

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique



L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Filière : Génie Électrique

Spécialité : Réseaux Electrique

Mémoire de Fin d'Étude

En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Présenté par :

LAICHE MOHAMMED TAYEB

SAHRAOUI BAHRI

Thème

**Optimisation de l'emplacement et du
dimensionnement des DGs dans les réseaux
de distribution à l'aide des méthodes
métaheuristiques**

Acceptée sur proposition du jury :

Dr. BOUGOUFFA Lazher
Dr. GACEM Abdelmalek
Dr. KECHIDA Ridha

MCA PRESIDENT
MCA ENCADREUR
MCA EXAMINATEUR

Année universitaire 2025/2026

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la
Recherche Scientifique

L'Université Echahid Hamma Lakhdar d'El Oued

Faculté de Technologie

Filière : Génie Électrique

Spécialité : Réseaux Electrique

Mémoire de Fin d'Étude

En vue de l'obtention du diplôme de
MASTER ACADEMIQUE

Présenté par :

LAICHE MOHAMMED TAYEB

SAHRAOUI BAHRI

Thème

**Optimisation de l'emplacement et du
dimensionnement des DGs dans les réseaux
de distribution à l'aide des méthodes
métaheuristiques**

Acceptée sur proposition du jury :

Dr. BOUGOUFFA Lazher
Dr. GACEM Abdelmalek
Dr. KECHIDA Ridha

MCA PRESIDENT
MCA ENCADREUR
MCA EXAMINATEUR

Année universitaire 2025/2026

﴿إِنْ فَعَلَ خَلَقَ السَّمَاوَاتِ وَالْأَرْضَ وَالْجَنَّةَ وَاللَّهُ

وَالنَّهَارَ لَا إِلَهَ إِلَّا هُوَ﴾

شكر

بسم الله الرحمن الرحيم والصلاة والسلام على أشرف المرسلين سيدنا محمد صلى الله عليه وسلم

نتوجه بخالص الحمد والشكر **لله** سبحانه وتعالى الذي وفقنا وأعانا على إتمام هذا العمل

كما نتقدم بأسمى عبارات الشكر والتقدير إلى الأستاذ: **الدكتور قاسم عبد المالك** المشرف على هذه المذكرة، لما قدمه لنا من توجيهات قيمة ونصائح علمية سديدة، ومتابعة مستمرة كان لها الأثر الكبير في إنجاز هذا العمل.

ونشكر الجزيل إلى أعضاء لجنة المناقشة الموقرة لفضلهم بقبول قراءة هذه المذكرة وتقييمها وإثرائها بملاحظاتهم القيمة.

كما نعبر عن عميق امتناننا إلى جميع أساتذتنا الأفاضل الذين أشرفوا على تكويننا العلمي طوال سنوات الدراسة، وأسهموا في بناء معارفنا وتنمية قدراتنا.

ولا يفوتنا أن نتقدم بالشكر لكل من ساعدنا وساندنا، من أفراد العائلة والأصدقاء والزملاء، وساهم من قريب أو بعيد في إنجاز هذا العمل.

نسأل الله تعالى أن يجزي الجميع خير الجزاء، وأن يجعل هذا العمل خالصاً لوجهه الكريم ونافعاً للعلم وطلابه.

إهداء

نهدي هذا الإنجاز إلى والدينا العزيزين، اللذين كانا خير سند وعون لنا في مسيرتنا العلمية، وأحاطانا بالرعاية والمحبة والتشجيع، فلهما منا كل التقدير والامتنان. نسأل الله أن يحفظهما ويبارك في عمرهما ويجزيهما عنا خير الجزاء. كما نهدي هذا العمل إلى أفراد عائلتنا الكريمتين، وإلى جميع أصدقائنا وزملائنا، وإلى كل من شاركنا لحظات النجاح والتحدي، وقدم لنا الدعم والمساندة طوال فترة الدراسة.

وإلى كل من ساهم من قريب أو بعيد في إنجاز هذا العمل، نهدي ثمرة هذا الجهد المتواضع

الطيب & بحري



Résumé

Cette étude aborde le défi de l'intégration des unités de production décentralisée (DG) dans les réseaux de distribution électrique, dans le but d'améliorer l'efficacité et la performance opérationnelle du réseau. La problématique réside dans la détermination optimale de l'emplacement et de la taille de ces unités afin de garantir un bénéfice technique maximal, principalement axé sur la réduction des pertes de puissance active et l'amélioration du profil de tension. Pour atteindre cet objectif, les méta heuristiques (AHA), (GWO) et (ALO) ont été appliquées. Des simulations et des analyses ont été effectuées sur le réseau IEEE 33-bus pour évaluer la performance des algorithmes proposés dans la résolution de ce type de problèmes non linéaires et contraints. Les résultats obtenus démontrent la précision et l'efficacité des algorithmes utilisés dans la détermination des solutions optimales, confirmant ainsi l'importance de ces méthodologies dans le développement de la gestion des réseaux de distribution

Mots clés : Production décentralisée (DG)- Réseau de distribution- Méta heuristiques (AHA, GWO, ALO)- Réseau IEEE 33-bus- Optimisation du dimensionnement- Réduction des pertes de puissance.

المخلص

تتناول هذه الدراسة تحدي دمج وحدات الإنتاج الموزع (DG) في شبكات التوزيع الكهربائية، بهدف تعزيز كفاءة الشبكة وتحسين أدائها التشغيلي. تكمن الإشكالية في التحديد الأمثل لموقع وحجم هذه الوحدات لضمان تحقيق أقصى استفادة تقنية، والمتمثلة أساساً في خفض فاقد الطاقة النشطة وتحسين ملف الجهد الكهربائي. ولتحقيق هذا الهدف، تم تطبيق خوارزميات الميتاهيورستيك (AHA)، (GWO)، و (ALO). تم إجراء المحاكاة والتحليل على نظام IEEE 33-bus لتقييم أداء الخوارزميات المقترحة في معالجة هذا النوع من المسائل غير الخطية والمقيدة. أظهرت النتائج المتحصل عليها دقة وفعالية الخوارزميات المستخدمة في تحديد الحلول المثلى، مما يؤكد أهمية هذه المنهجيات في تطوير إدارة شبكات التوزيع.

الكلمات المفتاحية: التوليد الموزع (DG) - شبكة التوزيع - الخوارزميات الميتاهيورستيك (AHA, GWO, ALO) - شبكة IEEE 33-bus - تحديد الحجم والموقع الأمثل - تقليل فاقد القدرة - تحسين ملف الجهد.

ABSTRACT

This study addresses the challenge of integrating Distributed Generation (DG) units into electrical distribution networks, aiming to enhance network efficiency and operational performance. The problem lies in the optimal placement and sizing of these units to ensure maximum technical benefits, primarily focused on reducing active power losses and improving the voltage profile. To achieve this objective, metaheuristic algorithms (AHA), (GWO), and (ALO) have been applied. Simulations and analyses were conducted on the IEEE 33-bus system to evaluate the performance of the proposed algorithms in solving this type of non-linear and constrained problem. The results obtained demonstrate the accuracy and effectiveness of the used algorithms in determining optimal solutions, thereby confirming the importance of these methodologies in the development of distribution network management.

Keywords: Distributed Generation (DG) - Distribution network - Metaheuristics (AHA, GWO, ALO)- IEEE 33-bus system- Optimal sizing and allocation - Power loss reduction - Voltage profile improvement.

Liste des figures

Chapitre I : L'écoulement de puissance

Figure I.1. Modèle du générateur	4
Figure I.2. Représente la charge électrique	5
Figure I.3. Modèle de transformateur de puissance	5
Figure I.4. Modélisé d'une ligne	6
Figure I.5. Éléments shunt	6
Figure I.6. Système à deux J.d.B.....	8
Figure I.7. Organigramme simplifié de l'algorithme de Newton-Raphson	14

Chapitre II: Energies renouvelables

Figure II.1. Champ de tours d'éolienne.....	17
Figure II.2. Schéma de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique	17
Figure II.3. Bilan de cycle biomasse.....	18
Figure II.4. Énergie Géothermie	18
Figure II.5. Réponse spectrale d'une cellule (PV)	20
Figure II.6. Le rayonnement global	22
Figure II.7. Panneau solaire	23
Figure II.8. Panneaux photovoltaïques	23
Figure II.9. Un échantillon schématisé de la cellule	24
Figure II.10. Principe de la conversion photovoltaïque.....	25
Figure II.11. Schéma d'une installation PV autonome.....	26
Figure II. 12.. Schéma d'une installation PV connecté au réseau	26
Figure II.13. Caractéristique $I(V)$ pour température.....	27
Figure II.14. Caractéristique $P(V)$ pour température	27
Figure II.15. Caractéristique $I(V)$ pour d'éclairement ($T=25^{\circ}\text{C}$).....	28

Figure II.16. Caractéristique P(V) pour d'éclairment (T=25°C)	28
Figure II.17. Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage.....	29
Figure II.18. Schéma d'un quadripôle électrique	29
Figure II.19. Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur	30
Figure II.20. Schéma de principe d'un survolteur	30
Figure II.21. Schéma du circuit électrique d'un convertisseur dévolteur.....	31
Figure II.22. Schéma de base d'un dévolteur / survolteur	31
Figure II.23. Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC).....	32
Figure II.24. Onduleur de tension triphasé à deux niveaux	32

Chapitre III: Méthodes d'optimisation

Figure III.1. Principe de base d'une méthodologie d'optimisation.....	36
Figure III.2. Éléments fondamentaux du processus d'optimisation.....	36
Figure III.3. Schéma de classification des méthodes d'optimisation	37
Figure III.4. Représentation simplifiée d'une approche méta-heuristique.....	39
Figure III.5. Classification des méthodes d'optimisation approchées	40
Figure III.6: Organigramme de la méthode ALO.....	44
Figure III.7. Mécanismes des comportements de recherche de nourriture chez les colibris	45
Figure III.8. Mécanismes de vol des colibris : (a) vol axial, (b) vol diagonal, (c) vol omnidirectionnel	47
Figure III.9. Montre le Pseudo-code representation of the AHA algorithm.....	48
Figure III.10. Organigramme de l'algorithme d'optimisation du colibri artificiel (AHA).....	49
Figure III.11. La hiérarchie des loups gris.....	50
Figure III.12. Comportement de la meute des loups gris lors de la chasse, (A) Poursuite de la proie, (B-D) harcèlement et encerclement, (E) Position d'attaque	52
Figure III.13. Mise à jour de la position dans GWO.	54

Figure III.14. Représentation 2D et 3D des vecteurs de position et leurs prochains Emplacements Possibles	54
Figure III.15. Mécanisme de positionnement de l'agent de recherche et de l'effet de ce qui le présente.	56
Figure III.16. Organigramme de la méthode GWO.....	57

Chapitre VI: Simulation et résultats

Figure IV.1. Réseau de distribution radial IEEE33-bus.	60
Figure IV.2. Analyse des courbes de convergence des algorithmes d'optimisation pour le réseau IEEE 33-bus (F1-F4).....	62
Figure IV.3. Analyse des courbes de convergence des algorithmes d'optimisation pour le réseau IEEE 33-bus	64
Figure IV.4. Analyse des courbes de convergence des algorithmes d'optimisation pour le réseau IEEE 33-bus (F14-F19).....	66
Figure IV.5. Profils de l'amplitude et de l'angle de la tension du réseau IEEE 33-bus.....	69
Figure IV.6. Distribution des pertes de puissances active et réactive par branche	69
Figure IV.7. Courbes de convergence de la déviation de tension et profil de tension pour le réseau IEEE 33-bus	71.
Figure IV.8. Courbes de convergence des pertes actives et pertes actives par branche pour le réseau IEEE 33-bus.	72
Figure IV.9. Courbe de convergence globale pour le réseau de distribution radial IEEE 33-bus ..	73
Figure IV.10. Profil de tension et pertes actives par branche pour le réseau IEEE 33-bus	74

Liste des tableaux**Chapitre I : L'écoulement de puissance**

Tableau I.1. Classification des barres	11
---	----

Chapitre II: Energies renouvelables

Tableau II.1. Valeurs d'albédo selon différents types de sol.	21
---	----

Chapitre VI: Simulation et résultats

Tableau IV.1. Résultats des fonctions benchmark unimodales (F1–F7)	61
---	----

Tableau IV.2. Résultats des fonctions benchmark multimodales (F8–F13).....	63
---	----

Tableau IV.3. Résultats des fonctions benchmark composite (F14–F23)	65
--	----

Tableau IV.4. Amplitude et angle de tensions des nœuds	67
---	----

Tableau IV.5. Les puissances de transmission et les pertes de branches.....	68
--	----

Tableau IV. 6. Impact du nombre de DG sur la réduction des pertes de puissance dans le système IEEE à 33 nœuds	70
---	----

Tableau. IV. 7. Impact du nombre de DG sur la réduction de la déviation de tension dans le réseau IEEE à 33 nœuds	70
--	----

Tableau IV.8. L'intégration optimale des DG pour la réduction de déviation de tension.....	71
---	----

Tableau IV.9. L'intégration optimale des DG pour la réduction des pertes de puissance.....	72
---	----

Tableau IV.10. L'intégration optimale des DG pour la réduction des pertes et la déviation de tension	73
---	----

Sommaire

Introduction Générale.....	1
----------------------------	---

Chapitre I : L'écoulement de puissance

Introduction	3
I.1. Le but de l'écoulement de puissance.....	3
I.2. Modélisation des composantes du réseau électrique.....	3
I.2.1. Modèle du générateur	3
I.2.2. Charge électrique	4
I.2.3. Modélisation du transformateur	5
I.2.4. Ligne de transmission	5
I.2.5. Modélisation Elements shunt	6
I.3. Principe de fonctionnement d'un réseau électrique	7
I.3.1. Relations paramétriques du système	7
I.3.2. Les équations aux J.d.B	7
I.3.3. Formulation d'admittances de réseau	8
I.3.4. Calcul de la puissance au J.d.B	9
I.3.5. La puissance transmise dans la ligne	10
I.3.6. Les pertes dans la ligne	10
I.4. Formulation pour L'écoulement de puissance	11
I.4.1. Méthode de Newton-Raphson	12
I.4.1.1. Principe de la méthode	12
I.4.1.2. La méthode de Newton-Raphson appliqué aux équations de l'écoulement de puissance	13
Conclusion.....	15

Chapitre II: Energies renouvelables

Introduction	16
II.1. Définition d'énergie renouvelable.....	16
II.2. Types d'énergies renouvelables.....	16
II.2.1. Energie éolienne.....	16
II.2.1. L'énergie hydraulique	17
II.2.2. Energie biomasse	17
II.2.3. L'énergie géothermique	18
II.3. L'énergie solaires	19

II.3.1.	L'énergie solaire Photovoltaïques.....	19
II.3.2.	Rayonnement solaire.....	20
II.3.2.1.	Types de rayonnement solaire reçus au sol	20
II.3.3.	L'effet Photovoltaïque	22
II.3.4.	La cellule photovoltaïque.....	24
II.3.5.	Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	24
II.3.6.	Types d'installations photovoltaïques.....	25
II.3.6.1.	Systèmes PV autonomes	25
II.3.6.2.	Systèmes PV connectés au réseau	26
II.3.7.	Comportement d'un module photovoltaïque	27
II.3.7.1.	Influence de la température	27
II.3.8.	Influence d'éclairement	28
II.3.9.	Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)	28
II.3.10.	Les convertisseurs DC-DA (onduleur).....	31
II.3.11.	Avantages et inconvénients d'énergie photovoltaïque	33
Conclusion.....		33

Chapitre III: Méthodes d'optimisation

Introduction	35
III.1. Définition L'optimisation.....	35
III.2. Les éléments d'optimisation	36
III.3. Classification de méthodes d'optimisation.....	37
III.3.1. Les méthodes d'optimisation mathématique	38
III.3.2. Les méthodes d'optimisation approchées	38
III.3.2.1. Les méthodes heuristiques	39
III.3.2.2. Les méthodes méta-heuristiques	39
III.4. Méthodes stochastiques	40
III.4.1. Ant Lion Optimizer	41
III.4.1.1. Marche aléatoire des fourmis	41
III.4.1.2. Piégeage dans les fosses de fourmis.....	42
III.4.1.3. Piège de construction	42
III.4.1.4. Glisser les fourmis vers Ant Lion.....	42
III.4.1.5. Attraper des proies et reconstruire la fosse	43
III.4.1.6. Élitisme.....	43
III.4.2. Artificial Hummingbird Algorithm (AHA).....	44

III.4.2.1. Algorithme original (AHA).....	44
III.4.2.2. Initialisation.....	46
III.4.2.3. Recherche de nourriture	46
III.4.3. Optimisation Grey Wolf	50
III.4.3.1. Définition	50
III.4.3.2. Principe de la méthode	50
III.4.3.3. Operateur	52
Conclusion.....	57

Chapitre VI : Simulation et résultats

Introduction	59
IV.1. Cas 1 : Evaluation des algorithmes sur les fonctions benchmark	60
IV.2. Cas 2 : Calcul de l'écoulement de puissance IEEE 33 bus	66
IV.3. Cas 3 : Optimisation de l'emplacement et de la taille des unités (DG).....	69
IV.3.1. Étude de l'impact du nombre de DG sur les performances d'un réseau IEEE33.....	69
IV.3.2. Minimisation de la déviation de tension (mono-objectif)	70
IV.3.3. Minimisation des pertes de puissance active (mono-objectif)	71
IV.3.4. Minimisation des pertes et de la déviation de tension (multi-objectif)	72
Conclusion.....	74
Conclusion Générale	75

Introduction Générale

Introduction Générale

Le rôle principal de toute entité responsable de la production d'énergie électrique est de garantir la satisfaction des besoins des utilisateurs en puissances active et réactive, à tout moment et en tout lieu. De plus, cette entité doit assurer une qualité d'énergie acceptable tout en réduisant les coûts d'exploitation. Pour assurer le bon fonctionnement d'un réseau électrique donné, il est impératif de résoudre d'abord des problèmes à caractère technique et économique. Souvent, nous nous trouvons confrontés au problème de la « répartition économique de la puissance ».[1]

L'intégration efficace de la production décentralisée (DGs) dans le système de distribution constitue l'une des stratégies les plus efficaces pour garantir une exploitation économique et fiable du réseau électrique. Le problème de l'allocation optimale de la production décentralisée peut être formulé comme un processus visant à déterminer le meilleur emplacement et la taille optimale des unités DGs dans le réseau de distribution. L'objectif est de minimiser les pertes de puissance et la déviation de tension, soit de manière isolée (mono-objectif), soit simultanément (multi-objectif), tout en satisfaisant la demande du système et en respectant un ensemble de contraintes opérationnelles.[2]

Dans ce contexte, les méthodes métaheuristiques – telles que AHA, GWO ou ALO – s'avèrent être des outils d'ingénierie d'une puissance remarquable. Grâce à leur capacité à explorer de manière exhaustive l'espace de recherche et à éviter de se piéger dans les optimums locaux, ces algorithmes bio-inspirés permettent de trouver des solutions quasi-optimales à ce problème de planification dans un temps de calcul compétitif.

Pour concrétiser l'aspect pratique, les méthodes proposées ont été simulées sous l'environnement MATLAB, et leur efficacité a été testée sur plusieurs réseaux électriques standards. Cela a permis d'évaluer rigoureusement les performances de la stratégie étudiée en ajustant et en faisant varier ses variables de contrôle. L'étude a ainsi débouché sur d'importantes recommandations scientifiques concernant son efficacité. De plus, une comparaison exhaustive a été menée entre les résultats obtenus via les algorithmes d'optimisation ALO, AHA et GWO, et ceux d'autres méthodes classiques et métaheuristiques, en adoptant les pertes de puissance active et les déviations de tension au niveau des jeux de barres (Busbars) comme critères fondamentaux d'évaluation.

L'objectif principal de ce travail est de formuler et de résoudre le problème de l'allocation optimale (emplacement et taille) des unités de production décentralisée dans les réseaux de distribution. L'accent est mis sur la formulation d'une fonction objectif visant à minimiser les pertes de puissance

INTRODUCTION GENERALE

active (PLOSS) et à améliorer l'indice de déviation de tension (CVD), tout en respectant l'ensemble des contraintes d'égalité (équations de l'écoulement de puissance) et d'inégalité (limites thermiques des lignes et marges de tension admissibles). Afin de valider notre méthodologie, les performances des algorithmes sélectionnés seront rigoureusement testées et comparées sur des réseaux de distribution standards.

Pour mener à bien cette étude, notre mémoire a été structuré en quatre chapitres fondamentaux:

Chapitre I : Écoulement de puissance, sera consacré aux généralités sur l'écoulement de puissance et à la modélisation mathématique des réseaux de distribution électriques.

Chapitre II : Énergie renouvelable, traitera des concepts des énergies renouvelables, en mettant l'accent sur la production décentralisée et ses différentes unités.

Chapitre III : Méthodes d'optimisation, présentera un état de l'art scientifique et complet sur les méthodes métaheuristiques utilisées pour résoudre ce problème d'optimisation, en détaillant les principes de fonctionnement et les mécanismes mathématiques des algorithmes appliqués.

Chapitre IV : Simulation et réseaux, sera dédié aux résultats de simulation et à la discussion ; nous y présenterons l'application des algorithmes développés sur des réseaux de test standards (tels que le système IEEE 33-bus), afin d'évaluer l'impact des différentes configurations des unités DGs sur les performances techniques et économiques du réseau.

Enfin, une conclusion générale mettra en lumière les principales contributions de ce travail, tout en ouvrant des perspectives et des horizons prometteurs pour les recherches futures.

Chapitre I :

Ecoulement de

puissance

Introduction

L'objectif principal de l'étude de l'écoulement de puissance a déterminé les conditions de fonctionnement d'un réseau électrique, avec des paramètres donnés pour ce réseau (paramètres des lignes, puissance active et réactive, ...etc.). Le but est de déterminer les tensions complexes des jeux de barres, à partir desquelles toutes les autres grandeurs telles que les puissances transitant à travers les lignes de transport, les puissances, et les pertes de puissances peuvent être obtenues. Le problème de l'analyse de l'écoulement de puissance se traduit par la relation non linéaire qui existe entre les différentes puissances générées, les puissances demandées (charges) et les modules et phases des tensions au niveau des jeux de barres avec les paramètres du circuit équivalent modélisant les éléments de réseau électrique. [3]

I.1. Le but de l'écoulement de puissance

L'étude de l'écoulement de puissance ou de flux de puissance est une étape essentielle pour l'étude et la conception des réseaux électriques. Cette étude est nécessaire pour la planification, l'échange de puissance entre les centres de production et le dispatching économique. Elle est aussi essentielle pour l'évaluation de la stabilité transitoire, stabilité dynamique et l'estimation de l'état du réseau ainsi que la prise de mesure adéquate à d'éventuelle imprévue. La planification d'une future extension pourrait se baser sur l'étude de l'écoulement de puissance dans ce réseau. [4]

I.2. Modélisation des composantes du réseau électrique

Les éléments qui interviennent dans le problème de répartition des charges sont ceux qui sont exposés à des hautes tensions et à des forts courants, à savoir : générateurs de puissance (machine synchrone), charges électriques, lignes de transports, transformateurs de puissances et compensateurs statiques

I.2.1. Modèle du générateur

Les générateurs sont des éléments qui permettent la conversion de l'énergie (mécanique, photonique, chimique...) vers une forme électrique. Dans l'analyse statique, les générateurs sont modélisés comme des injecteurs de courants. Dans l'état stationnaire, un générateur est généralement contrôlé de sorte que la puissance active P_g injectée au jeu de barre et la tension aux bornes du générateur soient maintenues constantes. La puissance active du générateur est déterminée par le contrôle de la turbine, qui doit être dans la capacité du système turbine générateur. La tension V_g est déterminée par

l'injection de la puissance réactive au jeu de barre de production. (Figure I.1) montre le modèle du générateur.[5]

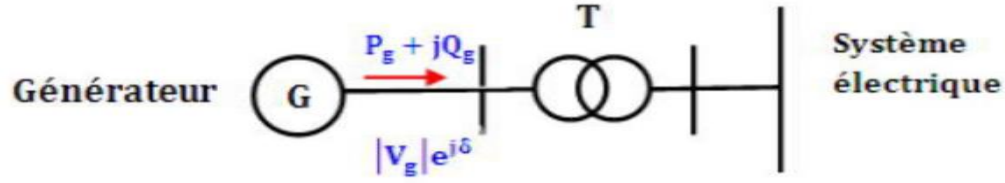


Figure I.1. Modèle du générateur

I.2.2. Charge électrique

La modélisation de la charge joue un rôle très important dans l'étude de l'écoulement de puissances et dans l'analyse du comportement des réseaux électriques. En effet, une représentation adéquate des charges permet d'obtenir des résultats plus précis concernant les profils de tension, les flux de puissance et les pertes dans le réseau. Ces charges correspondent souvent à des sous-stations alimentant les réseaux de distribution et sont généralement modélisées de manière statique comme des injecteurs négatifs de puissance au niveau des jeux de barres. La connexion de la charge au réseau est réalisée par l'intermédiaire d'un transformateur à prises en charge, permettant de maintenir le niveau de tension à une valeur pratiquement constante. Dans ce cas, les puissances active et réactive de la charge peuvent être considérées comme des valeurs constantes, ce qui simplifie considérablement les calculs de l'écoulement de puissances. Il existe également une modélisation dynamique des charges, plus complexe, dans laquelle la puissance consommée dépend non seulement de la tension mais aussi du temps et des conditions de fonctionnement du système. Ce type de modélisation est généralement utilisé pour l'étude des phénomènes transitoires et l'analyse de la stabilité dynamique et transitoire des réseaux électriques[6]. Les équations des puissances active et réactive de la charge en fonction de la tension de jeu de barres peuvent s'écrire comme suit :

$$P = P_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{np}, \quad Q = Q_0 \left(\frac{V}{V_0} \right)^{nq} \quad (I.1)$$

Où

P_0 et Q_0 : puissances active et réactive consommées à une tension de référence $V_0=1\text{pu}$;

np et nq : constantes dépendant du type de la charge.

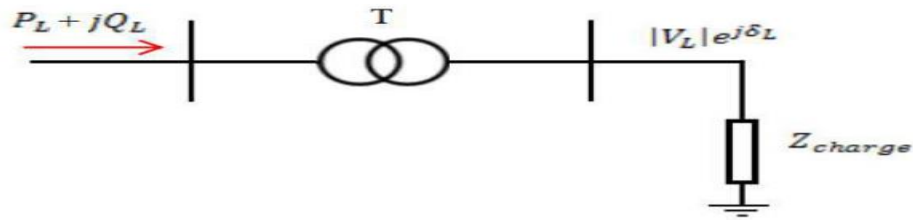


Figure I.2. Représente la charge électrique

I.2.3. Modélisation du transformateur

Un transformateur de l'énergie électrique est représenté par un quadripôle en π non symétrique. Les grandeurs associées sont le rapport de transformation a et l'impédance de fuite. Les rapports ont j été inclus dans les éléments de la matrice admittance, c'est-à-dire que les susceptances de la matrice admittance B_{ij} sont vues comme des fonctions de rapports de transformation a (Figure I.3) [7].

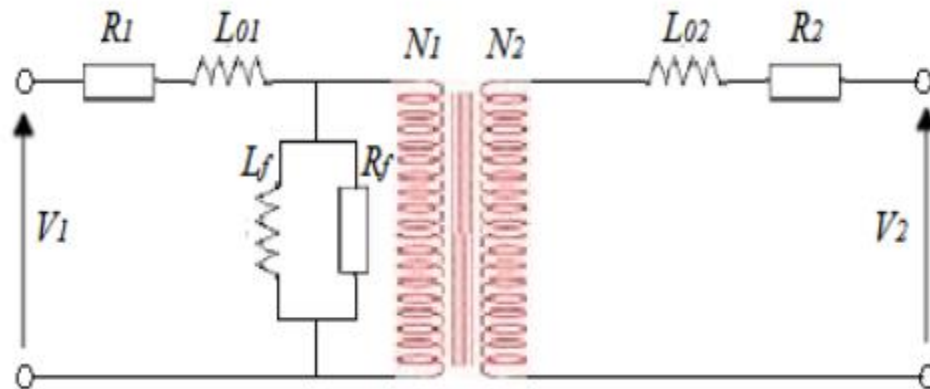


Figure I.3. Modèle de transformateur de puissance

I.2.4. Ligne de transmission

Une ligne électrique entre les nœuds i et j sera donc représentée par le schéma en π comme indiqué sur la Figure (I.4) comprenant une impédance série ou longitudinale $Z_{ij} = R_{ij} + jX_{ij}$ (avec R_{ij} et X_{ij} respectivement résistance totale et inductance totale de la ligne) et une admittance en parallèle

$y_{10} = y_{20} = (G + jB)/2$, avec (G et B étant respectivement la conductance totale et la susceptance totale d'ordre direct de la ligne).

