

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE ECHAHID HAMMA LAKHDAR D'EL OUED



Faculté de la Technologie
Département de Génie Electrique

Laboratoire d'Exploitation et de Valorisation des Ressources Energétiques Sahariennes
LEVRES

Thèse de Doctorat

Présentée par :

BOUCETTA Ikram

En vue de l'obtention du diplôme de **DOCTORAT LMD** en :

Filière : Génie Electrique

Option : Réseaux Electriques

Contribution à l'amélioration de la stabilité des réseaux électriques par les nouvelles techniques d'optimisation

Soutenue le 22/ 05/ 2023, devant le jury composé de :

GUIA Talal	MC/A	Univ. Hamma Lakhdar El-Oued	Président
NAIMI Djemai	Pr	Univ. Mohamed Khider Biskra	Directeur de Thèse
ZELLOUMA Laid	Pr	Univ. Hamma Lakhdar El-Oued	Co- encadreur
BKAKRA Youcef	Pr	Univ. Hamma Lakhdar El-Oued	Examineur
ROUINA Abdelhafid	MC/A	Univ. Mohamed Khider Biskra	Examineur
KHECHKHOUCHE Ali	MC/A	Univ. Hamma Lakhdar El-Oued	Examineur
SALHI Ahmed	MC/A	Univ. Mohamed Khider Biskra	Invité

Remerciements

Avant tout, je remercie **DIEU** le tout puissant, de m'avoir donnée la force, la volonté et la connaissance d'entreprendre cette étude de recherche.

Je tiens à exprimer ma gratitude et ma reconnaissance envers mon directeur de thèse Monsieur **NAIMI Djemai**, professeur à l'université Mohamed Khider Biskra, de m'avoir encadrée. Je le remercie pour ses conseils précieux à la hauteur de ses compétences, ses remarques et ses appréciations pertinentes pour atteindre l'objectif tracé.

Je remercie également mon co-directeur de thèse Monsieur **ZELLOUMA Laïd**, professeur à l'université Echahid Hamma Lakhdar El-Oued pour ses encouragements, son aide durant mes années d'étude.

Je remercie le président de jury, Monsieur **GUIA Talal**, maître de conférences à l'université d'El-oued d'avoir accepté de présider le jury.

J'exprime également toute ma gratitude aux membres de jury : Monsieur **BKAKRA Youcef**, professeur à l'université d'El-oued ; Monsieur **ROUINA Abdelhafid**, maître de conférences à l'université de Biskra ; Monsieur **KHECHKHOUCHE Ali**, maître de conférences à l'université d'El-oued, pour l'honneur qu'ils m'ont fait, en acceptant d'examiner et d'évaluer mon travail.

Je tiens à remercier Monsieur **Ahmed SALHI**, maître de conférences à l'université de Biskra pour son aide et ses conseils constructifs.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance aux docteurs **Lakhdar CHAIB** et **Saleh ABOUDJARAD** pour leurs aides.

Je voudrais aussi remercier l'ensemble des membres du laboratoire **LEVRES** et **LGEB** pour leurs accueils et leurs soutiens tout au long de ce travail de recherche.

Enfin, mes remerciements ne peuvent s'achever sans pensée à ma mère la lumière de mon chemin pour son amour, son sacrifice et ses encouragements. Elle m'a toujours soutenue aux bons comme aux mauvais moments jusqu'à l'aboutissement de cette thèse.

Dédicaces

Je dédie ce travail avec grand amour, sincérité et fierté

A la mémoire de mon père et de mes grands-parents.

A ma mère que D.F.E.U la protège

A mes tantes

A ma sœur Fatima et mes amies.

Publications & Communications

Publications internationals

1. I. Boucetta, D. Naimi, A. Salhi and L. Zellouma'' Enhancement of power system transient stability with a large penetration of solar photovoltaic using FACTS'', Chapter in Springer book, 2020.
2. Ikram Boucetta, Djemai Naimi, Ahmed Salhi, Saleh Abujarad, Laid Zellouma '' Power System Stability Enhancement Using a Novel Hybrid Algorithm Based on the Water Cycle Moth-Flame Optimization'' Energies, Volume 15, N: 14 pp 5060 '' A'', 11/07/2022.

Communications internationals

1. I. Boucetta, D. Naimi, A. Salhi and L. Zellouma'' Enhancement of power system transient stability with a large penetration of solar photovoltaic using facts'', 4th International Conference on Electrical Engineering and Control Applications (ICEECA2019) le 17-19 Décembre 2019 à Constantine.
2. I. Boucetta and D. Naimi ''Comparative Study between FACTS Devices for Power System Transient Stability Improvement with Solar Photovoltaic'', International Pluridisciplinary PhD Meeting (IPPM'20)1st Edition, le 23-26 Février 2020 à L' Oued.
3. I. Boucetta, D. Naimi, A. Salhi and L. Zellouma ''Water Cycle Algorithm Applied to Improve Transient Power System Stability '' The First International Conference on Communications, Control Systems and Signal Processing 16-17 March 2020 El-Oued, Algeria. Published in IEEE Xplore.

Table des matières

Remerciements	I
Table des matières	III
Liste des figures	X
Liste des tableaux	XIII
Liste des symboles et acronymes	XIV
Résumé	XXI
INTRODUCTION GENERALE	2

CHAPITRE 1: Stabilité des réseaux électriques

Introduction	8
I.1. Définition de la stabilité d'un réseau électrique.....	8
I.2. Classification de la stabilité des réseaux électriques.....	8
I.2.1. Stabilité de tension.....	9
I.2.1.1. Stabilité de tension aux grandes perturbations.....	9
I.2.1.2. Stabilité de tension aux petites perturbations.....	10
I.2.2. Stabilité de fréquence.....	10
I.2.3. Stabilité de l'angle du rotor (angulaire).....	10
I.2.3.1. Stabilité angulaire aux petites perturbations (stabilité dynamique)	10
I.2.3.2. Stabilité angulaire aux grandes perturbations (stabilité transitoire)	11
I.3. Relation entre fiabilité, sécurité et stabilité des réseaux électriques.....	12
I.4. Position du problème de la stabilité transitoire.....	12
I.5. Notions de la stabilité transitoire	12
I.5.1. Equation de mouvement (swing equation)	14
I.5.1.1. Equation de mouvement sans couple d'amortissement.....	15
I.5.1.2. Equation de mouvement avec couple d'amortissement.....	17

I.6. But de la stabilité transitoire	18
I.6.1. Stabilité en régime permanent vis-à-vis des petites perturbations	18
I.6.2. Détermination de temps critique d'isolement de défaut (TCID).....	20
I.7. Méthodes d'analyse de la stabilité transitoire	20
I.8. Méthode d'évaluation de la stabilité transitoire.....	21
I.9. Moyens d'amélioration de la stabilité transitoire.....	22
I.9.1. Stabilisateur de système d'alimentation (PSS).....	22
I.9.1.1. Réglage des paramètres de PSS.....	26
I.9.1.2. Emplacement optimal de PSS.....	26
I.9.2. Régulateur PID.....	27
I.9.2.1. Description des actions PID.....	28
I.9.3. Correcteur d'ordre fractionnaire $PI^{\lambda}D^{\mu}$	29
I.9.4. Amélioration de la stabilité par les systèmes FACTS.....	30
I.9.4.1. Types des systèmes FACTS.....	32
I.9.4.1.1. FACTS séries.....	32
I.9.4.1.2. FACTS parallèle.....	34
I.9.4.1.3. FACTS hydride.....	36
I.10. Qualité de l'énergie électrique.....	37
I.10.1. Qualité de la tension.....	37
I.10.2. Qualité du courant.....	38
I.11. Classification des perturbations électriques.....	39
Conclusion.....	40

CHAPITRE 2: Nouvelles techniques d'optimisation

Introduction.....	42
II.1. L'optimisation mathématique.....	42
II.2. Théorie de la complexité.....	42

II.3. Problème d'optimisation	43
II.4. Eléments constituant un problème d'optimisation.....	43
II.5. Formulation d'un problème d'optimisation mono-objectif.....	45
II.6. Classification des problèmes d'optimisation.....	45
II.6.1. Problèmes d'optimisation sans contraintes.....	46
II.6.2. Problèmes d'optimisation avec contraintes.....	46
II.6.2.1. Minimum local et minimum global.....	47
II.7. Etapes d'une opération d'optimisation.....	47
II.7.1. Mise en équation mathématique.....	47
II.7.2. Résolution du problème d'optimisation.....	48
II.7.3. Exploitation de la solution.....	48
II.8. Types des problèmes d'optimisation.....	48
II.8.1. La classe de complexité P (Polynomiale).....	49
II.8.2. La classe de complexité NP (Non Polynomiale)	49
II.9. Classification des méthodes d'optimisation.....	50
II.9.1. Les méthodes exactes (conventionnelles ou classiques)	50
II.9.2. Méthodes approchées.....	50
II.10. Méthodes heuristiques.....	51
II.10.1. Présentation des heuristiques.....	52
II.11. Méthodes méta-heuristiques.....	53
II.11.1. Terminologie.....	53
II.11.2. Présentation des méta-heuristiques.....	53
II.11.3. Caractéristiques principales des métaheuristiques.....	54
II.11.4. Avantages et inconvénients des méthodes métaheuristiques.....	54
Conclusion.....	57

CHAPITRE 3: Méthodes méta-heuristiques

Introduction.....	59
III.1. Principe des méta-heuristiques.....	59
III.1.1. Représentation des solutions.....	59
III.1.2. Fonction d'évaluation.....	59
III.1.3. Intensification, diversification et mémorisation	60
III.2. Classification des méthodes métaheuristiques.....	60
III.2.1. Métaheuristiques à base de solution unique.....	60
III.2.2. Métaheuristiques à base de population de solutions.....	60
III.3. L'inspiration des méta-heuristiques.....	61
III.4. Méthodes méta-heuristiques utilisées.....	62
III.4.1. Algorithme de recherche du corbeau (CSA).....	62
III.4.1.2. Principe de fonctionnement du CSA.....	62
III.4.1.1. Méthodologie de la CSA pour l'optimisation.....	64
III.4.2. Algorithme Génétique.....	68
III.4.2.1. Principe de fonctionnement du AG.....	68
III.4.2.2. Terminologie.....	68
III.4.2.3. Caractéristiques des AG s.....	69
III.4.3. L'algorithme d'optimisation de l'écosystème artificiel.....	73
III.4.3.1. Concept d'un écosystème.....	73
III.4.3.2. Principe de fonctionnement d'un écosystème.....	74
III.4.4. Algorithme du cycle de l'eau (WCA).....	79
III.4.4.1. Principe de l'algorithme du cycle de l'eau.....	80
III.4.5. Algorithme d'optimisation de la flamme de papillon (MFO).....	83
III.5. Métaheuristiques hybrides.....	88
III.5.1. Historique.....	88

III.5.2. Définition.....	88
III.5.3. Motivation de l'hybridation.....	89
III.5.4. Challenges des algorithmes hybrides.....	90
Conclusion.....	91

CHAPITRE 4: Applications et résultats

Introduction.....	93
IV.1. L'amélioration de la stabilité transitoire du système électrique avec une large pénétration du solaire photovoltaïque à l'aide des systèmes FACTS	93
IV.1.1. L'environnement de simulation.....	93
IV.1.2. Principe de l'étude.....	94
IV.1.3. Modèle d'étude (réseau test)	95
IV.1.4. Résultats de simulation.....	96
IV.2. Amélioration de la stabilité du système électrique à l'aide d'un nouvel algorithme hybride basé sur l'optimisation du cycle de l'eau et la flamme de papillon	103
IV.2.1. Principe de l'étude.....	103
IV.2.2. Modélisation du système électrique.....	105
IV.2.3. Description des stabilisateurs proposés.....	106
IV.2.4. Fonctions objectives.....	107
IV.2.5. Sélection du type de défaut.....	108
IV.2.6. L'algorithme Hybride proposé "WCMFO".....	108
IV.2.7. Stratégie d'analyse.....	113
IV.2.8. Résultats de simulation.....	113
IV.3. L'algorithme du cycle de l'eau appliqué pour améliorer la stabilité transitoire du système électrique.	122
IV.3.1. Stratégie d'analyse.....	122
IV.3.2. Résultats de simulation.....	122
Conclusion.....	125

CONCLUSION GENERALE	127
Bibliographie	130
Annex A.....	

Liste des figures

Figure I.1	Classification de la stabilité des réseaux électriques.....	9
Figure I.2	Variation d'angle de rotor.....	11
Figure I.3	Machine synchrone connectée à un jeu de barre infini.....	13
Figure I.4	Relation puissance-angle de rotor.....	13
Figure I.5	Variation d'angle de rotor (la stabilité et l'instabilité)	14
Figure I.6	Schéma électrique équivalent d'un générateur synchrone.....	17
Figure I.7	Modèle simplifié de liaison entre un PSS et le système.....	24
Figure I.8	Modèle d'un PSS avance/retard.....	24
Figure I.9	Régulateur PID.....	27
Figure I.10	Correcteur PID et $PI^{\lambda}D^{\mu}$	29
Figure I.11	Classification des dispositifs FACTS.....	31
Figure I.12	Schéma de principe de TSSC.....	32
Figure I.13	Schéma de principe de TCSC.....	33
Figure I.14	Schéma de base du SSSC.....	34
Figure I.15	Schéma de principe du STATCOM.....	35
Figure I.16	Schéma de principe du SVC.....	33
Figure I.17	Caractéristique du SVC.....	36
Figure I.18	Schéma de principe d'un variateur de charge universel (UPFC).	37
Figure II.1	Illustration des différents minima d'une fonction objective.....	50
Figure II.2	Classification des méthodes d'optimisation.....	58
Figure III.1	Classification des algorithmes métaheuristiques	65
Figure III.2	Diagramme d'état 1 dans CSA (a) $f_l < 1$ et (b) $f_l > 1$	67
Figure III.3	Organigramme de l'algorithme de recherche du corbeau CSA.....	71

Figure III.4	Organigramme de l'algorithme génétique AG.....	76
Figure III.5	Flux d'énergie dans un écosystème ; A) la chaîne alimentaire, B) réseau alimentaire	78
Figure III.6	Une théorie des graphes pour un écosystème basé sur l'AEO	79
Figure III.7	Organigramme de l'algorithme AEO.....	82
Figure III.8	Schéma simplifié du cycle hydrologique (cycle de l'eau)	83
Figure III.9	Organigramme de WCA.....	87
Figure III.10	Orientation transversal.....	88
Figure III.11	Trajectoire de vol en spirale autour de sources lumineuses proches	88
Figure III.12	Organigramme de l'algorithme MFO.....	92
Figure IV.1	La fenetre d'accueil du PSAT.....	99
Figure IV.2	Schéma illustratif de cette étude.....	100
Figure IV.3	Modèle d'un réseau IEEE 30JB sous PSAT.....	101
Figure IV.4	Profil de tension.....	102
Figure IV.5	Emplacement du défaut sur le JB 8.....	102
Figure IV.6	Profil de tension en présence d'un défaut sur le JB 12.....	102
Figure IV.7	La vitesse du rotor.....	103
Figure IV.8	Pénétration d'un PV solaire avec présence du défaut au bus 18	104
Figure IV.9	Vitesses des rotors correspondant.....	104
Figure IV.10	Profil de tension avec pénétration du solaire PV au bus 18.....	105
Figure IV.11	Histogramme de comparaison du TCID avec et sans l'intégration de PV.....	105
Figure IV.12	Localisation du SVC.....	106
Figure IV.13	Localisation du STATCOM.....	107
Figure IV.14	Localisation du UPFC.....	107
Figure IV.15	Histogramme de comparaison du TCID.....	108

