération des pertes dans les lignes de transmission, le coût optimal total.

Tableau IV.11: Comparaison des résultats obtenus par CSA et CSA _Améliorée

Variables du système	CSA	CSA améliorée
Pg1	353.9688	441.3853
Pg2	420.4379	421.6679
Pg3	83.1270	101.5630
Pg4	104.3284	82.2628
Pg5	281.4661	321.8721
Pg6	431.3006	406.5753
Pg7	441.0300	454.8473
Pg8	118.4443	87.6919
Pg9	109.5439	154.8804
Pg10	74.0406	26.3901
Pg11	68.7130	68.7803
Pg12	55.9229	21.7507
Pg13	52.7542	39.4957
Pg14	48.8907	16.9967
Pg15	19.8926	17.6644
Puissance générer totale (MW)	2663.8326	2663.8620

Les pertes actives totales (MW)	33.8326	33.8620
$\Delta P = \sum(P_{gi}) - P_l - P_{dt}$ (MW)	0.02833	-0.0381
Le coût total (\$/h)	33023.6508	32927.4387
Le temps d'exécution (seconds)	26.206545	148.625060

E. Convergence de l'algorithme CSA et CSA_Améliorée pour la résolution du DE

Dans la figure (IV.10) nous avons évalué la fonction du coût total de génération pour les deux algorithmes (CSA et CSA_Améliorée).

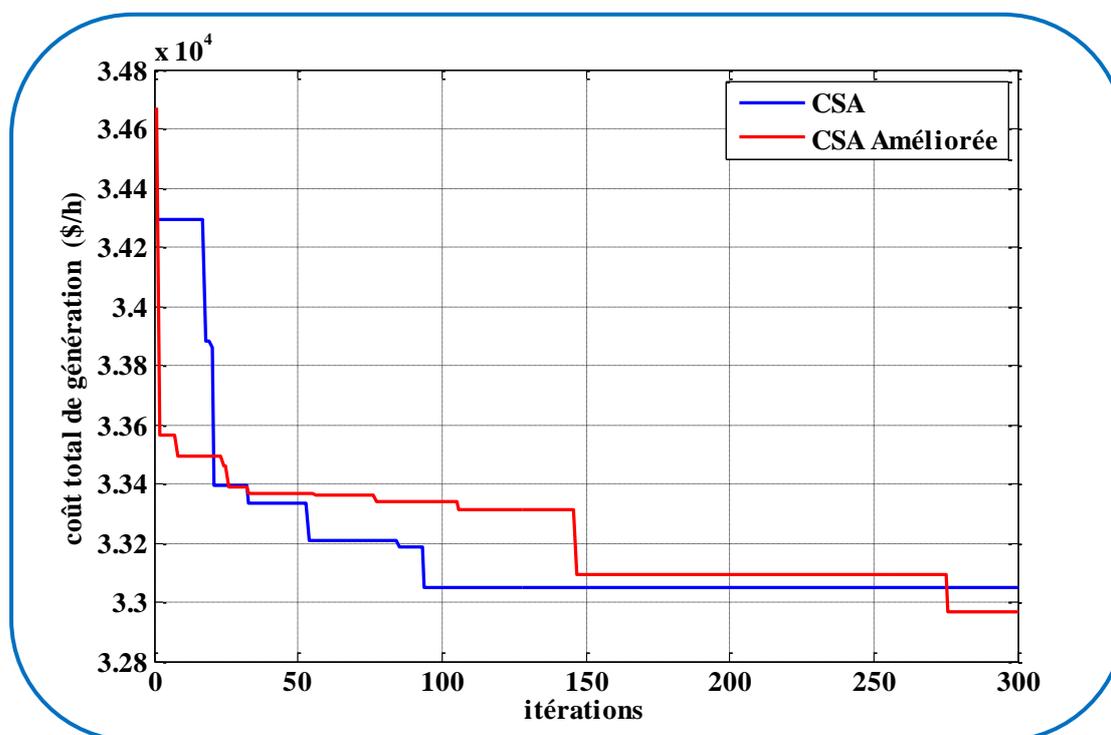


Figure IV.10 : Comparaison des convergences du CSA avec CSA_Améliorée pour un réseau 15 unités (30 essais)

Interprétation des résultats

La figure (IV.10) représente les variations de la fonction du coût total de génération (fonction objectif) on fonction des nombres des itérations. On note que la courbe de CSA_Améliorée peut converger vers l'optimum globale et plus rapidement que la courbe CSA que converger vers l'optimum locale, cela explique que l'algorithme de CSA_Améliorée efficace pour l'exploitation

de l'espace de recherche et contient bonne propriété de convergence et résultant en un faible coût de production.