Les pertes transversales par effet couronne dans le cas des lignes de transport sont négligeables. Il n'y a donc pas de courant résistif dérivé et on admet que la conductance transversale G est nulle. [5]

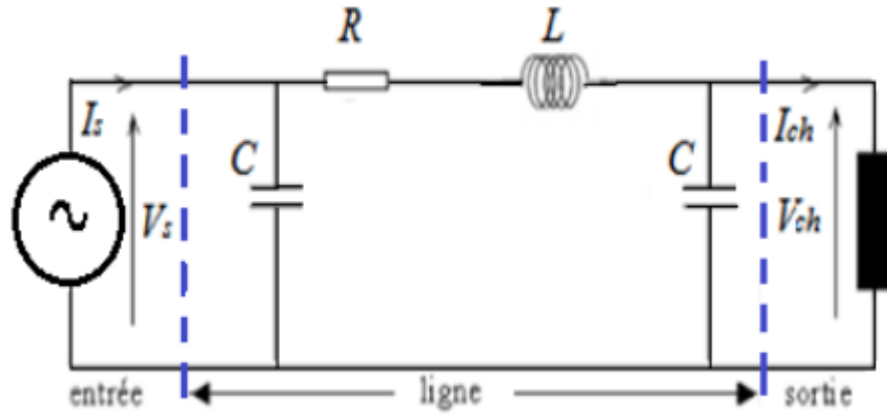


Figure I.4. Modelé d'une ligne.

I.2.5. Modélisation Elements shunt

Les éléments shunt sont largement utilisés dans les réseaux électriques de distribution et de transport afin d'assurer la compensation de la puissance réactive et de maintenir le niveau de tension dans les limites admissibles. Leur utilisation contribue à améliorer le profil de tension, à réduire les pertes de puissance et à accroître la stabilité et les performances globales du réseau. Parmi les principaux dispositifs shunt, on peut citer les moteurs synchrones, les batteries de condensateurs, les inductances fixes ainsi que les compensateurs statiques de puissance réactive (SVC). Dans les études de modélisation et d'analyse des systèmes électriques, ces dispositifs sont généralement représentés soit par une admittance équivalente connectée au réseau, soit par une injection de puissance réactive au niveau des nœuds concernés. [8]

$$yi = gi + jbi \quad (I.2)$$

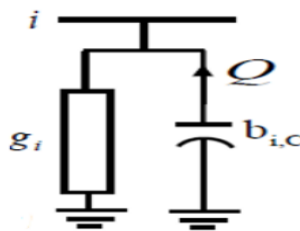


Figure I.5. Eléments shunt

I.3. Principe de fonctionnement d'un réseau électrique

I.3.1. Relations paramétriques du système

Les relations décrivant la topologie d'un système de distribution de peuvent être développées en utilisant les équations de continuité ou de courant de nœuds pour obtenir :

$$[I]_{bus} = [Y]_{bus}[V]_{bus} \quad (I.3)$$

Dans laquelle :

$[I]_{bus}$: vecteur des courants de nœuds.

$[Y]_{bus}$: matrice des admittances de nœuds.

$[V]_{bus}$: vecteur des tensions de nœud.

La relation suivante entraine que :

$$[Z]_{bus} = [Y]_{bus}^{-1}$$

Ou $[Z]_{bus}$ matrice des impédances de nœuds [9].

I.3.2. Les équations aux J.d.B

Les puissances active et réactive à chaque J.d.B « i » sont :

$$P_i - jQ_i = V_i^* \cdot I_i \quad (I.4)$$

Avec :

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} \quad (I.5)$$

Dans la formulation de l'équation du réseau, si les éléments shunts de mise à la terre sont :

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i^*} - Y_i \cdot V_i \quad (I.6)$$

Y_i : Admittance totale shunt au J.d.B « i ».

V_i : Courant de shunt circulant du J.d.B « i » vers la terre. [10]

I.3.3. Formulation d'admittances de réseau

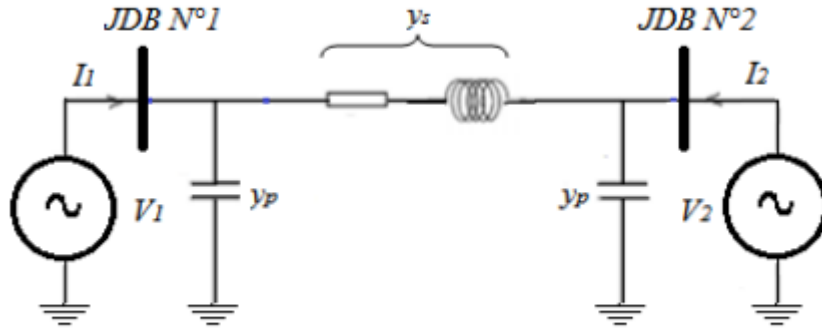


Figure I.6. Système à deux J.d.B

On note:

$$S_1 = S_{D1} \quad S_2 = S_{G2} - S_{D2} \quad (I.7)$$

Et en générale :

$$S_i = S_{Gi} - S_{Di} \begin{cases} S_i = P_i + jQ_i = (P_{Gi} + jQ_{Gi}) - (P_{Di} + jQ_{Di}) \\ S_i = (P_{Gi} - P_{Di}) + j(Q_{Gi} - Q_{Di}) \end{cases} \quad (I.8)$$

L'application des lois de KIRCHHOFF sur le système donne :

Au niveau de J.d.B « 1 »

$$I_1 = y_p \cdot V_1 + y_s(V_1 - V_2) + (y_p + y_s)V_1 - y_s V_2 \quad (I.9)$$

On Sait que:

$$S_1 = V_1 \cdot I_1^* \Rightarrow I_1 = \frac{S_1^*}{V_1^*} \quad (I.10)$$

Au niveau de J.d.B « 2 »

$$I_2 = y_p \cdot V_2 + y_s(V_2 - V_1) + (y_p + y_s)V_2 - y_s V_1 \quad (I.11)$$

Avec :

$$S_2 = V_2 \cdot I_2^* \Rightarrow I_2 = \frac{S_2^*}{V_2^*} \quad (I.12)$$

Alors on peut écrire (I.9) (I.11) sous la forme :

$$\begin{cases} I_1 = Y_{11} \cdot V_1 + Y_{12} \cdot V_2 \\ I_2 = Y_{21} \cdot V_1 + Y_{22} \cdot V_2 \end{cases} \quad (\text{I.13})$$

Avec :

$$Y_{11} = y_p + y_s, \quad Y_{22} = y_p + y_s \quad (\text{I.14})$$

$$Y_{12} = -y_s, \quad Y_{21} = -y_s \quad (\text{I.15})$$

$$Y_{bus} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \quad (\text{I.16})$$

$$\text{On remplace (I.13) en (I.16) : } \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \end{bmatrix} \quad (\text{I.17})$$

Et ainsi de suite. On peut généraliser la méthode de formulation comme suit pour le système à « n » J.d.B connectés entre eux [9]

$$I_1 = (\sum_{i=1, i \neq 1}^m y_{1i})V_1 + (-y_{12})V_2 + \dots + (y_{1n})V_n \quad (\text{I.18})$$

$$I_n = (-y_{n1})V_1 + (-y_{n2})V_2 + \dots + (\sum_{i=1, i \neq n}^m y_{ni})V_n \quad (\text{I.19})$$

La matrice admittance est donc [11] :

$$Y_{bus} = \begin{pmatrix} \sum_{i=1, i \neq 1}^m y_{1i} & \cdot & \cdot & (-y_{1n}) \\ \cdot & \ddots & \ddots & \cdot \\ \cdot & \ddots & \ddots & \cdot \\ (-y_{n1}) & \cdot & \cdot & \sum_{i=1, i \neq n}^m y_{ni} \end{pmatrix} \quad (\text{I.20})$$

$$I_{bus} = \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix} \quad V_{bus} = \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \vdots \\ V_n \end{pmatrix} \quad (\text{I.21})$$

I.3.4. Calcul de la puissance au J.d.B

On a:

$$S_i = (P_{Gi} - jQ_{Gi}) + (P_{Di} - Q_{Di}) = P_i + jQ_i \quad (\text{I.22})$$

Alors :

$$S_i^* = P_i + jQ_i = V_i^* \cdot I_i \quad S_i = V_i \cdot \sum_{j=1}^n y_{ij} \cdot V_j \quad (\text{I.23})$$

en coordonnées polaires [9] :

$$V_i = |V_i| \angle \delta_i \quad y_{ij} = |y_{ij}| \angle \gamma_{ij} \quad S_i^* = P_i + jQ_i = V_i^* I_i = V_i^* \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j$$

$$= \sum |V_i| |V_j| |y_{ij}| e^{j(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij})} \quad (\text{I.24})$$

Donc

$$P_i = \sum |y_{ij}| |V_i| |V_j| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad Q_i = -\sum |y_{ij}| |V_i| |V_j| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) \quad (\text{I.25})$$

I.3.5. La puissance transmise dans la ligne

Quand la solution itérative des tensions aux J.d.B est achevée, on peut calculer l'écoulement dans les lignes.

Le courant au J.d.B « i » dans la ligne de connexion du nœud « i » vers le nœud « k » est :

$$I_{ik} = (V_i - V_k) y_{ik} + V_i \frac{y'_{ik}}{2} \quad (\text{I.26})$$

y_{ik} : Admittance de la ligne entre les J.d.B « i » et « k ».

y'_{ik} : Admittance totale de la ligne de charge.

$V_i \cdot \frac{y'_{ik}}{2}$: Contribution du courant au J.d.B « i » due à la ligne de charge.

La puissance écoulee, active et réactive, est :

$$P_{ik} - jQ_{ik} = V_i^* \cdot I_{ik} \quad (\text{I.27})$$

$$P_{ik} - jQ_{ik} = V_i^* (V_i - V_k) y_{ik} + V_i^* \cdot V_i \frac{y_{ik}}{2} \quad (\text{I.28})$$

Soient P_{ki} et Q_{ki} les puissances active et réactive reparties du J.d.B « k » vers le J.d.B « i ».

$$P_{ki} - jQ_{ki} = V_k^* (V_k - V_i) y_{ik} + V_k^* \cdot V_k \frac{y_{ik}}{2} \quad (\text{I.29})$$

Les pertes de puissances dans la ligne « i-k » sont égales à la somme algébrique de la répartition des puissances déterminée à partir des relations (I.28) et (I.29) [11].

I.3.6. Les pertes dans la ligne

Au niveau de J.d.B la puissance apparente écoulee est la différence entre la puissance générée et la puissance demandée.

Pour un J.d.B « i » On a:

$$S_i = S_{Gi} - S_{Di} \quad (\text{I.30})$$

Avec :

$$P_i = P_{Gi} - P_{Di} = P_{iq} \quad Q_i = Q_{Gi} - Q_{Di} = F_{iq} \quad \sum P_i = \sum F_{ip} = \sum P_{Gi} - \sum P_{Di} \quad \sum Q_i = \sum F_{iq} = \sum Q_{Gi} - \sum Q_{Di} \quad (\text{I.31})$$

Le système d'équations (I.31) exprime l'expression des pertes.

Ou bien on peut calculer les pertes par une autre méthode, on calcule les pertes au niveau des lignes puis la somme algébrique donne l'expression des pertes [11].

$$P_{Lij} = P_{ij} + P_{ji} \quad Q_{Lij} = Q_{ij} + Q_{ji} \quad (\text{I.32})$$

I.4. Formulation pour L'écoulement de puissance

Sert à déterminer les tensions du réseau de façon à avoir un équilibre entre la génération et la charge. Il consiste à calculer le module et l'angle des tensions aux barres du réseau en régime permanent pour une puissance donnée à la charge. Les réseaux électriques sont caractérisés par des données de barres et de branches. On va définir trois types de barres de la façon suivante : [12]

- 1- La barre d'équilibre sert de référence pour les tensions, généralement elle sera identifiée par le numéro 1 et son module et angle de tension seront toujours spécifiés et fixes et connus.
- 2- Les barres de générations ont le module de tension maintenu constant, elles sont connectées à un générateur dont la puissance active est connue et constante.
- 3- Les barres de charge sont les barres dont les puissances actives et réactives injectées sont connues et fixes et grâce à l'écoulement de puissance on va chercher à trouver le module et l'angle de la tension.

Tableau I.1. Classification des barres

Classification des barres	Paramètres connus	Paramètres inconnus
Barre d'équilibre	$ V , \theta$	P, Q
Barre de generation	$P, V $	Q, θ
Barre de charge	P, Q	$ V , \theta$

La première étape de l'écoulement de puissance consiste à formuler la matrice d'admittance bus en utilisant les équations ci-dessous :

$$Y_{bus}(i, i) = \sum \text{admittance liée à la barre } i \quad (\text{I.33})$$

$$Y_{bus}(i, j) = -\sum \text{admittance entre la barre } i \text{ et } j \quad (\text{I.34})$$

En exprimant Y_{bus} en coordonnées rectangulaires et la tension en coordonnées polaires, on obtient les équations des puissances

$$Y_{bus} = G_{bus} + jB_{bus} \quad (I.35)$$

$$V = |V| \angle \theta \quad (I.36)$$

$$I = Y_{bus} V = (G_{bus} + jB_{bus}) |V| \angle \theta \quad (I.37)$$

$$S = V \cdot I^* = |V| \angle \theta \cdot (G_{bus} - jB_{bus}) |V| \angle (-\theta) \quad (I.38)$$

I.4.1. Méthode de Newton-Raphson

Parmi les différentes méthodes existantes pour résoudre un calcul de répartition de charge, c'est celle de Newton-Raphson qui est ordinairement et largement utilisée.

I.4.1.1. Principe de la méthode

Soit le système

$$F(x)=0 \quad (I.39)$$

Avec

$$x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n]^t \quad (I.40)$$

$$f = [f_1 \ f_2 \ \dots \ f_n]^t \quad (I.41)$$

La solution itérative de Newton-Raphson est donnée par

$$x^{k+1} = x^k - [J(x^k)]^{-1} \cdot f(x^k) \quad (I.42)$$

x^k : solution à l'itération k

x^{k+1} : solution à l'itération k + 1

j : Jacobien du système

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \frac{\partial f_n}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (I.43)$$

Nous écrivons souvent la résolution sous la forme :

$$\mathbf{x}^{k+1} = \mathbf{x}^k + \Delta \mathbf{x}^k \quad (\text{I.44})$$

$$\Delta \mathbf{x}^k = -[\mathbf{J}(\mathbf{x}^k)]^{-1} \cdot \mathbf{f}(\mathbf{x}^k) \quad (\text{I.45})$$

I.4.1.2. La méthode de Newton-Raphson appliqué aux équations de l'écoulement de puissance :

D'après la forme générale d'équations de puissance au J.d.B

$$\mathbf{P}_i = \sum_{j=1}^n |\mathbf{y}_{ij}| |\mathbf{V}_i| |\mathbf{V}_j| \cos(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) = \mathbf{F}_{ip} \quad (\text{I.46})$$

$$\mathbf{Q}_i = \sum_{j=1}^n |\mathbf{y}_{ij}| |\mathbf{V}_i| |\mathbf{V}_j| \sin(\delta_j - \delta_i + \gamma_{ij}) = \mathbf{F}_{iq} \quad (\text{I.47})$$

i = 1 : J.d.B de référence

n : Nombre de J.d.B

i : Numéro de J.d.B

Après développement en série de TAYLOR autour de la première approximation [10] :

$$\mathbf{P}_i = \mathbf{F}_{ip}^{(0)} + \left(\frac{\partial \mathbf{F}_{ip}}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} \Delta \delta_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial \mathbf{F}_{ip}}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} \Delta \delta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial \mathbf{F}_{ip}}{\partial |\mathbf{V}_2|}\right)^{(0)} \Delta \mathbf{V}_2^{(0)} \quad (\text{I.48})$$

$$\mathbf{Q}_i = \mathbf{F}_{iq}^{(0)} + \left(\frac{\partial \mathbf{F}_{iq}}{\partial \delta_2}\right)^{(0)} \Delta \delta_2^{(0)} + \dots + \left(\frac{\partial \mathbf{F}_{iq}}{\partial \delta_n}\right)^{(0)} \Delta \delta_n^{(0)} + \left(\frac{\partial \mathbf{F}_{iq}}{\partial |\mathbf{V}_2|}\right)^{(0)} \Delta \mathbf{V}_2^{(0)} \quad (\text{I.49})$$

Donc on peut écrire le système comme suit :

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}^{(0)} \\ \Delta \mathbf{Q}^{(0)} \end{bmatrix} = [\mathbf{J}^{(0)}] \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta \mathbf{V}^{(0)} \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \Delta \delta^{(0)} \\ \Delta \mathbf{V}^{(0)} \end{bmatrix} = [\mathbf{J}^{(0)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}^{(0)} \\ \Delta \mathbf{Q}^{(0)} \end{bmatrix} \quad (\text{I.50})$$

On rappelle que :

$$\Delta \delta_i^{(k)} = \delta_i^{(k+1)} - \delta_i^{(k)} \quad i \neq 1 \text{ (ref)}, \quad i \neq 2 \text{ (cont)} \quad \Delta |\mathbf{V}_i|^{(k+1)} = |\mathbf{V}_i|^{(k+1)} - |\mathbf{V}_i|^{(k)} \quad (\text{I.51})$$

L'adaptation de (I.43) (I.44) avec (I.45) donne :

$$\begin{bmatrix} \delta_i^{(k+1)} \\ |\mathbf{V}_i|^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(k)} \\ |\mathbf{V}|^{(k)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |\mathbf{V}| \end{bmatrix} \Leftrightarrow \begin{bmatrix} \delta_i^{(k+1)} \\ |\mathbf{V}_i|^{(k+1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta^{(k)} \\ |\mathbf{V}|^{(k)} \end{bmatrix} + [\mathbf{J}^{(k)}]^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P}^{(k)} \\ \Delta \mathbf{Q}^{(k)} \end{bmatrix} \quad (\text{I.52})$$

D'une manière générale

$$\begin{bmatrix} \Delta \mathbf{P} \\ \Delta \mathbf{Q} \end{bmatrix} = [\mathbf{J}] \begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta |\mathbf{V}| \end{bmatrix} \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} J_1 & J_2 \\ J_3 & J_4 \end{bmatrix} \quad (\text{I.53})$$

J_1, J_2, J_3, J_4 Soyons-les sous matrices de Jacobienne. [13]

❖ Organigramme NR :

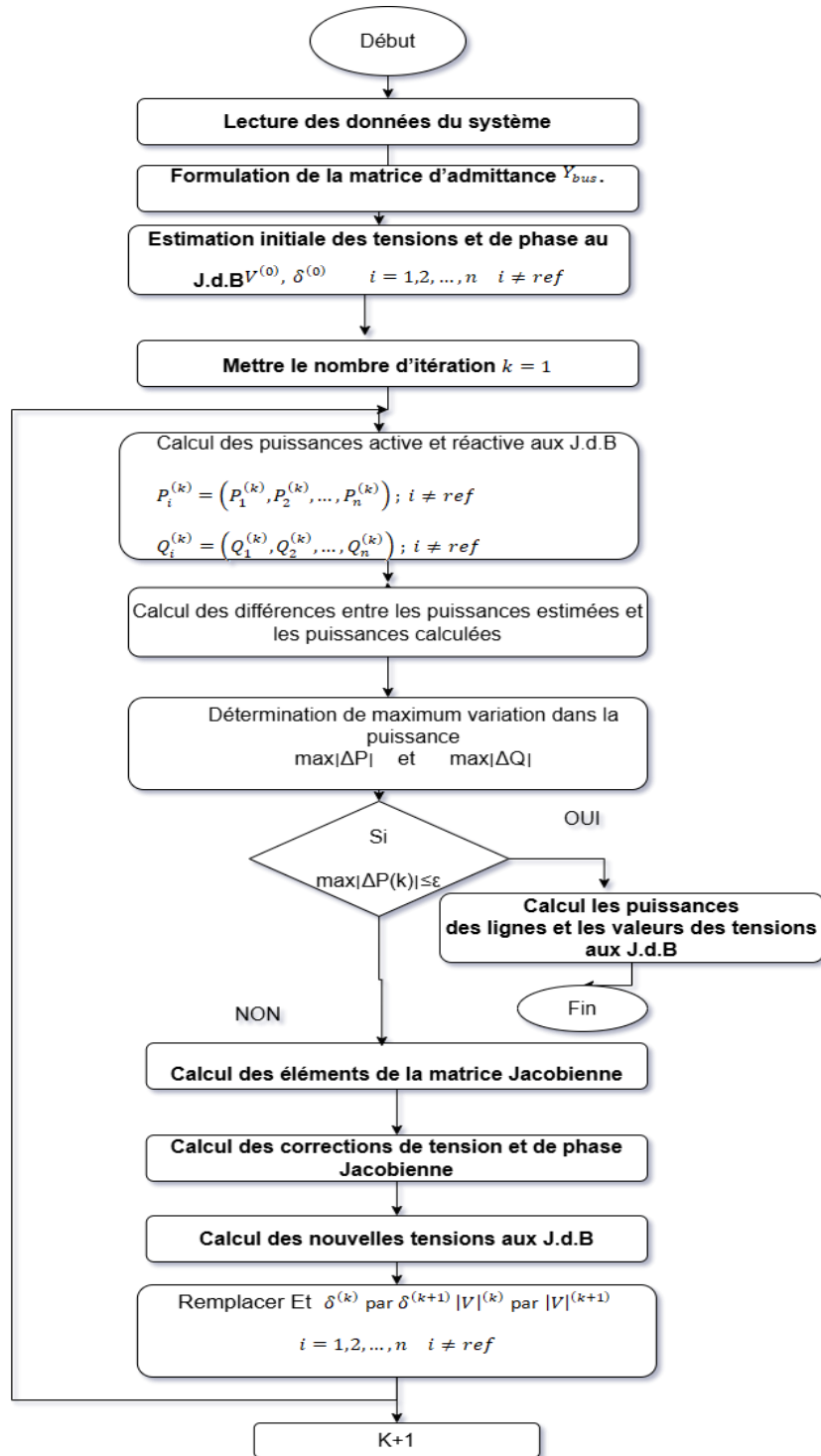


Figure I.7. Organigramme simplifié de l'algorithme de Newton-Raphson

Conclusion

Le problème de répartition de charges occupe une partie très importante dans la procédure de commande et de contrôle des réseaux électriques. Il est largement utilisé dans les centres de contrôle des systèmes de puissance pour étudier les problèmes d'exploitation des réseaux électriques et améliorer la précision des calculs des pertes de transmission et des facteurs de pénalité. De plus, dans ce chapitre, nous avons présenté une définition d'écoulement de puissance, réalisé la modélisation des différents éléments du réseau et abordé certaines méthodes numériques utilisées pour leur analyse.

Chapitre II :

Energies

renouvelables

Introduction

Les énergies renouvelables (solaire, éolienne, hydraulique, géothermique) sont des sources naturelles et inépuisables qui s'imposent comme une solution clé face aux défis environnementaux actuels. Contrairement aux combustibles fossiles, elles sont propres et n'émettent quasiment pas de gaz à effet de serre, jouant ainsi un rôle majeur dans la lutte contre le réchauffement climatique. En favorisant le développement durable, elles permettent aux pays de diversifier leurs ressources et de réduire leur dépendance énergétique. Bien qu'elles fassent face à des défis majeurs comme un coût initial élevé et l'intermittence de leur production, ce chapitre détaille leurs différents types, leur fonctionnement et leur intégration au réseau électrique.

II.1. Définition d'énergie renouvelable

Le monde d'aujourd'hui a connu une transformation fondamentale du domaine des systèmes de production de l'électricité, qui est la dérégulation du marché de l'électricité. Les raisons de cette dérégulation sont variées et multiples selon les pays. Cependant une de ces conséquences est l'apparition de nouveaux moyens de production nommés les énergies renouvelables au sein des réseaux électriques existants. Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie inépuisable, disponibles à volonté, diverses et variées. Grâce à ces énergies peu polluantes, on peut envisager un système de production énergétique prolifique qui possède de nombreux avantages. Elles sont plus propres, plus respectueuses de la nature que les énergies fossiles et fissiles, écologiques, disponibles en masse autour du globe et sont gratuites une fois les installations de production rentabilisées [14].

II.2. Types d'énergies renouvelables

II.2.1. Energie éolienne

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. Le soleil chauffe inégalement la Terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent. Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité dans des éoliennes, appelées aussi aérogénérateurs, grâce à la force du vent [15]. L'énergie éolienne, sans conteste est l'énergie propre par excellence. Sans rejet ni déchet d'aucune sorte, elle permet avec un bon coefficient de performance d'assurer une bonne indépendance énergétique. Sur terre ou off-shore, les éoliennes démontrent d'excellentes capacités de production et sont des alternatives viables pour les territoires les plus reculés dont l'accès à l'électricité est difficile [16].



Figure II.1. Champ de tours d'éolienne

II.2.1. L'énergie hydraulique

L'énergie hydraulique permet de produire de l'électricité, dans les centrales hydroélectriques, grâce à la force de l'eau. Cette dernière dépend soit de la hauteur de la chute d'eau (centrales de haute ou moyenne chute) ou du débit des fleuves et des rivières (centrales au fil de l'eau) [17].

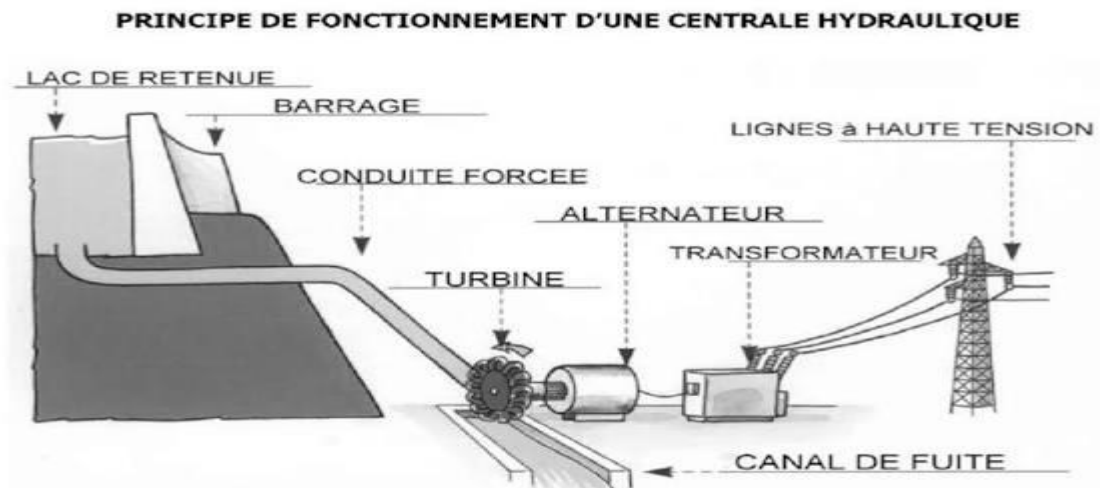


Figure II.2. Schéma de fonctionnement d'une centrale hydroélectrique

II.2.2. Energie biomasse

On appelle les énergies biomasse tous les matériaux d'origine biologique employés comme combustible pour la production de chaleur, d'électricité, de gaz et de carburants. Le bois, le biogaz et les biocarburants (ou agro carburants) sont les principales énergies biomasse. Toutes ces énergies sont renouvelables, émettent moins de CO_2 dans l'atmosphère à l'utilisation et permette, quand cela est possibles, l'exploitation des ressources locales. Il s'agit d'énergie solaire stockée sous forme organique grâce à la photosynthèse. Elle est exploitée par combustion. Cette énergie est renouvelable à condition

que les quantités brûlées n'excèdent pas les quantités produites ; cette condition n'est pas toujours remplie. On peut citer notamment le Boisset les biocarburants. La biomasse peut produire de l'énergie par combustion dans une chaudière. Elle peut aussi produire par méthanisation du biogaz, qui sera converti en énergie. Des procédés permettent aussi la production de biocarburants à partir de colza ou de betteraves (diester, méthanol...) [18].