Figure IV.16	Organigramme présentant les étapes de l'étude.....	109
Figure IV.17	Schéma présentant la réalisation de l'étude.....	110
Figure IV.18	Schéma de principe du système (SMIB).....	111
Figure IV.19	Organigramme de l'algorithme hybride WCMFO.....	117
Figure IV.20	Profil de convergence (a) IAE, (b) ISE, (c) ITAE utilisant le contrôleur FOPID-PSS	121
Figure IV.21	Profil de convergence (a) IAE, (b) ISE utilisant le contrôleur PID-PSS	121
Figure IV.22	Profil de convergence (a) IAE, (b) ISE utilisant le contrôleur PSS	122
Figure IV.23	Déviations de la vitesse angulaire (avec et sans stabilisateur)....	124
Figure IV.24	Déviations de la vitesse angulaire (a, b, c).....	125
Figure IV.25	Valeurs d'écart de vitesse angulaire (a, b).....	126
Figure IV.26	L'écart de la vitesse du rotor.....	127
Figure IV.27	L'écart de vitesse du rotor (avec et sans PSS)	128
Figure IV.28	Écart de vitesse du rotor (Comparaison entre trois algorithmes)	128
Figure IV.29	Comparaison des profils de convergence.....	129

La liste des tableaux

Tableau II.1	Avantages et inconvénients de quelques méthodes classiques d'optimisation	59
Tableau III.1	Classification des algorithmes métaheuristiques	64
Tableau III.2	Les méthodes hybrides les plus populaires.....	96
Tableau IV.1	Données techniques du modèle d'étude.....	101
Tableau IV.2	Données totales du générateur	101
Tableau IV.3	Le temps critique d'isolement de défaut pour différents emplacements de défaut.....	103
Tableau IV.4	Variation du temps critique (TCID) en fonction de pénétration de l'énergie solaire.....	105
Tableau IV.5	Le TCID pour différents taux de pénétration de l'énergie solaire avec et sans SVC.....	106
Tableau IV.6	Le TCID pour différents taux de pénétration de l'énergie solaire avec et sans STATCOM.....	107
Tableau IV.7	Paramètres de l'algorithme.....	119
Tableau IV.8	Une gamme typique de paramètres du stabilisateur.....	119
Tableau IV.9	Paramètres optimaux du stabilisateur basés sur le WCMFO proposé.....	119
Tableau IV.10	Valeurs optimales de la fonction objective.....	123
Tableau IV.11	Comparaison des résultats de simulation de la déviation de la vitesse maximale du rotor.....	129
Tableau IV.12	Paramètres du PSS optimisés par différents algorithmes.....	129

Liste des abréviations ‘‘ Symboles et Acronymes’’

Chapitre I

Symboles

δ	L'angle de rotor
δ_0	L'angle de fonctionnement avant l'apparition du défaut
$\Delta\delta$	Déviations de l'angle
E_g	La tension interne du générateur [P.U]
E_0	La tension du jeu de barre infini [P.U]
X_E	La réactance
X_g	L'impédance du générateur
P_e	La puissance électrique produite par le générateur [P.U]
P_{max}	La puissance électrique maximale
P_{e1}	La puissance électrique appliquée pour l'angle correspondant δ_a
P_{e2}	La puissance électrique appliquée pour l'angle correspondant δ_b
P_m	La puissance mécanique
C_m	Le couple mécanique
C_e	Le couple électrique (résistant)
C_i	Le couple d'inertie
C_a	Le couple d'amortissement
θ_m	L'angle mécanique
ω_{sm}/ ω_s	Vitesse de rotation synchrone en (rad/s)
δ_m	L'angle mécanique
ω_m	La vitesse mécanique du rotor
J	Le moment d'inertie du rotor

ω_K	L'énergie cinétique emmagasinée par la machine
M	Le moment d'inertie de la partie tournante
S_B	La puissance de base de la machine
H	La constante d'inertie de la machine
f_0	La fréquence en Hz
a / D	Le coefficient d'amortissement de la machine
a'	Le coefficient d'amortissement de la machine en [P.U]
t_c / TCID	Le temps critique d'isolement de défaut.
δ_C	L'angle critique.
K_{pss}	Gain
ΔT_e	Le couple électrique du générateur
T_ω	Filtre passe-haut de constante de temps
T_1, \dots, T_4	Blocs de compensation de phase structurés en avance-retard
ΔV_{er}	L'entrée du système d'excitation
K_P	Gain proportionnel
K_i	Gain intégral
K_d	Gain dérivé
$\varepsilon(t)$	Signal d'erreur
T_i	Constante de temps d'intégration
T_d	Constante de temps de dérivation
K_c	Représente l'action proportionnelle.
T_i / p^λ	Représente l'action intégrale d'ordre fractionnaire
$T_d P_\mu$	Représente l'action dérivation d'ordre fractionnaire.
$1/p^{mi}$	L'opérateur de l'intégrale d'ordre mi avec $0 < mi < md < 1$
p^{mi}	L'opérateur de la dériver d'ordre md avec : $0 < md < 1$

P_{li} / Z_{li}	Les pôles et les zéros de l'approximation de l'intégrateur d'ordre fractionnaire.
K_I, N_I	Les paramètres de l'approximation de l'intégrateur d'ordre fractionnaire.
P_{Di} / Z_{Di}	Les pôles et les zéros de l'approximation de dérivateur d'ordre fractionnaire.
K_D, N_D	Les paramètres de l'approximation de dérivateur d'ordre fractionnaire.

Acronymes

<i>ST</i>	Stabilité transitoire
<i>PSS</i>	Power System Stabilizer
<i>AVR</i>	Automatique Voltage Regulator
<i>PID</i>	Proportionnel Intégral Dérivative
<i>FOPID</i>	Fractional order-PID
<i>FACTS</i>	Flexible Alternating Current Transmission System
<i>TSSC</i>	Thyristor Switched Series Capacitor
<i>SSSC</i>	Static Synchronous Series Compensateur
<i>STATCOM</i>	Statique Synchrones Compensateur
<i>SVC</i>	Statique Var Compensateur

Chapitre II

Symboles

P_D	La puissance active totale demandée.
P_L	Les pertes actives totales de transmission.
Q_D	La puissance réactive totale demandée.
Q_L	Les pertes réactives totales de transmission.
$P_{Gi}^{\max} / P_{Gi}^{\min}$	Puissance active maximale et minimale du générateur <i>i</i> .

$Q_{Gi}^{\max} / Q_{Gi}^{\min}$	Puissance réactive maximale et minimale du générateur i .
$f_{obj}(x)$	Le critère à minimiser appeler aussi fonction objective.
x	Un vecteur à n variables
x_k	Représentent les paramètres du problème à optimiser
$g_i(x)$ et $h_i(x)$	Représentent respectivement les contraintes d'inégalité et d'égalité.
$x_k \min$ et $x_k \max$	Désignent les contraintes de domaine
R^n	L'espace de recherche borné par les contraintes de domaine.

Chapitre III

Symboles

N	Le nombre du corbeau ‘ ‘ taille de l’essaim’ ’
$iter_{max}$	Nombre maximal d’itération
$m^{i,iter}$	La meilleure position que le corbeau ait obtenue jusqu’à l’itération courante
$x^{i,iter}$	Le vecteur de la position du corbeau i
$fl^{i,iter}$	Indique la portée de vol du corbeau i à l’itération $iter$
$AP^{j,iter}$	Indique la probabilité de prise de conscience du corbeau j à l’itération $iter$.
r_i	Est un nombre aléatoire avec une répartition uniforme entre 0 et 1.
x_n	Le meilleur individu
x_{rand}	Un individu aléatoirement généré dans l'espace de recherche
x_1	Le pire individu
x_2, x_5	Sont des herbivores
x_3, x_6	Sont des omnivores
x_4, x_7	Sont des carnivores
a	Un coefficient de pondération linéaire
n	La taille de la population

T	Le nombre maximal d'itérations
L / u	Sont les limites inférieure et supérieure respectivement
r_1	Un nombre aléatoire de l'intervalle [0,1]
r	Est un vecteur aléatoire de l'intervalle [0,1]
c	Le facteur de consommation
D	Le facteur de décomposition
e et h	Les variables de poids sont considérées
r_2	Un nombre aléatoire de l'intervalle [0,1]
r_3	Un nombre aléatoire de l'intervalle [0,1]
x_1, \dots, x_N	Montre le nombre de variables de la fonction objectif
N_{pop}	Le nombre de gouttes de pluie (population initiale)
N_{var}	Nombre de variables de conception
LB	Limites inférieure
UB	Limites supérieures
N_{Sr}	La somme du nombre de rivières (qui est un paramètre utilisateur) et une mer unique
NS_n	Nombre de cours d'eau qui se jettent dans les rivières spécifiques ou la mer
c_i	Fonction de coût
μ	Est un coefficient qui montre la plage de la région de recherche près de la mer.
t	Un nombre aléatoire uniforme [- 1,1]
x_{i+1}	La position suivante du flux
x_i	La position actuelle du flux
dim	La dimension du problème ou le nombre de variables de décision

Acronymes

WOASA	Hybrid Whole Optimization Algorithm with Simulated Annealing
HPSACO	A Heuristic Particle Swarm Ant Colony Optimization Algorithm
HMPA	Hybrid Multi-Population Algorithm
BB – BC	Big Bang- Big Crunch Algorithm
BHS	Hybrid Bat Algorithm with Harmony Search
HS/CS	Hybrid Harmony Search- Cuckoo Search algorithm
WCMFO	Hybrid Water Cycle -Moth Flame Optimization algorithms

Chapitre IV

Symboles

V_t	La tension aux bornes du générateur synchrone
V_{in}	La tension du jeu de barres infini
K_{pss}	Gain
T_ω	Filtre passe-haut de constante de temps
T_1, T_2, T_3, T_4	Blocs de compensation de phase structurée en avance et retard
K_p	La constante proportionnelle
K_i	La constante intégrale
K_d	La constante différentielle
$\Delta\omega$	La déviation de la vitesse synchrone
$e(t)$	Erreur
$U(s)$	La fonction de transfert
μ	Élément dérivé d'ordre fractionnaire
λ	Élément intégral d'ordre fractionnaire

t_{sim} Le temps de simulation

PI Indices de performance

Acronymes

TF La fonction de transfert

IAE Erreur absolue intégrale

ISE Erreur quadratique intégrale

ITAE Intégrale de l'erreur absolue pondérée dans le temps

المخلص

يمكن أن يؤدي ضعف التحكم في الشبكة الكهربائية إلى انهيار كامل للنظام، مما يؤدي إلى خسائر اقتصادية، بيئية وتقنية. لذلك، أصبح تحسين استقرار النظام الكهربائي، وخاصة الاستقرار العابر، أحد الموضوعات الأساسية التي تهتم باحثي الهندسة الكهربائية. حيث تقترح هذه الرسالة نهج تحسين مطور يوفر معلمات الاستقرار المثلى لأجهزة التحكم (مثبت نظام الطاقة، المشتق النسبي المتكامل القائم على مثبت نظام الطاقة ومشتق الترتيب النسبي المتكامل القائم على مثبت نظام الطاقة)، بهدف تحسين استقرار النظام الطاقوي عن طريق تقليل انحراف السرعة الزاوية، في ظل وجود اضطراب شديد باستخدام خوارزمية هجينة جديدة تسمى دورة المياه وشعلة الفراشة، يتم تحقيق ذلك من خلال فرض حادث ديناميكي حراري على نموذج الاختبار المعروف (شبكة احادية الالة متصلة بقضيب بسبار لانهائي). تم إجراء دراسة لتحسين تأثير مصادر الطاقة الشمسية على استقرار النظام الكهربائي حيث تم تطبيق هذه الدراسة على شبكة الاختبار المعروفة (30 عقدة). أثبتت النتائج التجريبية التي تم الحصول عليها تفوق وكفاءة النهج المقترح من حيث تثبيط التذبذبات وتقليل التجاوز، وكذلك تحسين وقت عزل الخطأ الحرج. تم تطوير هذا العمل البحثي في ظل بيئة (ماتلاب/ سيميلنك) وبرنامج البيسات (صندوق أدوات تحليل نظام الطاقة).

الكلمات المفتاحية: الشبكة الكهربائية، الاستقرار العابر، التحسين، انظمة التحكم، مثبت نظام الطاقة، المشتق النسبي المتكامل، مشتق الترتيب النسبي المتكامل، خورزمية دورة المياه وشعلة العثة، حادث ديناميكي حراري.

Résumé

Un mauvais contrôle du réseau électrique peut conduire à un effondrement total du système, entraînant des pertes économiques, écologiques et techniques. Par conséquent, l'amélioration de la stabilité du système électrique, en particulier la stabilité transitoire, est devenue l'un des plus fondamentaux sujets qui préoccupe les chercheurs en génie électrique. Cette thèse propose une approche d'optimisation développée qui fournit les paramètres de stabilisation optimaux des dispositifs de contrôle, (Stabilisateur du système d'alimentation (PSS), Proportionnel -Intégrale-Dérivée à base de PSS (PID- PSS) et le PID d'ordre fractionnaire à base de PSS (FOPID-PSS)), visant à améliorer la stabilité du réseau électrique en minimisant l'écart de la vitesse angulaire, en présence d'une perturbation grave en utilisant un nouvel algorithme hybride appelé Cycle de l'eau et la Flamme de papillon (WCMFO). Ceci est réalisé en imposant un incident thermodynamique sur le modèle de test bien connu SMIB (Réseau mono machine relié à un jeu de barres infini). D'autre part, une étude a été réalisée pour améliorer l'impact de l'intégration des sources d'énergie solaire (PV) sur la stabilité du système électrique. Cette étude est appliquée sur le fameux réseau test IEEE 30 JB. Les résultats expérimentaux obtenus ont prouvé la supériorité et l'efficacité de l'approche proposée en termes d'amortissement des oscillations et de réduction du dépassement, ainsi que l'amélioration du temps critique d'isolement de défaut. Ce travail de recherche a été développé sous l'environnement MATLAB/ SIMULINK et le logiciel PSAT (Power System Analysis Toolbox).

Mots clés : Réseau électrique ; stabilité transitoire ; optimisation ; systèmes de contrôle ; PSS- PID- FOPID ; WCMFO ; incident thermodynamique.

Abstract

Poor control of the power grid can lead to a total system collapse, causing economic, ecological, and technical losses. Therefore, improving power system stability, particularly transient stability, has become one of the most fundamental topics of concern to electrical engineering researchers. This thesis proposes a developed optimization approach that provides the optimal stabilization parameters of the control devices, (Power System Stabilizer (PSS), Proportional-Integral-Derivative based on PSS (PID- PSS), and Fractional Order PID based on PSS (FOPID- PSS)), aimed at improving the power system stability by minimizing the angular speed deviation in the presence of a severe disturbance using a new hybrid algorithm called Water Cycle and Moth-Flame (WCMFO). This is achieved by imposing a thermodynamic incident on the well-known test model SMIB (single machine infinite bus). On the other hand, a study has been carried out to improve the impact of solar energy sources integration on electrical system stability. This study is applied to the famous IEEE 30 JB test system. The experimental results obtained proved the superiority and efficiency of the proposed approach in terms of oscillation damping and overshoot reduction, as well as the improvement of the critical cleaning time. This research study was developed in the MATLAB/SIMULINK environment and the PSAT (Power System Analysis Toolbox) software.

Keywords: Power system; transient stability; optimization; control system; PSS- PID- FOPID; WCMFO; thermodynamic incident.

Introduction générale

Généralités

Depuis l'inauguration de la première centrale électrique dans le monde en 1882 à Pearl Street Station au Sud de Manhattan par le père de l'électricité Thomas Alva Edison, l'énergie électrique est devenue une nécessité quotidienne incontournable et l'un des facteurs les plus importants pour le développement de n'importe quel pays [1].

Au cours des dernières décennies, le développement technologique rapide, l'industrialisation, la croissance démographique et les exigences des consommateurs de l'énergie électrique qui s'accroissent de jour en jour ont rendu le réseau électrique très complexe. Par ailleurs, ces réseaux électriques sont vulnérables à divers incidents pouvant causer un dysfonctionnement partiel ou total. Ces incidents sont de nature très diversifiée tels que : les ruptures de ligne, défauts de court-circuit, la surcharge, la foudre, les changements brusques du couple mécanique, etc...