Les résultats de simulation dans le tableau (IV.11) montrent l'efficacité de l'algorithme CSA _Améliorée. L'erreur de calcul pour la contrainte d'égalité de CSA _Améliorée est plus petite que CSA, et le coût total de la puissance générée trouvé par la méthode CSA_ Améliorée qui est égale 32927.4387 (\$/h) et plus réduite avec ceux trouvés par l'algorithme CSA qui est de l'ordre 33023.6508 (\$/h), et la valeur des pertes actives dans les lignes de transmission trouvées par CSA qui de l'ordre 33.8326MW sont inférieures et approchées à celles trouvées par CSA _Améliorée de l'ordre 33.8620MW. Les puissances optimales générées ne dépassent pas les limites de fonctionnement des générateurs, ça veut dire que la contrainte d'inégalité est vérifiée. Et dans ce dernier on conclut que l'algorithme CSA Améliorée proposée à une excellente qualité de solution.

F. Comparaison des résultats obtenus par CSA et CSA _Améliorée avec les autres méthodes

Le tableau (IV.12) montre une comparaison des variables du système entre l'algorithme CSA et sa version améliorée CSA_ Améliorée avec les autres méthodes : Algorithme génétique (AG)[PAR10], Optimisation par les essaims de particules (PSO)[KHA10].

Tableau IV.12: Résultats de simulation par différentes méthodes.

Variable du système	CSA	CSA_Amélioré	AG	PSO
Pg1	353.9688	441.3853	415.3108	450.298
Pg2	420.4379	421.6679	359.7206	440.000
Pg3	83.1270	101.5630	104.4250	118.118
Pg4	104.3284	82.2628	74.9853	122.484
Pg5	281.4661	321.8721	380.2844	270.000
Pg6	431.3006	406.5753	426.7902	284.040
Pg7	441.0300	454.8473	341.3164	430.000
Pg8	118.4443	87.6919	124.7867	151.274
Pg9	109.5439	154.8804	133.1445	111.394
Pg10	74.0406	26.3901	89.2567	75.112
Pg11	68.7130	68.7803	60.0572	50.456
Pg12	55.9229	21.7507	49.9998	44.658
Pg13	52.7542	39.4957	38.7713	47.317
Pg14	48.8907	16.9967	41.9425	37.184
Pg15	19.8926	17.6644	22.6445	35.090

Puissance générer total (MW)	2663.8326	2663.8620	2663.44	2667.40
Les pertes actives (MW)	33.8326	33.8620	38.2782	37.3329
Coût total (\$/h)	33023.6508	32927.4387	33113.00	33020.00
Contrainte d'égalité	$2.833.10^{-2}$	$-3.81.10^{-2}$	-4.96	$6.71.10^{-2}$

Interprétation des résultats

D'après le tableau (IV.12) nous concluons que le coût total le plus bas existe dans la méthode de recherche du corbeau améliorée (CSA_Améliorée) de l'ordre **32927.4387**(\$/h), sont inférieures de celles des autres méthodes (CSA, AG, PSO) d'ordre 33023.6508(\$/h), 33113.00(\$/h),33020.00(\$/h) respectivement , et les pertes total dans les lignes de transmission de la méthode CSA_ Améliorée est de l'ordre 33.8620 MW sont inférieure à celle des autres méthodes (AG et PSO) et très proche de la méthode CSA qui de l'ordre 33.8326 MW .La puissance générée totale à partir des centrales du système électrique contient quinze unités de production est 2663 MW. Nous avons constaté que notre méthode de CSA _Améliorée a présenté des meilleures performances par rapport aux autre méthodes présentées dans les littératures.

IV.4. Conclusion

Dans ce dernier chapitre on a appliqué l'algorithme de CSA et sa version améliorée (CSA_Améliorée) pour la résolution du problème de dispatching économique pour les deux types de réseaux électriques 06-unités et 15-unités de production avec considération des contraintes de fonctionnement des générateurs.