Figure II.3. Bilan de cycle biomasse [19]

II.2.3. L'énergie géothermique

L'énergie géothermique, c'est la chaleur stockée au-dessous de la surface du sol. Cette chaleur provient pour l'essentiel de la radioactivité naturelle des roches de la croûte terrestre, et pour une faible part, des échanges thermiques avec les zones plus profondes de la Terre. Ce que l'on appelle géothermie, c'est l'utilisation de cette chaleur. La chaleur terrestre est une source d'énergie quasiment inépuisable mais elle reste un parmi les sources énergétiques renouvelables et qui dépend de la géographie de pays. [20]

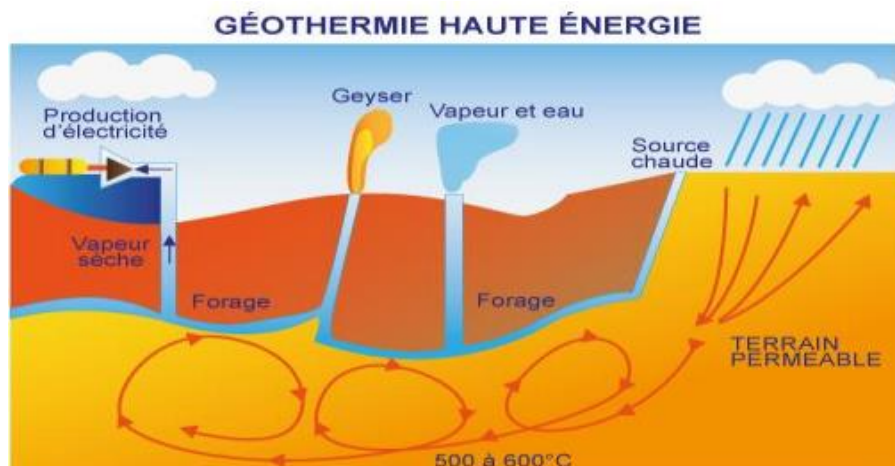


Figure II.4. Energie Géothermie

II.3. L'énergie solaires

La transformation du rayonnement solaire en électricité par le processus photovoltaïque est un des moyens d'exploitation du gisement solaire. Elle est réalisée par des cellules photovoltaïques (PV). Il est à noter qu'en début de cette terminologie, aucune énergie n'est stockée dans une cellule, ni sous forme chimique ni sous aucune autre forme. Ce n'est pas une pile, mais un convertisseur instantané, qui ne pourra fournir une énergie sous forme électrique que s'il reçoit une énergie sous forme de rayonnement. Une cellule sous obscurité totale va se comporter comme un composant passif. La cellule solaire ne peut être assimilée à aucun autre générateur classique d'énergie électrique de type continu. Elle n'est ni une source de tension constante ni une source de courant constant. Elles possèdent des caractéristiques électriques non linéaires dépendant de l'éclairement.

Actuellement, le rendement de conversion d'énergie solaire en énergie électrique est encore faible (souvent inférieur à 12 %) et sous un ensoleillement nominal de 1000 W/m², 12 m² de panneaux PV sont nécessaires pour fournir 1 kW crête. Ce qui induit un coût élevé du watt crête. Ce rendement faible ainsi que le coût élevé de la source photovoltaïque ont incité les utilisateurs à exploiter le maximum de puissance électrique disponible au niveau du générateur PV. Ce maximum est généralement obtenu en assurant une bonne adaptation entre le générateur PV et le récepteur associé. Cette adaptation est effectuée à l'aide de convertisseurs statiques contrôlés pour différents modes de fonctionnement. Dans ce chapitre, le principe de la production photovoltaïque sera rappelé et les principales caractéristiques de la source photovoltaïque. Puis, les différents types de systèmes photovoltaïques seront présentés [21]. et en finissent par les avantages et inconvénients des installations PV.

II.3.1. L'énergie solaire Photovoltaïques

L'énergie solaire est la fraction de l'énergie de rayonnement solaire qui apporte l'énergie thermique et la lumière prévenante sur la surface de la terre après filtrage par l'atmosphère terrestre. Cette énergie produite par l'homme en captant le rayonnement émis par le soleil principalement sous forme électrique ou thermique, c'est l'une des principales formes d'énergie renouvelables. Dans une maison solaire, l'apport solaire permet de faire de l'économie importante. Ce type de montage est adapté aux installations ne pouvant être raccordées au réseau. L'énergie produite doit être directement consommée et/ou stockée dans des accumulateurs pour permettre de répondre à la totalité des besoins. L'énergie solaire permet donc de chauffer tout ou partie d'un bâtiment pour un cout proportionnel quasi nul [22]. L'énergie photovoltaïque (PV) est la transformation directe de la lumière en électricité, On utilise pour cela une

cellule photovoltaïque (photopile). Le soleil est à l'origine de toutes les formes d'énergie présentes sur terre (à l'exception de l'énergie nucléaire). Le rayonnement solaire apporte à la terre de la chaleur et de la lumière. Cette énergie peut être captée de trois façons : en utilisant directement la chaleur (chauffage solaire direct capteurs thermiques), en transformant la lumière en électricité (capteurs photovoltaïques) ou en transformant la chaleur en électricité (centrales électriques solaires) [23]

II.3.2. Rayonnement solaire

Malgré la distance considérable qui sépare le soleil de la terre 150×10^6 Km, la couche terrestre reçoit une quantité d'énergie importante 180×10^6 GW. Cette énergie quittera la surface du soleil sous forme de rayonnement électromagnétique compris dans une longueur variant de 0.22 à $10 \mu\text{m}$.

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement comme suit : - 9% dans la bande des ultraviolets ($< 0.4 \mu\text{m}$). - 47% dans la bande visible (0.4 à $0.8 \mu\text{m}$). - 44% dans la bande des infrarouges ($> 0.8 \mu\text{m}$) [24]

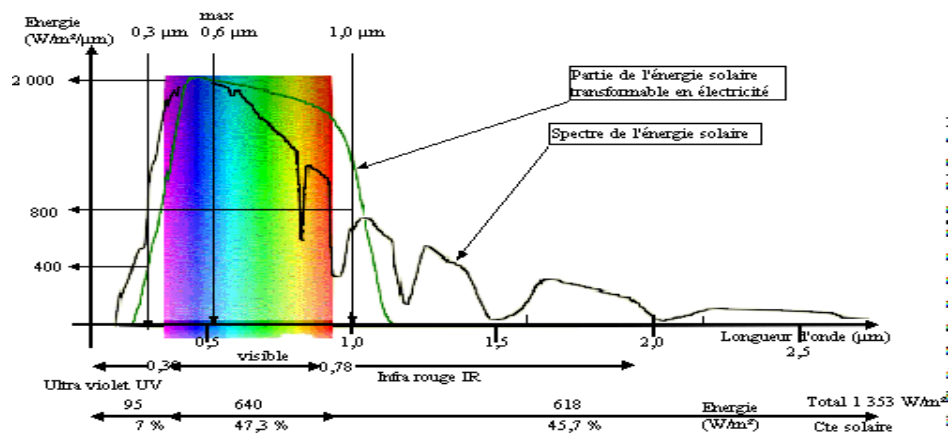


Figure II.5. Réponse spectrale d'une cellule (PV)

II.3.2.1. Types de rayonnement solaire reçus au sol

a. Rayonnement direct

C'est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ces rayons sont parallèles entre eux. Il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs. Il peut être mesuré par un Pyranomètre [25].

b. Rayonnement diffus (ID)

Qui résulte des diffractions du rayonnement direct par les nuages et les particules atmosphériques. [26].

c. Rayonnement réfléchi (IR)

Le rayonnement réfléchi est à prendre en compte seulement dans le cas d'une surface inclinée. Il est directement proportionnel au rayonnement global. Le sol réfléchit une partie de l'éclairement qu'il reçoit en fonction de sa nature.

- ❖ Sol cultivé 10 à 25%
- ❖ Neige 60 à 90%,
- ❖ Sable 30 à 40%.

Albédo : c'est le rapport du rayonnement incident diffusé ou réfléchi sur le rayonnement incident.

Ce terme étant généralement réservé au sol ou aux nuages, c'est une valeur moyenne de leur réflectance pour le rayonnement considéré et pour tous les angles d'incidences possibles. Par définition, le corps noir possède un albédo nul [27].

Une simple formule représentant l'albédo du sol peut être défini comme suit :

$$\text{Albédo } (\rho) = \frac{\text{Energie réfléchie}}{\text{Energie reçue}}$$

Sur le tableau I.2 on donne quelques valeurs de l'albédo suivant la surface du sol :

Tableau II.1. Valeurs d'albédo selon différents types de sol. [28]

Surfaces du sol	Albédo
Surface d'eau	0.01 à 0.1
Fore	0.05 à 0.2
Sol cultivé	0.07 à 0.14
Pierres et Rochers	0.15 à 0.25
Champs et prairies	0.1 à 0.3
Sol nul	0.15 à 0.4
Nige ancien	0.5 à 0.7
Nige fraîche	0.8 à 0.95

d. Rayonnement global (IG)

- ❖ *Rayonnement Global sur une surface horizontale (IGh)* : est la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus.
- ❖ *Le rayonnement Global sur une surface inclinée (IGi)* : est la somme des composantes directe, diffuse et réfléchi par le sol du rayonnement solaire [29].

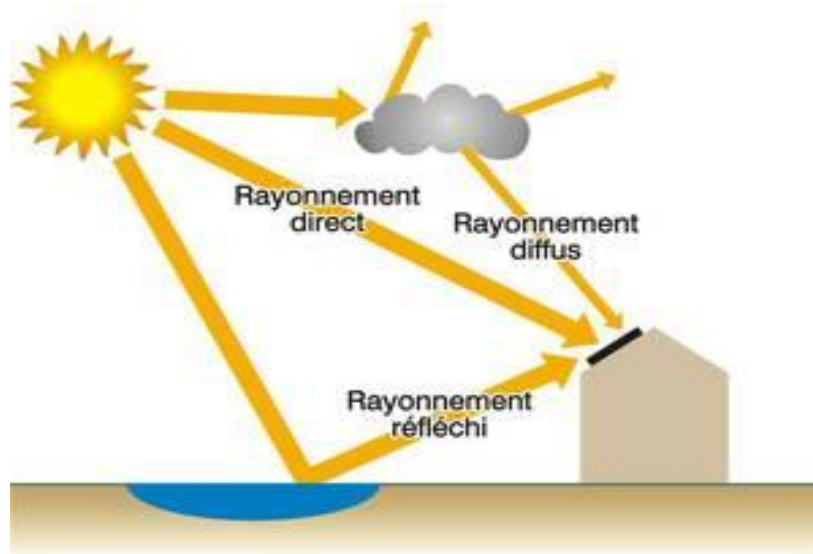


Figure II.6. Rayonnement global

II.3.3. L'effet Photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque (PV) est la transformation directe de la lumière en électricité. A l'encontre de l'énergie solaire passive, qui utilise les éléments structuraux d'un bâtiment pour mieux le chauffer (ou le refroidir), et de l'énergie solaire active, qui utilise un caloporteur (liquide ou gazeux) pour transporter et stocker la chaleur du soleil (on pense au chauffe-eau), l'énergie photovoltaïque n'est pas une forme d'énergie thermique. Elle utilise une cellule PV pour transformer directement l'énergie solaire en électricité. L'effet photovoltaïque, c'est-à-dire la production d'électricité directement de la lumière, fut observée la première fois, en 1839, par le physicien français Edmond Becquerel. Toutefois, ce n'est qu'au cours des années 1950 que les chercheurs de la compagnie Bell Téléphone, aux États-Unis, parvinrent à fabriquer la première photopile, l'élément primaire d'un système photovoltaïque [28]

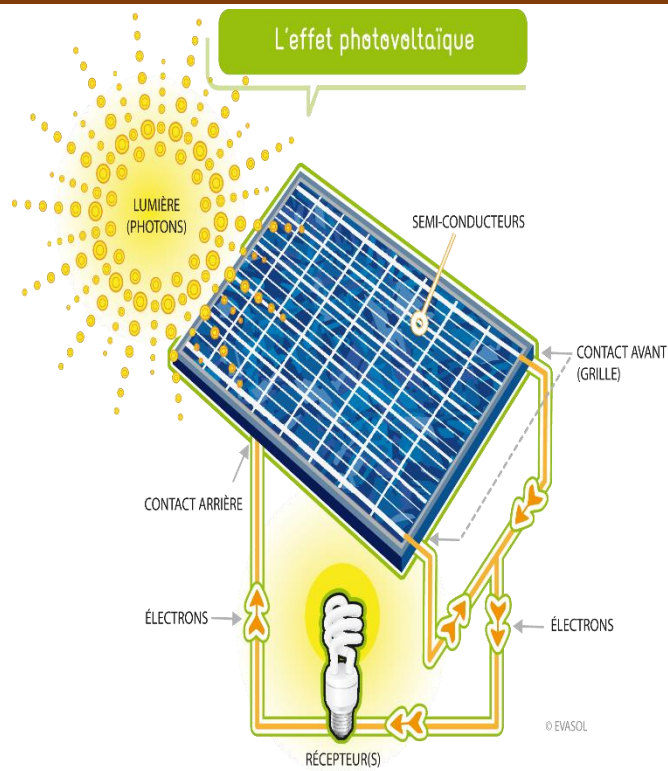


Figure II.7. Panneau solaire

Un panneau solaire photovoltaïque (ou module solaire photovoltaïque) est un générateur électrique de courant continu constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles électriquement, qui sert de module de base pour les installations photovoltaïques et notamment les centrales solaires photovoltaïques [30].

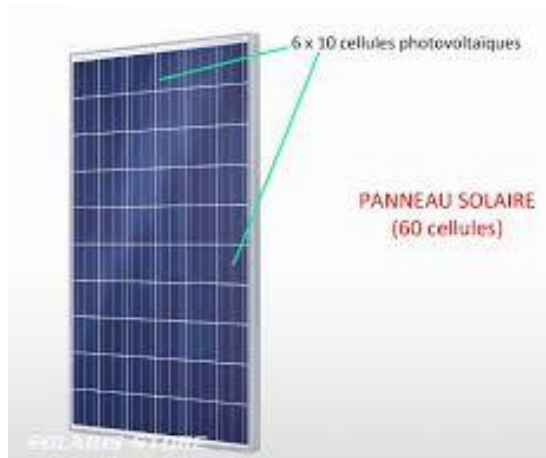


Figure II.8. Panneaux photovoltaïques

Module photovoltaïque La cellule individuelle, unité de base d'un système photovoltaïque, ne produit qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt. Pour

produire plus de puissance, les cellules sont assemblées pour former un module. Les connections en série de plusieurs cellules augmentent la tension pour un même courant, tandis que la mise en parallèle accroît le courant en conservant la tension. La puissance crête, obtenue sous un éclairage maximal sera proportionnelle à la surface du module. La rigidité de la face avant (vitre) et l'étanchéité sous vide offerte par la face arrière soudée sous vide confèrent à l'ensemble sa durabilité [31].

II.3.4. Cellule photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par l'effet photovoltaïque. Elles sont réalisées à l'aide des matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. La structure la plus simple d'une cellule photovoltaïque comporte une jonction entre deux zones dopées différemment du même matériau (homo-jonction) ou entre deux matériaux différents (hétérojonction). Le but de la structure photovoltaïque, c'est de créer un champ électrique interne.

Dans la (Figure II.9.) un échantillon schématique d'une configuration de la cellule solaire, Elle se compose d'un abri du verre (g), un encapsulant (e), et un métal en arrière contact (m) afin de réduire les pertes par réflexion du rayonnement incident [32]

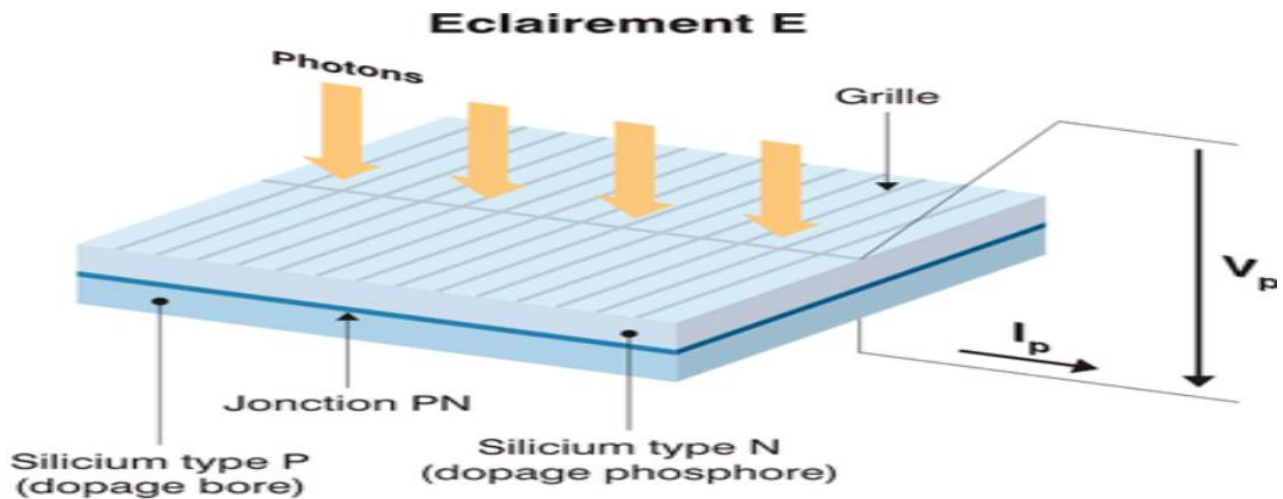


Figure II.9. Un échantillon schématique de la cellule

II.3.5. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Lorsque la cellule est exposée au rayonnement solaire, les photons d'énergie ($E_{ph} = h\nu$) pénétrant dans la cellule solaire transmettent leur énergie aux atomes de la jonction. Si cette énergie est suffisamment élevée, elle peut faire passer les électrons de la bande de valence à la bande de conduction

du matériau semi-conducteur et créer ainsi des paires « électron- trou ». Les électrons (charges N) et les trous (charges P), sont alors maintenus séparés par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel et un courant électrique circule (Figure II.10.) [33].

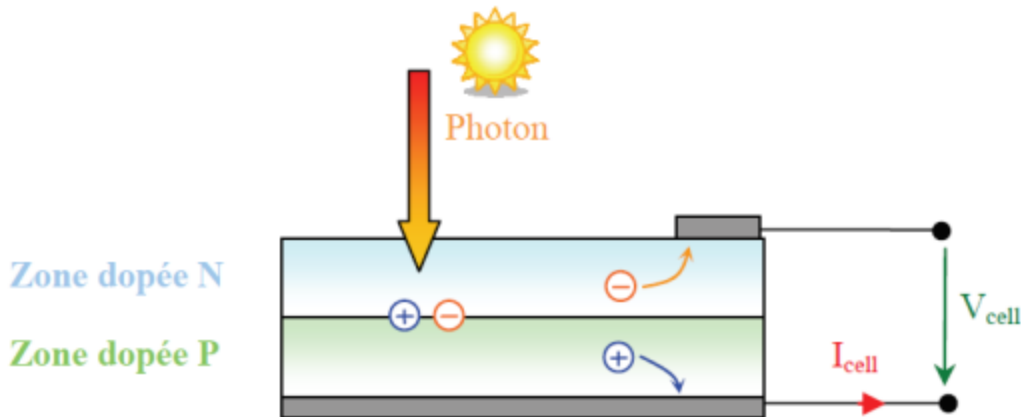


Figure II.10. Principe de la conversion photovoltaïque

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par a un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent.

Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [34].

- a. Les cellules monocristallines
- b. Les cellules poly cristallines
- c. Les cellules amorphes

II.3.6. Types d'installations photovoltaïques

II.3.6.1. Systèmes PV autonomes

Le but de cette installation est d'assurer l'énergie demandée par la charge en tout temps. Elle comporte les éléments suivants : un ou plusieurs PV, une batterie de stockage et son contrôleur de charge et un onduleur autonome. [35]. Ce système est utilisé pour les installations qui ne sont pas connectées au réseau, citons par exemple : les sites isolés (îles, en montagnes, désert), les éclairages pub publics. Deux types de connexion sont distingués : directe et indirecte.

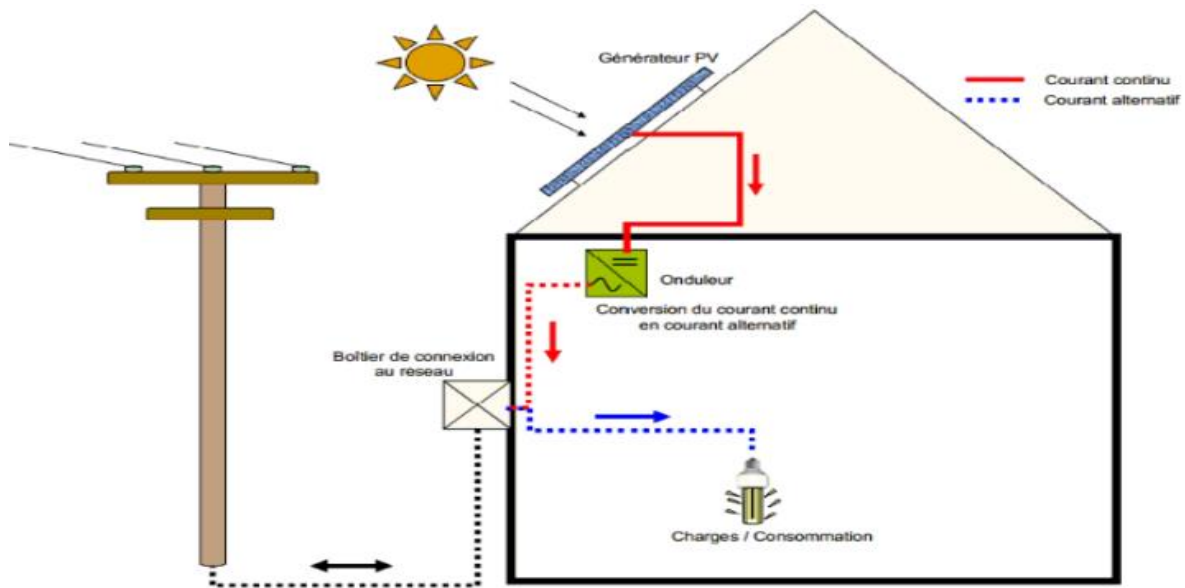


Figure II.11. Schéma d'une installation PV autonome

II.3.6.2. Systèmes PV connectés au réseau

Un système PV connecté au réseau est un système photovoltaïque qui est connecté au réseau électrique public. Ce type de système est également connu sous le nom de système PV interconnecté. Le fonctionnement d'un système PV connecté au réseau est relativement simple. Les panneaux solaires captent l'énergie solaire et la convertissent en électricité. Cette électricité est ensuite envoyée à un onduleur, qui convertit le courant continu produit par les panneaux solaires en courant alternatif, qui est le type d'électricité utilisé par les appareils électriques. [36]

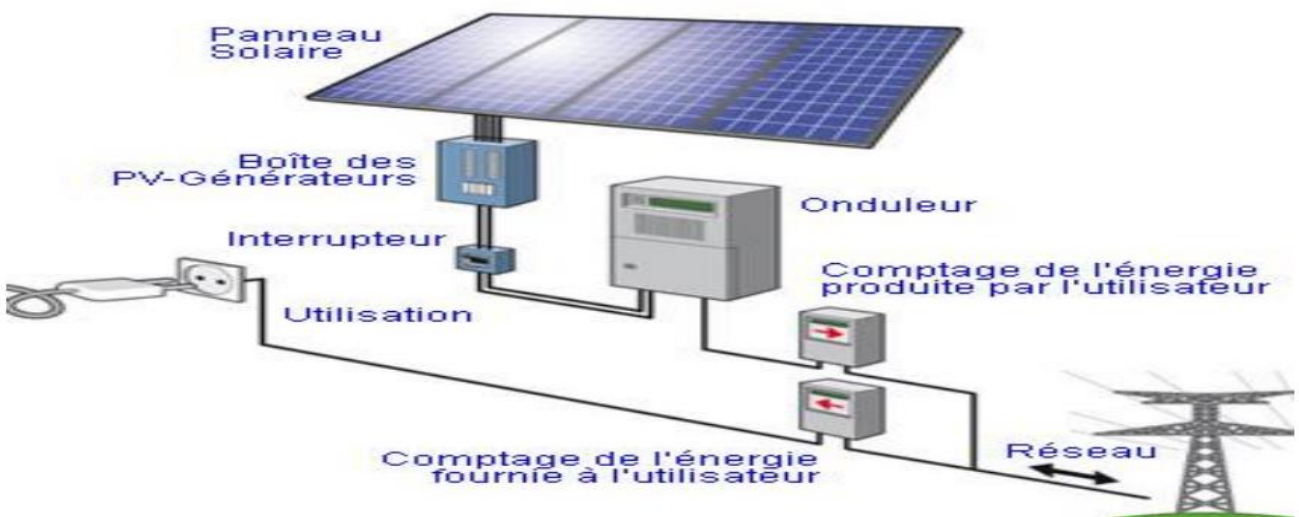


Figure II. 12.. Schéma d'une installation PV connecté au réseau

II.3.7. Comportement d'un module photovoltaïque

II.3.7.1. Influence de la température

La température a une influence considérable sur le comportement de la cellule et donc sur son rendement. Cette influence se traduit principalement par une diminution de la tension générée (et une très légère augmentation du courant).

Suivant les modèles, ce comportement induit, par degré, une perte de 0.5 % du rendement par rapport au rendement maximum de la cellule [37].

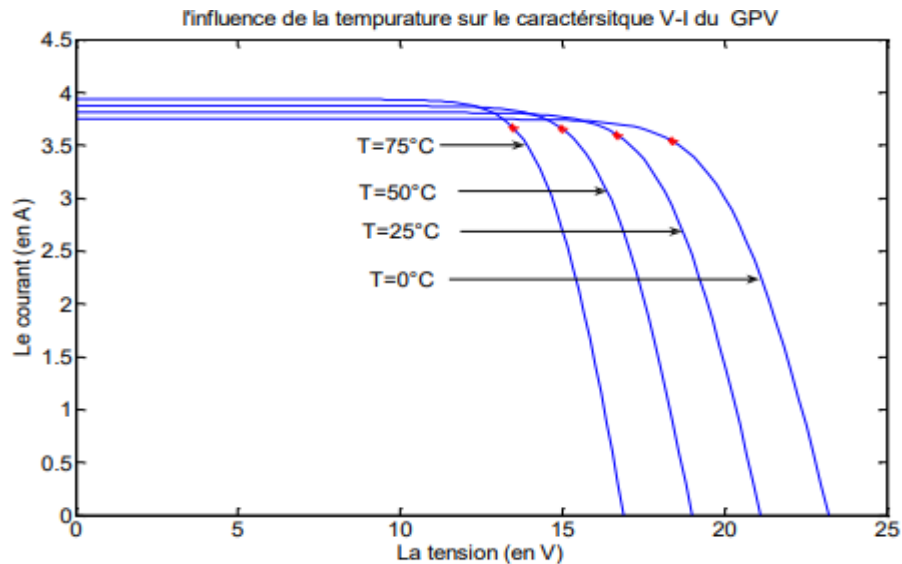


Figure II.13. Caractéristique $I(V)$ pour température

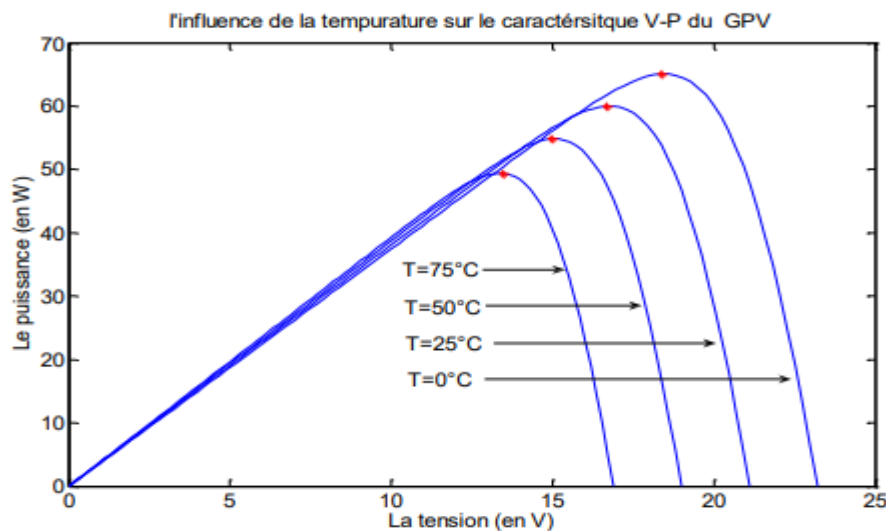


Figure II.14. Caractéristique $P(V)$ pour température

II.3.8. Influence d'éclairement

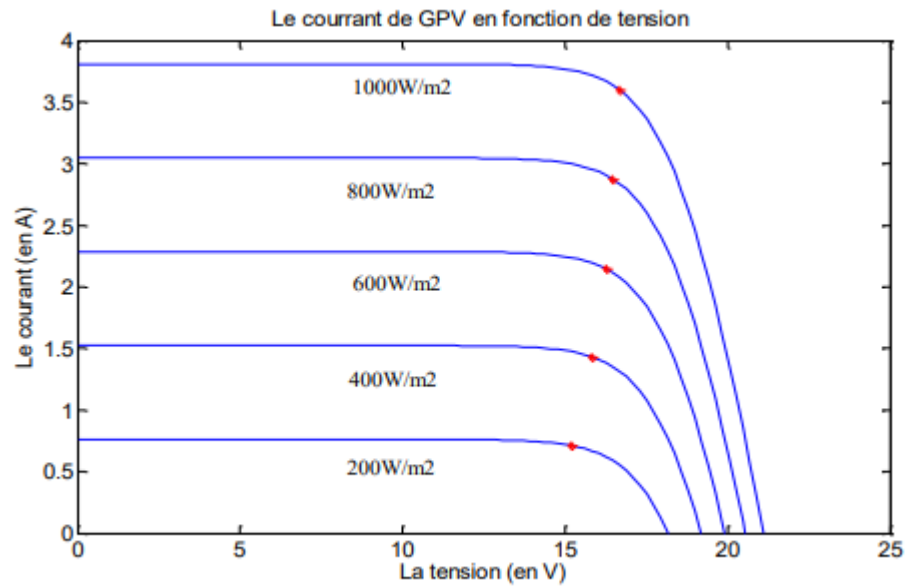


Figure II.15. Caractéristique $I(V)$ pour d'éclairement ($T=25^{\circ}\text{C}$)

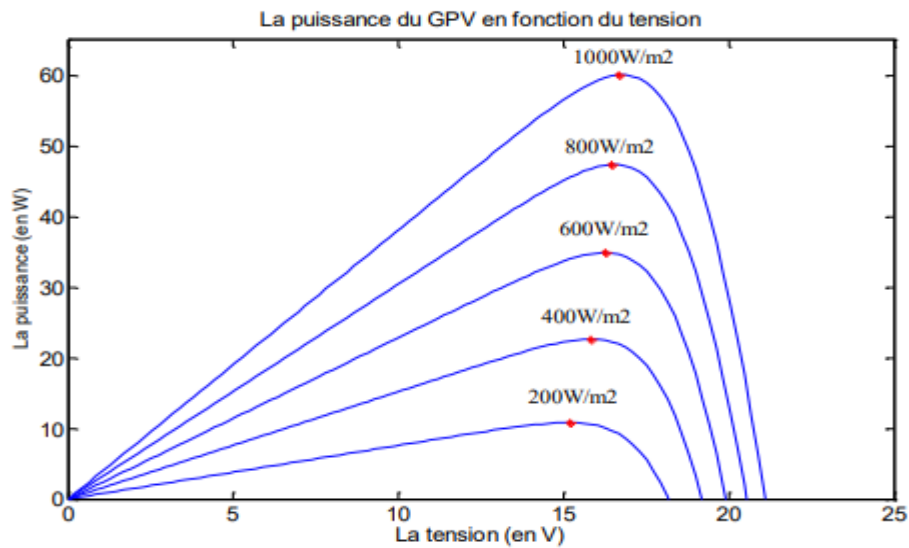


Figure II.16. Caractéristique $P(V)$ pour d'éclairement ($T=25^{\circ}\text{C}$)

II.3.9. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs) :

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé [38]. Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans

le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs [39].