L'un des incidents les plus dangereux aux quels le réseau électrique peut être confronté est la perturbation soudaine qui peut engendrer dans certains cas l'instabilité totale du système (Blackout), provoquant par la suite des pertes économiques importantes et éventuelles atteintes à la sécurité et à la paix sociale [2]. A titre d'exemple, la panne du 3 février 2003 en Algérie où 25 millions d'utilisateurs se sont retrouvés soudainement dans l'obscurité pendant 6h [3]. Ainsi que celle de l'Inde, le 31 juillet 2012 où 620 millions d'utilisateurs n'ayant pas accès à l'électricité durant 16h [4].

Le contrôle de la stabilité, en particulier la stabilité transitoire en présence de ces contingences constituent un souci majeur qui ne cesse de préoccuper les chercheurs en génie électrique. L'analyse de la stabilité transitoire est l'un des outils les plus puissants pour étudier et améliorer le comportement des réseaux électriques. Grâce à cette étude, nous pouvons faire un jugement sur la capacité du réseau à résister les incidents majeurs qui peuvent survenir à tout moment.

Motivations de la thèse

Dans la littérature, divers systèmes de contrôle et dispositifs auxiliaires ont été développés pour améliorer la stabilité transitoire, tels que : le régulateur automatique de tension (AVR), les stabilisateurs de système d'alimentation (PSS) [5], le proportionnel-intégral-dérivé (PID), le PID d'ordre fractionnaire (FOPID), et le système de transmission flexible en courant alternatif (FACTS)

[6-7]. Le PSS, PID et le FOPID sont les dispositifs les plus couramment utilisés pour assurer le fonctionnement efficace du réseau électrique. L'objectif principal des stabilisateurs est de fournir un couple adéquat sur la partie mécanique du générateur et d'assurer un meilleur amortissement du système électrique [8].

Malheureusement, elles présentent plusieurs difficultés lorsqu'il y a une certaine non-linéarité dans le système, causée par l'inflexibilité des valeurs des paramètres [9]. Ainsi que le choix de ses paramètres qui influent énormément sur l'efficacité de ces outils pour l'amélioration de la stabilité du système électrique.

En raison des contraintes reconnues par les méthodes numériques dans la résolution du problème d'optimisation complexes, tels que :

- La convergence vers une solution locale.
- Le grand nombre d'itération.
- La sensibilité à un point de recherche initiale.
- La capacité de modélisation limitée (dans la gestion des contraintes et les fonctions non-linéaires et discontinues).

De nombreux chercheurs ont développé une nouvelle approche appelée algorithmes méta-heuristiques qui est basée sur des phénomènes naturels, pour répondre aux conditions de bon fonctionnement et traiter une variété de problèmes d'optimisation.

Plusieurs travaux de recherche ont été élaborés pour ajuster les paramètres des stabilisateurs en utilisant des algorithmes méta-heuristiques afin d'améliorer la stabilité du système électrique. Sheshnarayan et al [10] ont utilisé la technique d'optimisation par recherche de coucou pour concevoir un PSS robuste basé sur un contrôleur PID. Dans le but d'améliorer la stabilité du système électrique, L. Chaib et al [11] ont proposé une conception et un réglage optimaux du PSS basé sur le FOPID en utilisant l'algorithme Bat. Vijayakumar et al. [12] ont proposé un algorithme génétique amélioré pour optimiser les paramètres du contrôleur PID. Boucetta et al. [13] ont utilisé une nouvelle méthode d'optimisation appelée l'algorithme du cycle de l'eau pour fournir les réglages optimaux des paramètres PSS afin d'améliorer la stabilité transitoire du système électrique.

Comme illustré précédemment, de nombreux algorithmes méta-heuristiques peuvent obtenir des solutions prometteuses pour les problèmes d'optimisation. Par contre, il n'y a aucune garantie

qu'un algorithme méta-heuristique particulier atteigne une solution parfaitement optimale pour résoudre tous les problèmes d'optimisation de manière efficace, conformément au théorème "No Free Lunch" [14]. Récemment, diverses approches hybrides ont été introduites pour améliorer la qualité des solutions et la capacité de recherche des méthodes méta-heuristiques de base pour une optimisation globale.

Problématique de la recherche

À cause des complexités entourant le réseau électrique actuellement, l'occurrence de n'importe quelle contingences ou incidents peuvent mener à une situation critique qui entraîne des oscillations électromécaniques souvent mal amorties, ainsi que l'augmentation progressive de l'écart de la vitesse angulaire (le dépassement), suivie de la perte de synchronisme et de l'instabilité du système.

- ✓ Comment peut-on améliorer la stabilité du réseau électrique en agissant sur les systèmes de contrôle des réseaux électriques ?
- ✓ Quels sont les meilleures méthodes d'optimisation en se basant sur l'intelligence artificielle qui peuvent donner les meilleurs résultats ?
- ✓ Comment améliorer l'influence de l'intégration des sources renouvelable sur la stabilité des réseaux électriques ?

Afin de répondre à ces problématiques soulevées précédemment et autres relatives, c'est dans ce cadre que ma thèse de doctorat s'inscrit où l'amélioration de la stabilité du réseau électrique constitue l'objectif primordial.

Contributions

Ce cadre de travail novateur propose une approche de modélisation développée qui fournit les paramètres de stabilisation optimaux des dispositifs de contrôle (PSS, PSS- PID, PSS -FOPID), visant à améliorer la stabilité du réseau électrique en minimisant l'écart de vitesse angulaire, le temps de stabilisation et d'assurer un amortissement maximal des oscillations en présence d'un événement de perturbation grave en utilisant un ensemble de techniques d'optimisation basées sur l'intelligence artificielle. Les approches proposées sont examinées et évaluées sur un système d'essai SMIB (Single Machine Infinite Bus) dans différentes conditions de fonctionnement.

Cette thèse contribue au domaine de recherche en développement de l'amélioration de la stabilité du système électrique. Les principaux piliers de contribution du présent travail de recherche sont les suivants :

- ✓ Le développement d'un code de calcul basé sur les méthodes métaheuristiques, afin de fournir les paramètres optimaux du stabilisateur pour améliorer les performances de stabilité du réseau électrique.
- ✓ La fourniture d'un modèle plus réaliste et précis de stabilisation du système électrique facile à étudier et très utile pour illustrer l'impact de divers facteurs sur la stabilité du système électrique.

La contribution principale de ce travail de recherche est d'introduire différentes techniques d'optimisation pour résoudre le problème de stabilité des systèmes électrique.

Il est à noter que les environnements de la simulation vont être utilisé sont le PSAT (Power System Analysis Toolbox) et le MATLAB/Simulink.

Structure de la thèse

La présente thèse est structurée en 4 chapitres qui traitent de l'ensemble des questions soulevées :

- Le premier chapitre, présentera les notions de base liées à la stabilité des réseaux électriques, ainsi que le but de la stabilité transitoire. En outre, une partie importante de ce chapitre sera consacré aux techniques utilisées pour l'amélioration de la stabilité transitoire.
- Le second chapitre, sera consacré sur aux concepts fondamentaux de l'optimisation, les éléments qui constituer un problème d'optimisation et la formulation du problème d'optimisation mono-objectif.
- Le troisième chapitre, nous exposerons les notions de base des méthodes méta-heuristique, le concept de l'inspiration et le principe de fonctionnement. Nous mettons l'accent sur celles que nous avons étudiées dans le cadre de cette thèse : Algorithme de recherche du corbeau (CSA) ; L'algorithme génétique (GA) ; L'algorithme d'optimisation de l'écosystème artificiel (AEO) ; L'algorithme du cycle de l'eau (WCA) ; L'algorithme d'optimisation de la flamme de papillon (MFO). Une place privilégiée dans ce chapitre sera consacrée aux méthodes hybride.

- Le dernier chapitre, sera subdivisé en trois parties, la première partie sera consacré à l'analyse de l'influence des sources d'énergie solaire PV et les systèmes FACTS sur la stabilité du réseau électrique. La deuxième partie présentera notre modeste contribution à l'amélioration de la stabilité transitoire, en utilisant une nouvelle méthode hybride. La dernière partie se penchera sur l'optimisation des paramètres du PSS, en utilisant le WCA visant à l'amélioration de la stabilité du système électrique. Puis, nous exposerons les résultats expérimentaux obtenus par les approches d'optimisation proposées, ainsi que leurs interprétations.

Enfin, cette thèse sera clôturée par une conclusion générale synthétisant ainsi les principales contributions présentées dans cette thèse. Un ensemble de perspectives pouvant être développées par la suite, ouvrant ainsi de nouvelles voies et propositions dans le but d'améliorer ce travail et d'entamer de futures recherches.

Chapitre 1

Stabilité des réseaux électriques

I. Introduction

La stabilité est un facteur essentiel pour garantir une alimentation électrique fiable et sécurisée, en assurant le fonctionnement correct du réseau électrique même s'il est soumis à des perturbations externes ou à des conditions de charge variables. L'instabilité du système électrique peut entraîner une augmentation de la fréquence des pannes, des pertes financières importantes et même des perturbations majeures. En conséquence, il est crucial de comprendre les différents types de la stabilité électrique et de développer des stratégies efficaces pour améliorer la stabilité des réseaux électriques. Dans cette optique, de nombreuses recherches ont été menées pour concevoir des méthodes avancées de contrôle et des technologies émergentes pour assurer la stabilité et la fiabilité des réseaux électriques dans un avenir proche.

Ce chapitre donne un aperçu des notions de base liées à la stabilité des réseaux électriques, ainsi que des caractéristiques des différents types de stabilité, en particulier la stabilité transitoire. De plus, une partie importante de ce chapitre sera consacrée aux techniques utilisées pour améliorer la stabilité transitoire.

I.1. Définition de la stabilité d'un réseau électrique

Nombreuses définitions de la stabilité de systèmes de puissance étaient proposées en insistant sur les divers aspects qui reflètent la manifestation de l'état stable de système. La définition la plus récente, que nous adopterons, est le résultat d'un groupe de travail conjoint *IEEE/CIGRE* [18].

« La stabilité des réseaux électriques se réfère à sa capacité à retrouver un état d'équilibre d'après avoir été soumis à une perturbation. Plus précisément, la stabilité d'un réseau électrique dépend de sa capacité à maintenir la fréquence, la tension et la puissance à des niveaux acceptables, malgré les changements de charge et les perturbations imprévues. En d'autres termes, un réseau électrique est considéré comme stable s'il peut fournir de l'énergie électrique de manière fiable et continue sans interruption ou fluctuations importantes ». [18]

I.2. Classification de la stabilité des réseaux électriques

Pour simplifier l'analyse de la stabilité, il faut identifier les facteurs clés qui contribuent à l'instabilité et la mise au point de méthodes d'amélioration [18].

La classification de la stabilité du système de puissance proposée ici est basée sur les considérations suivantes [16] :

1. La nature physique de l'instabilité.

2. L'amplitude de perturbations.
3. Le délai qui doit être pris en compte pour évaluer la stabilité.
4. les dispositifs et les processus nécessaires pour assurer la stabilité.

La figure 1.1 donne une idée générale du problème de stabilité du réseau électrique, en identifiant ses catégories et sous-catégories qui contiennent une description détaillée de chaque classification.

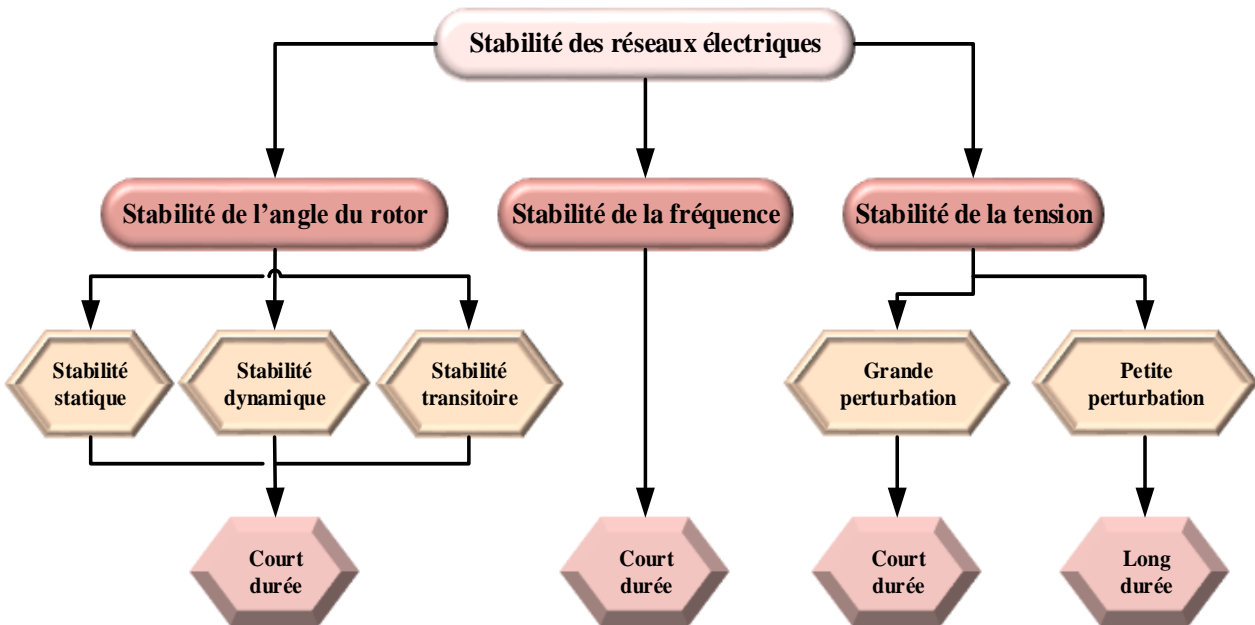


Figure 1.1. Classification de la stabilité des réseaux électriques [15]

I.2.1. Stabilité de tension

La stabilité de tension concerne la capacité d'un système électrique à maintenir les niveaux de tension dans les limites acceptables malgré les fluctuations de la demande de puissance ou les perturbations du système. Les systèmes électriques utilisent diverses méthodes pour maintenir la stabilité de tension, notamment la régulation de la tension, la compensation de réactance, l'injection de puissance réactive et la gestion de la demande. [18]

I.2.1.1. Stabilité de tension aux grandes perturbations

« La stabilité de tension aux grandes perturbations est essentielle pour maintenir la sécurité et la fiabilité du système électrique. Ce dernier est conçu pour résister à ces grandes perturbations en utilisant des mécanismes de protection et de contrôle pour isoler les zones affectées et rediriger le flux d'énergie. Les techniques d'amélioration de la stabilité de tension aux grandes perturbations

incluent l'utilisation de dispositifs de protection tels que les disjoncteurs, les relais de protection, les contrôleurs de phase, les compensateurs statiques de réactance et les systèmes de stockage d'énergie ». [17]

1.2.1.2. Stabilité de tension aux petites perturbations

Elle est définie comme la capacité du réseau électrique à maintenir les tensions des nœuds dans les limites de fonctionnement permises en présence des grandes perturbations à savoir la perte d'équipement de transport ou de production, le court-circuit, ...etc. [17].

1.2.2. Stabilité de fréquence

« La stabilité de la fréquence d'un système de puissance se définit par la capacité du système à maintenir sa fréquence proche de la valeur nominale suite à une perturbation sévère menant par conséquent à un important déséquilibre, entre les puissances produites et consommées ». [19]

1.2.3. Stabilité de l'angle du rotor (angulaire)

La stabilité angulaire est définie comme la capacité des générateurs synchrones d'un réseau à maintenir le synchronisme après avoir été soumis à une ou des perturbations. L'instabilité se traduit par des oscillations angulaires de certains générateurs menant à la perte de leur synchronisme avec les autres générateurs [20].

Suivant l'amplitude de la perturbation, nous pouvons classer la stabilité angulaire en deux sous-catégories : la stabilité des angles de rotor aux petites perturbations et la stabilité des angles de rotor aux grandes perturbations, encore appelée stabilité transitoire [15].