Sur la base des résultats de la simulation et après la comparaison entre les algorithmes CSA et CSA_Améliorée nous pouvons noter que le coût total optimal du combustible de la méthode (CSA_Améliorée) est plus réduit par rapport la méthode CSA de base par chacun des réseaux contenant six et quinze unités de production. La qualité de la solution, et l'efficacité du calcul montre la supériorité de la méthode (CSA _Améliorée). L'algorithme (CSA_Améliorée) a présenté une meilleure capacité d'exploitation de l'espace de recherche.

Bien que l'algorithme CSA_Améliorée a présente une meilleure performance par rapport à des autres méthodes, mais le temps de convergence est grand par rapport à la méthode de base c'est ce qui constitue un inconvénient. Enfin on peut conclure dans cette étude comparative que l'algorithme CSA _Améliorée peut être utilisé efficacement pour résoudre les autres problèmes d'optimisation.

Conclusion générale

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans ce mémoire nous avons discuté la résolution du problème de dispatching économique de l'énergie électrique à partir des unités de production pour obtenir un minimum de coût total. Ce problème a été résolu par des méthodes classiques et en raison de l'inefficacité de ces méthodes pour résoudre des problèmes complexes, on a exposé quelques méthodes évolutionnaires (métaheuristiques) inspiré de la nature et utilisés pour résoudre le problème de DE (considérant quelques complexités comme l'effets d'ouverture des vannes, contraintes due à l'effet rampe, contrainte des zones de fonctionnement prohibées, contrainte due à plusieurs types de combustible). Parmi les méthodes métaheuristique récemment développés nous avons choisi la méthode de Recherche du Corbeau (CSA) qui a été utilisée précédemment pour résoudre le problème de DE et nous avons essayé d'améliorer cette méthode avec une version modifié pour améliorer la qualité de solution de DE (CSA _Améliorée).

Dans la première phase de ce travail, on a appliqué la méthode de recherche du corbeau (CSA) et sa version améliorée (CSA _Améliorée) pour résoudre le problème de dispatching économique sur deux réseaux électriques de test : le premier contient 6 unités de production et le second dispose de 15 unités de production. Dans le but de montrer l'efficacité de l'algorithme de CSA_ Améliorée, nous avons proposé une étude comparative entre la méthode CSA et CSA _Amélioré sur les deux réseaux (6 et 15 unités). Les résultats de simulation sur les deux réseaux test ont été très satisfaisants quel que soit le changement des paramètres de l'algorithme, ces résultats ont montré la supériorité de la méthode CSA_Améliorée de sorte qu'elle a été capable d'exploiter les régions les plus prometteuses de l'espace de recherche. Les résultats de la méthode CSA_Améliorée ont été comparés avec une variété d'algorithmes connus et récents : optimisation par les essaims de particules (PSO), algorithme génétique (AG), évolution Différentielle (DE) et système immunitaire artificielle (AIS) où il a été observé que CSA_Amélioré est capable de surmonter les techniques d'optimisation auxquelles elle a été comparée. Selon les simulations et les analyses élaborées, nous pouvons affirmer que l'algorithmes CSA_Améliorée a des mérites parmi les algorithmes d'optimisation actuels qui sont très connus dans la littérature et mérite d'être appliqué à des différents problèmes.

Perspective :

- ✚ Agrandir la taille du réseau utilisé et tester les capacités de l'algorithme proposé.
- ✚ Améliorée le temps de convergence de l'algorithme proposé (CSA _Améliorée).

*Références
bibliographiques*

[**ABB16**] ABBAS Hichem et AIT AMOKHTAR Samir, Etude et dimensionnement électrique de la raffinerie sucre liquide Cevital, mémoire de master à Université de Bejaia ,2016.

[**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, p. 391-402.

[**ASK16**] ASKARZADEH, Alireza, a novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm. Computers & Structures, 2016, vol. 169, p. 1-12.

[**BEN14**] BENBOUDJEMA Toufik et AGTI Ouassim, étude des capacités et perspectives de production d'énergie électrique en Algérie, mémoire de master à Université de Bejaia,2014.

[**BOU15**] Bouchilaoune Amel, Boufadene Anissa, L'algorithme de colonies de fourmis pour l'ordonnancement des tâches d'un projet. Cas de la Cité Beni Mansour Sonatrach, mémoire de Master à Université de Béjaï,2015.

[**CHR97**] Christophe Prévé et Robert JEANNOT, Guide de conception des réseaux électriques industriels, groupe Schneider Electric, 1997.

[**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, vol. 10.