La technique du découpage, apparue environ dans les années soixante, a apporté une solution au problème du mauvais rendement et de l'encombrement des alimentations séries. Dans une alimentation à découpage (Figure II.17), la tension d'entrée est "hachée" à une fréquence donnée par un transistor alternativement passant et bloqué. Il en résulte une onde carrée de tension qu'il suffit de lisser pour obtenir finalement une tension continue [39].

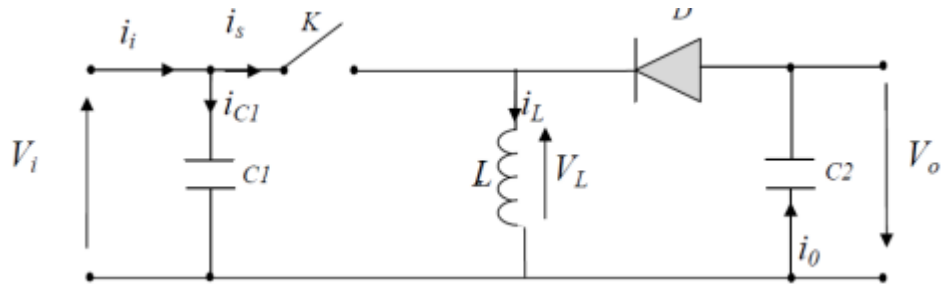


Figure II.17. Schéma de principe d'un type d'alimentation à découpage

D'un point de vue circuit, l'hacheur apparaît comme un quadripôle (figure II.18.), jouant le rôle d'organe de liaison entre deux parties d'un réseau. On peut le considérer comme un transformateur de grandeurs électriques continues [39].

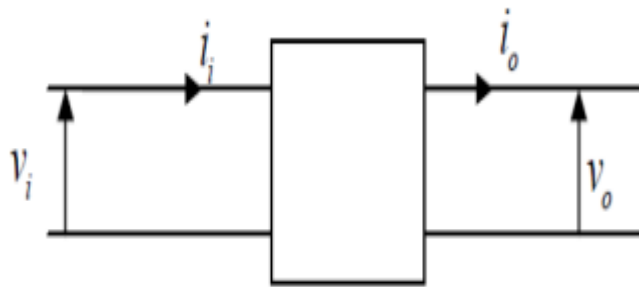


Figure II.18. Schéma d'un quadripôle électrique

La régulation de la tension de sortie à un niveau constant est réalisée par une action sur le "rapport cyclique", défini comme la fraction de la période de découpage où l'interrupteur est passant (figure II.19.). L'interrupteur est un dispositif semi-conducteur en mode tout-rien (bloqué – saturé), habituellement un transistor MOSFET. Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé la chute de

tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite [39]. Pendant le fonctionnement de le hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence constante f

Avec un temps de fermeture $= Td$ et un temps d'ouverture $= (1-d) T$. Où :

T est la période de commutation qui est égale à $1/f$

d le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0,1]$).

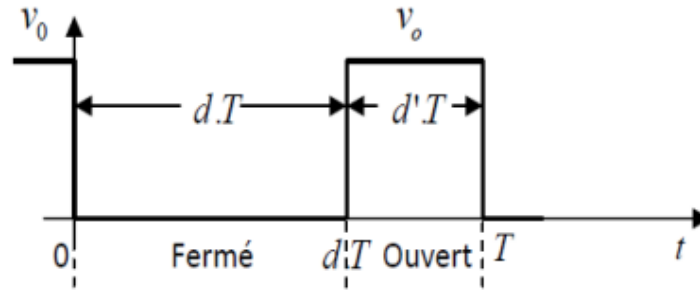


Figure II.19. Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur

Dans ce travail, parmi les convertisseurs DC-DC existant dans la littérature on présente le principe des trois types des convertisseurs à découpage comme dévolteur, survolteur et mixte. Ces convertisseurs sont utilisés fréquemment dans les systèmes PV pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux PV avec les différentes charges.

a. Convertisseur survolteur

Le convertisseur survolteur, connu aussi sous le nom de « Boost » ou hacheur parallèle. Il est utilisé pour convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure. Son schéma de principe est présenté sur (figure II.20) [40].

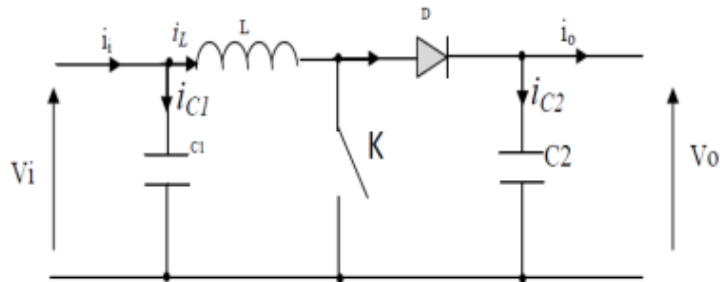


Figure II.20. Schéma de principe d'un survolteur

b. Convertisseur dévolteur

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur « Buck » ou hacheur série. Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure. (Figure II.21) représente le schéma de principe du convertisseur dévolteur [40], [39].

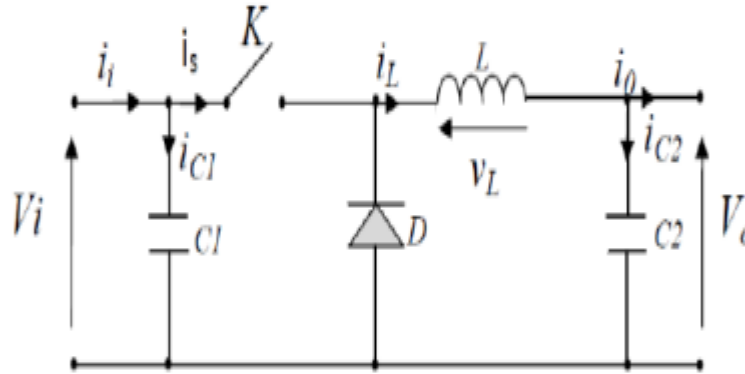


Figure II.21. Schéma du circuit électrique d'un convertisseur dévolteur

c. Convertisseur dévolteur-survolteur

Le convertisseur dévolteur-survolteur a acquis les caractéristiques et les propriétés électriques des deux types évoqués précédemment. Il présente donc une sortie d'un transformateur hybride (abaisseur/élevateur) pour une tension d'entrée/sortie continue ; son schéma de base est illustré par La figure II.22 [41], [39], [40].

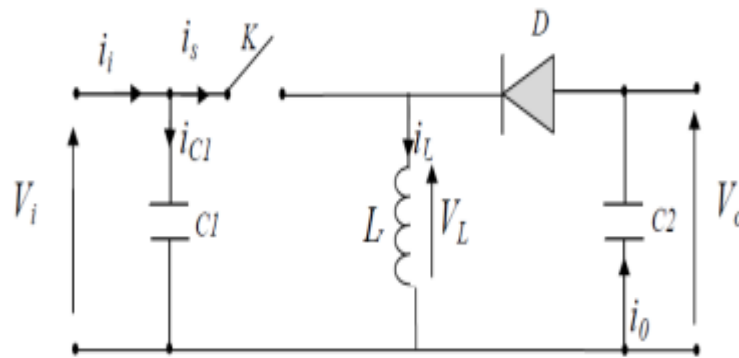


Figure II.22. Schéma de base d'un dévolteur / survolteur

II.3.10. Les convertisseurs DC-AC (onduleur)

Convertisseur DC-AC Pour transformer la tension continue fournie par les panneaux photovoltaïques en une tension "sinusoïdale" on fait appel à un onduleur [42] En fait, cette conversion d'énergie est

satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande. (Figure II.23) représente schéma de principe de l'onduleur. Cette tension peut comporter un ou plusieurs créneaux par alternance suivant qu'il s'agit d'une commande à un créneau par alternance ou d'une commande par Modulation de Largeur d'Impulsions. [43]



Figure II.23. Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)

✓ *L'onduleur à deux niveaux*

L'onduleur de tension triphasé à deux niveaux est constitué de trois bras de commutation, où chaque bras est composé de deux interrupteurs bidirectionnels, qui fonctionnent de manière complémentaire pour éviter le court-circuit de la source de tension continue à l'entrée de l'onduleur. L'interrupteur bidirectionnel peut être réalisé par une diode et un IGBT montés en tête bêche comme montre (figure.II.24) [44]

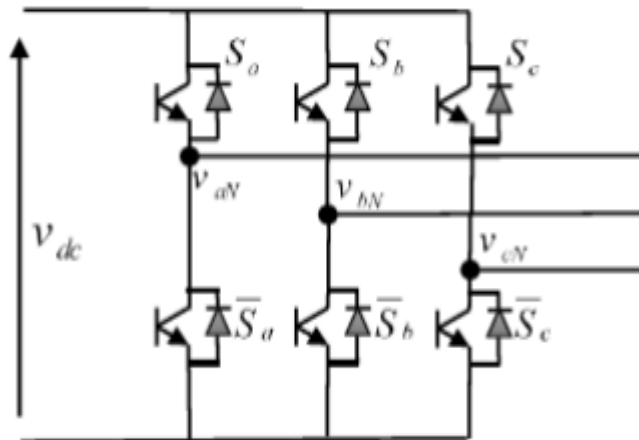


Figure II.24. Onduleur de tension triphasé à deux niveaux

II.3.11. Avantages et inconvénients d'énergie photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques présentent de nombreux avantages, mais ils comportent également quelques inconvénients [45]

1. Les avantages

- La gratuité de l'énergie solaire et l'absence de pollution lors de la production d'électricité.
- La fiabilité et la longue durée de vie de l'installation.
- La structure fixe des panneaux solaires qui ne nécessite pas de mouvements mécaniques. Les coûts de maintenance relativement bas.
- La flexibilité des systèmes photovoltaïques, permettant un dimensionnement adapté aux besoins et une modularité.
- L'absence de bruit généré par l'installation solaire.
- Le potentiel illimité de l'énergie solaire, où seulement 5% de la surface des déserts pourrait suffire à alimenter l'ensemble de la planète.

2. Les inconvénients

- Le coût élevé de l'installation initiale, bien que les prix aient considérablement diminué ces dernières années.
- Le rendement relativement bas de l'effet photovoltaïque, ce qui signifie que seule une partie de l'énergie solaire incidente est convertie en électricité.
- La réduction de la puissance produite en cas de conditions climatiques défavorables, comme la présence de nuages, qui réduit l'intensité du rayonnement solaire atteignant les panneaux photovoltaïques [46].

Conclusion

Ce chapitre consacré aux principes des énergies renouvelables a constitué une base fondamentale pour comprendre les mécanismes d'intégration des ressources durables dans les systèmes énergétiques modernes, où l'accent a été mis en profondeur sur les systèmes photovoltaïques à travers l'analyse de leur comportement physique et de l'influence des variables climatiques, telles que l'irradiation et la température, sur leur rendement. L'assimilation de ces caractéristiques de conversion, ainsi que du rôle

des convertisseurs de puissance dans le raccordement au réseau, met en exergue le défi majeur de l'intégration de cette "Production Décentralisée" d'une manière qui garantit la stabilité du réseau de distribution et réduit les pertes techniques. De ce fait, il apparaît impératif de ne pas se contenter d'un raccordement aléatoire, mais de s'appuyer sur des stratégies d'optimisation précises pour déterminer l'emplacement et la taille optimale de ces unités.

Chapitre III :

Méthodes

d'optimisation

Introduction

Les méthodes d'optimisation constituent l'un des piliers fondamentaux dans les sciences de l'ingénieur, particulièrement en génie électrique. Dans ce chapitre, nous présentons les outils métaheuristiques appliqués pour résoudre le problème complexe de l'allocation optimale et du dimensionnement des unités de production décentralisée (PD) dans les réseaux de distribution. L'objectif est de minimiser les pertes de puissance active tout en améliorant le profil de tension du réseau.

Ces méthodes ont connu une évolution remarquable avec le développement des mathématiques appliquées et de l'informatique. Elles ne se limitent plus aux approches analytiques classiques, mais englobent également des méthodes numériques et approchées, capables de traiter des problèmes complexes et non linéaires. Dans ce contexte, les méthodes d'optimisation se répartissent en plusieurs grandes catégories, notamment les méthodes exactes, fondées sur des modèles mathématiques rigoureux, et les méthodes approchées, incluant les heuristiques et les métaheuristiques, qui ont démontré leur efficacité dans la résolution de problèmes de grande taille et de forte complexité.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les différentes méthodes d'optimisation, en mettant en évidence les caractéristiques de chaque catégorie, leurs domaines d'application, ainsi que leurs avantages et leurs limites. Cela permettra d'orienter le choix de la méthode la plus appropriée pour traiter le problème étudié dans ce travail.

III.1. Définition de l'optimisation

L'optimisation est une branche des mathématiques consistant à rechercher des conditions ou des configurations optimales pour des systèmes variés. Ce mot nous vient du latin optimum qui signifie le meilleur. En d'autres termes, l'optimisation se réfère au processus de trouver les meilleures solutions pour un système donné à partir de toutes les valeurs possibles [47].

En mathématiques, l'optimisation recouvre toutes les méthodes qui permettent de déterminer l'optimum d'une fonction, avec ou sans contraintes. L'optimisation cherche à analyser et à résoudre analytiquement ou numériquement les problèmes qui consistent à déterminer la meilleure solution du problème durant un temps de calcul raisonnable [48].

Elle est très importante en analyse numérique et dans les mathématiques appliquées, fondamentales pour l'industrie et l'ingénierie. En effet, lorsqu'un phénomène économique, physique, chimique... est

exprimé par des équations, il est nécessaire d'optimiser le système afin d'obtenir un rendement maximal ou une configuration idéale [47].



Figure III.1. Principe de base d'une méthodologie d'optimisation

III.2. Les éléments de l'optimisation

L'optimisation peut être définie comme une approche mathématique visant à déterminer le minimum ou le maximum d'une fonction, qu'elle soit à une ou plusieurs variables, dans un domaine d'étude bien défini. Pour aboutir à une solution optimale, plusieurs éléments fondamentaux interviennent, comme illustré dans la figure ci-après.

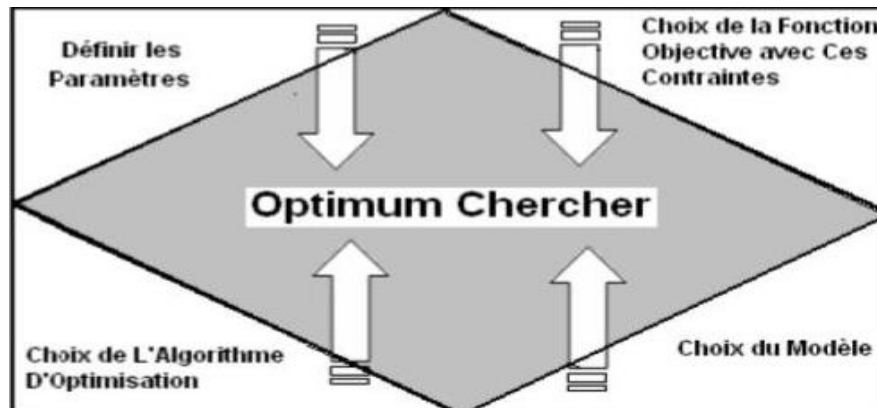


Figure III.2. Éléments fondamentaux du processus d'optimisation

En général, un grand nombre de paramètres peuvent intervenir dans un problème d'optimisation. Il est donc nécessaire d'identifier les paramètres les plus influents sur la fonction objectif. Étant donné le coût parfois élevé des simulations, seuls les paramètres les plus pertinents doivent être retenus : [49].

- **Une fonction objectif** : elle représente l'objectif à atteindre. Sa définition constitue une étape essentielle, car la qualité de la solution obtenue dépend directement de sa

formulation.

- **Un modèle** : un modèle précis, robuste et flexible du système étudié est indispensable. Ce modèle doit être utilisable sur un domaine d'étude aussi large que possible.
- **Un algorithme d'optimisation** : il permet de rechercher la solution optimale ou quasi optimale du problème considéré

III.3. Classification des méthodes d'optimisation

Les différentes méthodes d'optimisation peuvent être classées selon leurs caractéristiques et être réparties en deux grandes catégories :

- Les méthodes exactes.
- Les méthodes approchées.

La figure III.3. répertorie les approches d'optimisation incontournables permettant de résoudre les problématiques techniques majeures rencontrées dans les domaines de l'ingénierie et de la technologie .

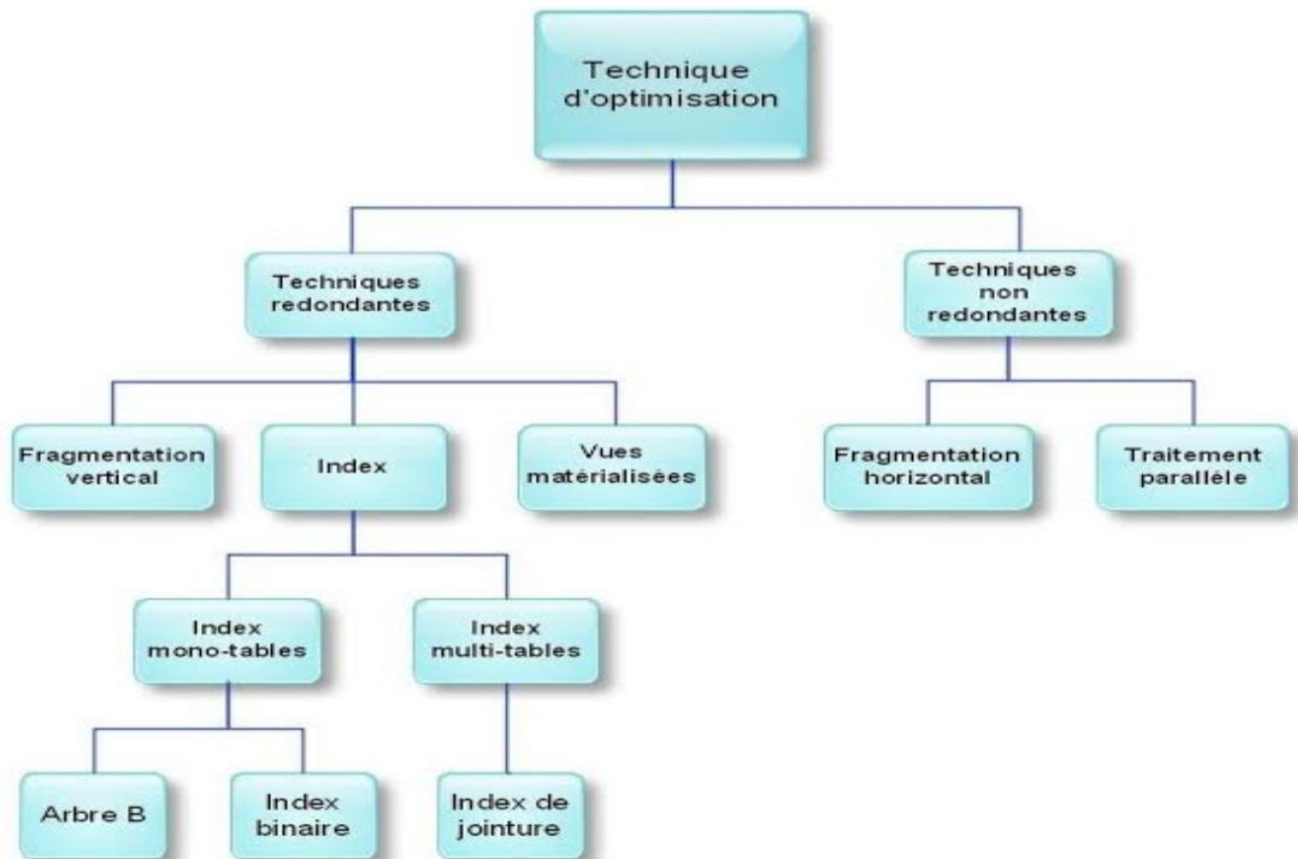


Figure III.3. Schéma de classification des méthodes d'optimisation

III.3.1. Les méthodes d'optimisation mathématique

Les méthodes exactes fournissent systématiquement une solution (optimale) au problème traité si une telle solution existe. Dans le cas contraire, ce type de méthode permet d'affirmer qu'il n'existe pas de solution au problème traité [50].

Sans doute, la plupart des techniques de programmation mathématiques publiées dans la littérature ont été appliquées au problème de dispatching économique, toutefois, les techniques les plus intéressantes sont [6]:

- Les approches basées sur la technique du gradient réduit.
- La technique de programmation quadratique.
- Les méthodes Newtoniennes.
- La méthode de programmation linéaire.
- Les méthodes de points intérieurs.

Ces méthodes sont peut-être connues par le fait qu'elles garantissent l'optimalité de la solution mais elles sont très gourmandes en termes de temps de calcul et de l'espace mémoire nécessaire, c'est la raison pour laquelle elles sont beaucoup plus utilisées pour la résolution de problèmes faciles. La nécessité de disposer d'une solution de bonne qualité (semi optimale) avec un coût de recherche (temps de calcul et espace mémoire) raisonnable a excité les chercheurs à proposer un autre type de méthodes de résolution de problèmes communément connues par les méthodes approchées [49].

III.3.2. Les méthodes d'optimisation approchées

Les méthodes exactes ne sont pas toujours applicables : elles pâtissent souvent d'un temps d'exécution trop long et de la complexité de certaines fonctions cibles.

Les méthodes approchées fournissent une solution approchée au problème traité. Elles sont en général conçues de manière à ce que la solution obtenue puisse être située par rapport à la valeur optimale : de telle méthodes permettent d'obtenir des bornes inférieures ou supérieures de la valeur optimale tel que: [50]

- Les méthodes Heuristiques.
- Les méthodes Méta-heuristiques.

III.3.2.1. Les méthodes heuristiques

Une heuristique est un algorithme qui fournit rapidement une solution approchée et réalisable, pas nécessairement optimale, pour un problème d'optimisation difficile. Cette méthode approximative est le contraire d'un algorithme exact qui donne une solution optimale pour un problème donné [51].

III.3.2.2. Les méthodes méta-heuristiques:

Les méta-heuristiques sont un ensemble d'algorithmes d'optimisation visant à résoudre les problèmes d'optimisation 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, des sauts de grenouilles, des lucioles ou de l'optimisation par essaims de particules).

Le principe des méta-heuristiques est de minimiser ou de maximiser une fonction objectif. Leur avantage est de trouver un minimum global à un problème de minimisation et de ne pas rester bloqué sur un minimum local [52].

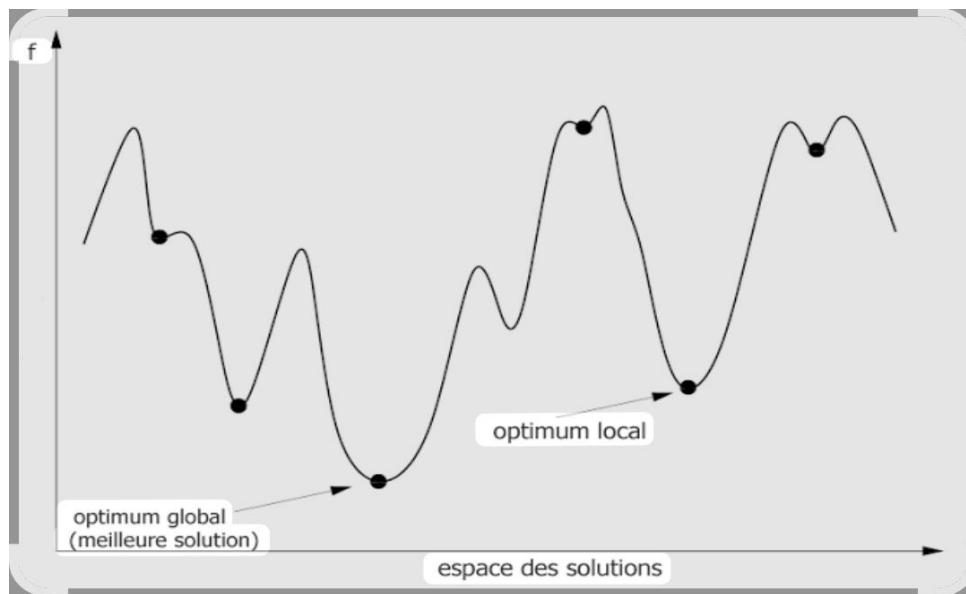


Figure III.4. Représentation simplifiée d'une approche méta-heuristique.

Il existe un grand nombre de méta-heuristiques d'optimisation. Elles se distinguent classiquement en deux groupes : les méthodes locales et les méthodes de recherche globale : [53]

- À partir d'un point de départ quelconque, les méthodes locales permettent d'obtenir le minimum local le plus proche du point de départ. Elles essaient toujours d'améliorer la solution courante et sont donc incapables de s'extraire d'un minimum local puisque cela impliquerait d'accepter

de dégrader la solution courante.

- Les méthodes globales (Tabou, recuit simulé, algorithmes évolutionnaires, etc.) possèdent un mécanisme leur permettant de s'extraire des minima locaux. Elles sont plus adaptées à l'exploration globale de l'espace de recherche le plus souvent au détriment de l'exploration locale [54].

Pour surmonter les limitations des approches locales, l'accent est mis sur les méta-heuristiques globales qui assurent une exploration efficace de l'espace de recherche. Le schéma suivant (Figure III.5) illustre cette classification en mettant en relief les algorithmes stochastiques adoptés dans ce travail, à savoir AHA, GWO et ALO.