1.2.3.1. Stabilité angulaire aux petites perturbations (stabilité dynamique)

La stabilité angulaire aux petites perturbations concerne la capacité du système à maintenir le synchronisme en présence de petites perturbations comme : une petite variation de la charge ou de génération, manœuvre d'équipement, etc. L'instabilité résultante se manifeste sous forme d'un écart croissant, oscillatoire ou non-oscillatoire, entre les angles de rotor. [22]

1.2.3.2. Stabilité angulaire aux grandes perturbations (stabilité transitoire)

« Elle concerne la capacité du système de maintenir le synchronisme après avoir subi une perturbation sévère transitoire tel un court-circuit sur une ligne de transmission ou une perte d'une

partie importante de la charge ou de la génération. La réponse du système implique de grandes variations des angles de rotor. Elle dépend de la relation non-linéaire couples- angles ».

La stabilité transitoire dépend non seulement de l'amplitude des perturbations et du point de fonctionnement initial, mais elle dépend également des caractéristiques dynamiques du système. Elle se manifeste à court terme sous forme d'un écart croissant de façon apériodique de certains angles de rotor. Si l'instabilité se manifeste directement suite à la perturbation (plus précisément dans la première seconde qui suit l'élimination du défaut), elle est appelée instabilité de première oscillation. (Cas 1, figure (2)), et elle s'étend sur 3 à 5 secondes.

L'instabilité transitoire peut aussi se manifester autrement. Elle peut résulter de la superposition des effets de plusieurs modes d'oscillation lents excités par la perturbation, provoquant ainsi une variation importante de l'angle de rotor au-delà de la première oscillation, (cas 2, figure (1.2)). La gamme de temps associée va de 10 à 20 secondes. [15][22]

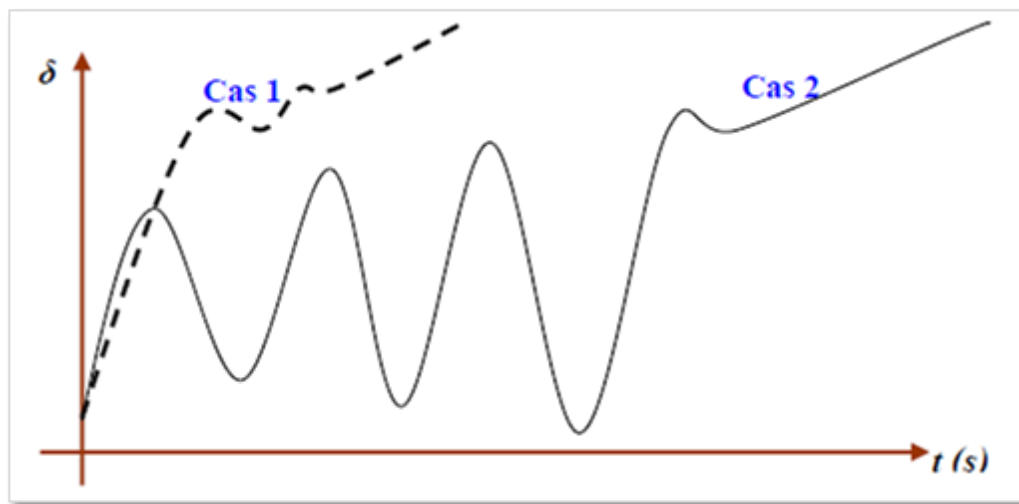


Figure. 1.2. Variation d'angle de rotor.[21]

Cas 1 : instabilité de première oscillation. Cas 2 : instabilité de multi-oscillations.

Il est important de distinguer les différentes formes de stabilité pour bien comprendre les causes sous-jacentes afin de concevoir des outils appropriés et adéquats pour une exploitation efficace pour les réseaux électriques. Même si l'on s'intéresse à un cas spécifique de stabilité, il faut toujours garder en tête que l'objectif final est de garder la stabilité de manière globale. [19]

I.3. Relation entre fiabilité, sécurité et stabilité des réseaux électriques

Dans cette section, on tient à faire la différence entre la fiabilité, la sécurité et la stabilité des réseaux électriques. [16] La fiabilité d'un réseau électrique se rapporte à la probabilité d'un fonctionnement satisfaisant sur le long terme et dénote la capacité de fournir un service électrique adéquat continuellement avec d'éventuelles interruptions dans le temps [20]. La sécurité d'un réseau électrique se rapporte à sa capacité à supporter des perturbations imminentes sans interruption de service. Elle est assimilable à la robustesse du réseau [15].

Dans la conception et le fonctionnement d'un réseau électrique, sa fiabilité est toujours l'objectif recherché.[22] Pour être fiable, la sécurité doit être garantie quasiment en tout temps. Cette sécurité passe par la stabilité et la protection contre les autres risques qui ne sont pas classés comme des problèmes de stabilité : par exemple, des dommages à l'équipement, la défaillance des câbles de transport et de distribution. Cela peut être entraîné par une surcharge de l'équipement ou des violations de tension dans la configuration post-défaut. L'analyse de stabilité fait donc partie intégrante de l'étude de la sécurité et de l'évaluation de la fiabilité du réseau. Dans cette thèse, on n'aborde que le volet de la stabilité. [21][23]

I.4. Position du problème de la stabilité transitoire

Lorsque le réseau subit une perturbation importante liée aux phénomènes transitoires, la différence entre la puissance mécanique et électrique induit une accélération ou une décélération pouvant entraîner la perte de synchronisme d'un ou de plusieurs générateurs. Les angles rotoriques commencent à osciller jusqu'à l'intervention des systèmes de régulation de tension et de vitesse afin de restituer la marche en synchronisme et mener le réseau à un nouvel état de fonctionnement stable. [22]

I.5. Notions de la stabilité transitoire

Le concept de stabilité transitoire peut être expliqué par une approche graphique simple, à savoir le critère d'égalité des aires. Cette approche regroupe l'équation du mouvement et la courbe (P- δ) traditionnelle représentant la relation entre la puissance produite par le générateur et l'angle de rotor. [21]

Pour expliquer cette approche, nous utilisons un système de puissance simple constitué d'un générateur synchrone connecté à un jeu de barre infini via une ligne de transmission, (figure.1.3).

Le générateur est modélisé par une source de tension idéale E_g en série avec une réactance X_g (modèle classique). La ligne et le transformateur sont représentés par la réactance X_E .

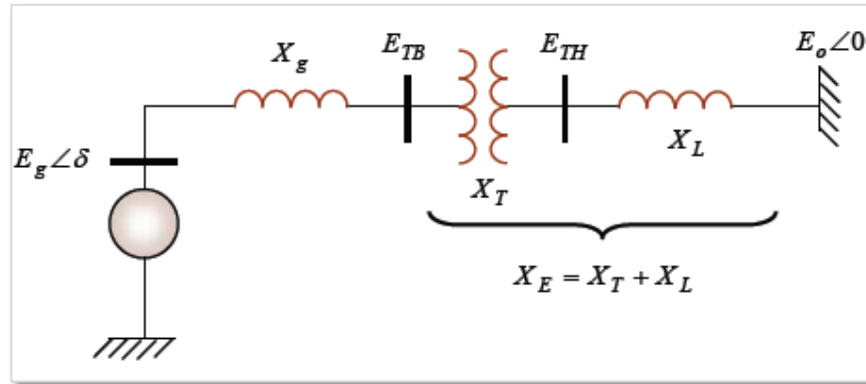


Figure.1.3. Machine synchrone connectée à un jeu de barre infini.[21]

- Relation (P- δ)

Dans l'état équilibré, la puissance produite par le générateur P_e est donnée par l'équation suivante:

$$P_e = \frac{E_g E_0}{X_g + X_E} \sin \delta \quad (1.1)$$

Où, δ , l'angle de rotor, est le déphasage entre la tension interne du générateur (E_g) et la tension du jeu de barre infini (E_0). L'équation (Eq.1) est représentée graphiquement dans la figure (1.4).

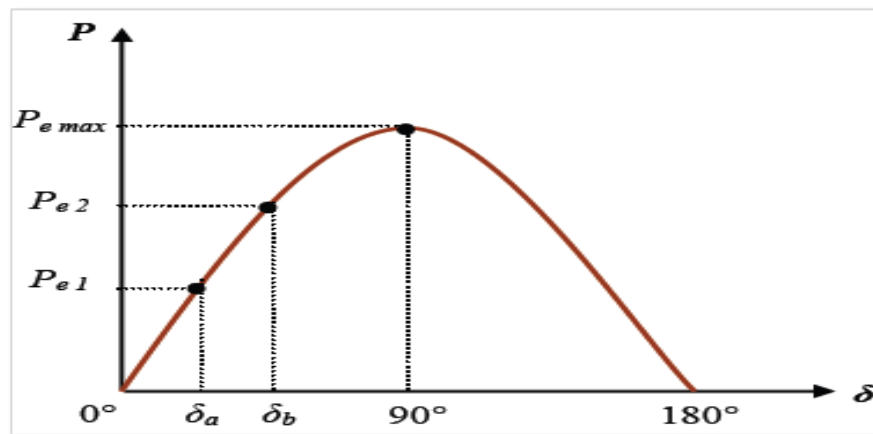


Figure.1.4. Relation puissance-angle de rotor.[21]

Lors de l'équilibre, la puissance électrique $P_e I$ est égale à la puissance mécanique appliquée pour l'angle correspondant δ_a . Un brusque changement sur la charge du générateur entraîne une

variation de la puissance mécanique, et par conséquent de la puissance électrique, par exemple de $Pe1$ à $Pe2$, (figure 1.4).

Le rotor va donc accélérer de sorte que l'angle de puissance augmente, de δa à δb , pour pouvoir fournir une puissance supplémentaire à la charge. Cependant, l'accélération du rotor ne peut pas s'arrêter instantanément. Ainsi, bien que la puissance développée pour l'angle δb soit suffisante pour la charge, le rotor va dépasser l'angle δb jusqu'à ce qu'un couple opposé suffisant soit développé pour arrêter cette accélération. L'énergie supplémentaire va entraîner le ralentissement du rotor et la diminution de l'angle de puissance. Suivant l'inertie et l'amortissement du système, les oscillations de l'angle de rotor résultant vont ou s'amortir, et la machine restera stable (cas 1, (figure.1.5)), ou diverger, et la machine deviendra instable en perdant le synchronisme avec le système (cas 2, (figure.1.5)). [15][21]

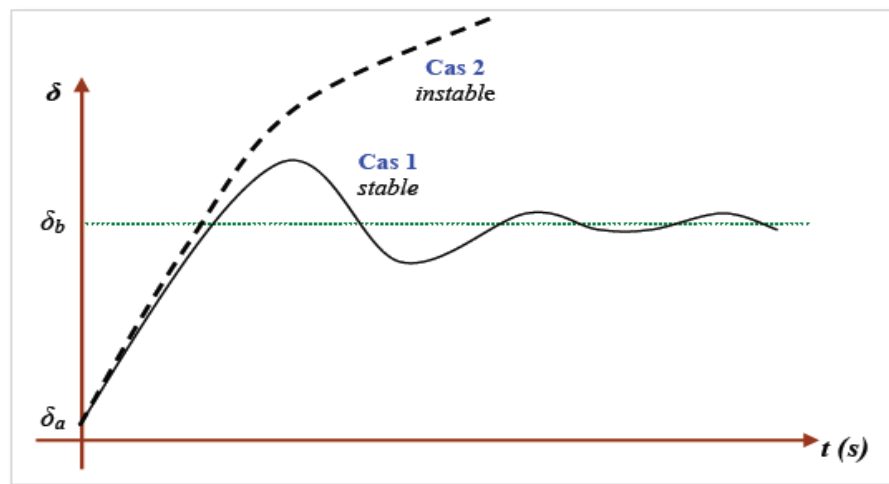


Figure.1. 5. Variation d'angle de rotor.[21]

I.5.1. Equation de mouvement (swing equation)

La liaison entre de l'aspect mécanique et électrique de la machine synchrone est régie par l'équation dynamique de l'accélération du rotor de l'alternateur lié à la turbine, ce que l'on appelle (équation du mouvement). [24]

- Un couple d'entrée, couple mécanique C_m .
- Un couple d'origine électrique ou couple résistant, correspondant à la puissance fournie au réseau C_e .

- Un couple d'inertie C_i .
- Un couple d'amortissement C_a .

A tout instant, le couple mécanique appliqué doit faire équilibre avec les autres couples d'où l'équation : [23]

$$C_m = C_e + C_i + C_a \quad (1.2)$$

1.5.1.1. Equation de mouvement sans couple d'amortissement

Si on néglige le couple d'amortissement C_a , et a l'équilibre, on a : [18]

$$C_i = C_m - C_e \quad (1.3)$$

- ✓ Si $C_i > 0$ accélération.
- ✓ Si $C_i < 0$ décélération.

Alors:

Le couple mécanique est égal à couple électrique :

$$C_m = C_e \quad (1.4)$$

$$\text{On a: } C_i = J \frac{d^2\theta}{dt^2} = C_m - C_e \quad (1.5)$$

$$\text{Et: } \theta_m = \omega_{sm}t + \delta_m \quad (1.6)$$

$$\text{La 1}^{\text{ère}} \text{ dérivée de } \theta_m \text{ donne: } \omega_m = \frac{d\theta_m}{dt} = \frac{d\delta_m}{dt} + \omega_{ms} \quad (1.7)$$

$$\text{La 2}^{\text{ème}} \text{ dérivée de } \theta_m \text{ donne: } \frac{d^2\theta_m}{dt^2} = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} \quad (1.8)$$

Substituant l'équation (Eq. 8) dans l'équation (Eq. 5), on obtient :

$$J \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = C_m - C_e \quad (1.9)$$

Multipliant les deux côtés de l'équation (Eq. 9) par ω_m :

$$J\omega_m \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = \omega_m C_m - \omega_m C_e \quad (1.10)$$

Avec : $\omega_m C_m = P_m$ et : $\omega_m C_e = P_e$

On obtient l'équation de puissance suivant :

$$Jw_m = \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (1.11)$$

$$\text{On a: } w_k = \frac{1}{2} Jw_m^2 = \frac{1}{2} M w_m \quad (1.12)$$

Avec : WK : est l'énergie cinétique emmagasinée par la machine à la vitesse synchrone en Mégajoules.

$$\text{Donc l'expression de } M \text{ est comme la suite : } M = \frac{2W_K}{w_m} \quad (1.13)$$

Nous supposons que les variations de vitesse ω_m restent toujours faibles, durant a longue temps, avant que la stabilité soit perdue, alors : $\omega_m = \omega_{sm}$.

$$\text{Alors l'expression de } M \text{ vaut : } M = \frac{2w_k}{w_{sm}} \quad (1.14)$$

$$\text{L'équation de mouvement soit comme la suite : } M \frac{d^2\delta_m}{dt^2} = P_m - P_e \quad (1.15)$$

On doit écrire l'équation de mouvement en fonction de l'angle électrique δ , la relation entre l'angle mécanique et l'angle électrique est : $\delta = \frac{p}{2} \delta_m$ (1.16)

Alors l'équation de mouvement est en fonction de l'angle électrique :

$$\frac{2}{p} M \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m - P_e \quad (1.17)$$

Conversion de l'équation de mouvement en unité relative :

$$\frac{2}{p} \frac{2W_k}{w_{sm} S_B} \frac{d^2\delta}{dt^2} = \frac{P_m}{S_B} - \frac{P_e}{S_B} \quad (1.18)$$

$$\text{On a : } H \frac{W_K}{S_B} \quad (1.19)$$

La constante d'inertie H (en sec) de la machine est définie par le rapport d'énergie cinétique W_k emmagasinée par la machine à la vitesse synchrone en Mégajoules, et de la puissance de base S_B de la machine en Méga –volt ampère.