[**DOU17**] Douida Nedjmeddine, Algorithme de recherche du corbeau dédié à l'optimisation appliqué au dispatching économique, mémoire de master à université de Biskra, 2017.

[**DRA10**] DRAIDI Abdellah, Répartition économique de l'énergie électrique utilisant les techniques d'intelligence artificielle, thèse de magister à Université Mentouri de Constantine ,2010.

[**GAC10**] GACEM Abdelmalek, Utilisation des Méthodes d'optimisations Métaheuristique pour La résolution du Problème de répartition optimale de la puissance dans les réseaux électriques, mémoire de magister à 'El-ouedd ,2010.

- [GAS08] GASBAOUI, Brahim, Optimisation de l'énergie réactive dans un réseau d'énergie électrique, mémoire de magister à université Bechar, 2008.
- [HTT15] Généralités sur les réseaux électriques, Edition Internet, [En ligne], [https://fr.scribd.com/doc/4597291/Generalites-sur-les-reseaux-electriques], 2015.
- [KHA10] KHAMSAWANG, S. et JIRIWIBHAKORN, S. DSPSO–TSA for economic dispatch problem with nonsmooth and noncontinuous cost functions. *Energy Conversion and Management*, 2010, vol. 51, no 2, p. 365-375.
- [LAB13] LABED Imen, dispatching économique dans un système de Puissance électrique par L'intelligence Artificielle, mémoire de magistère à Université de Constantine 1 ,2013.
- [LAI18] LAIMECHE Abdallah, application de l'algorithme des essais des salpes au dispatching économique, Mémoire de Master à Université de Biskra ,2018.
- [MAR07] MARCELA Saguan, L'Analyse économique des architectures de marché électrique. L'Application au market design du temps réel. *Economies et finances*, thèse de doctorat à Université paris sud –paris XI ,2007.
- [MAR16] M. Zenzami¹, N. Elhami, A. Makhloufi, M. Itmi, N. Hmina, Electrical power transmission optimization based on a new version of PSO algorithm, The 4th Conference IEEE International Colloquium on Information Science and Technology (CIST),2016.
- [MIM09] YOUNES, Mimoun, HADJERI, S., et SAYAH, Houari. Dispatching économique par une méthode artificielle. *Acta electrotehnica*, 2009, vol. 50, no 2, p. 128-136.
- [MOS13] MOSTEFA Hamed, dispatching économique dynamique par utilisation de méthodes d'Optimisation globales, Mémoire de Magister à Université de Biskra ,2013.
- [MOS14] Mostafa Ramzanpour¹, Hamdi Abdi «Solving the Economic Load Dispatch Problem considering units with different fuels using Evolutionary Algorithms», Vol. 4(11), Apr, 2014, pp. 722-743.
- [NAT16] Nathan weber, 9 choses fascinantes et méconnues à savoir sur les corbeaux,2016, <https://www.demotivateur.fr>.
- [NOM08] NOMAN, Nasimul et IBA, Hitoshi. Differential evolution for economic load

dispatch problems. *Electric power systems research*, 2008, vol. 78, no 8, p. 1322-1331.

[PAN07] PANIGRAHI, B. K., YADAV, Salik R., AGRAWAL, Shubham, et al. A clonal algorithm to solve economic load dispatch. *Electric Power Systems Research*, 2007, vol. 77, no 10, p. 1381-1389.

[PAR10] PARK, Jong-Bae, JEONG, Yun-Won, SHIN, Joong-Rin, et al. An improved particle swarm optimization for nonconvex economic dispatch problems. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2010, vol. 25, no 1, p. 156-166.

[REZ09] REZIG Missoum, étude d'un dispatching économique de puissance active par les Algorithmes de fourmis, mémoire de Magistère à Université Hassiba Ben Bouali Chleff-Algérie ,2009.

[SAL13] SALHI, A. et BOUKTIR, T. Résolution du Problème de Dispatching Economique par les Méthodes Méta heuristiques en utilisant la Logique Floue., BP 145,2013.

[SAY10] SAYAH Samir, Application de l'Intelligence Artificielle pour le fonctionnement Optimal des Systèmes électriques, thèse de Doctorat à Université Ferhat Abbas — Sétif ,2010.

[SLI09] SLIMANI Linda, contribution à l'application de l'optimisation par les méthodes métaheuristique à l'écoulement de puissance optimale dans un environnement de l'électricité dérégulé, thèse de doctorat à Université de Batna ,2009.