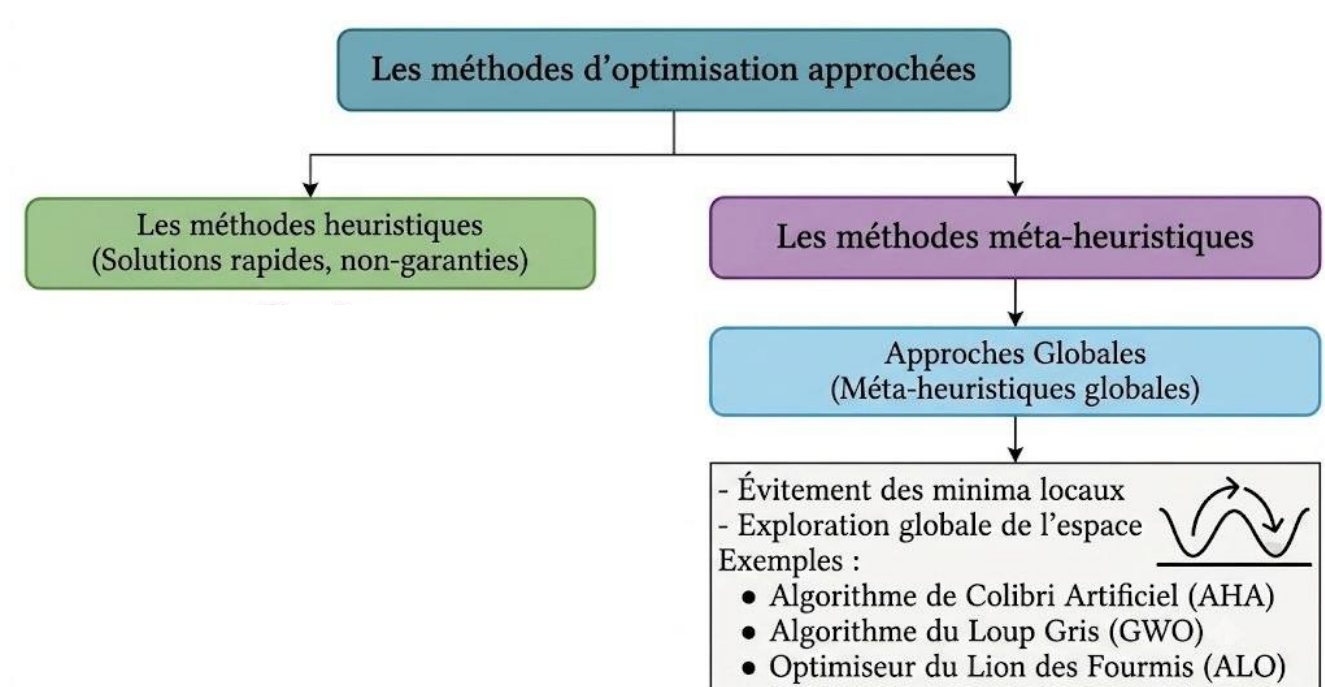


Figure III.5. Classification des méthodes d'optimisation approchées

III.4. Méthodes stochastiques

Ces méthodes s'appuient sur les probabilités et l'aléatoire pour la recherche de solutions, ce qui leur confère une capacité supérieure à trouver l'optimum global sans nécessiter de connaissances préalables sur le gradient de la fonction ou un point de départ spécifique. Bien qu'elles soient très efficaces pour éviter les optima locaux, elles requièrent un coût calculatoire important en raison du grand nombre d'évaluations nécessaires.

Dans cette étude, nous nous focaliserons sur trois métaheuristiques inspirées de la nature : l'algorithme des Lions de Fourmis (Ant Lion Optimizer - ALO), l'algorithme du Colibri Artificiel

(Artificial Hummingbird Algorithm - AHA) et l'algorithme du Loup Gris (Grey Wolf Optimizer - GWO), qui ont démontré leur efficacité dans la résolution de problèmes d'optimisation complexes et non linéaires.

III.4.1. Ant Lion Optimizer

L'algorithme Ant Lion Optimizer (ALO), proposé par Sayedali Mirjalili en 2015, est une métaheuristique inspirée du comportement de chasse des antlions dans la nature. Cet algorithme reproduit les principales étapes du processus de chasse, notamment la marche aléatoire des fourmis, la construction des pièges, le piégeage des proies, leur capture ainsi que la reconstruction des fosses.

Les antlions appartiennent à la famille des Myrmeleontidae et passent par deux stades de développement : larvaire et adulte. La phase larvaire constitue la période de chasse active. Les larves creusent des fosses coniques dans le sable afin de piéger leurs proies. Lorsqu'une fourmi tombe dans la fosse, l'antlion projette du sable afin de la faire glisser vers le centre du piège où elle est capturée et consommée. Après la capture, l'antlion nettoie la fosse et la prépare pour une nouvelle chasse.

Dans l'algorithme ALO, les fourmis représentent les solutions candidates, tandis que les antlions représentent les solutions guides. La recherche de la solution optimale est réalisée à travers l'interaction dynamique entre ces deux populations[55].

III.4.1.1. Marche aléatoire des fourmis

L'algorithme ALO imite l'interaction entre les fourmis lions et les fourmis dans le piège. Pour de tels modèles d'interaction, les fourmis sont nécessaires pour se déplacer dans l'espace de recherche et les fourmis sont autorisés à les chasser et à devenir plus en forme à l'aide de pièges. Depuis les fourmis se déplacent de manière stochastique dans la nature lors de la recherche de nourriture, une marche aléatoire est choisie pour le mouvement des fourmis de modélisation comme suit :

$$X(t) = [0, \text{cums}(2r(t_1)) - 1, \text{cums}(2r(t_2)) - 1 \dots \dots, \text{cums}(2r(t_n)) - 1] \quad \text{III.1}$$

Où cums calcule la somme cumulée et $r(t)$ est défini comme suit :

$$r(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } rand > 0.5 \\ 0, & \text{if } rand < 0.5 \end{cases} \quad \text{III.2}$$

La position des fourmis est stockée et utilisée pendant le processus d'optimisation dans la matrice suivante :

$$M_{ant} = \begin{bmatrix} ant_{1,1} & ant_{1,2} & \cdots & ant_{1,d} \\ ant_{2,1} & ant_{2,2} & \cdots & ant_{2,d} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ ant_{n,1} & ant_{n,2} & \cdots & ant_{n,d} \end{bmatrix} \quad \text{III.3}$$

Où, M_{ant} est une matrice pour enregistrer la position de chaque fourmi, ant_{ij} est la valeur de la j-ème variable (dimension) de la i-ème fourmi, n est le nombre de fourmis, et d est le nombre de variables. Pendant le processus d'optimisation, la matrice M_{ant} sauvegardera la position de toutes les fourmis (variables de toutes les solutions). La marche aléatoire des fourmis est normalisée pour les maintenir en mouvement dans l'espace de recherche en utilisant l'équation suivante :

Où a_i a indiqué le minimum de marche aléatoire de la i-ème variable, d_i est le maximum de marche aléatoire dans la i-ème variable, c_i^t est le minimum de la i-ème variable à la t-ième itération, et d_i^t indique la i-ème variable maximale à la t-ième itération.

$$X_i^t = \frac{(X_i^t - a_i) \times (d_i - c_i^t)}{(d_i^t - a_i)} + c_i^t \quad \text{III.4}$$

III.4.1.2. Piégeage dans les fosses de fourmis

Les équations suivantes sont utilisées pour représenter mathématiquement le modèle des fosses de fourmis ...

$$c_i^t = \text{Antlion}_j^t + C^t \quad \text{III.5}$$

$$d_i^t = \text{antlion}_j^t + d^t \quad \text{III.6}$$

Où C^t est le minimum de toutes les variables à la t-ième itération, d^t indique le vecteur comprenant le maximum de toutes les variables à la t-ième itération, C_i^t est le minimum de toutes les variables pour la i-ème fourmi, d_i^t est le maximum de toutes les variables pour la i-ème fourmi, et Antlion_j montre la position du j-ième antlion sélectionné à la t-ième itération.

III.4.1.3. Piège de construction

La capacité de chasse du lion de fourmi est modélisée par l'opérateur de la roue de roulette pour sélectionner les lions de fourmis en fonction de leur aptitude pendant l'optimisation. Ce mécanisme donne de grandes probabilités aux lions de fourmis plus aptes à attraper des proies. [55]

III.4.1.4. Glisser les fourmis vers Ant Lion

Les lions fourmis sont capables de construire des pièges proportionnels à leur forme physique et les fourmis sont nécessaires pour se déplacer au hasard. Une fois la fourmi est dans le piège, les lions

fourmis tireront du sable vers le centre de la fosse. Ce comportement fait glisser la fourmi piégée dans le prendre au piège. Le rayon des promenades aléatoires des fourmis est représenté par (10) et (11).

$$c^t = \frac{c^t}{I} \quad \text{III.7}$$

$$d^t = \frac{d^t}{I} \quad \text{III.8}$$

Où I est un rapport, c^t est le minimum de toutes les variables à la t -ième itération, d^t indique le vecteur comprenant le maximum de toutes les variables à la t -ième itération. Ces équations réduisent le rayon de mise à jour des positions des fourmis et imitent la manière glissante des proies à l'intérieur des fosses.

III.4.1.5. Attraper des proies et reconstruire la fosse

La dernière phase de la chasse est lorsque la fourmi atteint le fond de la fosse et est piégée dans la mâchoire du lion. Le lion fourmi attire la fourmi à l'intérieur du sable et consomme son corps. On suppose que la capture de proies se produit lorsque les fourmis deviennent plus en forme (va à l'intérieur du sable) que son lion fourmi correspondant. Ant lion est nécessaire pour moderniser son emplacement à la dernière position de la chassé la fourmi pour améliorer ses chances d'attraper de nouvelles proies.

Il est représenté par l'équation suivante :

$$Antlion_i^t = Ant_i^t, \text{ if } f(Ant_i^t) > f(Antlion_i^t) \quad \text{III.9}$$

Où t est l'itération courante, $Antlion_i^t$ indique la position du j -ème antlion sélectionné à la t -ième itération, et Ant_i^t indique la position de la i -ème fourmi à la t -ième itération.

III.4.1.6. Élitisme

Le meilleur lion fourmi obtenu à chaque itération est conservé comme élite, le lion fourmi le plus apte. Le lion fourmi le plus apte devrait pouvoir affecter les mouvements de toutes les fourmis lors des itérations. On suppose que chaque marche aléatoire de fourmis autour d'un ion de fourmi choisi en la roue de la roulette et l'élite instantanément comme suit :

$$Ant_i^t = \frac{R_A^t + R_E^t}{2} \quad \text{III.10}$$

Où R_A^t est la marche aléatoire autour de l'antlion sélectionné par la roue de roulette à la t -ième itération, R_E^t est la marche aléatoire autour de l'élite à la t -ième itération, et Ant_i^t indique la position de la i -ème fourmi à la t -ième itération.

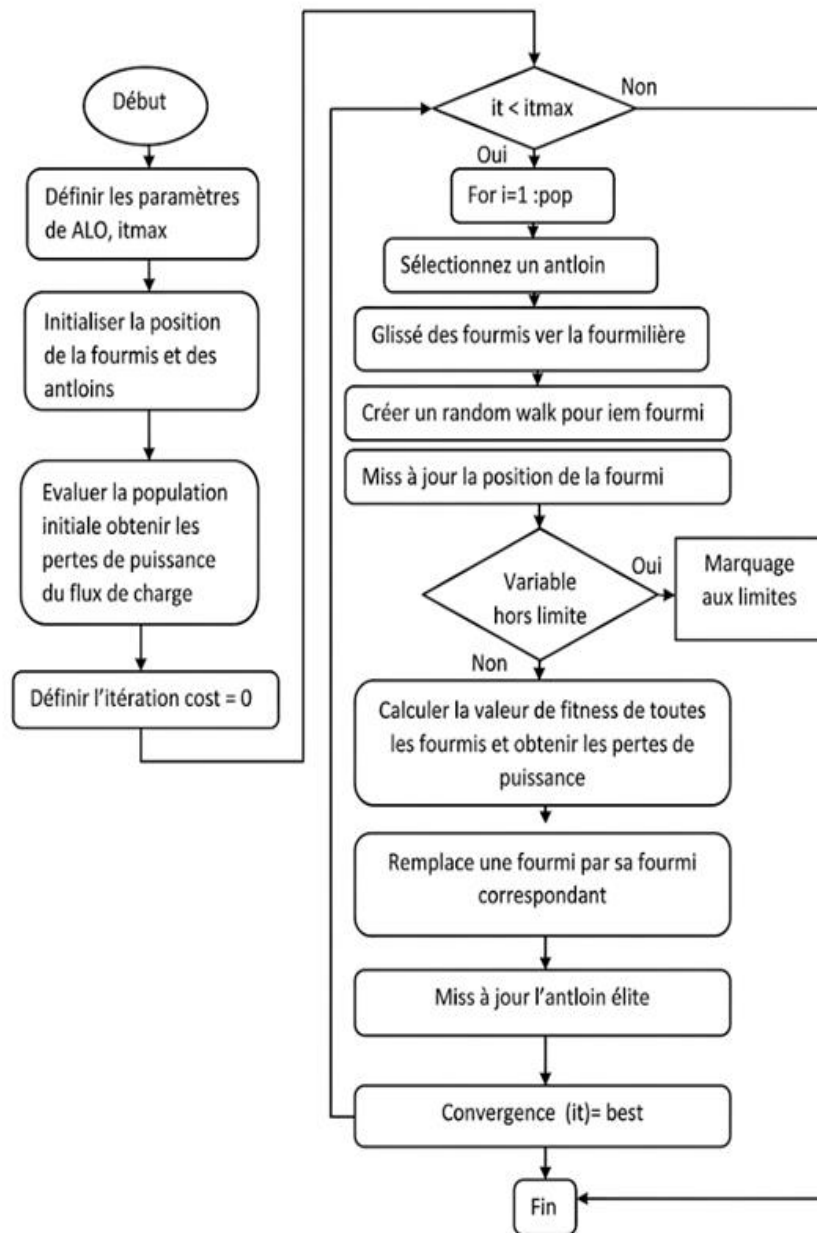


Figure III.6. Organigramme de la méthode ALO

III.4.2. Artificial Hummingbird Algorithm (AHA)

III.4.2.1. Algorithme original (AHA)

Cette section présente l'algorithme original du Artificial Hummingbird Algorithm (AHA), une métaheuristique exploratoire récente introduite en 2022 [56]. Cet algorithme imite les comportements intelligents et les stratégies de recherche de nourriture des colibris dans la nature. Ces mécanismes reposent sur trois piliers fondamentaux : les sources de nourriture, les colibris eux-mêmes, et la matrice des visites.

➤ **Sources de nourriture** : Les colibris sélectionnent la source de nourriture appropriée en fonction de la qualité du nectar, de sa quantité disponible et de son taux de renouvellement dans chaque fleur. Dans le cadre de l'algorithme AHA, il est supposé que toutes les sources de nourriture contiennent le même nombre et le même type de fleurs. Chaque source de nourriture est modélisée par un vecteur de solution, tandis que le taux de renouvellement du nectar correspond à la valeur de la fonction fitness (fonction d'adaptation). Par conséquent, une meilleure valeur de fitness se traduit par un taux de renouvellement du nectar plus élevé au niveau de la source de nourriture cible.

➤ **Colibris** : Chaque colibri est assigné à une source de nourriture spécifique et reste à proximité de celle-ci, tout en gardant en mémoire le temps écoulé depuis sa dernière visite. De plus, chaque individu est capable de partager les informations concernant les propriétés de sa source et son taux de renouvellement de nectar avec les autres colibris de son groupe, optimisant ainsi l'effort collectif.

➤ **Matrice des visites (Table des visites)** : Lors de la quête de nourriture, les colibris suivent rigoureusement le nombre de visites effectuées par les autres oiseaux pour chaque source de nourriture. Cela leur permet d'identifier et de cibler la source la plus adéquate. Pour garantir la convergence de l'algorithme AHA et s'assurer qu'il s'oriente efficacement vers l'optimum global, cette matrice des visites est mise à jour de manière dynamique à chaque itération.

Dans l'ensemble de l'algorithme AHA, trois mécanismes comportementaux principaux des colibris lors de la recherche de nourriture sont modélisés : la recherche dirigée, la recherche territoriale et la recherche migratoire, comme illustré dans. **Figure III.7.**

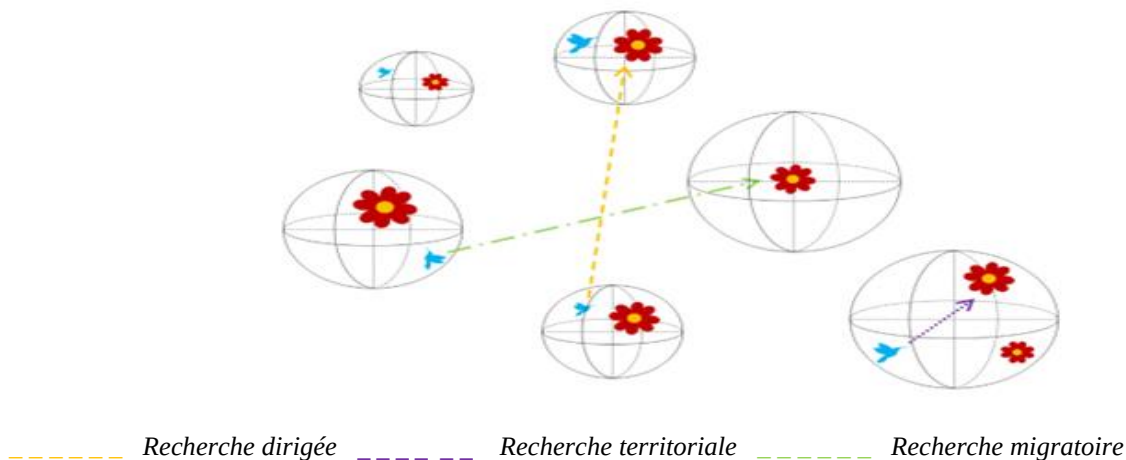


Figure III.7. Mécanismes des comportements de recherche de nourriture chez les colibris.

Afin d'expliquer l'algorithme AHA plus clairement, la section suivante fournit une description détaillée des principales étapes qui constituent la structure de base de l'algorithme.

III.4.2.2. Initialisation

La première étape de l'algorithme AHA consiste à créer une population de n colibris répartis aléatoirement sur n sources de nourriture, comme suit :

$$X_i = X_{low} + \text{rand}(X_{Up} - X_{Low}) \quad i = 1, \dots, n \quad \text{III.11}$$

La variable X_i fait référence à l'emplacement de la source de nourriture numéro i , qui représente une solution possible au problème. X_{Low} et X_{Up} définissent les limites inférieure et supérieure de la variable. Rand est un nombre aléatoire distribué entre 0 et 1

D'autre part, le calendrier de visite des sources de nourriture est initialisé comme suit :

$$VT_{i,j} = \begin{cases} 0 & \text{if } i \neq j \\ \text{null} & \text{if } i = j \end{cases} \quad i = 1, \dots, n ; j = 1, \dots, n \quad \text{III.12}$$

Lorsque $VT_{i,j} = \text{null}$ si $i = j$, cela signifie que le colibri a visité sa propre source de nourriture spécifiée ; tandis que $i \neq j$, $VT_{i,j} = 0$, cela indique que le colibri i a visité la source de nourriture j dans l'itération actuelle.

III.4.2.3. Recherche de nourriture

- **Recherche dirigée (Guided foraging)**

Le mécanisme de recherche dirigée décrit la tendance des colibris à se diriger vers les sources de nourriture qui ont une forte concentration de nectar. Cela est réalisé en orientant leur recherche vers des sources de nourriture qui n'ont pas été visitées depuis longtemps, où le taux de renouvellement du nectar est élevé. Le comportement de recherche dirigée des colibris peut être modélisé mathématiquement à l'aide de l'équation (3) [57].

$$v_i(t+1) = X_{i,tar}(t) + \alpha \cdot D \cdot (X_i(t) - X_{i,tar}(t)) \quad \text{III.13}$$

$$X_i(t+1) = \begin{cases} X_i(t) & \text{if } f(X_i(t)) \leq f(v_i(t+1)) \\ v_i(t+1) & \text{if } f(X_i(t)) \geq f(v_i(t+1)) \end{cases} \quad \text{III.14}$$

Où $X_i(t)$ et $v_i(t+1)$ représentent respectivement les positions actuelle et nouvelle de la source de nourriture $X_{i,tar}(t)$ indique la position de la source de nourriture ciblée par le colibri. α représente

le facteur guidé, et D représente les directions de mouvement dans l'espace de recherche, permettant à l'oiseau d'utiliser un vol axial, diagonal ou omnidirectionnel, comme illustré dans la **Figure III.8**.

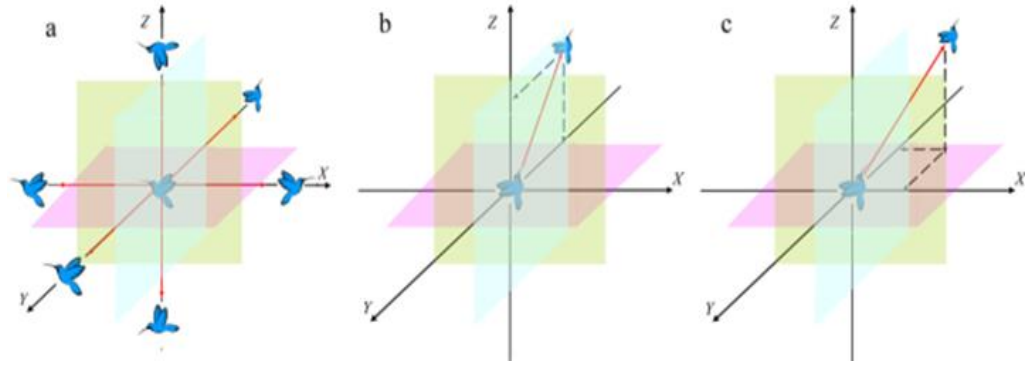


Figure III.8. Mécanismes de vol des colibris : (a) vol axial, (b) vol diagonal, (c) vol omnidirectionnel.

- **Recherche territoriale (Territorial foraging)**

Pendant la recherche de nourriture, le colibri se dirige vers un nouvel emplacement proche de son territoire actuel au lieu de retourner dans des zones où les sources de nourriture ont déjà été consommées, afin de découvrir de nouvelles sources potentiellement plus abondantes. Ce mécanisme est connu sous le nom de recherche territoriale, et il peut être modélisé mathématiquement à l'aide de l'équation (15).

$$v_i(t + 1) = X_{i,tar}(t) + \beta \cdot D \cdot X_i(t) \quad \text{III.15}$$

Où β représente un facteur territorial.

- **Recherche migratoire (Migration foraging)**

Ce comportement représente un mécanisme d'exploration à longue portée, où le colibri migre des zones presque épuisées en sources de nourriture vers de nouvelles zones offrant une plus grande abondance de nourriture, selon un calendrier de migration prédéterminé. Ce mécanisme est utilisé pour renforcer les capacités exploratoires de l'algorithme et éviter de rester bloqué dans des solutions locales. Ce comportement peut être modélisé à l'aide de l'équation (16) suivante :

$$X_{wor}(t + 1) = X_{Low} + rand(X_{Up} - X_{Low}) \quad \text{III.16}$$

Où X_{wor} représente la source de nourriture ayant le moins bon taux de renouvellement de nectar au sein du groupe. [58]

```

1  Configuration de l'initialisation.
2  Paramètres d'entrée :  $n$ ,  $MaxIteration$ ,  $dim$ ,  $X_{Low}$ ,  $X_{Up}$ , et  $f$ 
3  Générer la population initiale de colibris  $X_i$ 
4  Générer la table de visite initiale  $VT_{i,j}$ 
5  Évaluer l'aptitude du colibri  $f_i = fitness(X_i)$ 
6  Tant que  $t \leq MaxIteration$ 
7      Pour chaque colibri  $Xi$  faire
8           $r = rand$ 
9          is  $r < 1/3$ 
10             Effectuer le vol axial
11         sinon si  $r > 2/3$ 
12             Effectuer le vol diagonal
13         Sinon
14             Effectuer le vol omnidirectionnel
15         fin si
16         si  $rand < 0.5$ 
17             Effectuer la recherche dirigée en utilisant l'Éq. (3)
18             Évaluer l'aptitude  $f_i$  et mettre à jour la table de visite
19         Sinon
20             Effectuer la recherche territoriale en utilisant l'Éq. (5)
21             Évaluer l'aptitude  $f_i$  et mettre à jour la table de visite
22         fin
23     fin
24     si  $mod(t, 2 * n) == 0$ 
25         Effectuer la recherche migratoire en utilisant l'Éq. (6)
26         Évaluer l'aptitude  $f_i$  et mettre à jour la table de visite
27     fin si
28      $t=t+1$ 
29 fin tant que
30 Visualiser les résultats finaux..

```

Figure III.9. Montre le Pseudo-code representation of the AHA algorithm

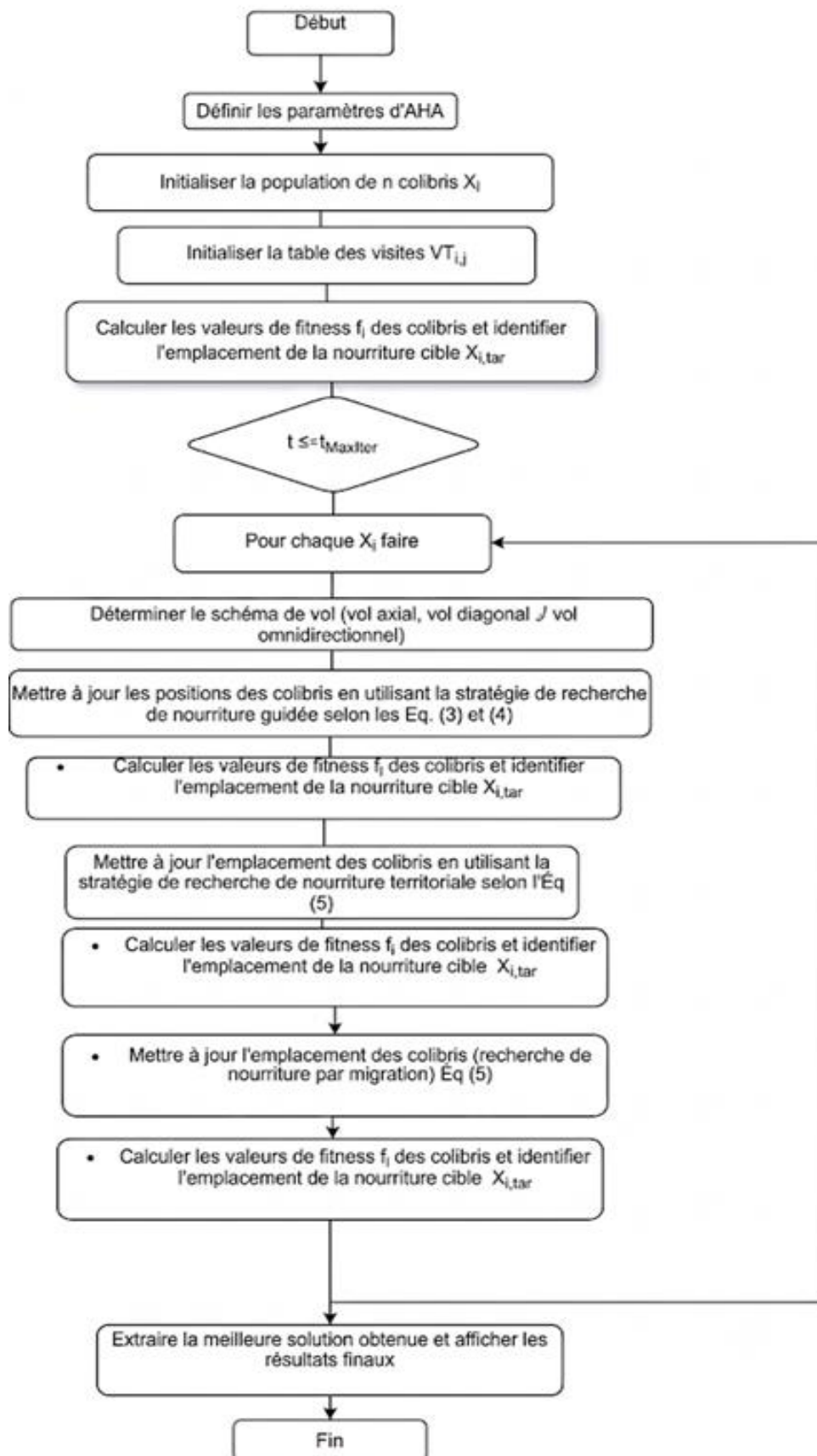


Figure III.10 : Organigramme de l'algorithme d'optimisation du colibri artificiel (AHA)

III.4.3. Optimisation Grey Wolf

III.4.3.1. Définition

Le Grey Wolf Optimizer (GWO) est une métaheuristique d'intelligence en essaim proposée par Mirjalili et ses collaborateurs en 2014. Cet algorithme s'inspire de la hiérarchie sociale et du comportement de chasse des loups gris dans la nature [59].