$$\text{Donc l'équation vaut : } \frac{2}{p} \frac{2H}{w_{sm}} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m(pu) - P_e(pu) \quad (1.20)$$

$$\text{On a : } w_{sm} = \frac{2}{p} w_s \quad (1.21)$$

$$\text{Alors : } \frac{2H}{w_s} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m(pu) - P_e(pu) \quad (1.22)$$

$$\text{On a : } \omega_s = 2\pi f_0 \quad (1.23)$$

$$\text{Alors : } \frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m(pu) - P_e(pu) \quad (1.24)$$

On a qui représente le modèle d'une machine synchrone P_e :

$$P_e = P_{max} \sin \delta \quad (1.25)$$

Substituant l'équation (Eq. 25) qui représente le modèle d'une machine synchrone P_e dans l'équation (Eq. 24) qui représente le modèle de générateur dynamique, on obtient l'équation de mouvement. [15]

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2\delta}{dt^2} = P_m(pu) - P_{max} \sin \delta \quad (1.26)$$

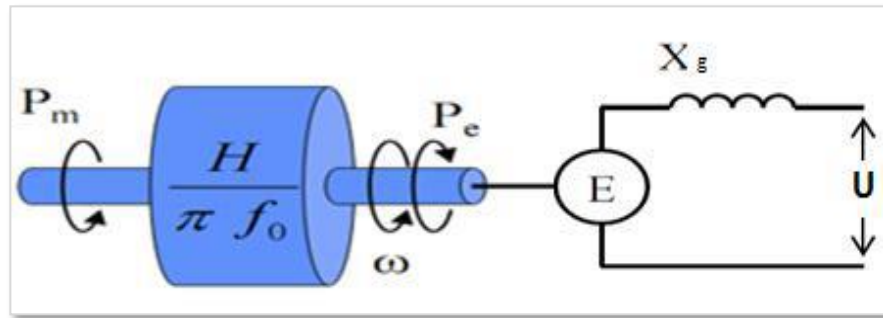


Figure.1. 6. Schéma électrique équivalent d'un générateur synchrone.[15]

1.5.1.2. Equation de mouvement avec couple d'amortissement

Si on tenir compte le couple d'amortissement C_a , on a : [15]

$$C_i + C_a = C_m - C_e \quad (1.27)$$

On a:

$$C_i = J \frac{d^2\theta}{dt^2} \quad (1.28)$$

$$C_a = \frac{a}{w_m} \frac{d\delta}{dt} \quad (1.29)$$

On peut donc déduire l'équation d'équilibre des couples :

$$J \frac{d^2\theta}{dt^2} + \frac{a}{w_m} \frac{d\delta}{dt} = C_m - C_e(\delta) \quad (1.30)$$

Alors on obtient une équation de mouvement avec le couple d'amortissement sous forme :

$$\left\{ \begin{array}{l} P_e = P_{max} \sin \delta \\ \frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} + a' \frac{d\delta}{dt} = P_m(pu) - P_e(pu) \end{array} \right.$$

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} + a' \frac{d\delta}{dt} = P_m(pu) - P_{max} \sin \delta \quad (1.31)$$

1.6. But de la stabilité transitoire

L'objectif le plus important de l'étude de la stabilité est de trouver le comportement dynamique des principales variables qui déterminent le fonctionnement des générateurs ainsi que l'angle, la vitesse, le courant, la tension et la puissance. Même, grâce à ces variables, il est possible de déterminer le temps critique d'élimination de défaut ou la marge de stabilité.[16] Autrement dit, la ST vise à répondre à la question suivante : *quel est le temps maximal d'isolement du défaut pour lequel le réseau reste stable ?*

Aussi, l'étude de la ST permet une meilleure compréhension du comportement des réseaux électriques et facilite la mise en œuvre de la planification et de l'opération. Elles sont également utiles pour valider si les nouveaux circuits répondent aux critères techniques établis de chaque pays et pour vérifier le réglage et le contrôle des équipements de protection. [16][21]

1.6.1. Stabilité en régime permanent vis-à-vis des petites perturbations

Pour représenter le problème de la stabilité en régime permanent, On considère que la machine synchrone dans le système est liée à un jeu de barre infini [23].

L'équation mécanique est comme la suite :

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_m(p.u) - P_{max} \sin \delta \quad (1.32)$$

L'équation mécanique est une fonction non linéaire, mais s'il y a une petite perturbation de l'angle, l'équation devient une fonction linéaire. Avec une petite déviation de l'angle au point initial.

$$\delta = \delta_0 + \Delta \delta \quad (1.33)$$

Substituant l'équation (33) dans l'équation (32), on obtient :

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2(\delta_0 + \Delta \delta)}{dt^2} = P_m + P_{max} \sin(\delta_0 + \Delta \delta)$$

Ou bien :
$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2 \delta_0}{dt^2} + \frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2 \Delta \delta}{dt^2} = P_m - P_{max} (\sin \delta_0 \cos \Delta \delta + \cos \delta_0 \sin \Delta \delta) \quad (1.34)$$

On a $\Delta\delta$ est petite, alors $\Delta\delta \cong 1$, et $\sin\Delta\delta \cong \Delta\delta$, c'est-à-dire que :

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2\delta_0}{dt^2} + \frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} = P_m - P_{max} \sin \delta_0 - P_{max} \cos \delta_0 \Delta\delta \quad (1.35)$$

Aux conditions initiales :

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2\delta_0}{dt^2} = P_m - P_{max} \sin \delta_0 \quad (1.36)$$

L'équation (37) sert une équation linéaire :

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2\delta_0}{dt^2} + P_{max} \cos \delta_0 \Delta\delta = 0 \quad (1.37)$$

On a:

$$P_S = P_{max} \cos \delta_0 \quad (1.38)$$

L'équation (37) vaut comme la suite (sans couple d'amortissement) :

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + P_S \Delta\delta = 0 \quad (1.39)$$

On a:

$$\omega_n = \sqrt{\frac{\pi f_0}{H}} P_S \quad (1.40)$$

$$\text{Avec : } C_a = D \frac{d\delta}{dt} \quad (1.41)$$

Alors (avec couple d'amortissement) :

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + D \frac{d\Delta\delta}{dt} + P_S \Delta\delta = 0 \quad (1.42)$$

$$\frac{H}{\pi f_0} \frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + \frac{\pi f_0}{H} D \frac{d\Delta\delta}{dt} + \frac{\pi f_0}{H} P_S \Delta\delta = 0 \quad (1.43)$$

Ou bien en termes d'équation différentielle de second ordre, on a :

$$\frac{d^2\Delta\delta}{dt^2} + 2\xi\omega_n \frac{d\Delta\delta}{dt} + \omega_n^2 \Delta\delta = 0 \quad (1.44)$$

$$\text{Avec : } \xi = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{\pi f_0}{HP_S}} \quad (1.45)$$

$$\text{Et : } \omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (1.46)$$

Dans les conditions normales, $\xi < 1$ et les solutions d'équation différentielle sont complexes :

$$S_1, S_2 = -\xi\omega_n \pm j\omega_n \sqrt{1 - \xi^2} \quad (1.47)$$

Si les solutions sont dans une petite perturbation $\Delta\delta_0$ et $\Delta\omega_0 = 0$, alors :

$$\Delta\delta = \frac{\Delta\delta_0}{\sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \sin(\omega_d t + \theta) \quad (1.48)$$

$$\Delta\omega = \frac{\omega_n \Delta\delta_0}{\sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\xi\omega_n t} \sin \omega_d t \quad (1.49)$$

1.6.2. Détermination de temps critique d'isolement de défaut (TCID)

C'est le paramètre le plus décisif dans l'analyse de la stabilité transitoire d'un réseau électrique. Le temps critique d'élimination du défaut, est l'intervalle du temps juste après l'instant de l'apparition du défaut et hors de laquelle le système ne sera plus stable si le défaut n'est pas isolé. [25]

D'après l'équation de mouvement de la machine on peut calculer le temps critique d'isolement de défaut en appliquant l'équation suivante :

$$t_c = \sqrt{\frac{H(\delta_c - \delta_0)}{90 \cdot f \cdot P_m}} \quad (1.50)$$

1.7. Méthodes d'analyse de la stabilité transitoire

Le système de puissance électrique est fortement non linéaire du fait de sa structure très complexe et des phénomènes inhérents à son fonctionnement. [21] en effet, la dynamique du réseau durant la période transitoire est décrite par un système d'équations différentielles de la forme suivante :

$$\frac{dx}{dt} = f(x, \mu) \quad (1.51)$$

Avec x : Vecteur des variables d'état du système.

μ : Vecteur des paramètres du système.

La stabilité transitoire concerne l'étude de la dynamique du réseau décrit par l'ensemble des équations différentielles. [18] Les solutions de ces équations sont obtenues par des méthodes numériques à l'aide des calculateurs numériques. [16] Cette étude fournit les informations relatives aux variations dans le temps des angles internes, des vitesses du rotor, des tensions, courant et puissance des unités de production aussi bien que les variations des tensions, courant et puissances transitées dans les branches des lignes de transports avant, pendant et après la perturbation. Cette analyse permet d'une part de juger si le système est en fonctionnement stable ou non et d'autre part de dimensionner les protections censées éliminer le défaut avant l'atteinte du temps critique. [17] Elle aide les planificateurs dans leurs tâches de renforcement des réseaux d'énergie électriques par la construction de nouveaux ouvrages de production, de transport ou de compensations.[15]

Les différentes méthodes pour stabiliser le système de puissance dans l'état transitoire sont : [23]

A. L'analyse de stabilité pour appliquer une commande préventive

- Les méthodes numériques ou indirectes.
- les méthodes directes.

B. La commande en ligne

- La modification de la caractéristique de la ligne avec les systèmes FACTS.
- La commande du transit de puissance de la ligne durant la période Transitoire.
- La rapidité (le temps de calcul court)
- La capacité d'évaluer l'indice de stabilité.
- La possibilité d'utiliser des modèles complexes avec les dimensions choisies.
- La possibilité d'avoir les réponses temporelles de toutes les variables du réseau qui contiennent les informations importantes des dynamiques du réseau.
- La possibilité d'avoir les réponses temporelles de toutes les variables du réseau qui contiennent les informations importantes des dynamiques du réseau.
- La possibilité de calculer les impédances apparentes, les courants de lignes, les tensions de nœuds et les autres informations nécessaires pour simuler le fonctionnement des relais. Il faut noter que le fonctionnement des relais a un grand effet sur la stabilité transitoire du réseau.
- La possibilité de représenter le fonctionnement des interrupteurs automatiques de réseau qui sont commandés par les variables de réseau.
- La possibilité de supposer le système de puissance "non autonome". Avec cette hypothèse on peut considérer les effets de plusieurs variations dans la topologie et les conditions de fonctionnement du n réseau. [23]

I.8. Méthode d'évaluation de la stabilité transitoire

La stabilité transitoire est devenue plus critique, à cause de l'interconnexion, l'accroissement énorme de la demande et les contraintes économiques de construire des nouvelles centrales de production et des nouvelles lignes de transmission. Tous ces facteurs conduisent à l'exploitation des réseaux électriques près de leurs limites de stabilité, ce qui donne une importance capitale à l'évaluation de la stabilité transitoire en temps réel [20]. À cause de la forte non-linéarité une étude analytique rigoureuse n'est guère possible, la résolution nécessiterait la prise en compte d'un grand

nombre des paramètres. Plusieurs méthodes d'évaluation ont été développées, elles sont classées en trois familles : [15][25]

- Méthodes d'intégration numériques;
- Méthodes directes (ou énergétiques) ;
- Méthodes hybrides.

Différentes méthodes ont été proposées pour analyser le système de puissance permettant l'évaluation de la stabilité transitoire. Trois objectifs peuvent être établis pour renforcer la stabilité transitoire :[22]

- L'amélioration du temps critique d'élimination des défauts.
- L'amortissement des oscillations après la perturbation.
- L'amélioration de la capacité de transfert des lignes.

I.9. Moyens d'amélioration de la stabilité transitoire

I.9.1. Stabilisateur de système d'alimentation (PSS)

Le stabilisateur de système d'alimentation PSS (Power System Stabilizer en anglais) est un dispositif utilisé dans les réseaux électriques pour améliorer la stabilité de la fréquence et de la tension en régulant la puissance électrique transmise. Le PSS fonctionne en détectant les variations rapides de la fréquence ou de la tension, puis en envoyant des signaux de commande pour ajuster les paramètres des générateurs d'électricité et ainsi corriger ces variations. Cela permet de prévenir les oscillations indésirables dans le système électrique qui pourraient entraîner des pannes d'électricité. Le PSS est donc un élément important de la régulation des réseaux électriques et contribue à assurer une alimentation électrique fiable et stable. [22]

Un PSS permet d'ajouter un signal de tension proportionnel à la variation de vitesse de rotor dans l'entrée du régulateur de tension (AVR) du générateur. [25] Par conséquent, l'ensemble du système de contrôle d'excitation (AVR et PSS) doit assurer les points suivants [26] :

- Supporter les premières oscillations faisant suite à une grande perturbation ; c.-à-d. assurer la stabilité transitoire du système.
- Maximiser l'amortissement des oscillations électromécaniques associées aux modes locaux ainsi qu'aux modes interrégionaux sans effets négatifs sur les autres modes.
- Minimiser la probabilité d'effets défavorables, à savoir :

- ✓ Les interactions avec les phénomènes de hautes fréquences dans le système de puissance telle la résonance dans le réseau de transport.
- ✓ Les instabilités locales dans la bande de l'action désirée du système de contrôle.
- Être suffisamment robuste pour permettre au système de contrôle d'assurer ses objectifs pour divers points de fonctionnement probables du système de puissance.

Le choix du signal d'entrée de PSS représente une étape critique dans la conception du PSS.

Plusieurs considérations interviennent dans ce choix, telles :[25]

- La sensibilité du signal d'entrée aux oscillations électromécaniques (autrement dit, les modes oscillatoires doivent être "observables" dans le signal choisi).
- L'insensibilité du signal d'entrée du PSS à son propre signal de sortie. D'une façon similaire, la sensibilité doit être très la plus faible possible pour les signaux de sortie d'autres PSSs.

Un bon résultat peut être obtenu si l'entrée du PSS est la variation de la vitesse de rotor ($\Delta\omega$), la variation de puissance produite du générateur (ΔP_e) ou la fréquence du jeu de barre (Δf). Etant donné que le PSS est utilisé pour produire un couple électrique proportionnel à la variation de vitesse, il apparaît donc plus convenable d'utiliser la variation de vitesse ($\Delta\omega$) comme entrée du PSS. Cependant, quel que soit le signal d'entrée, la fonction de transfert du PSS doit compenser les caractéristiques de phase du système d'excitation, des parties électriques du générateur et des autres parties électriques du système. L'ensemble de ces dernières déterminent la fonction de transfert entre l'entrée du système d'excitation (ΔV_{er}) et le couple électrique du générateur (ΔT_e), [23]. Cette fonction de transfert est dénotée $GEP(s)$, figure (1.7).