[STA09] STASIAKOWSKA, Agnieszka. Le marché intérieur d'électricité. Entre la libéralisation et la sécurité d'approvisionnement en électricité, Thèse de doctorat à Université de Geneva,2009.

ANNEXE

Base de données de 6 générateurs

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 1 suivant :

Tableau 1 : Données du réseau électrique comportant 6 unités.

Nombre des unités	Coefficient du coût			Limites de la puissance active (MW)	
	a (\$/MW ² h)	b (\$/MWh)	c (\$/h)	Pgmin	Pgmax
1	0.0070	7	240	100	500
2	0.0095	10	200	50	200
3	0.0090	8.5	220	80	300
4	0.0090	11	200	50	150
5	0.0080	10.5	220	50	200
6	0.0075	12	190	50	120

Les coefficients représentant la configuration du réseau :

✚ Matrice carrée β_{ij}

$$\beta_{ij} = \begin{bmatrix} 0.0017 & 0.0012 & 0.0007 & -0.0001 & -0.0005 & -0.0002 \\ 0.0012 & 0.0014 & 0.0009 & 0.0001 & -0.0006 & -0.0001 \\ 0.0007 & 0.0009 & 0.0031 & 0.0000 & -0.0010 & -0.0006 \\ -0.0001 & 0.0001 & 0.0000 & 0.0024 & -0.0006 & -0.0008 \\ -0.0005 & -0.0006 & -0.0010 & -0.0006 & 0.0129 & -0.0002 \\ -0.0002 & -0.0001 & -0.0006 & -0.0008 & -0.0002 & 0.0150 \end{bmatrix}.$$

✚ vecteur ligne β_{0i}

$$\beta_{0i} = 1e-3 * [-0.3908 \quad -0.1297 \quad 0.7047 \quad 0.0591 \quad 0.2161 \quad -0.6635];$$

✚ un scalaire β_{00}

$$\beta_{00} = 0.0056$$

✚ la puissance demandée total

$$P_{dt} = 1263$$

✚ Lambda=1000


```

-0.3 -0.5 -1.3 -0.7 9.0 1.4 -0.3 -1.2 -1.0 -1.3 0.7 -0.2
-0.2 -2.4 -0.3;
-0.1 -0.2 -0.9 -0.4 1.4 1.6 0.0 -0.6 -0.5 -0.8 1.1 -0.1
-0.2 1.7 0.3;
-0.1 0.0 -0.1 1.1 -0.3 0.0 1.5 1.7 1.5 0.9 -0.5 0.7
0.0 -0.2 -0.8;
-0.1 0.1 0.0 5.0 -1.2 -0.6 1.7 16.8 8.2 7.9 -2.3 -3.6
0.1 0.5 -7.8;
-0.3 -0.2 -0.8 2.9 -1.0 -0.5 1.5 8.2 12.9 11.6 -2.1 -2.5
0.7 -1.2 -7.2;
-0.5 -0.4 -1.2 3.2 -1.3 -0.8 0.9 7.9 11.6 20.0 -2.7 -3.4
0.9 -1.1 -8.8;
-0.3 -0.4 -1.7 -1.1 0.7 1.1 -0.5 -2.3 -2.1 -2.7 14.0 0.1
0.4 -3.8 16.8;
-0.2 0.0 0.0 0.0 -0.2 -0.1 0.7 -3.6 -2.5 -3.4 0.1 5.4
-0.1 -0.4 2.8;
0.4 0.4 -2.6 0.1 -0.2 -0.2 0.0 0.1 0.7 0.9 0.4 -0.1
10.3 -10.1 2.8;
0.3 1.0 11.1 0.1 -2.4 -1.7 -0.2 0.5 -1.2 -1.1 -3.8 -0.4
-10.1 57.8 -9.4;
-0.1 -0.2 -2.8 -2.6 -0.3 0.3 -0.8 -7.8 -7.2 -8.8 16.8 2.8
2.8 -9.4 128.3];

```

✚ vecteur ligne β_{0i}

```

=1e-3*[-0.1 -0.2 2.8 -0.1 0.1 -0.3 -0.2 -0.2 0.6 3.9 -1.7 0.0 -3.2
6.7 -6.4];

```

✚ un scalaire β_{00}

$\beta_{00}=0.0055$

✚ la puissance demandée total

Pdt=2630

✚ Lambda=1000