La population est divisée en quatre catégories hiérarchiques :

- Alpha (α) : représente la meilleure solution candidate.
- Bêta (β) : représente la deuxième meilleure solution.
- Delta (δ) : représente la troisième meilleure solution.
- Oméga (ω) : regroupe le reste des solutions candidates..

Le processus d'optimisation repose sur trois mécanismes principaux : l'encerclement de la proie, la chasse et l'attaque finale. Les loups α , β et δ guident la recherche dans l'espace des solutions, tandis que les autres loups mettent à jour leurs positions en fonction de ces trois meilleures solutions. Cette stratégie permet d'assurer un équilibre efficace entre l'exploration globale et l'exploitation locale de l'espace de recherche. [60]

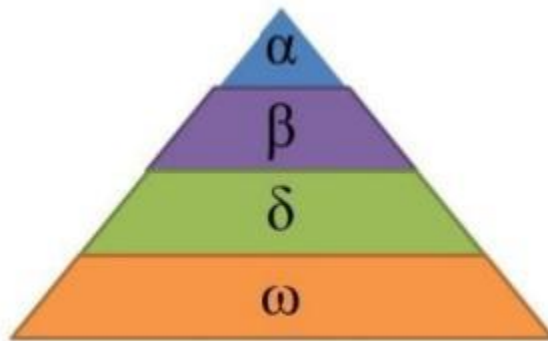


Figure III.11. La hiérarchie des loups gris

III.4.3.2. Principe de la méthode

Le loup gris appartient à la famille des canidés. Les loups gris sont considérés comme les loups les plus répandues au monde, ce qui signifie qu'ils sont au sommet de la chaîne alimentaire. Les loups gris préfèrent surtout vivre en communauté. Le groupe des loups englobe en moyenne de 5 à 12 loups.

Il est intéressant de noter qu'ils ont une hiérarchie sociale très stricte, comme illustré dans la Figure III.12. [61]

➤ **Les niveaux hiérarchiques de la meute de loups**

- Le premier niveau appelé alphas (α) : Les loups alpha sont les leaders de la meute et ils sont un mâle et femelle. Ils sont principalement responsables de prendre des décisions sur la chasse, le lieu de sommeil, le temps de se réveiller, et ainsi de suite. Les décisions de l'alpha sont dictées au groupe. Cependant, une sorte de comportement démocratique a également été observé, dans lequel un alpha suit les autres loups dans le groupe. Dans les rassemblements, l'ensemble du paquet reconnaît l'alpha en tenant leurs queues vers le bas. Le loup alpha est aussi appelé le loup dominant puisque ses ordres devraient être suivis par le paquet. Les loups alphas ont seulement autorisés à s'accoupler dans le pack. Fait intéressant, l'alpha n'est pas nécessairement le membre le plus fort de la meute mais le meilleur en termes de gestion du pack. Cela montre que l'organisation et la discipline d'un pack est beaucoup plus important que sa force.
- Le deuxième niveau s'appelle bêta (β) : Les bêtas sont des loups subordonnés qui aident l'alpha dans la prise de décision ou d'autres activités de pack. Le loup bêta peut être mâle ou femelle, et il/elle est probablement le meilleur candidat pour être l'alpha en cas l'un des loups alpha décède ou devient très vieux. Le loup bêta devrait respecter l'alpha, mais commande l'autre niveau inférieur des loups aussi. Il joue le rôle de conseiller de l'alpha et de la discipline pour le pack. La version bêta renforce les commandes de l'alpha tout au long du packet donne des commentaires à l'alpha. [62]
- Le troisième niveau s'elle Delta (δ) : Le loup n'est pas un alpha, bêta ou oméga, ils sont s'appelé subordonnés (ou delta dans certaines références). Les loups Delta doivent soumettre aux alphas et aux bêtas, mais ils dominent l'oméga (le niveau le plus bas). Scouts, sentinelles, les anciens, les chasseurs et les gardiens appartiennent à cette catégorie. Les scouts sont responsables de regarder les limites du territoire et avertir le pack en cas de danger. Les sentinelles protègent et garantissent la sécurité du pack. Les anciens sont les loups expérimentés qui utilisés pour être alpha ou bêta. Les chasseurs aident les alphas et les bêtas quand chasse la proie et fournir de la nourriture pour le pack. [62]
- Le quatrième niveau (plus bas) s'appelle oméga (ω) : L'oméga joue le rôle de bouc émissaire. Les loups oméga doivent toujours se soumettre à tous les autres loups dominants. Ce sont les derniers loups autorisés à manger. Il peut sembler quel l'oméga n'est pas un individu important dans le paquet, mais il a été observé que l'ensemble du pack rencontre des problèmes en cas de perte de l'oméga. Cela est dû au dégagement de la violence et de la frustration de tous les loups par l'oméga. Cela aide à

satisfaire l'ensemble du paquet et à maintenir la structure de dominance. [62]

En plus de la hiérarchie sociale des loups, la chasse de groupe est aussi l'un des comportements sociaux intéressants des loups gris. Les principales phases de la chasse au loup gris sont les suivantes : [61]

- 1) Suivre, chasser et approcher la proie.
- 2) Poursuivre, encercler et harceler la proie jusqu'à ce qu'elle arrête de bouger.
- 3) Attaquer vers la proie.

Ces étapes sont illustrées dans la Figure III.12.



Figure III.12. Comportement de la meute des loups gris lors de la chasse, (A) Poursuite de la proie, (B-D) harcèlement et encerclement, (E) Position d'attaque

III.4.3.3. Opérateurs

Nous présentons ici la formulation mathématique de la hiérarchie sociale et des techniques de chasse propres aux loups gris au sein de l'algorithme GWO.

a. La hiérarchie sociale

Afin de modéliser mathématiquement la hiérarchie sociale des loups lors de la conception de GWO, nous considérons la solution la plus appropriée comme alpha (α). Par conséquent, les deuxièmes et troisièmes meilleures solutions sont respectivement nommées bêta (β) et delta (δ).

Les solutions candidates restantes sont supposées être oméga (ω). Dans l'algorithme GWO, la chasse (optimisation) est guidée par α , β et δ . Les loups ω suivent ces trois loups [63]

b. Encercler les proies

Comme mentionné ci-dessus, les loups gris encerclent leurs proies pendant la chasse. Afin de modéliser mathématiquement le comportement d'encercllement, les équations suivantes sont proposées [64] :

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad \text{III.17}$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad \text{III.18}$$

Où:

- t : indique l'itération courante.
- $\vec{A}$ et $\vec{C}$: sont des vecteurs de coefficient.
- $\vec{X}_p$: est le vecteur de position de la proie.
- $\vec{X}$: indique le vecteur de position d'un loup gris.

Les vecteurs $\vec{A}$ et $\vec{C}$ sont calculés comme suit: [65].

$$\vec{A} = 2\vec{a}r_1 - \vec{a} \quad \text{III.19}$$

$$\vec{C} = 2 \times \vec{r}_2 \quad \text{III.20}$$

Où les composantes de $\vec{a}$ sont linéairement diminuées de 2 à 0 au cours des itérations et r_1 et r_2 sont des vecteurs aléatoires dans [0,1].

c. Chasse:

Les loups gris ont la capacité de reconnaître l'emplacement des proies et les encerclées. La chasse est généralement guidée par l'alpha, la bêta et le delta pourraient également participer à la chasse de temps en temps. Cependant, dans un espace de recherche abstraite, nous n'avons aucune idée de l'emplacement de l'optimum (proie). Afin de simuler mathématiquement le comportement de chasse des loups gris, nous supposons que l'alpha (meilleure solution candidate) beta, et delta ont une meilleure connaissance à propos de l'emplacement potentiel de la proie. Par conséquent, nous sauvons les premières trois meilleures solutions obtenues jusqu'à présent et on oblige les autres agents (y compris les omégas) pour mettre à jour leurs positions selon la position des meilleurs agents de recherche. [66]

Les formules suivantes sont proposées à cet égard :

$$\begin{cases} \vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha(t) - \vec{X}(t)| \\ \vec{D}_\beta = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_\beta(t) - \vec{X}(t)| \\ \vec{D}_\delta = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_\delta(t) - \vec{X}(t)| \end{cases} \quad \text{III.21}$$

$$\begin{cases} \vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot \vec{D}_\alpha \\ \vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot \vec{D}_\beta \\ \vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot \vec{D}_\delta \end{cases} \quad \text{III.22}$$

$$\vec{X}(t+1) = \frac{\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3}{3} \quad \text{III.23}$$

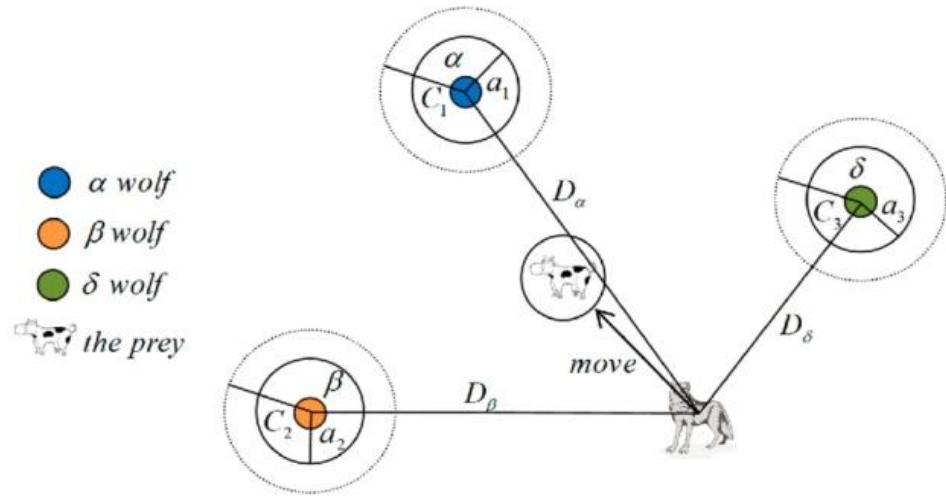


Figure III.13. Mise à jour de la position dans GWO.

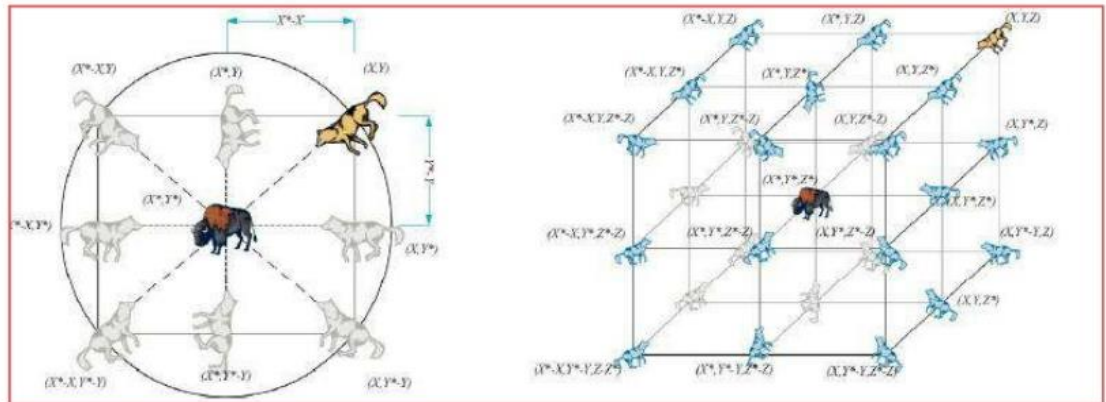


Figure III.14. Représentation 2D et 3D des vecteurs de position et de leurs prochains Emplacements Possibles

La figure illustre les positions potentielles où le loup peut se déplacer autour de sa proie en fonction des dimensions de l'espace de recherche:

- Le côté gauche (2D): montre comment le loup peut encercler la proie dans un espace plat (bidimensionnel), où ses points de mouvement forment un cercle entourant la cible.
- Le côté droit (3D): montre le même processus mais dans un espace tridimensionnel, où les points de mouvement potentiels sont répartis sous la forme d'un cube entourant la cible de toutes les directions.

On peut observer que la position finale se situerait dans un endroit aléatoire à l'intérieur d'un cercle défini par les positions d'alpha, bêta et delta dans l'espace de recherche. En d'autres termes, alpha, bêta et delta estiment la position de la proie, tandis que les autres loups mettent à jour leurs positions au hasard autour de la proie. [66]

d. Attaquer une proie (exploitation)

Les loups gris terminent la chasse en attaquant la proie lorsqu'elle s'arrête de bouger. Afin de modéliser mathématiquement l'approche de la proie, nous réduisons la valeur de $\vec{a}$. Notez que la plage de fluctuation de $\vec{A}$ est également réduite de $\vec{a}$ autrement dit $\vec{A}$ est une valeur aléatoire dans l'intervalle $[-a, a]$ où a est diminué de 2 à 0 au cours des itérations [64].

Lorsque des valeurs aléatoires de $\vec{A}$ sont dans $[-1,1]$, la prochaine position du chercheur peut être n'importe où entre sa position actuelle et la position de la proie [67].

Avec les opérateurs proposés jusqu'à présent, l'algorithme GWO permet ses agents de recherche pour mettre à jour leur position en fonction de l'emplacement de l'alpha, le bêta et le delta ; et attaque vers la proie. Cependant, l'algorithme GWO est sujet à la stagnation dans les solutions locales avec ces opérateurs. Il est vrai que le mécanisme d'encerclement proposé montre l'exploration dans une certaine mesure, mais GWO a besoin de plus d'opérateurs souligner l'exploration. [62]

Bien que les sept (7) des emplacements possibles aient été représentés sur la figure III.15, les paramètres aléatoires A et C permettent aux loups de se déplacer à n'importe quelle position dans l'espace continu autour de la proie. [66]

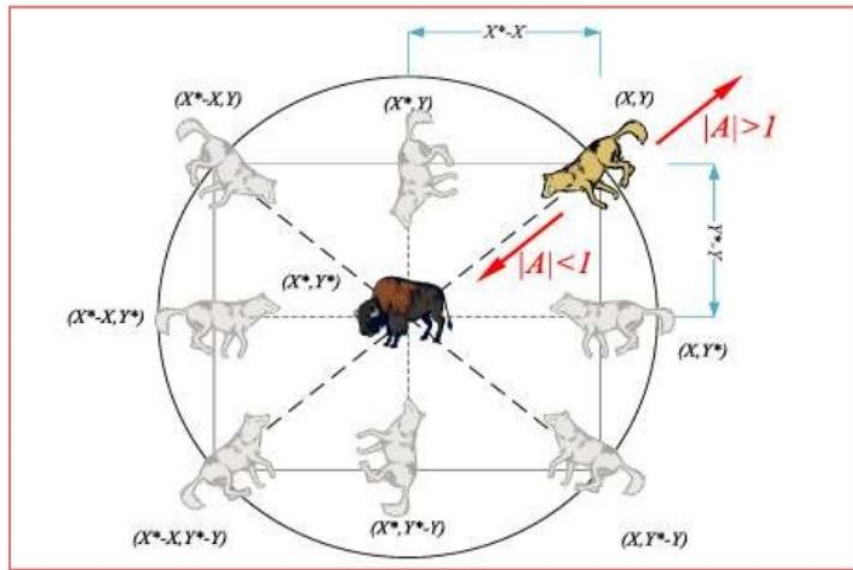


Figure III.15. Mécanisme de positionnement de l'agent de recherche de l'effet de cercle qui le présente.

e. Les étapes générales de l'algorithme GWO

Après tout, les étapes générales de l'algorithme GWO sont les suivantes : [61]

- Initialiser une population de loups au hasard sur la base des limites supérieure et inférieure des variables.
- Calculer la valeur objective correspondante pour chaque Loup.
- Choisir les trois premiers meilleurs loups et sauvegarde-les sous α , β et δ .
- Actualiser la position du reste de la population (loups) en utilisant les équations (III.21) et (III.23),
- Mise à jour des paramètres a , A et C .
- Passez à la 2ème étape si le critère final n'est pas satisfait.
- Renvoie la position de α comme optimum optimal approximé .

f. Les étapes pour écrire l'algorithme GWO (organigramme)

La figure III.16. représente les étapes de l'algorithme de l'optimisation de loup gris GWO. Mirjalili et al. A montré que l'algorithme GWO est capable de fournir des résultats très compétitifs par rapport à d'autres méta-heuristiques bien connues. D'une part, l'exploration de cet algorithme est très élevée et nécessite d'éviter les optima locaux.

De plus, l'équilibre entre exploration et exploitation est très simple et efficace pour résoudre des problèmes difficiles selon les résultats dans des problèmes réels. [66]

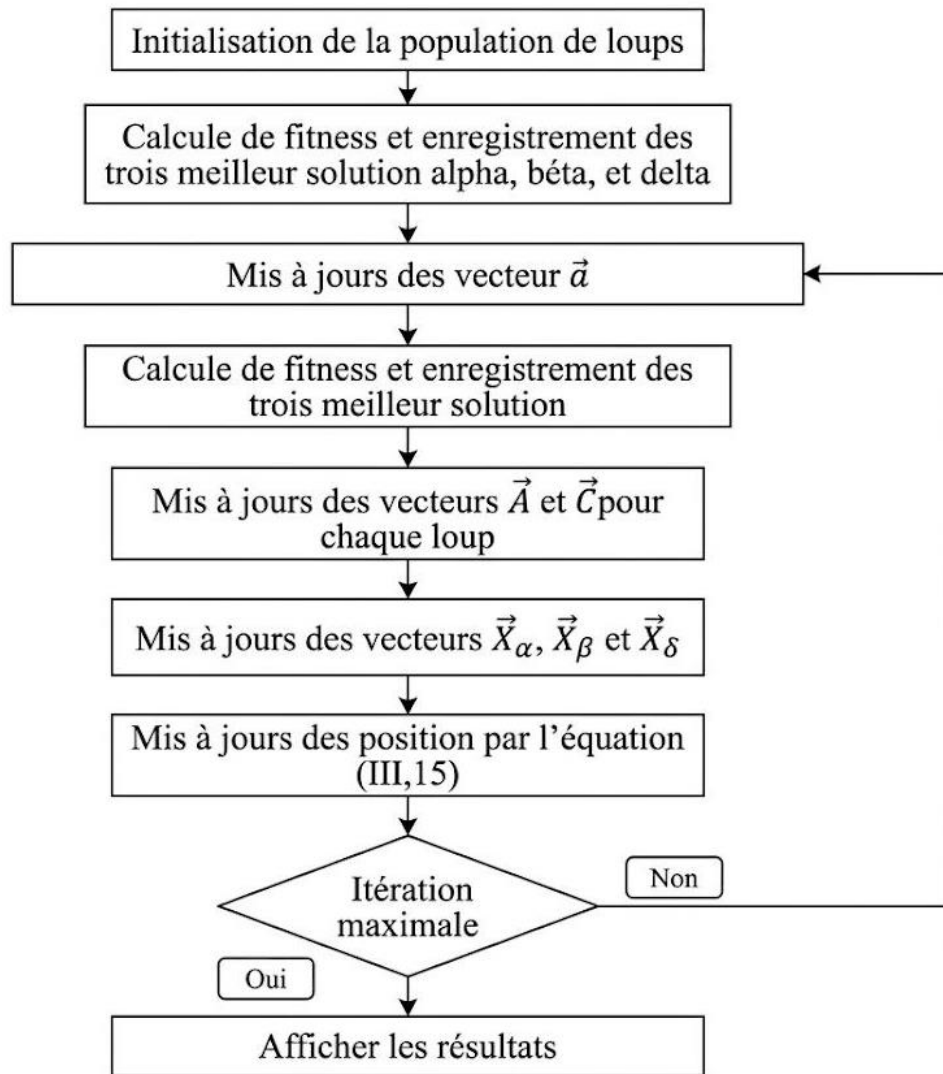


Figure III.16. Organigramme de la méthode GWO

Conclusion

En conclusion, les méthodes d'optimisation constituent un outil fondamental pour la résolution de nombreux problèmes complexes rencontrés dans divers domaines scientifiques et industriels. À travers ce chapitre, nous avons mis en évidence les principes de base de l'optimisation ainsi que les différentes catégories de méthodes existantes. Les méthodes exactes, bien qu'efficaces pour certains problèmes structurés, montrent leurs limites face aux problèmes de grande taille ou fortement non linéaires. En revanche, les méthodes approchées, notamment les heuristiques et les méta heuristiques, offrent une grande flexibilité et permettent d'obtenir des solutions satisfaisantes dans des délais

raisonnables. Parmi ces approches, les algorithmes inspirés de la nature, tels que les algorithmes génétiques et l'optimisation par essaim de particules, se distinguent par leur capacité à explorer efficacement l'espace de recherche tout en évitant les minima locaux. Ainsi, le choix de la méthode d'optimisation dépend essentiellement de la nature du problème à traiter, de sa complexité et des contraintes associées. Ce chapitre constitue donc une base essentielle pour la compréhension et l'application des techniques d'optimisation qui seront exploitées dans la suite de ce travail.

Chapitre IV: Simulation et résultats

Introduction

Les algorithmes métaheuristiques ont connu un développement remarquable dans le domaine des systèmes électriques. Cette popularité croissante est principalement attribuée à leur simplicité de conception, à leur facilité d'implémentation et à leur capacité à résoudre efficacement des problèmes d'optimisation complexes, et non linéaires. Dans ce contexte, ce chapitre vise à évaluer et à comparer les performances des algorithmes AHA, GWO et ALO appliqués à différents problèmes d'optimisation. Une attention particulière est portée à l'algorithme AHA proposé, dont l'efficacité, la robustesse et la capacité de convergence sont analysées à travers plusieurs études de cas afin d'apprécier ses performances et de les comparer à celles des autres approches considérées.

Tous les algorithmes d'optimisation ainsi que les simulations ont été réalisés à l'aide de l'environnement MATLAB. Les expérimentations ont été exécutées sur un ordinateur équipé d'un processeur Intel(R) Core (TM) i5-7300U cadencé à 2,60 GHz, de 8 Go de mémoire vive (RAM), et fonctionnant sous un système d'exploitation Windows 64 bits.

Les détails de ces études de cas sont présentés dans les sous-sections suivantes :

a. Cas 1 : Évaluation des algorithmes sur les fonctions de test (Benchmark functions)

Les algorithmes AHA, GWO et ALO ont été évalués à l'aide de 23 fonctions de référence issues de la littérature [2]. Ces fonctions de test permettent d'analyser la capacité des algorithmes à résoudre des problèmes d'optimisation variés et à différentes complexités.

Les performances sont analysées en considérant trois indicateurs statistiques principaux : la meilleure valeur obtenue (Best), la moyenne des résultats (Mean) ainsi que (STD). Ces mesures permettent d'évaluer à la fois la qualité des solutions trouvées et la robustesse des algorithmes face à la variabilité des résultats.

b. Cas 2 : Analyse de l'écoulement de puissance dans les réseaux électriques

Cette section est consacrée à l'analyse et à la simulation de l'écoulement de puissance dans le réseau électrique (IEEE 33 Bus Figure IV.1), afin de déterminer l'état de fonctionnement initial du système ainsi que les principales grandeurs électriques (tensions, angles de phase et flux de puissance). Le calcul de l'écoulement de puissance est effectué à l'aide de la méthode de Newton-Raphson. Cette étape constitue une base essentielle pour l'étude des performances du réseau et l'évaluation des conditions de fonctionnement en régime permanent.

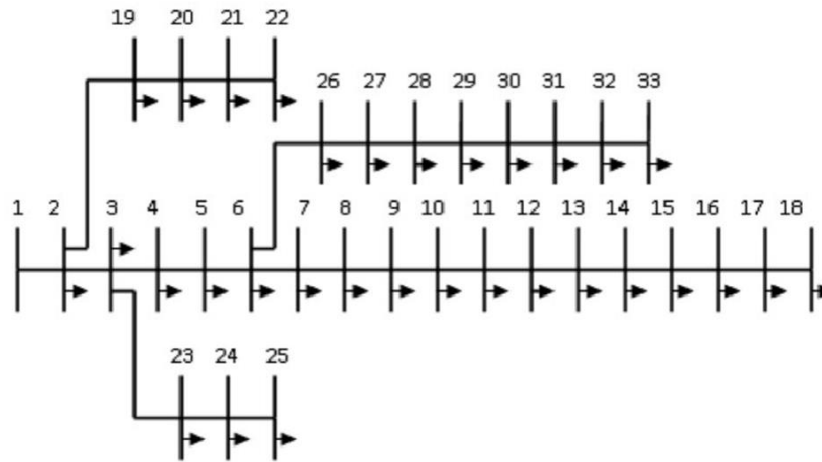


Figure IV.1. Réseau distribution radial IEEE33-bus

c. Cas 3 : Optimisation de l'emplacement et de la taille des unités de génération distribuée (DG)

Ce cas d'étude vise à déterminer l'emplacement optimal, la taille optimale ainsi que le facteur de puissance des unités de génération distribuée (DG) dans un réseau de distribution radial IEEE 33-bus. L'objectif principal est d'améliorer les performances globales du réseau, notamment en réduisant la déviation de tension et les pertes de puissance active. Le problème d'optimisation est abordé selon deux formulations : mono-objectif et multi-objectif, afin d'évaluer l'efficacité des solutions proposées dans différents scénarios de fonctionnement du réseau électrique.

IV.1. Cas 1 : Evaluation des algorithmes sur les fonctions benchmark

Pour l'évaluation les algorithmes proposés, à savoir (AHA), (GWO) et (ALO), ont été testés sur un ensemble de 23 fonctions de référence issues de la littérature scientifique.

Afin de garantir la fiabilité des résultats et de réduire l'effet de l'aléatoire, chaque fonction a été exécutée sur 10 runs indépendants. Pour chaque fonction, trois indicateurs de performance ont été utilisés la meilleure solution obtenue (Best), la valeur moyenne (Mean) ainsi que l'écart type (STD). Ces indicateurs permettent d'évaluer simultanément la qualité des solutions, la stabilité des algorithmes et leur capacité de convergence.

Les fonctions de test considérées sont ensuite classées en trois catégories principales, en fonction des caractéristiques de leur espace de recherche et de la complexité de leur paysage d'optimisation.

Les fonctions unimodales (F1–F7) se caractérisent par la présence d'un unique optimum global, ce qui les rend particulièrement adaptées à l'évaluation de la capacité d'exploitation (exploitation) des algorithmes ainsi que de leur aptitude à converger efficacement vers la solution optimale. Le Tableau IV.1 résume les résultats comparatifs obtenus par l'algorithme AHA par rapport aux méthodes GWO et ALO. Les résultats mettent clairement en évidence la supériorité de l'approche proposée, en montrant sa capacité à améliorer la qualité des solutions et à assurer une convergence plus précise vers l'optimum global.