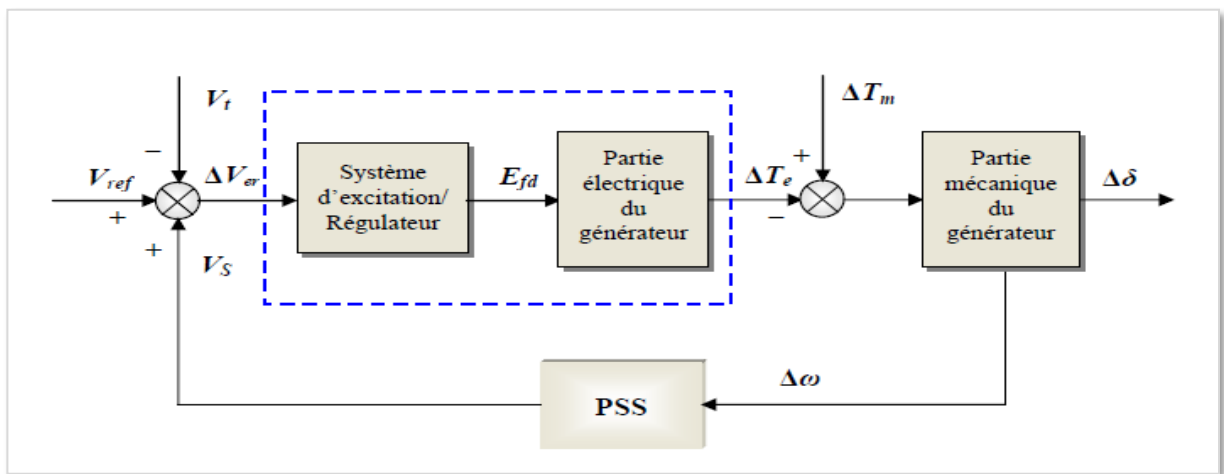


Figure.1.7. Modèle simplifié de liaison entre un PSS et le système.[23]

Le type de PSSs le plus utilisé est connu sous le nom de PSS conventionnel, a montré sa grande efficacité dans le maintien de la stabilité aux petites perturbations. [26] Ce PSS utilise la variation de vitesse de rotor comme entrée. Il se compose généralement de quatre blocs, figure (1.8) :

- Un bloc d'amplificateur.
- Un bloc de filtre passe-haut "filtre Wash out".
- Un bloc de compensation de phase.
- Un limiteur.

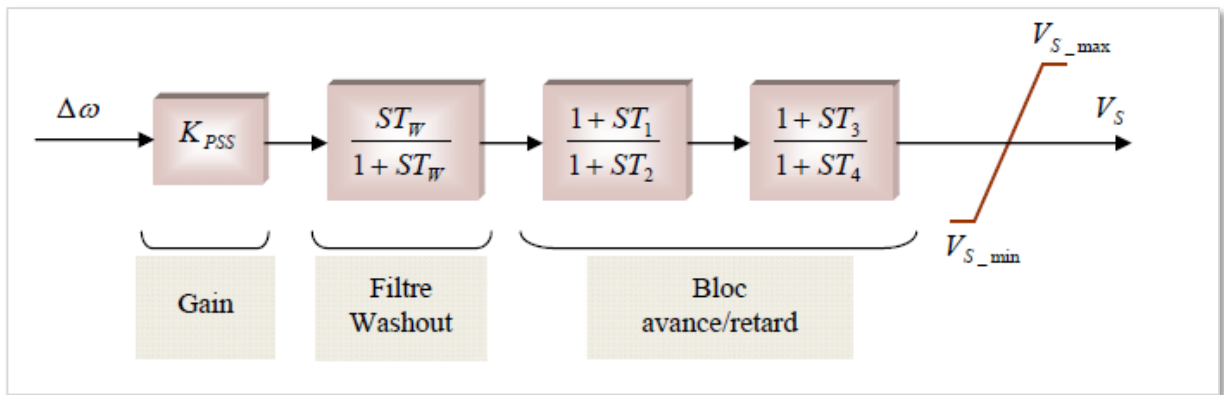


Figure.1.8. Modèle d'un PSS avance/retard.[26]

1- L'amplificateur

Il détermine la valeur de l'amortissement introduit par le PSS. Théoriquement, sa valeur (K_{PSS}) doit correspondre à l'amortissement maximal. Toutefois, la valeur du gain doit satisfaire l'amortissement des modes dominants du système sans risquer de dégrader la stabilité des autres modes ou la stabilité transitoire [26]. Généralement, K_{PSS} varie généralement de 0.01 à 50.

2- Le filtre passe-haut "filtre Wash out"

Il élimine les oscillations à très basse fréquence (inférieure à 0.2 Hz) présentées dans le signal d'entrée. Il supprime également la composante continue de la vitesse (la composante "DC" correspondant au régime statique) : le PSS ne réagit donc que lorsqu'il y a des variations de vitesse. La constante de temps de ce filtre (TW) doit être suffisamment grande pour permettre aux signaux, dont la fréquence est située dans la bande utile, d'être transmis sans atténuation. Mais, elle ne doit pas être trop grande pour éviter de mener à des variations indésirables de tension de générateur pendant les conditions d'îlotage. Généralement, TW varie de 1 à 20 secondes [26]. Une amélioration

remarquable sur la stabilité de la première oscillation est obtenue avec une valeur TW fixée à 10 secondes [27].

3- Le filtre compensation de phase

L'origine de l'amortissement négatif est, comme nous l'avons vu, associée au retard de phase introduit entre le couple électrique du générateur (ΔTe) et l'entrée du système d'excitation (ΔVer). Par conséquent, le PSS fournit l'avance de phase nécessaire pour compenser le retard de phase de la fonction de transfert $GEP(s)$. Pratiquement, un bloc de phase d'avance pure ne suffit pas pour réaliser la compensation de phase nécessaire ; ainsi, un bloc d'avance/retard de phase est souvent utilisé. Pour mieux garantir la stabilité du système, deux étages (au moins) de compensations de phase sont nécessaires. La fonction de transfert de chaque étage est une simple combinaison de pole-zéro, les constantes de temps d'avance ($T1$, $T3$) et de retard ($T2$, $T4$) étant réglables. La gamme de chaque constante de temps s'étend généralement de 0.01 à 6 secondes [26]. Mais pour des considérations de réalisation physique, les constantes de temps de retard ($T2$, $T4$) sont considérées fixes et généralement autour de la valeur de 0.05 seconde [28].

4- Le limiteur

Le PSS est conçu pour améliorer l'amortissement du système en cas de petites variations autour d'un point d'équilibre. Son objectif n'est pas de restaurer la stabilité du système aux perturbations sévères (la stabilité transitoire). Le PSS a parfois tendance à perturber le bon fonctionnement du régulateur de tension en le saturant lorsque ce dernier essaye de maintenir la tension lors de conditions transitoires. Le PSS doit être équipé d'un limiteur afin de réduire son influence indésirable durant les phases transitoires [26]. Les valeurs minimales et maximales du limiteur s'étendent de ± 0.02 à 0.1 per-unit [27].

I.9.1.1. Réglage des paramètres de PSS

Le problème de la conception d'un PSS est de déterminer les valeurs de ses paramètres pour :

- Augmenter l'amortissement des modes du système.
- Assurer une stabilisation robuste.

La minimisation des risques probables des interactions défavorables et des effets négatifs sur les autres modes oscillatoires du système représente aussi un point critique important qui influence le réglage de PSSs. En outre, les valeurs des paramètres du PSS doivent être réglées sans entraîner d'effet négatif dans la restauration de la stabilité transitoire.

De nombreuses méthodes sont proposées dans la littérature pour le réglage des paramètres de PSS. Généralement, la plupart de ces méthodes sont basées sur l'analyse des valeurs propres du système.[8]

- Méthode de compensation de phase
- Méthode du résidu
- Méthode de placement des pôles

I.9.1.2. Emplacement optimal de PSS

Tous les générateurs du système ne participent pas aux modes dominants : ils n'ont pas besoin d'être équipés de PSSs.[26]

La première étape de la mise en œuvre des PSSs, est de trouver les emplacements optimaux et de déterminer leur nombre. Les approches les plus efficaces proposées sont basées sur l'analyse modale du système linéarisé :[27]

- Le mode Shape.
- Les facteurs de participations.
- Les résidus.

Les amplitudes des résidus associés aux modes dominants de la fonction de transfert du système en boucle ouverte peuvent être utilisées pour déterminer les placements les plus efficaces pour installer les PSSs. Les amplitudes des facteurs de participation ou du mode Shape permettent de déterminer l'influence de chaque variable d'état dans les modes oscillatoires associés. Ces méthodes peuvent donc nous fournir des indications importantes sur l'emplacement optimal des PSSs dans le système pour réaliser un meilleur amortissement par rapport à des critères donnés. [28,29]

Sachant que des emplacements différents des PSSs entraînent des oscillations totalement différentes, des PSSs "mal placés" peuvent donc ne pas répondre aux objectifs. Pour cela, il faut bien choisir la méthode qu'il faut appliquer pour déterminer le bon emplacement des PSSs. Les méthodes mentionnées ci-dessus donnent généralement de bons résultats, mais la recherche de méthodes plus efficace reste toujours actuelle. [29]

I.9.2. Régulateur PID

Définition

Un régulateur PID ou correcteur PID (proportionnel intégral dérivé) est un organe de contrôle permettant d'effectuer une régulation en boucle fermée d'une grandeur physique d'un système

industriel ou « procédé ». C'est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie, il permet de régler un grand nombre de grandeurs physiques. [30]

Le but de la régulation est de maintenir à une valeur désirée (référence), une grandeur physique (comme la température, l'humidité relative, la pression...), soumise à des perturbations en mesurant sa valeur. Après la comparaison entre la grandeur réglée et la grandeur de référence, il en résulte un écart de réglage. Le régulateur forme un signal de commande qui va faire varier la puissance de réglage par l'intermédiaire d'un actionneur. [31]

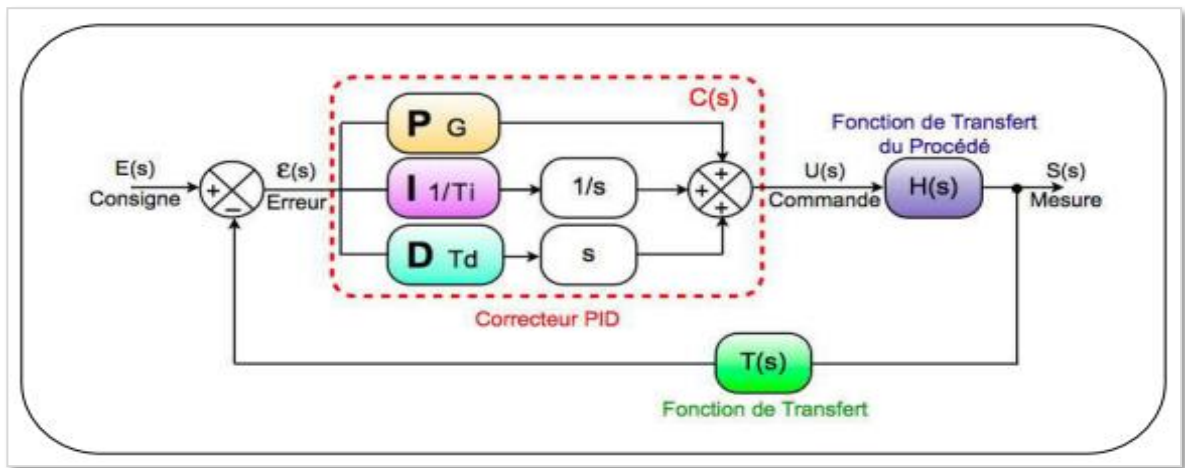


Figure.1.9. Régulateur PID [31]

Un régulateur PID est obtenu par l'association de ces trois actions suivantes : [30]

1. Il fournit un signal de commande en tenant compte de l'évolution du signal de sortie par rapport à la consigne.
2. Il élimine l'erreur statique grâce au terme intégrateur.
3. Il anticipe les variations de la sortie grâce au terme dérivateur.

I.9.2.1. Description des actions PID

1. Proportionnelle (P)

La correction proportionnelle (P) ajuste la sortie en proportion de la différence entre la consigne souhaitée et la variable de processus réelle. [32]

$$\text{Consigne}(t) = K_p \cdot \varepsilon(t)$$

Ce qui en Laplace donne :

$$\text{Consigne}(p) = K_p \cdot \varepsilon(p)$$

L'objectif est d'accentuer l'impact de l'erreur sur le système pour permettre une réponse plus rapide aux changements de consignes. Cependant, cette approche peut compromettre la stabilité du système, et dans le cas où K_p est excessif, le système peut même entrer en divergence. [32]

2. Intégrale (I)

La correction intégrale (I) agit pour réduire les erreurs de long terme en accumulant les erreurs passées et en ajustant la sortie en conséquence.

L'erreur entre la consigne et la mesure est ici intégrée par rapport au temps et multipliée par une constante qu'il faudra aussi déterminer en fonction du système. [32]

$$\text{Consigne (t)} = K_i \cdot \int_0^t \varepsilon(\tau) \cdot d\tau \quad (1.52)$$

Ce qui en Laplace donne :

$$\text{Consigne (t)} = K_i \cdot \frac{\varepsilon(p)}{p} \quad (1.53)$$

3. Dérivée (D)

La correction dérivée (D) agit pour réduire les erreurs à court terme en mesurant la variation de l'erreur avec le temps et en ajustant la sortie en conséquence.

$$\text{Consigne (t)} = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_i \cdot \int_0^t \varepsilon(\tau) \cdot d\tau + K_d \cdot \frac{d\varepsilon(\tau)}{d\tau} \quad (1.54)$$

Ce qui en Laplace donne :

$$\text{Consigne (p)} = K_p \cdot \varepsilon(p) + K_i \cdot \frac{\varepsilon(p)}{p} + K_d \cdot p \cdot \varepsilon(p) = \varepsilon(p) \cdot [K_p + K_i \cdot \frac{1}{p} + K_d \cdot p] \quad (1.55)$$

En ajustant les poids de chaque correction et en les combinant de manière appropriée, le régulateur PID peut fournir une réponse rapide et précise à la consigne de référence, même en présence de perturbations ou de variations du processus. Le régulateur PID est largement utilisé dans les systèmes de contrôle automatique, tels que les systèmes de régulation de température, de vitesse, de pression et de positionnement. [31]

Le réglage d'un PID consiste à déterminer les coefficients K , T_i , T_d afin d'obtenir une réponse adéquate du procédé et de la régulation. Les objectifs sont d'être robustes, rapide et précis. [32]

1.9.3. Correcteur d'ordre fractionnaire $PI^\lambda D^\mu$

Afin d'améliorer les performances des systèmes asservis linéaires, Poudlubny [33] a proposé une généralisation du correcteur PID classique à la forme $PI^\lambda D^\mu$ nommé le PID fractionnaire, où λ et μ sont des réels positifs tel que $0 < \lambda < 1$ et $0 < \mu < 1$, Il a montré que les performances étaient

considérablement améliorées par rapport à celles obtenues par un PID d'ordre entier. L'expression analytique du PID fractionnaire est donnée par l'équation suivante : [34]

$$C(p) = K_c + \frac{T_i}{p^\lambda} + T_d p^\mu \quad (1.56)$$

Où K_c : représente le gain proportionnel.

T_i / p^λ : représente l'action intégrale d'ordre fractionnaire.

$T_d p^\mu$: représente l'action dérivation d'ordre fractionnaire.

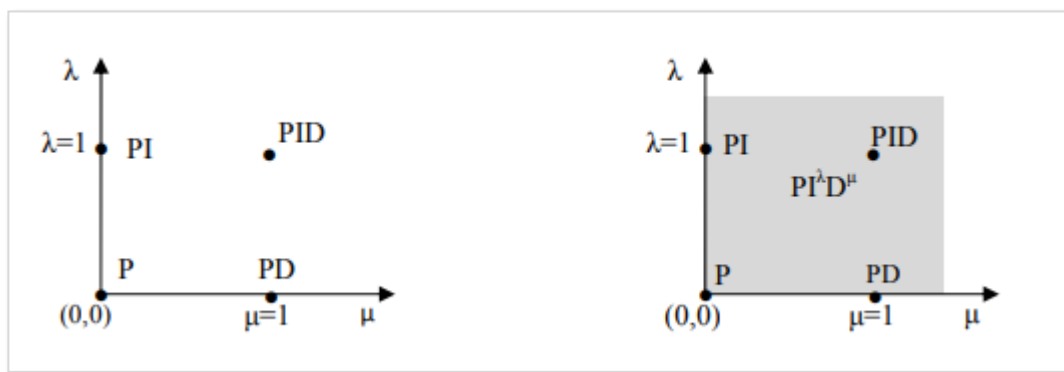


Figure.1.10. Correcteur PID et $PI^\lambda D^\mu$ [34]

Comme il est montré dans la figure (1.10), le $PI^\lambda D^\mu$ fractionnaire généralise le PID conventionnel et l'étend du point au plan. Cette extension donne plus de flexibilité dans la conception des commandes PID. Ce type de correcteur est généralement utilisé dans la conception d'une commande robuste. [34]

- Approximation du $PI^\lambda D^\mu$ par une fonction rationnelle

Dans cette partie nous considérons le cas où $1 < \lambda < 2$ et $1 < \mu < 2$ l'équation (54) devient :

$$C(p) = K_c + \frac{T_i}{p} \left(\frac{1}{p^{mi}} \right) + T_d p (p^{md}) \quad (1.57)$$

$1/p^{mi}$: est l'opérateur de l'intégrale d'ordre mi avec : $0 < mi < md < 1$

p^{md} : est l'opérateur de la dérivation d'ordre md avec : $0 < md < 1$

Dans une bande de fréquences $[\omega_b, \omega_h]$, l'action intégrale et dérivée d'ordre fractionnaire est réalisée respectivement par un PPF et ZPF. On obtient l'approximation du $PI^\lambda D^\mu$ par la méthode de Charef.

$$C(p) = K_c + \frac{T_i}{P} \left(K_I \frac{\prod_{i=0}^{N_I-1} (1+p/z_{I_i})}{\prod_{i=0}^{N_I} (1+p/p_{I_i})} \right) + T_d p \left(K_D \frac{\prod_{i=0}^{N_D} (1+p/z_{D_i})}{\prod_{i=0}^{N_D} (1+p/p_{D_i})} \right) \quad (1.58)$$

Les pôles P_{I_i} , les zéros Z_{I_i} et les paramètres K_I et N_I de l'approximation de l'intégrateur d'ordre fractionnaire.