Tableau IV.1. Résultats des fonctions benchmark unimodales (F1–F7)

Fonction	Rrésultat	GWO	AHA	ALO
F1	Min	2.6763e-050	8.8749e-295	4.1548e-009
	Moyenne	0.0000	0.0000	0.0000
	STD	1.4458e-049	1.0548e-287	3.7546e-009
F2	Min	3.5589e-029	4.3678e-151	1.5326e-005
	Moyenne	0.0000	0.0000	0.0000
	STD	1.0400e-029	4.2251e-151	8.8280e-005
F3	Min	1.6626e-012	2.0582e-277	2.1273e-005
	Moyenne	0.0000	0.0000	0.0000
	STD	7.0234e-012	2.2506e-270	0.0003
F4	Min	1.7809e-011	1.0025e-138	0.0002
	Moyenne	0.0000	0.0000	0.0000
	STD	9.1379e-013	1.4245e-128	0.0002
F5	Min	28.5497	25.9304	9.6054
	Moyenne	0.0272	0.0026	0.2342
	STD	27.1635	26.2567	234.2013
F6	Min	1.4828	0	3.8205e-009
	Moyenne	0.0010	0	0.0000
	STD	0.9942	0	5.3783e-009
F7	Min	0.0006	0.0003	0.0055
	Moyenne	0.0000	0.0000	0.0000
	STD	0.0024	5.4234e-005	0.0192

A figure IV.2 montrent une supériorité remarquable de l'algorithme AHA, qui affiche une convergence continue et rapide vers les coûts les plus bas, surpassant largement l'algorithme GWO et l'algorithme ALO

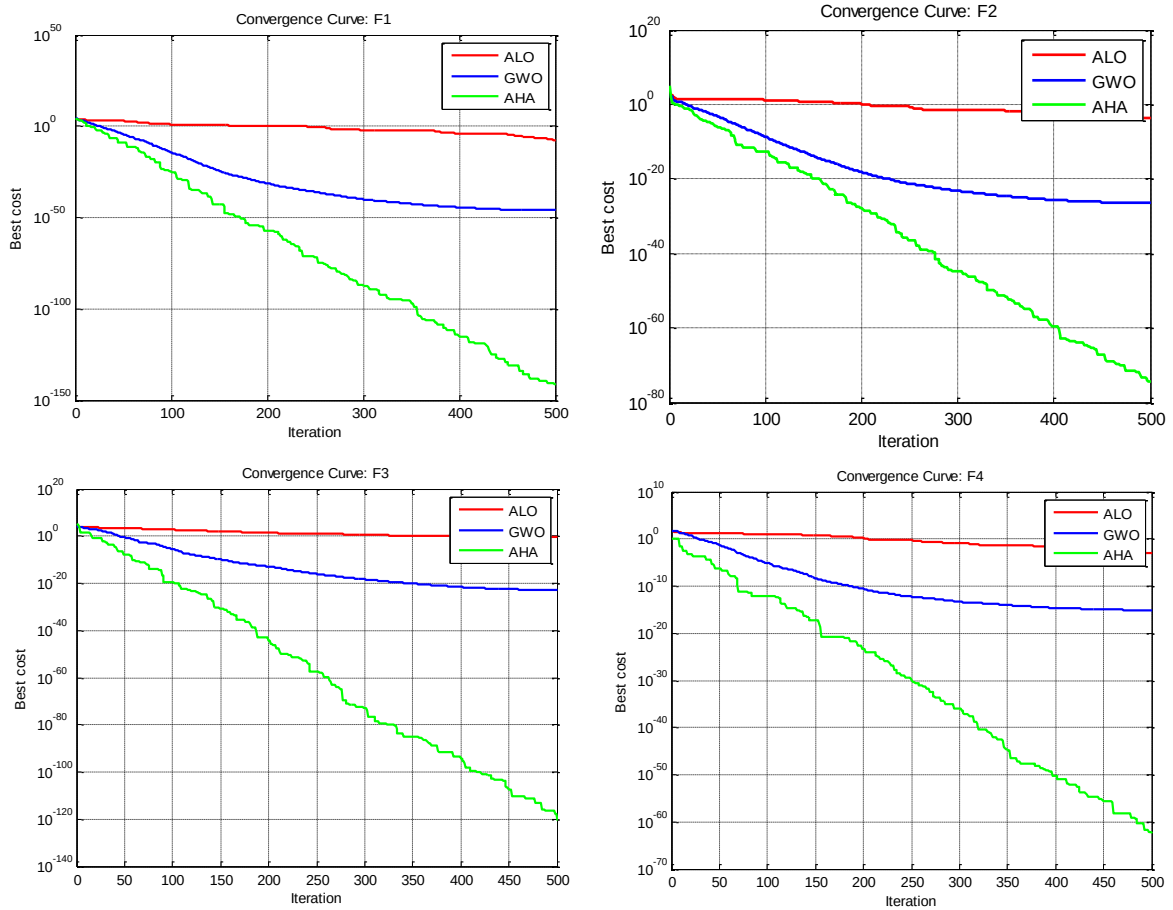


Figure IV.2 convergences des algorithmes d'optimisation pour les fonctions (F1-F4)

Les fonctions multimodales (F8–F13) se distinguent par une complexité accrue, en raison de la présence de plusieurs optima locaux en plus de l'optimum global. Cette caractéristique permet d'évaluer la capacité d'exploration (exploration) des algorithmes ainsi que leur aptitude à éviter le piègeage dans des minima locaux. Les résultats obtenus montrent que l'algorithme AHA présente une forte capacité d'exploration et parvient efficacement à maintenir la diversité des solutions au cours du processus de recherche. Le Tableau IV.2 met en évidence que l'approche proposée AHA surpasse systématiquement les algorithmes GWO et ALO, confirmant ainsi sa robustesse et son efficacité pour résoudre des problèmes d'optimisation complexes.

Tableau IV.2. Résultats des fonctions benchmark multimodales (F8–F13)

Functions	Rrésultat	GWO	AHA	ALO
F8	Min	-5594.57	-12314.88	-2165.75
	Moyenne	-5.9870	-1.1501	-3.1071
	STD	-5986.95	-11500.94	-3107.05
F9	Min	0	0	4.9748
	Moyenne	0.0000	0	0.0159
	STD	3.7896e-014	0	15.9193
F10	Min	1.5099e-014	8.8818e-016	1.7054e-005
	Moyenne	0.0000	0.0000	0.0008
	STD	2.2204e-014	8.8818e-016	0.7701
F11	Min	0	0	0.2656
	Moyenne	0	0	0.0002
	STD	0	0	0.2476
F12	Min	0.0844	3.7717e-005	1.9456
	Moyenne	0.0000	0.0000	0.0001
	STD	0.0356	3.3504e-005	0.1225
F13	Min	0.5322	1.0895	9.4082e-010
	Moyenne	0.0008	0.0001	0.0000
	STD	0.8250	1.2457	0.0037

La figure IV.3 montrent une nette supériorité de l'algorithme AHA en termes de vitesse de convergence et de réduction du coût minimal sur toutes les fonctions de test, comparé aux performances des algorithmes GWO et ALO.

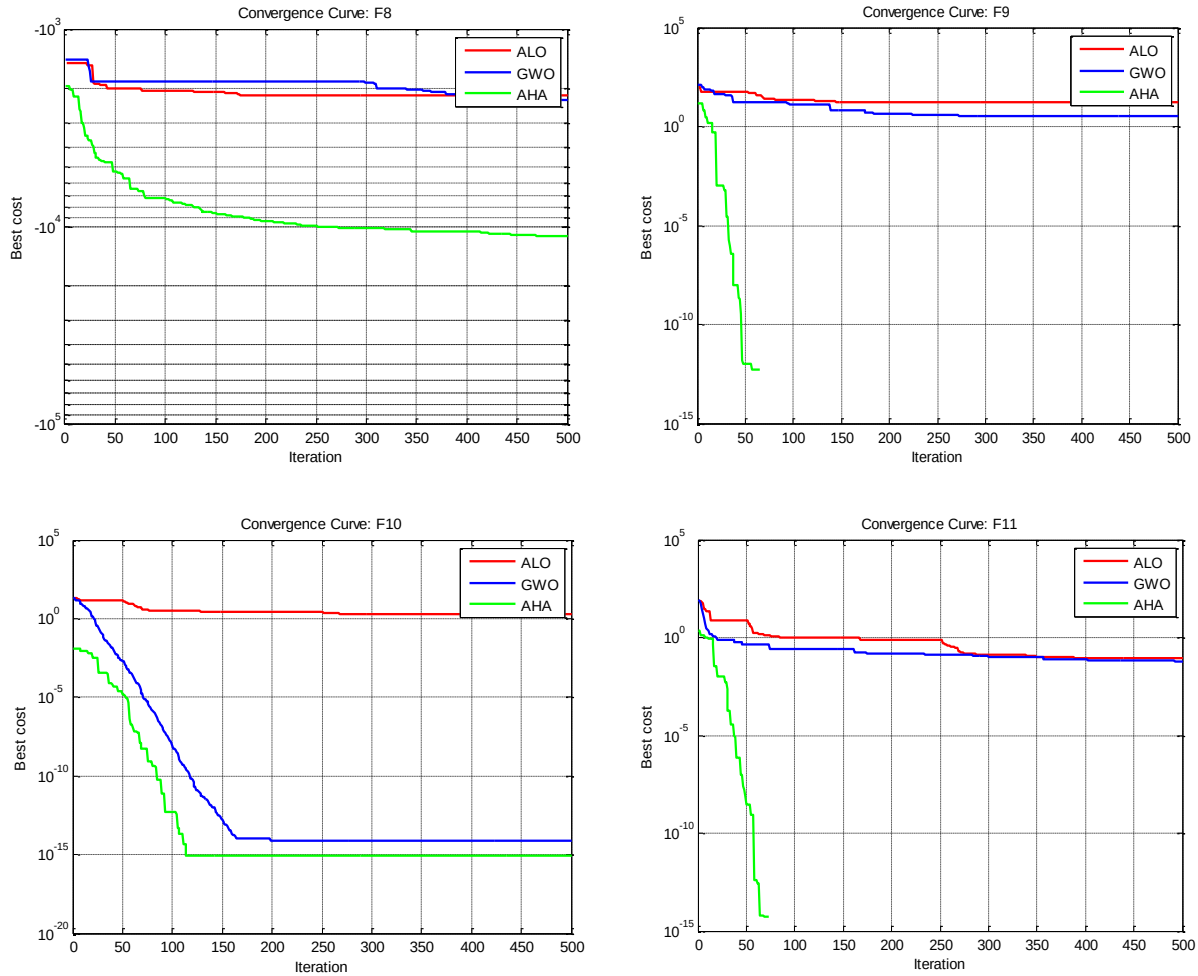


Figure IV.3. Convergence des algorithmes d'optimisation pour les fonctions F8 à F11

Le Tableau IV.3 présente les résultats obtenus pour les fonctions F14 à F23, qui combinent les caractéristiques des fonctions unimodales et multimodales étudiées précédemment. Ces fonctions composites constituent un ensemble de tests particulièrement pertinent pour évaluer de manière approfondie l'adaptabilité, la robustesse et les performances globales de l'algorithme face à des paysages de recherche complexes. Les résultats obtenus montrent que l'approche AHA se distingue par une grande fiabilité ainsi qu'une efficacité remarquable dans la résolution d'une large variété de problèmes d'optimisation, démontrant ainsi sa capacité à maintenir des performances élevées dans différents fonctions

Tableau IV.3. Résultats des fonctions benchmark composite (F14–F23)

fonctions	Rrésultat	GWO	AHA	ALO
F14	Min	10.7632	0.9980	0.9980
	Moyenne	0.0043	0.0001	0.0013
	STD	4.2531	0.9980	1.3293
F15	Min	0.0003	0.0003	0.0008
	Moyenne	0.0000	0.0000	0.0000
	STD	0.0073	0.0003	0.0008
F16	Min	-1.0316	-1.0316	-1.0316
	Moyenne	-0.0010	-0.0001	-0.0010
	STD	1.0316	1.0316	1.0316
F17	Min	0.3979	0.3979	0.3979
	Moyenne	0.0004	0.0000	0.0004
	STD	0.3979	0.3979	0.3979
F18	Min	3.0000	3	3
	Moyenne	0.0300	0.0003	0.0030
	STD	30.0000	3	3
F19	Min	-3.8628	-3.8628	-3.8628
	Moyenne	-0.0039	-0.0004	-0.0039
	STD	3.8622	3.8628	3.8628
F20	Min	-3.3220	-3.2031	-3.3220
	Moyenne	-0.0033	-0.0003	-0.0033
	STD	3.2811	3.2824	3.2824
F21	Min	-10.1528	10.1532	-5.1008
	Moyenne	-0.0102	-0.0010	-0.0043
	STD	10.1529	10.1532	4.2773
F22	Min	-10.4022	-10.4029	-10.4029
	Moyenne	-0.0104	-0.0010	-0.0061
	STD	10.4023	10.4029	6.0946
F23	Min	-10.5357	-10.5364	-10.5364
	Moyenne	-0.0105	-0.0011	-0.0060
	STD	10.5354	10.5364	6.0446

La figure IV.4 indique ainsi l'algorithme **AHA** encore sa supériorité en atteignant plus rapidement la solution optimale, tandis que les algorithmes **ALO** et **GWO** stagnent prématurément à des niveaux de coût plus élevés

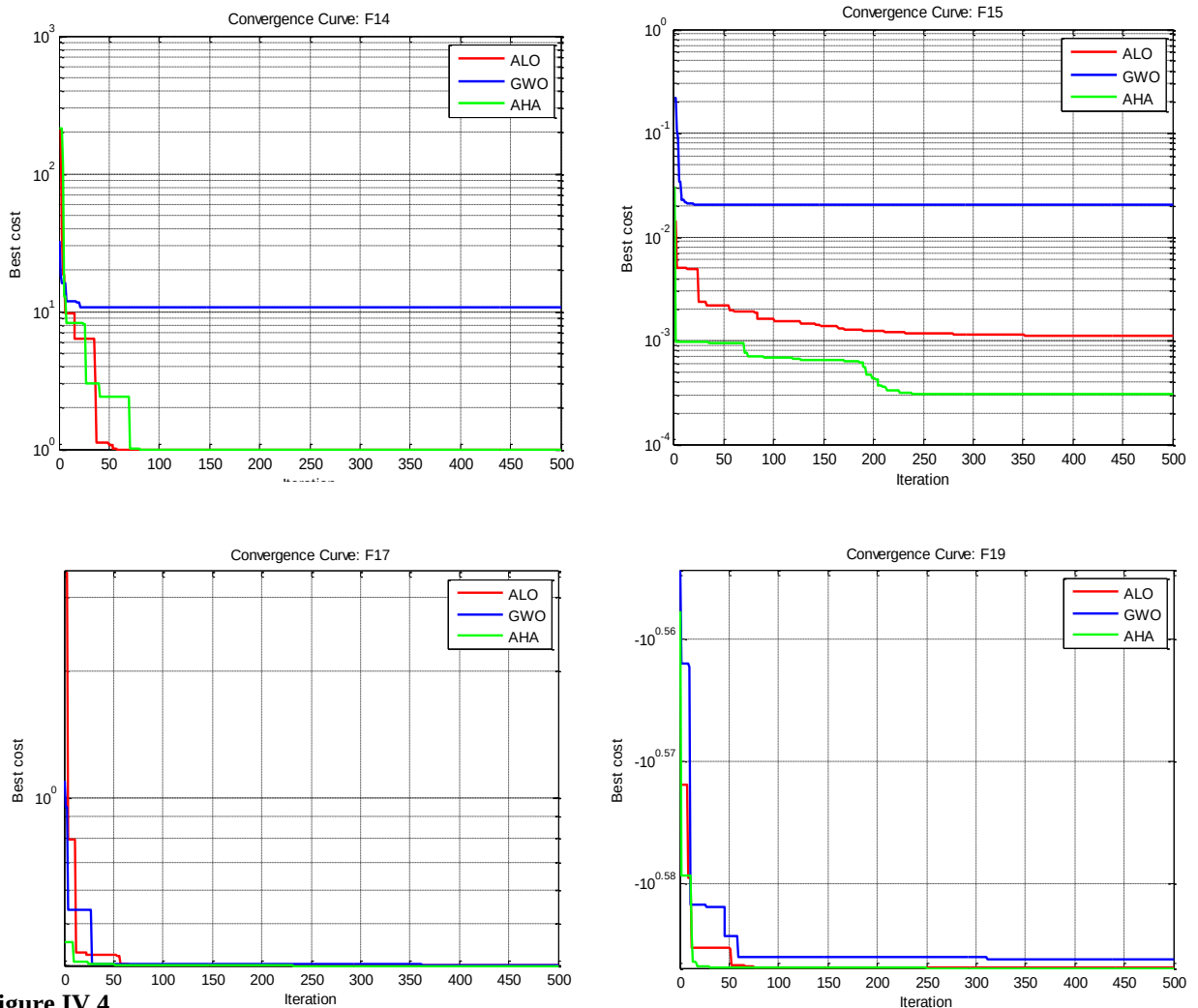


Figure IV.4.

Convergence des algorithmes d'optimisation pour les fonctions F14 à F15 à F17 à F19

IV.2. Cas 2 : Calcul de l'écoulement de puissance IEEE 33 bus

Le calcul de l'écoulement de puissance (Power Flow) est une étape essentielle pour la planification et l'exploitation des réseaux électriques. Elle permet de déterminer l'état stationnaire du système en calculant les tensions aux nœuds ainsi que les flux de puissance active et réactive dans les branches.

Dans ce travail, cette analyse est appliquée au système IEEE 33 bus afin d'établir un état de référence du réseau. Les résultats obtenus servent à identifier la déviation de tension, à évaluer les

pertes de puissance et à fournir une base de comparaison pour l'étude de l'intégration optimale des générateurs distribués (DG) et l'évaluation des performances des algorithmes d'optimisation.

Le Tableau IV.4 illustre les caractéristiques électriques des nœuds en termes d'amplitude et d'angle de tension. En complément, le Tableau IV.5 fournit une analyse quantitative des puissances transitées et évalue rigoureusement les pertes actives et réactives globales enregistrées sur chaque branche du réseau.

Tableau IV.4. Amplitude et angle de tensions des nœuds[4]

N°	Tension (pu)	Phase (degré)	N°	Tension (pu)	Phase (degré)
1	1.0000	0.000	18	0.9131	-0.495
2	0.9970	0.014	19	0.9965	0.004
3	0.9829	0.096	20	0.9929	-0.063
4	0.9755	0.162	21	0.9922	-0.083
5	0.9681	0.228	22	0.9916	-0.103
6	0.9497	0.134	23	0.9794	0.065
7	0.9462	-0.096	24	0.9727	-0.024
8	0.9413	-0.060	25	0.9694	-0.067
9	0.9351	-0.133	26	0.9477	0.173
10	0.9292	-0.196	27	0.9452	0.229
11	0.9284	-0.189	28	0.9337	0.312
12	0.9269	-0.177	29	0.9255	0.390
13	0.9208	-0.269	30	0.9220	0.496
14	0.9185	-0.347	31	0.9178	0.411
15	0.9171	-0.385	32	0.9169	0.388
16	0.9157	-0.408	33	0.9166	0.380
17	0.9137	-0.485			

Tableau IV.5. Les puissances de transmission et les pertes de branches[4]

Départ	Arrivée	P (MW)	Q (MVAR)	P _{loss} (MW)	Q _{loss} (MVAR)
1	2	3.9177	2.4351	0.01224	0.00624
2	3	3.4443	2.2078	0.05179	0.02638
3	4	2.3629	1.6842	0.01990	0.01013
4	5	2.2230	1.5941	0.01870	0.00952
5	6	2.1443	1.5545	0.03825	0.03302
6	7	1.0953	0.5279	0.00191	0.00633
7	8	0.8933	0.4216	0.00484	0.00160
8	9	0.6885	0.3200	0.00418	0.00300
9	10	0.6243	0.2970	0.00356	0.00252
10	11	0.5608	0.2744	0.00055	0.00018
11	12	0.5152	0.2442	0.00088	0.00029
12	13	0.4543	0.2090	0.00267	0.00210
13	14	0.3917	0.1719	0.00073	0.00096
14	15	0.2709	0.0909	0.00036	0.00032
15	16	0.2106	0.0806	0.00028	0.00021
16	17	0.1503	0.0604	0.00025	0.00034
17	18	0.0900	0.0400	0.00005	0.00004
2	19	0.3611	0.1611	0.00016	0.00015
19	20	0.2710	0.1209	0.00083	0.00075
20	21	0.1801	0.0802	0.00010	0.00012
21	22	0.0900	0.0401	0.00004	0.00006
3	23	0.9396	0.4572	0.00318	0.00217
23	24	0.8464	0.4051	0.00514	0.00406
24	25	0.4213	0.2010	0.00129	0.00101
6	26	0.9508	0.9736	0.00260	0.00132
26	27	0.8882	0.9473	0.00333	0.00169
27	28	0.8248	0.9206	0.01130	0.00996
28	29	0.7535	0.8906	0.00783	0.00682
29	30	0.6257	0.8138	0.00390	0.00198
30	31	0.4218	0.2118	0.00159	0.00157
31	32	0.2702	0.1403	0.00021	0.00025
32	33	0.0600	0.0400	0.00001	0.00002
Total				0.20267	0.13514

La figure IV.5. Illustre l'évolution de l'amplitude et de l'angle de la tension aux différents nœuds du réseau, tandis que la **Figure IV.6.** Met en évidence la répartition quantitative des pertes de puissances active (MW) et réactive (MVAR) enregistrées sur chaque branche.

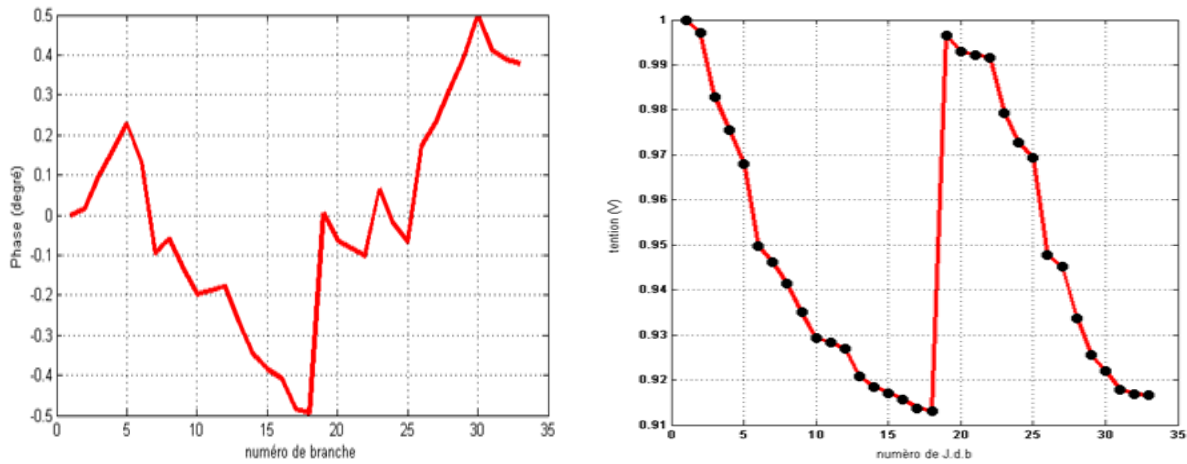


Figure IV.5. Profils de l'amplitude et de l'angle de la tension du réseau IEEE 33-bus

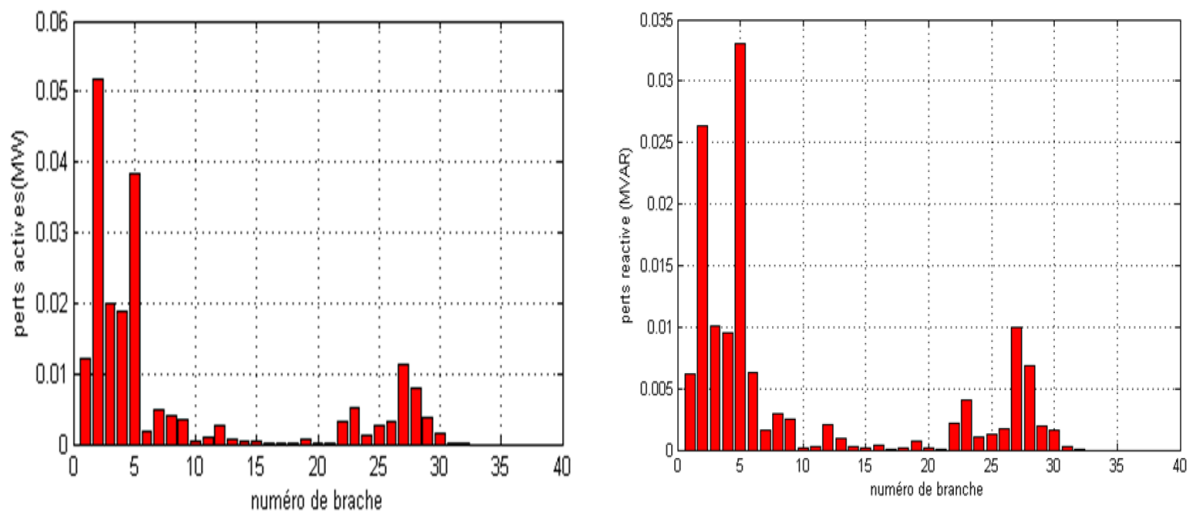


Figure IV.6. Distribution des pertes de puissances active et réactive par branche

IV.3. Cas 3 : Optimisation de l'emplacement et de la taille des unités (DG)

IV.3.1. Étude de l'impact du nombre de DG sur les performances d'un réseau IEEE33

Dans cette partie, nous nous sommes appuyés sur l'étude précédente présentée dans la référence [2], portant sur la détermination du nombre optimisé de générateurs distribués (DG) dans le réseau IEEE à 33 nœuds. Les résultats présentés dans le Tableau 6 montrent que l'augmentation du nombre de générateurs distribués entraîne une réduction significative des pertes de puissance active, celles-ci passant de 0,21002 MW dans le cas de base à 0,071457 MW et 0,071456 MW lors de l'intégration de

trois et quatre DG, respectivement. Par ailleurs, la valeur maximale des économies annuelles, estimée à 51 915,577 \$, a été obtenue avec l'installation de trois générateurs distribués.

Le Tableau IV. 7 met également en évidence une amélioration notable du profil de tension, puisque la déviation de tension a diminué de 0,11709 p.u dans le cas de base à 0,000632 p.u avec quatre générateurs distribués. D'un point de vue économique, l'intégration des DG a permis de réduire les pertes annuelles et de générer des économies financières importantes, le gain maximal atteignant 32 982,775 \$ pour trois générateurs distribués.

À la lumière des résultats obtenus dans les Tableaux IV.6 et IV.7, il apparaît que l'utilisation de trois générateurs distribués constitue la solution la plus efficace pour le réseau IEEE à 33 nœuds. Cette configuration offre un compromis optimal entre la réduction des pertes de puissance, l'amélioration du profil de tension et l'augmentation des bénéfices économiques, contribuant ainsi à l'amélioration globale des performances opérationnelles du réseau. En conséquence, trois générateurs distribués ont été retenus dans cette étude pour la réalisation des tests et des simulations ultérieures.[2]

Tableau IV. 6. Impact du nombre de DG sur la réduction des pertes de puissance dans le système IEEE à 33 nœuds.[2]

	Cas de base	Réduction des pertes de puissance			
Nombre de DG	0	1	2	3	4
Pertes de puissance active [MW]	0.21002	0.10397	0.08591	0.071457	0.071456
Puissance active des DG [MW]	–	2.57532	2.00528	2.92480	2.965114
Puissance active de la sous-station [MW]	3.92502	1.24365	1.79563	0.861657	0.821342
Coût annuel total des pertes [\$]	91988.143	48114.180	41639.139	40072.566	43158.184
Économie annuelle totale [\$]	–	43873.963	50349.003	51915.577	48829.959

Tableau. IV. 7. Impact du nombre de DG sur la réduction de la déviation de tension dans le réseau IEEE à 33 nœuds[2]

	Cas de base	Réduction de la déviation de tension			
Nombre de DG	0	1	2	3	4
Déviation de tension [p.u.]	0.11709	0.005148	0.00928	0.000649	0.000632
Puissance active des DG [MW]	–	3.79999	3.39109	3.72000	3.75010
Puissance active de la sous-station [MW]	3.92502	0.07883	0.45139	0.10424	0.07457
Coût annuel total des pertes [\$]	91988.143	75553.150	62618.42	59005.368	63035.860
Économie annuelle totale [\$]	–	16434.993	29369.723	32982.775	28952.283

IV.3.2. Minimisation de la déviation de tension (mono-objectif)

Cette partie vise à réduire la déviation de tension à travers la détermination optimale des emplacements et des tailles des générateurs distribués (DG). Le tableau IV.8 présente les résultats obtenus à l'aide des algorithmes ALO, GWO et AHA pour l'intégration optimale des générateurs distribués dans le réseau de distribution. Les résultats montrent que les trois algorithmes ont permis

d'améliorer le profil de tension et de réduire la déviation de tension. Parmi les méthodes comparées, l'algorithme AHA a obtenu la meilleure performance avec une déviation de tension minimale de 0,00023053 p.u., en sélectionnant les nœuds (13, 29 et 24) comme emplacements optimaux des générateurs distribués. Les algorithmes GWO et ALO ont obtenu des déviations de tension de 0,0002416 p.u. et 0,0002382 p.u., respectivement. Ces résultats démontrent l'efficacité de l'algorithme AHA dans la recherche de solutions optimales pour le problème d'allocation des générateurs distribués, tout en assurant une amélioration significative du profil de tension du réseau de distribution

Tableau IV.8. L'intégration optimale des DG pour la réduction de déviation de tension

Algorithm	Emplacement des DGs	DG size		VD [p.u]
		[Mw]	[Mvar]	
ALO	14, 31, 24	0.7429,1.2000,1.1828	0.8191,0.8036,0.8683	0.0002382
GWO	13, 30, 3	0.1405,0.7627,1.0013	0.1156,0.5511,0.1578	0.0002416
AHA	13, 29, 24	0.6028,1.2000,1.2000	0.6768,0.7345,0.9023	0.00023053

La figure.IV.7 montre la supériorité de l'algorithme **AHA** en termes de vitesse de convergence et de réduction de la déviation de tension. Tous les algorithmes ont réussi à corriger la chute de tension sévère et à améliorer le profil du réseau.

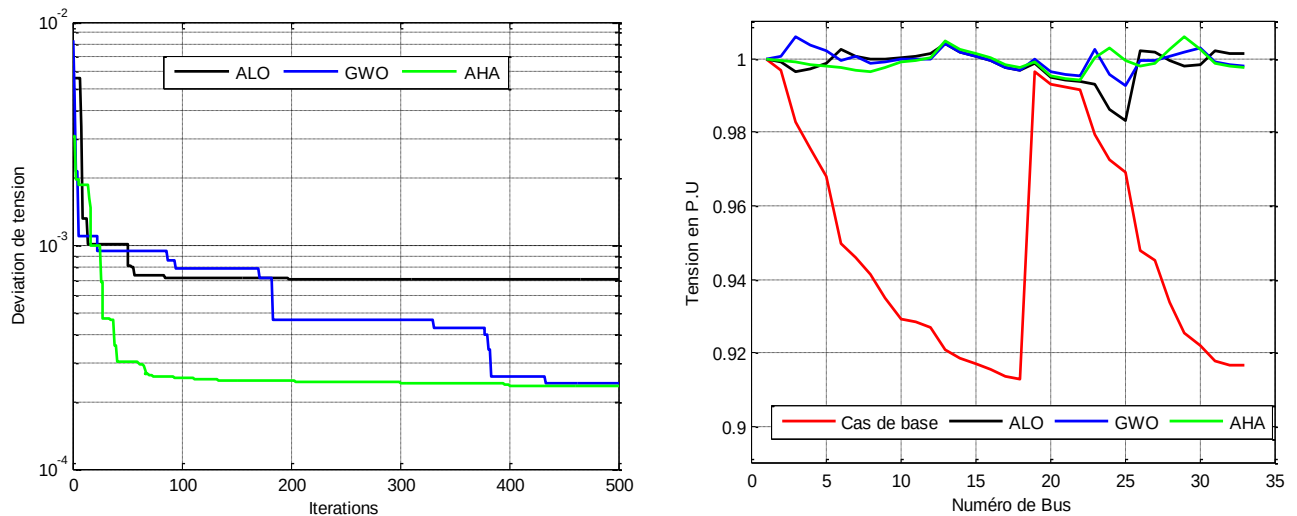


Figure IV.7. Convergence des l'algorithmes et profil de tension pour le réseau IEEE 33-bus.

IV.3.3. Minimisation des pertes de puissance active (mono-objectif)

Cette partie est consacrée à la réduction des pertes de puissance active par la détermination optimale des emplacements et des tailles des générateurs distribués, tout en tenant compte des facteurs de puissance optimaux de chaque générateur. Le tableau IV.9 présente les résultats obtenus par l'algorithme proposé AHA et leur comparaison avec ceux des algorithmes de référence IHHO, GA[2], ainsi que des

algorithmes ALO et GWO. Les résultats démontrent la supériorité de l'algorithme AHA par rapport aux autres méthodes comparées, puisqu'il a permis de réduire les pertes de puissance active à 11,6 kW en choisissant les nœuds (24, 14 et 30) comme emplacements optimaux des générateurs distribués. Cette performance remarquable reflète la capacité de l'algorithme à assurer un équilibre efficace entre l'exploration et l'exploitation de l'espace de recherche, lui permettant ainsi d'atteindre des solutions précises et de haute qualité. Ces résultats confirment l'efficacité et la fiabilité de l'algorithme proposé pour améliorer les performances opérationnelles des réseaux de distribution électrique et minimiser les pertes électriques.

Tableau IV.9. L'intégration optimale des DG pour la réduction des pertes de puissance [2]

Algorithm	Emplacement des DGs	DG size		PI [Kw]
		[Mw]	PF	
IHHO37	14, 24, 30	0.7618, 1.1419, 1.013	0.898, 0.905, 0.711	11.830
GA	13, 24, 30	0.7667, 1.0904, 0.9906	0.915, 0.915, 0.687	11.812
ALO	30, 13, 24	1.0356, 0.7793, 1.0726	0.7144, 0.9051, 0.9003	11.7
GWO	14, 30, 24	0.7723, 1.0349, 1.0599	0.9052, 0.7146, 0.8951	11.7
AHA	24, 14, 30	1.0781, 0.7482, 1.0479	0.9001, 0.9058, 0.7160	11.6

La figure.IV.8 montre l'efficacité de l'algorithme **AHA** à converger rapidement vers la solution optimale. De plus, toutes les méthodes ont réussi à réduire considérablement les pertes actives dans chaque branche par rapport au cas de base

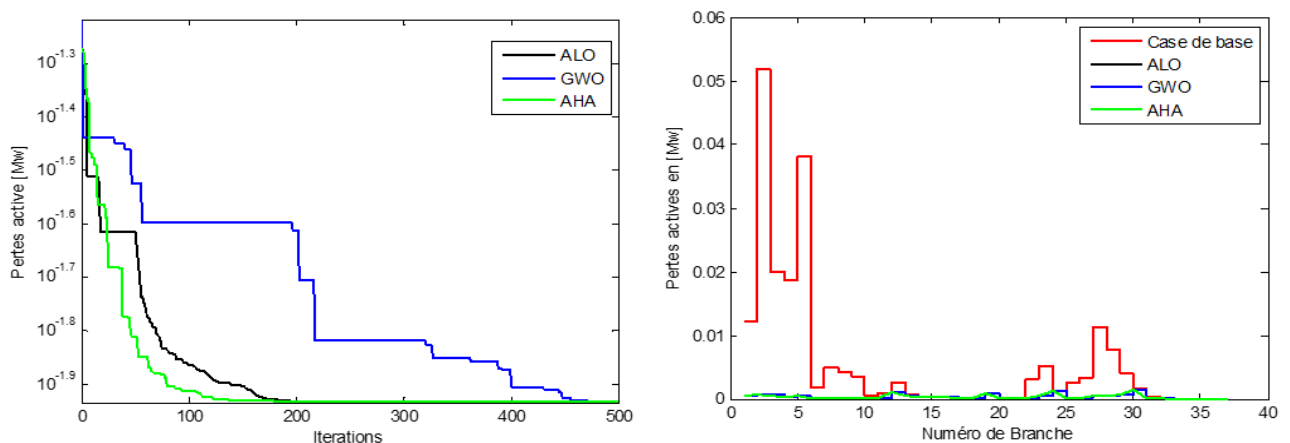


Figure IV.8. Convergence des pertes actives et pertes actives par branche pour le réseau IEEE 33-bus.

IV.3.4. Minimisation des pertes et de la déviation de tension (multi-objectif)

Cette partie vise à améliorer globalement les performances du réseau de distribution électrique en réduisant simultanément les pertes de puissance active et la déviation de tension, grâce à la

détermination optimale des emplacements, des tailles et des facteurs de puissance des générateurs distribués. Le tableau IV.10 présente les résultats obtenus à l'aide de l'algorithme proposé AHA et les compare à ceux des algorithmes de référence GTO, GA [2], ainsi qu'aux algorithmes ALO et GWO. Les résultats montrent que l'algorithme AHA a permis d'obtenir des pertes de puissance active de 11.9 kW et une déviation de tension de 0,00026133 p.u., en sélectionnant les nœuds (13, 24 et 30) comme emplacements optimaux des générateurs distribués. Les résultats mettent également en évidence la capacité de l'algorithme à assurer un compromis efficace entre les deux objectifs contradictoires, en fournissant une solution de haute qualité permettant à la fois de réduire les pertes électriques et d'améliorer le profil de tension. Ces performances confirment l'efficacité de l'algorithme proposé dans la résolution des problèmes d'optimisation multi-objectifs et sa capacité à améliorer de manière équilibrée et fiable les performances globales des réseaux de distribution électrique.

Tableau IV.10. L'intégration optimale des DG pour la réduction des pertes et la déviation de tension [2]

Algorithm	Emplacement des DGs	DG size		PI [Kw]	VD [p.u]
		[Mw]	PF		
GTO	14, 24, 30	0.7020, 1.0881, 1.2030	0.850, 0.890, 0.787	12.664	0.000345
GA	14, 24, 30	0.7714, 1.1125, 1.0616	0.899, 0.916, 0.714	11.756	0.000408
ALO	24, 12, 30	1.0880, 0.9893, 1.0125	0.9014, 0.8963, 0.7109	13.1	0.00033275
GWO	24, 30, 13	0.9088, 1.1197, 0.8356	0.8207, 0.7359, 0.9015	12.6	0.00028734
AHA	13, 24, 30	0.8274, 1.1245, 1.0861	0.8987, 0.9010, 0.7222	11.9	0.00026133

La figure IV.9 illustre le comportement de convergence des trois algorithmes, où **AHA** et **ALO** montrent une vitesse supérieure pour atteindre la solution optimale par rapport à GWO.

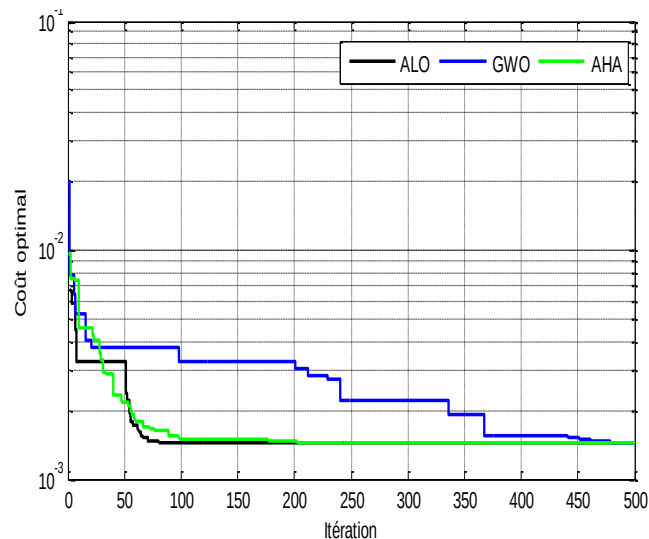


Figure IV.9. Convergence globale pour le réseau de distribution radial IEEE 33-bus

La figure IV.10 montre l'efficacité des algorithmes à améliorer le profil de tension près de 1 p.u. De plus, une réduction remarquable des pertes actives dans toutes les branches est obtenue par rapport au cas de base.

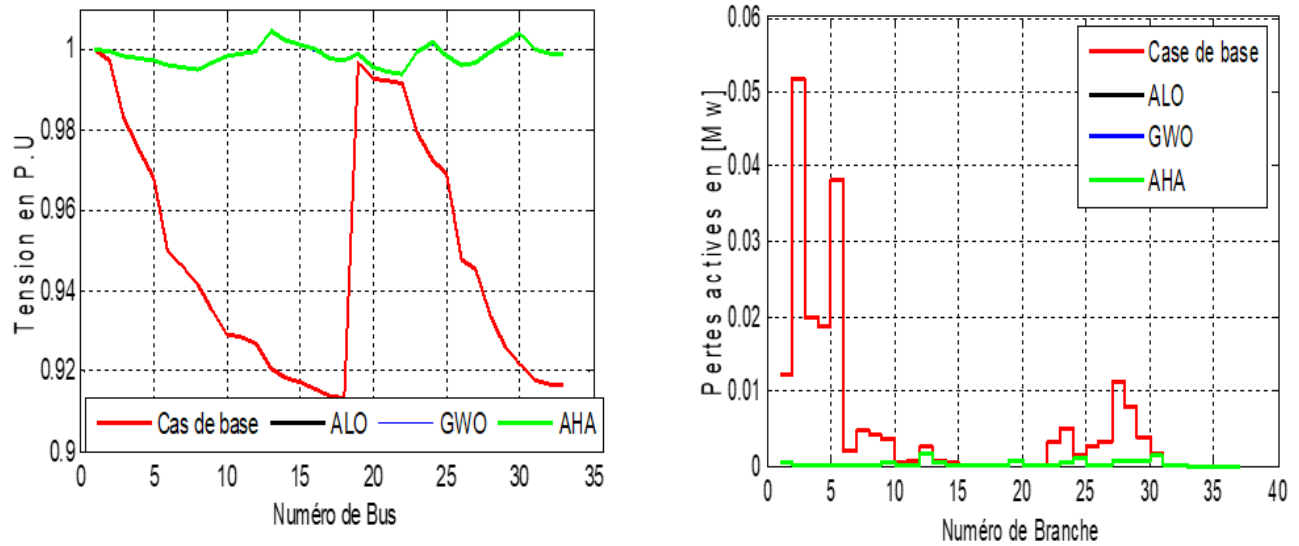


Figure IV.10. Profil de tension et pertes actives par branche pour le réseau IEEE 33-bus

Conclusions

Dans ce chapitre, nous avons proposé les algorithmes AHA, GWO et ALO comme techniques d'optimisation métaheuristiques pour résoudre le problème de l'amélioration des performances des réseaux de distribution électrique. L'objectif principal est de minimiser des fonctions objectives, à savoir : les pertes de puissance active et la déviation de tension, tout en considérant les contraintes opérationnelles du réseau, notamment les limites de tension et la capacité de charge des nœuds. La robustesse des algorithmes proposés est validée sur le réseau de test standard IEEE 33-bus ainsi que sur un ensemble de 23 fonctions de référence (Benchmark fonctions). Nous avons appliqué ces approches pour résoudre des problèmes d'optimisation mono-objectif et multi-objectif, démontrant ainsi l'efficacité et la supériorité de l'algorithme AHA dans la résolution des problèmes complexes des systèmes électriques.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Au terme de ce travail, nous avons étudié le problème de l'allocation optimale des unités de production décentralisée (DGs) dans les réseaux de distribution électrique. L'objectif principal consistait à déterminer les emplacements et les puissances optimales de ces unités afin d'améliorer les performances techniques du réseau, notamment par la réduction des pertes de puissance active et l'amélioration du profil de tension.

Dans un premier temps, nous avons présenté les concepts fondamentaux liés à l'écoulement de puissance ainsi que les modèles mathématiques des réseaux de distribution. Ensuite, nous avons abordé le concept de production décentralisée et son importance dans les réseaux de distribution électrique, en mettant en évidence son impact sur l'amélioration des performances du réseau, la réduction des pertes de puissance et l'amélioration des niveaux de tension.

Par la suite, plusieurs algorithmes d'optimisation métaheuristiques inspirés de phénomènes naturels ont été étudiés, à savoir AHA, ALO et GWO. Ces algorithmes ont été appliqués au problème d'optimisation considéré afin de rechercher les meilleures configurations des unités DGs tout en respectant les contraintes opérationnelles du réseau.

Les simulations réalisées sous l'environnement MATLAB, ainsi que la validation sur un ensemble de 23 fonctions de référence (Benchmark), sur le réseau de test standard IEEE à 33 nœuds ont permis d'évaluer les performances des méthodes proposées. Les résultats obtenus ont montré une amélioration significative des performances du réseau grâce à l'allocation optimale des unités DGs. En particulier, une réduction importante des pertes de puissance active ainsi qu'une amélioration notable du profil de tension ont été observées. Les comparaisons effectuées entre AHA, ALO et GWO ont démontré l'efficacité et la supériorité de l'algorithme AHA dans la résolution de ce problème d'optimisation complexe.

Les résultats obtenus confirment ainsi que les techniques métaheuristiques constituent des outils performants pour résoudre les problèmes complexes d'allocation optimale dans les réseaux de distribution modernes. Elles offrent une bonne capacité d'exploration de l'espace de recherche et permettent d'obtenir des solutions proches de l'optimum global dans des temps de calcul raisonnables.

Comme perspectives futures, cette étude pourrait être étendue à des réseaux de distribution plus complexes ainsi qu'à l'utilisation de versions améliorées des algorithmes métaheuristiques. Par ailleurs, il était initialement prévu d'aborder l'intégration des sources d'énergie renouvelable dans les réseaux de

distribution, mais les contraintes de temps n'ont pas permis d'approfondir cet aspect. Celui-ci constitue donc une extension naturelle et une perspective prometteuse pour de futurs travaux de recherche.

Bibliographie

Bibliographe

- [1] FRIDJAT Zineddine. TAMMA Mohammed Elhadi, "Application des algorithmes génétiques à l'optimisation de la production énergie active dans réseau électrique" Mémoire de Master, Université d'EL-Oued, 2014.
- [2] Gacem, A., Romdhane, M., Kechida, R. *et al.* Multi-objective sizing and location of DG in distribution network by hybrid gorilla troops optimization-genetic algorithm: a real case study. *Sci Rep* 16, 11334 (2026). <https://doi.org/10.1038/s41598-026-41868-7>.
- [3] Sayah Samir « Application des Ensembles Flous à la Repartition Optimale de la Puissance Dans les Réseaux Electriques » Mémoire de magister, université de setif (2005).
- [4] K. E. Lakhal and M. L. Ben Moussa, Analyse de l'écoulement de puissance dans un réseau de distribution, Mémoire de Master, Département d'Électrotechnique, Université Kasdi Merbah Ouargla, Ouargla, Algérie, 2021.
- [5] Gacem, A. (2019). Commande Robuste d'un Dispositif FACTS par les Méthodes Métaheuristiques pour la Stabilité de Tension d'un Réseau Électrique. Thèse de Doctorat en Sciences, Spécialité Réseaux Électriques, Faculté des Sciences et de la Technologie, Université Mohamed Khider Biskra, Algérie.
- [6] S.Sayah, "Application de l'intelligence artificiel pour le fonctionnement optimal des systèmes électriques," Université de Sétif Thèse de Doctorat, 2010.
- [7] Yahiaoui Merzoug, " Contrôle optimal des puissances réactives et des tensions dans un réseau d'énergie électrique par dispositifs FACTS", Thèse de doctorat, univ Mohamed Boudiaf d'Oran, 2014..
- [8] Zeroual Moktaria « optimisait et control de l'écoulement de puissance active par système FACT magister ORAN, 2015
- [9] : Computer methods in power system analysis (chapter 08), ALLEN W.stagg, Ahmed ELAbier, International Student Edition.
- [10]: Mnsouri Dris. Gummoudi Mohammed, Ferhat Abdel Hamid. « Calcule d'écoulement de puissance par la méthode GAUSS-SEIDEL » , Mémoire de fin d'étude Université de Biskra (promotion 1996).
- [11] : Gacem Abdelmalek ((Utilisation des Méthodes d'Optimisations Méta heuristiques Pour La Résolution Du Problème De Répartition Optimale De La Puissance Dans les Réseaux Electriques)) mémoire présenté pour obtenir le diplôme de magister en électrotechnique (2010).

BIBLIOGRAPHE

- [12] O. Mammeri. « Différentes méthodes de calcul de la puissance réactive dans un nœud charge non linéaire en présence d'un système de compensation de l'énergie » mémoire de magistère 2012, Université de Batna
- [13] Z. F. Fethi et G. Abdelmalek et D. Mohammed, « L'application de la Méthode NewtonRaphson à L'écoulement de Puissance Dans Le Système Electrique » ». Mémoire de fin d'étude université EL-OUDE promotion (2007).
- [14] BENGOURAIN ISSAM « Représentations des systèmes hybrides à énergie renouvelables » Présenté pour l'obtention du diplôme de MASTER, Université Aboubakr Belkaïd– Tlemcen –2022.
- [15] K. Belmokhtar, "Contribution à l'intégration d'un parc éolien à un réseau électrique autonome, avec stockage d'énergie sous forme d'hydrogène" Doctorat en génie électrique, université du Québec, 2015
- [16]. <http://jeunes.edf.com/> Consulter le 03/05/2022
- [17] EDF, "Électricité de France - Portail Officiel," [Online]. Available: <https://www.edf.fr>. [Accessed: Jun. 22, 2026].
- [18] <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/biomasse>
- [19] Bilan De Cycle Biomasse.Ardjoun Sid Ahmed El Mehdi
- [20]<https://www.explorateurs-energie.com/index.php/enseignants/les-energies/geothermique>
- [21] Energie géométrique 17/10/2017 EDF
- [22] T. Shimizu, M. Hirakata, and T. Kamezawa. "Generation control circuit for photovoltaic modules". IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 16(3) :293 300,May 2001.
- [23] Ahlam Litim, « Application de la Logique Floue pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale d'un Générateur Photovoltaïque », Mémoire de master, Université Dr. Tahar Moulay de Saïda, 2017.
- [24] Mme Azizi Amina, « Modélisation et Optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride »Thèse de Doctorat Université d'Annaba 2019.
- [25] Kharef fatima zohra, "commande mppt pour les panneaux photovoltaïques en ombrage", mémoire de master, université ahmed draïa-adrar, 2020-2021

BIBLIOGRAPHIE

- [26] Ketfi noujoud, dahmani rahma, "commande non linéaire d'un système d'énergie renouvelable", mémoire de master, université mohamed el bachir eli brahimi, bordj bou arréidj, 2020-2021.
- [27] Anil Kalyanpur, Marc-Etienne Mercadier, Philippe Blanc. Gisement solaire en France caractérisation de la ressource énergétique. Profil de répartition et volatilité. Environnement et Technique. 2013
- [28] Samira Mouhous Chaouchi. Etude statistique du rayonnement solaire sur un plan incliné. Université Abou Bekr Belkaid. 2012
- [29] Baroud Hinde , Djekaoua Habiba. Estimation de l'ensoleillement par deux modèles semiempiriques dans la région de Ghardaïa. Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master. Université De Ghardaïa 2017.
- [30] A, Labouret. M, Villos. « Energie solaire photovoltaïque » le manuel du professionnel.3eme édition Dunod, 2006
- [31] B. Fliche and D. Delagnes, "Production d'énergie électrique : ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE," Cours d'Électrotechnique (STI ELT), Juin 2007.
- [32] L. Protin and S. Astier, "Convertisseurs photovoltaïques," Techniques de l'Ingénieur, Génie électrique, vol. 5, doc. D3360, 1997.
- [33] A. buyers « Les systèmes photovoltaïques » guide, Article, Canada, 2002.
- [34] I. Bendjamaa ‘‘Modélisation et commande d’un système de stockage photovoltaïque ‘‘Mémoire de Magister Université Abou-Baker Belkaid-Tlemcen 2011/2012.
- [35] M. L. Louazane ‘‘Etude technico-économique d’un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla ‘‘Mémoire de Magister Université El Hadj Lakhdar-Batna 16/06/2008.
- [36] A.Saadi, « Etude comparative entre les techniques d’optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque » Mémoire de Magister, Université de Biskra, 2000.lics
- [37] S. Bouchakour, Étude et modélisation d’un système photovoltaïque connecté au réseau, Mémoire de Master, Université Mohamed Khider Biskra, 2020.

BIBLIOGRAPHE

- [38] Kir aimen et Mehellou abdelhai et Lamer mohammed salah et Kadi djeber «Commande prédictive des convertisseurs AC/CC» Mémoire de Master Académique Université Echahid Hamma Lakhdar, El-Oued 2021/2022
- [39] N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie Buck-boost appliquée à un MPPT », Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009.
- [40] R. Touahir et M. A. K. Ben Zahia, « contrôleur neuronal pour la poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque », Mémoire master, Université Kasdi Merbah, Ouargla, Algérie, 2015.
- [41] W. Bensaci, «Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT», Mémoire de Master, Université de Ouargla, Algérie, 2011.
- [42] Schimpf, F. et Norum, L. E. (2008). Grid Connected Converters for Photovoltaic, State of the Art, Ideas for Improvement of Transformerless Inverters. In Proceedings of Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics .
- [43] S. Okbaoui and M. Chain, "Réalisation et commande d'un onduleur triphasé à deux niveaux," Mémoire de Master, Département de Génie Électrique, Université Amar Telidji - Laghouat, Algérie, 2018.
- [44] D. Lalili, Mli vectorielle et commande non linéaire du bus continu des onduleurs multiniveaux. Ph.D. dissertation, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, 2009.
- [45] R. Geoffrey, J. Walker, C. Pierce, "Photovoltaic DC-DC Module Integrated Converter for Novel Cascaded and Bypass Grid Connection Topologies, Design and Optimisation", IEEE, 2007
- [46] Gabriel -Ocatvian CIMUCA « Système inertiel de stockage d'énergies Associe A des générateur éoliens ». Ecole nationale supérieur d'arts et métiers center de Lille, Thés de doctorat soutenu en 2005
- [47] DJEDIDI Imene, Optimisation des performances du réseau électrique de distribution par des méthodes évolutionnaires, thèse de doctorat en génie électrique, Université Mohamed Khider Biskra, 2023
- [48] CHABANE Djabali, "Contribution à l'optimisation de la reconfiguration des Réseaux de distribution en présence de la production décentralisée", Thèse de doctorat, Université de Setif, 2021

BIBLIOGRAPHE

- [49] LAIMECHE Abdallah, "application de l'algorithme des essaims de salpes au dispatching Economique" Mémoire de Master, Université Mohamed Khider-Biskra, 2018.
- [50] Missoum.R«Étude d'un dispatching économique des puissances actives par les Algorithmes de fourmis» mémoire de magister, université Hassiba Ben Bouali, Chlef 2008.
- [51] R. Cherkaoui « Méthodes Heuristiques pour la Recherche de Configurations D' un Réseau Electrique de Distribution»Thèse de doctorat, l'EPF de Lausanne.1992
- [52] L.J. Fogel, A.J. Owens, et M.J. Walsh «Artificial Intelligence Through Simulated Evolution»Wiley, New- York, 1966.
- [53] BELGANDI Imad Eddine. MEDJBER Rédha, "Application de la méthode (simulated Annealing) pour le calcul du dispatching économique", Mémoire de Master, Université Tahar Moulay-Saïda, 2017.
- [54] KETFI Nadhir, "Contribution à la gestion des réseaux de distribution en présence de Génération d'énergie dispersée" Mémoire de doctorat en sciences, Université de Batna,2014
- [55] Systèmes FACTS" Mémoire de Doctorat, Université Mohamed Khider -Biskra,2017. A. J. Wood, B. F. Wollenberg, Power Generation, Operation, and Control, 2e éd., John Wiley and Sons, New York, 1996
- [56] Weiguo Zhao, Liying Wang, Seyedali Mirjalili, Artificial hummingbird algorithm: A new bio-inspired optimizer with its engineering applications, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Volume 388,2022,
- [57] 2. Gang Hu, Jingyu Zhong, Congyao Zhao, Guo Wei, Ching-Ter Chang, LCAHA: A hybrid artificial hummingbird algorithm with multi-strategy for engineering applications, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Volume 415, 2023,
- [58] Mohamed Ebeed, Mohamed A. Abdelmotaleb, Noor Habib Khan, Raheela Jamal, Salah Kamel, Abdelazim G. Hussien, Hossam M. Zawbaa, Francisco Jurado, Khairy Sayed, A Modified Artificial Hummingbird Algorithm for solving optimal power flow problem in power systems, Energy Reports, Volume 11, 2024,Pages 982-1005
- [59] H. Faris, I. Aljarah, M. A. Al-Betar, and S. Mirjalili, "Grey wolf optimizer: a review of recent variants and applications," Sadhana, vol. 43, no. 5, p. 62, 2018.

BIBLIOGRAPHIE

- [60] CHERIFI SARRA, BOUDAUD IMANE “Correction des défaillances des réseaux d'antennes linéaires par l'algorithme de Grey Wolf”, Mémoire de Master Académique, Université OHAMED BOUDIAF – M'SILA, Département d'Electrotechnique, soutenue en 2019.
- [61] ROUMAIR IMENE" Synthèse d'un réseau d'antennes adaptatif pour une topologie circulaire", Mémoire de Master, Université MOHAMED BOUDIAF – M'SILA, Département Electronique, soutenue en 2020
- [62] NAIR Amira et MOUSSAOUI Fatima Zohra, L'approche du Loup Gris (GWO) pour l'optimisation technico-économique des réseaux électriques distribués, mémoire de Master en Électrotechnique, option Énergies Renouvelables en Électrotechnique, Centre Universitaire Salhi Ahmed de Naâma, Algérie, 2021
- [63] X. Shen, L. Tan, S. Zhao, X. Zhang, L. Liu, J. Huang, and W. Chen, "Grey Wolf Optimizer for parameter estimation in surface waves," *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, vol. 77, pp. 11-16, 2015.
- [64] N. Mittal, U. Singh, and B. Singh, "Modified Grey Wolf Optimizer for Global Engineering Optimization," *Applied Computational Intelligence and Soft Computing*, vol. 2016, Article ID 7950348, 16 pages, 2016.
- [65] YACINI Salah, MOHAMMDI Yacine. Optimisation des positions des drones dans un réseau 5G en utilisant le GWO. Mémoire de Master Télécommunication. Université Abderrahmane Mira de Béjaïa, Faculté de Technologie, 2021.
- [66] KIMOUCHE MOHAMMED, BENZID MOUSSA “Les méthodes méta heuristiques pour l'optimisation en génie électrique.”, Mémoire de Master, Université MOHAMED SEDDIK BEN YAHIA – Jijel, Département d'Electrotechnique, soutenue en 2019.
- [67] Seyedali, M., Shahrzad, S., & Seyed, M. (2015). Multi-objective grey wolf optimizer: A novel algorithm formulti-criterion optimization, article de journal.