Les pôles P_{D_i} , les zéros Z_{D_i} et les paramètres K_D et N_D de l'approximation de dérivateur d'ordre fractionnaire.[35]

1.9.4. Amélioration de la stabilité par les systèmes FACTS

Les systèmes FACTS (système de transmission d'électricité à courant alternatif flexible) sont une technologie avancée qui peut être utilisée pour améliorer la stabilité des réseaux électriques. Les systèmes FACTS sont constitués d'un ensemble de dispositifs électroniques qui sont installés sur le réseau électrique pour contrôler la tension, la puissance et l'impédance. Ces dispositifs sont capables de modifier les caractéristiques électriques du réseau en temps réel pour maintenir la stabilité du système. [36].

Les systèmes FACTS utilisent des convertisseurs électroniques pour injecter des signaux dans les lignes de transmission électrique. Ces signaux sont utilisés pour modifier les caractéristiques électriques des lignes de transmission, comme la tension, la puissance et l'impédance. Voici les principaux composants des systèmes FACTS et leur fonctionnement : [37]

Thyristors : Les thyristors sont des interrupteurs électroniques qui sont utilisés pour contrôler le flux de courant dans les lignes de transmission. Les thyristors peuvent être contrôlés pour modifier la tension et l'impédance des lignes de transmission.

Transformateurs : Les transformateurs sont utilisés pour modifier la tension de la ligne de transmission. Les systèmes FACTS peuvent utiliser des transformateurs pour augmenter ou réduire la tension sur une ligne de transmission.

Condensateurs : Les condensateurs sont utilisés pour stocker de l'énergie électrique et peuvent être utilisés pour améliorer la capacité de transmission d'une ligne de transmission.

Filtres : Les filtres sont utilisés pour éliminer les harmoniques de la ligne de transmission et améliorer la qualité de l'énergie électrique.

En utilisant ces composants, les systèmes FACTS peuvent ajuster les paramètres électriques des lignes de transmission pour améliorer la stabilité et la qualité de l'énergie électrique. Ils peuvent également aider à résoudre les problèmes de surcharge et de congestion dans les réseaux électriques en améliorant la capacité de transmission des lignes de transmission.

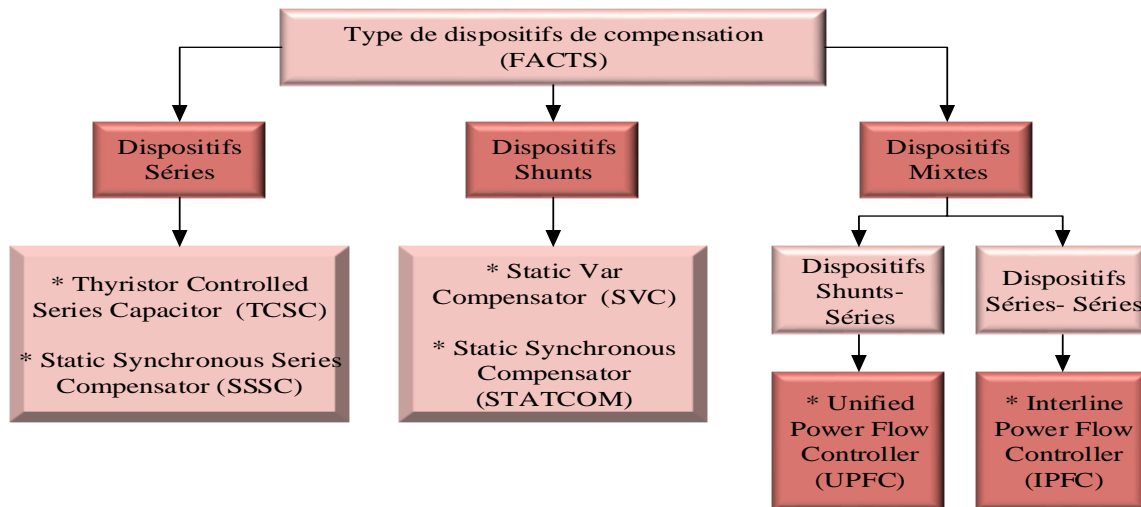


Figure 1.11. Classification des dispositifs FACTS [36]

I.9.4.1. Types des systèmes FACTS

I.9.4.1.1. FACTS séries

Les dispositifs FACTS série sont généralement installés en série avec la ligne de transmission et peuvent ajuster la tension et le courant du flux de puissance pour améliorer la stabilité du système, augmenter la capacité de transmission et réduire les pertes de puissance. Ces technologies sont un outil important pour améliorer l'efficacité et la fiabilité des systèmes électriques sont largement utilisées dans les réseaux électriques modernes. Les dispositifs FACTS série les plus courants sont : [38]

➤ Compensateur série commutée par thyristor (TSSC)

IEEE définit le TSSC (Thyristor Switched Series Capacitor) comme un compensateur capacitif qui se compose de plusieurs condensateurs en série. Chaque condensateur commandé par un commutateur de thyristor qui assure une compensation par palier.

Le compensateur série commuté par thyristor TSSC, est le premier qui apparaît dans la famille des compensateurs série. Il est constitué de plusieurs capacités montées en série, chacun étant shunté par une valve à thyristors montée en dérivation. [38]

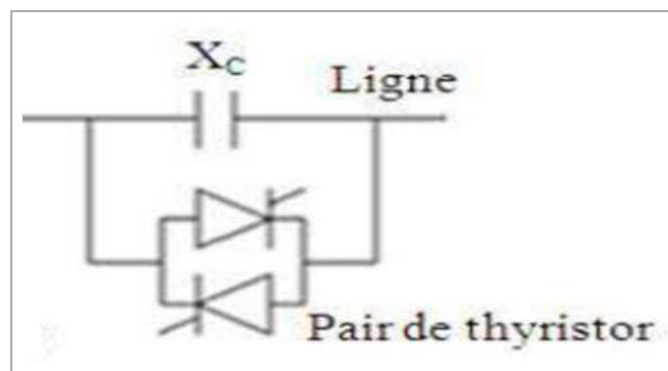


Figure 1.12. Schéma de principe de TSSC [37]

➤ Compensateur série commandée par thyristor (TCSC)

IEEE définit le TCSC comme étant un compensateur à réactance capacitif qui consiste en une série de condensateurs en parallèle avec des inductances commandées par thyristor afin de pouvoir assurer une variation homogène de la réactance capacitive. Le TCSC permet une compensation qui varie entre 20% inductive et 80% capacitive [39].

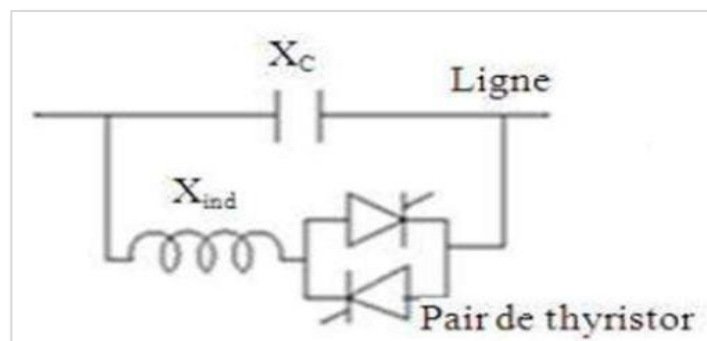


Figure 1.13. Schéma de principe de TCSC [37]

- Compensateur série synchrone (SSSC)

Le Compensateur Série Synchrone (SSSC) est un dispositif utilisé dans les systèmes d'énergie électrique pour améliorer la qualité de l'énergie électrique en modifiant la tension et le courant dans le réseau électrique. Le SSSC se compose d'un convertisseur de puissance à haute fréquence, d'un transformateur couplé en série, d'un circuit de commande, et d'un système de surveillance. Le convertisseur de puissance est connecté en série avec la ligne de transmission électrique permet de générer un courant de compensation qui s'additionne au courant de la ligne.[39]

Le compensateur série synchrone SSSC est un dispositif FACTS de deuxième génération. Le SSSC est un dispositif de compensation très efficace, qui offre une grande flexibilité et une capacité de régulation rapide. Il est souvent utilisé dans les réseaux électriques de haute tension pour améliorer la qualité de l'énergie électrique et pour optimiser la gestion de la puissance électrique. De plus sa taille est réduite en comparaison au celle du TCSC. [38]

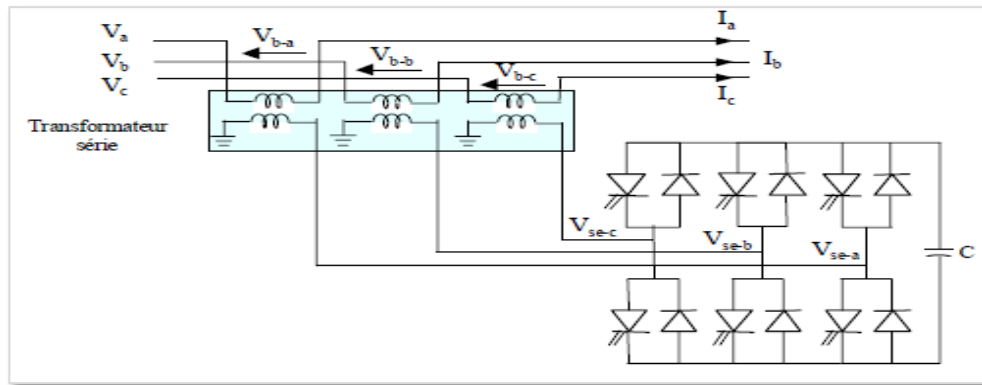


Figure.1.14. Schéma de base du SSSC. [39]

I.9.4.1.2. FACTS parallèle

Dans la compensation shunt, le système de puissance est connecté en shunt avec les FACTS. Il fonctionne comme une source de courant contrôlable. Un courant réactif est injecté dans la ligne pour maintenir l'amplitude de la tension donc la puissance active transmissible est augmentée. [40]

Parmi les compensateurs parallèles nous avons cité :

- Statique synchrone compensateur (STATCOM)

Un compensateur statique synchrone (ou STATCOM) est un dispositif électronique utilisé dans les systèmes électriques pour fournir une compensation de puissance réactive en temps réel. Le STATCOM est connecté au réseau électrique et régule la tension en ajustant la puissance réactive fournie ou absorbée. Il utilise une technologie électronique avancée pour fournir une réponse rapide et précise aux fluctuations de tension, de sorte que la tension du système reste constante. [40] Le STATCOM peut ajuster la puissance réactive en quelques millisecondes, ce qui permet de réduire les perturbations du système et d'améliorer la stabilité de la tension. Cela peut aider à éviter les coupures de courant et les pannes d'équipement qui pourraient survenir si la tension du système devait fluctuer de manière significative. [36]

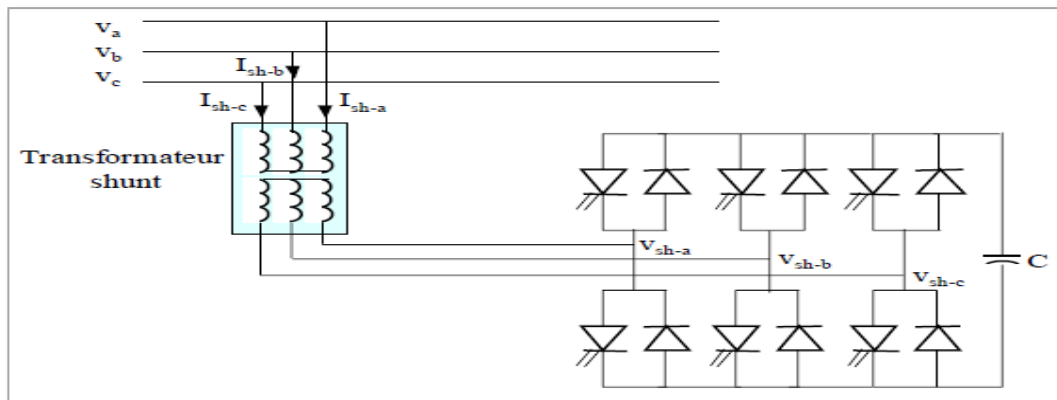


Figure.1.15. Schéma de principe du STATCOM. [39]

- Statique Var Compensateur (SVC)

Il y a plusieurs modèles de SVC, le modèle défini est considéré comme un générateur synchrone qui ne produit aucune puissance active, identique à un condensateur synchrone en parallèle avec une réactance inductive. Le jeu de barres au point de raccordement est comme un jeu de barres PV, devient un jb PQ quand le SVC fonctionne à sa limite. Le compensateur statique de puissance réactive SVC rend possible le contrôle rapide de la tension [36].

Le SVC est l'association d'une inductance commandée par thyristor (Thyristor Controller-Réacteur : TCR), d'un condensateur commuté par thyristor (Thyristor Switcher Capacitor TSC) et

d'un filtre d'harmoniques. La caractéristique statique de ce type de FACTS est mentionnée par la figure suivante : [38]

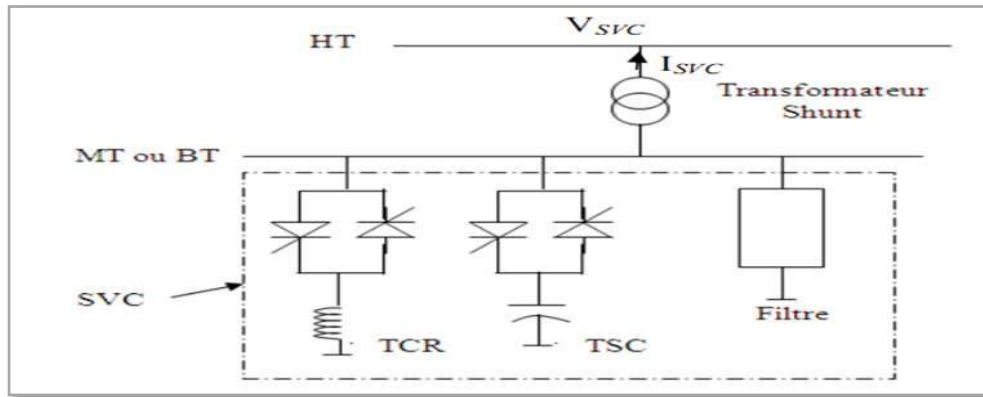


Figure.1.16. Schéma de principe d'un SVC. [37]

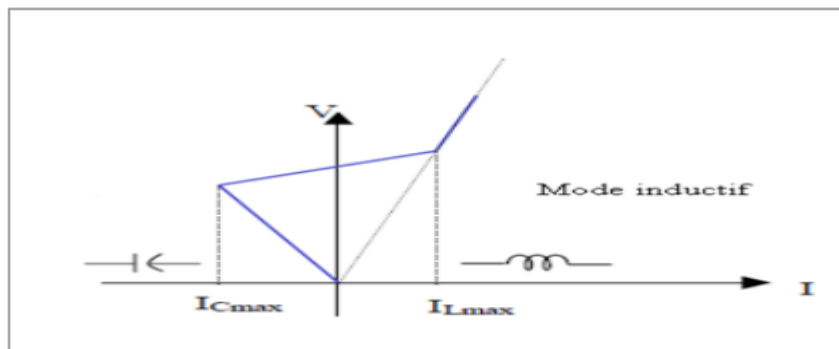


Figure.1.17. Caractéristique du SVC [37]

I_{Cmax} et I_{Lmax} sont les courants limites que peuvent supporter respectivement le TCR et le TSC.

I.9.4.1.3. FACTS hybride

- Contrôleur de transit de puissance universel (UPFC)

En principe, le variateur de charge universel l'UPFC possède à la fois la fonctionnalité des autres compensateurs FACTS (parallèle, série et hybride), à savoir le réglage de la tension, le flux de puissances, l'atténuation des oscillations de puissance et l'amélioration de la stabilité [40].

L'originalité de ce dispositif est de pouvoir contrôler les trois paramètres associés au transit de puissance dans une ligne électrique à savoir : la tension, l'impédance de la ligne, le déphasage des tensions aux extrémités de la ligne ou il est installé. La configuration de l'UPFC comprend un compensateur shunt STATCOM et un compensateur série SSSC. Les deux compensateurs sont interconnectés avec un jeu de barres de tension continue V_{dc} comme le montre la figure suivante. [37][40]

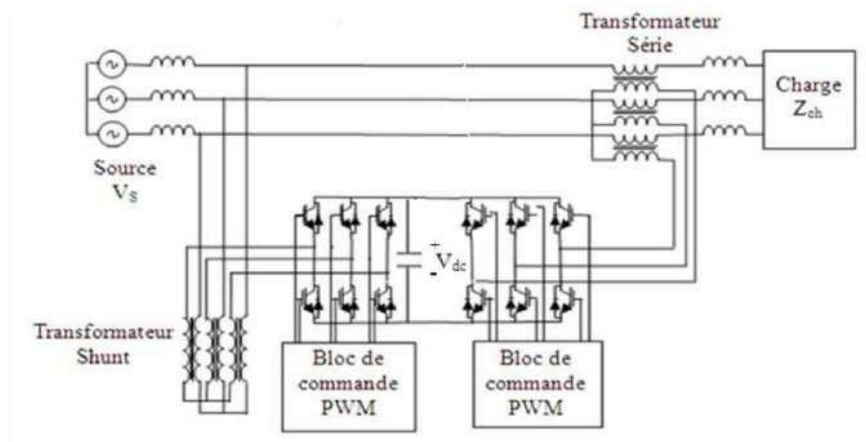


Figure.1.18. Schéma de principe d'un variateur de charge universel (UPFC) [40]

I.10. Qualité de l'énergie électrique

La qualité de l'énergie électrique est considérée comme une combinaison de la qualité de la tension et de la qualité du courant. Nous allons donc définir ces deux notions dans la suite de ce paragraphe. [41]

I.10.1. Qualité de la tension

L'énergie électrique distribuée se présente sous forme d'ensemble de tensions constituant un système alternatif triphasé qui possède quatre caractéristiques principales :[42]

- La fréquence,
- L'amplitude des trois tensions,
- La forme d'onde qui doit être la plus proche possible d'une sinusoïde,
- La symétrie du système triphasé, caractérisé par l'égalité des modules des trois tensions et leur déphasage relatif.

- Amplitude

L'amplitude de la tension est un facteur crucial pour la qualité de l'électricité. Elle constitue le premier engagement contractuel du distributeur d'énergie. Habituellement, l'amplitude de la tension doit être maintenue dans un intervalle de $\pm 10\%$ autour de la valeur nominale. Dans le cas idéal, les trois tensions ont la même amplitude qui est une constante.

- Fréquence

Dans le cas idéal, les trois tensions sont alternatives et sinusoïdales d'une fréquence constante de 50 ou 60 Hz selon le pays. Des variations de fréquence peuvent être provoquées par des pertes importantes de production, de l'îlotage d'un groupe sur ses auxiliaires ou son passage en réseau séparé, ou d'un défaut dont la chute de tension résultante entraîne une réduction de la charge [28]. Cependant, ces variations sont en général très faibles (moins de 1%) et ne nuisent pas au bon fonctionnement des équipements électriques ou électroniques.

- Forme d'onde

La forme d'onde des trois tensions formant un système triphasé doit être plus proche d'une sinusoïde. En cas de perturbations au niveau de la forme d'onde, la tension n'est plus sinusoïdale peut être considérée comme une onde fondamentale à 50Hz associée à des ondes de fréquences supérieures ou inférieures à 50 Hz appelées également harmoniques. Les tensions peuvent également contenir des signaux permanents, mais non-périodiques, alors dénommés bruits.[43]

- Symétrie

La symétrie d'un système triphasé se caractérise par l'égalité des modules des trois tensions et celle de leurs déphasages relatifs. La dissymétrie de tels systèmes est communément appelé déséquilibre. [43]

I.10.2. Qualité du courant

La qualité du courant est relative à une dérive des courants de leur forme idéale, se caractérise de la même manière que pour les tensions par quatre paramètres : amplitude, fréquence, forme d'onde et symétrie.

Le terme « qualité du courant » est rarement utilisé, car la qualité du courant est étroitement liée à la qualité de la tension et la nature des charges. Pour cette raison, « la qualité de l'énergie électrique » est souvent réduite à « la qualité de la tension ». C'est l'hypothèse que nous ferons dans la suite de ce document, où le terme de « qualité de l'énergie » s'applique uniquement à celle de la tension. [42][43]

I.11. Classification des perturbations électriques

En se basant sur les paramètres caractérisant la tension et énumérés au paragraphe précédent, on distingue quatre familles de perturbations électriques :

- Les variations de l'amplitude (creux de tensions, coupures brèves et surtensions),
- Les fluctuations de la fréquence autour de la fréquence fondamentale,
- Les modifications de la forme d'onde (harmoniques, inter-harmoniques, bruits),
- La dissymétrie du système triphasé : déséquilibre.

Un autre type de classification des perturbations électriques peut également être élaboré en se basant sur leur durée :

- Les perturbations transitoires,
- Les perturbations de courte durée,
- Les perturbations permanentes. [42]

Les perturbations électriques transitoires ont une durée de moins d'une demi période fondamentale. Elles ont pour principale origine les manœuvres d'ouverture et de fermeture sur le réseau de transport et de distribution, mais également des phénomènes naturels tels que la foudre. Les perturbations de courte durée sont les creux de tension, les coupures brèves et les surtensions, qui sont généralement provoquées par la présence de courts-circuits. Elles se caractérisent par des variations importantes de l'amplitude de la tension, et peuvent avoir des conséquences néfastes et coûteuses sur les équipements électriques.[43]

Dans la catégorie « perturbations permanentes » on retrouve les harmoniques, le bruit, le déséquilibre et les variations de tension et de fréquence. Elles sont généralement provoquées par la présence de charges non linéaires et fluctuantes au sein du réseau électrique. Elles se caractérisent par de faibles variations de l'amplitude qui sont à l'origine d'échauffement, de pertes

supplémentaires, de vieillissement prématuré des équipements électriques et de dysfonctionnements sur certains appareillages de contrôle-commande. [42][43]

On peut également remarquer que les origines des perturbations électriques peuvent être classées en deux grandes catégories :

- Les défauts au sein des réseaux électriques,
- La présence de charges non-linéaires ou fluctuantes.

Enfin, les effets des perturbations électriques peuvent, eux aussi, être divisés en deux grandes familles :

- Les effets à court terme (déclenchement des appareils, dégâts matériels, ...),
- Les effets à long terme (pertes supplémentaires, échauffements, vieillissements).[42]

Conclusion

En conclusion, la stabilité des réseaux électriques est un enjeu majeur pour assurer un approvisionnement en électricité fiable, sûr et durable. Face aux perturbations telles que les variations de la demande, les pannes de courant et les défaillances d'équipement, les opérateurs de réseaux électriques doivent être en mesure de surveiller et de contrôler le réseau en temps réel pour faciliter la gestion des perturbations.

Dans ce chapitre, nous avons présenté le concept général de la stabilité du système électrique, en particulier la stabilité transitoire. Ainsi que les systèmes de contrôle et les dispositifs auxiliaires conventionnels et actuels utilisés pour l'amélioration de la stabilité transitoire.

Chapitre 2

Nouvelles techniques
d'optimisation

Introduction

L'optimisation est la procédure pour trouver la meilleure solution d'un problème donné dans l'espace de recherche, qui satisfait l'ensemble des contraintes et qui minimise ou maximise la fonction objective. [44] La plupart des méthodologies d'optimisation traditionnelles sont inefficaces pour résoudre les problèmes complexes d'aujourd'hui [45]. Au fil des années, de nombreux chercheurs ont commencé à proposer de nouvelles techniques de solution appelées algorithmes métaheuristiques pour résoudre les problèmes d'optimisation complexes en un temps et un coût de calcul raisonnables. [46] D'une manière générale, la résolution d'un problème d'optimisation nécessite d'abord une modélisation du problème réel et une technique de résolution adaptée.[47]

Ce chapitre, sera consacré aux concepts fondamentaux de l'optimisation et les éléments qui constituent un problème d'optimisation. Nous présenterons ensuite les différentes méthodes d'optimisation.

II.1. L'optimisation mathématique

L'objet principal de l'optimisation est la construction d'algorithmes permettant de rechercher dans un espace de solutions potentielles, une solution optimale "meilleure" quantifiée par une fonction objective qui conduit à vouloir maximiser ou minimiser le problème. Un grand nombre de problèmes peuvent être, traités de façon qu'on puisse ajuster et améliorer leurs paramètres pour produire des résultats fiables. [44]

II.2. Théorie de la complexité

La théorie de la complexité s'intéresse à l'étude formelle de la difficulté des problèmes en informatique. On se pose alors la question fondamentale de savoir : [45]

« Entre différents algorithmes réalisant une même tâche, quel est le plus performant ? ». Pour comparer les algorithmes entre eux, on pourrait calculer le temps mis par chaque algorithme pour s'exécuter, une fois implémenté sur une machine. [47] Il s'agit de calculer une mesure de la complexité d'un algorithme, en nombre d'opérations élémentaires nécessaires pour que l'algorithme fournisse la solution du problème à l'utilisateur. Une telle démarche est dépendante des caractéristiques de la machine ou du langage utilisé. [48]

II.3. Problème d'optimisation

Un problème d'optimisation se définit comme la recherche du minimum ou maximum de l'optimum d'une fonction donnée [44]. On peut aussi trouver des problèmes d'optimisation pour lesquels les variables de la fonction à optimiser sont soumis à des contraintes qui évoluent dans une certaine partie de l'espace de recherche. Dans ce cas, on a une forme particulière de ce que l'on appelle un problème d'optimisation sous contraintes. [45]

Un problème d'optimisation, peut être défini par le couple (X, f) , où X représente un ensemble de solutions réalisables ou possibles (appelé aussi espace de recherche ou espace de décision), et f la fonction objective à optimiser qui associe à chaque élément x de l'ensemble X un scalaire dans \mathbf{R} . [45][46]

II.4. Éléments constituant un problème d'optimisation

Un problème d'optimisation est défini par : [44]

- **Espace de recherche**

Ensemble de solutions ou de configurations est constitué de différentes valeurs prises par les variables de décision. Elles sont regroupées dans le vecteur \vec{x} C'est en faisant varier ce vecteur que l'on recherche un optimum de la fonction f . [47]

- **Fonction Objective**

Équation mathématique qui représente ce qu'on désire à améliorer dans un dispositif. Elle représente le but à atteindre (maximiser ou minimiser la fonction objective) en utilisant un algorithme d'optimisation. En effet, la qualité d'une solution donnée par un tel algorithme d'optimisation est liée à la valeur de la fonction objective. [47]

- **Variables de décision**

Correspondent aux variables de la fonction objective. Ils sont ajustés pendant le processus d'optimisation, pour obtenir la solution optimale. On les appelle aussi variables d'optimisation, variables de conception ou de projet (design variables). Ils sont regroupés dans le vecteur \vec{x} . [47]

- **Les Contraintes**

Sont définies comme des conditions sur l'espace d'état que les variables doivent les satisfaire. Ces contraintes sont souvent des contraintes d'inégalité ou d'égalité qui permettent en général de limiter notre espace de recherche. [48]

- *Contraintes d'égalité:*

Elles sont représentées par les équations non linéaires de l'écoulement de puissance :

$$\sum_{i=1}^{ng} P_{Gi} - P_D - P_L = 0 \quad (2.1)$$

$$\sum_{i=1}^{ng} Q_{Gi} - Q_D - Q_L = 0 \quad (2.2)$$

Où :

P_D : est la puissance active totale demandée.

P_L : est les pertes actives totales de transmission.

Q_D : est la puissance réactive totale demandée.

Q_L : est les pertes réactives totales de transmission.

- *Contraintes d'inégalité*

Chaque alternateur possède une plage de fonctionnement limité par la puissance générée maximale supérieure ou inférieure par la puissance générée minimale, les puissances maximales et minimales, c'est une condition qu'exige le constructeur, ne peut pas dépasser cette limite pour l'alternateur fonctionné :

$$P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} \quad (2.3)$$

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \quad (2.4)$$

Où :

P_{Gi}^{\max} et P_{Gi}^{\min} : puissance active maximale et minimale du générateur i.

Q_{Gi}^{\max} et Q_{Gi}^{\min} : puissance réactive maximale et minimale du générateur i.

- **Exploration (diversification)**

Est liée à la capacité de l'algorithme à prospecter les différentes régions inconnues dans l'espace de recherche pour fournir une estimation fiable de l'optimum global. [49]

- **Exploitation (intensification)**

Se réfère à la capacité d'utiliser les connaissances existantes (les meilleures solutions trouvées) pour déterminer l'optimum global.[49]

II.5. Formulation d'un problème d'optimisation mono-objectif

Un problème d'optimisation de dimension n peut être écrit de façon générale sous la forme [35] :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Min où Max } f_{obj}(x) \in R^n \\ g_i(x) \leq 0 \quad i = 1, \dots, p \\ h_i(x) = 0 \quad j = 1, \dots, q \\ x_{k \min} \leq x_k \leq x_{k \max} \quad k = 1, \dots, n \end{array} \right. \quad (2.5)$$

Où :

$f_{obj}(x)$ est le critère à minimiser appelé aussi fonction objective.

x est un vecteur à n variables x_k qui représentent les paramètres du problème à optimiser.

$g_i(x)$ et $h_i(x)$ représentent respectivement les contraintes d'inégalité et d'égalité.

$x_k \min$ et $x_k \max$ désignent les contraintes de domaine

R^n est l'espace de recherche borné par les contraintes de domaine.

La solution d'un problème d'optimisation est alors donnée par un ensemble de paramètres x^* pour lesquels la fonction objective présente une valeur minimale, en respectant les contraintes d'égalité, et d'inégalité de domaine.

II.6. Classification des problèmes d'optimisation

Il n'existe pas de méthodes qui s'appliquent universellement et efficacement à tous les problèmes d'optimisation, c'est pourquoi il est primordial de pouvoir d'abord les classer suivant la forme de la fonction objective et des contraintes.[44]

- Les problèmes d'optimisation continue où les variables peuvent prendre n'importe quelles valeurs réelles ($x \in K \subseteq \mathbb{R}$) et les problèmes d'optimisation discrètes ($x \in K$, ensemble discret).
- Les problèmes d'optimisation uni-critère, où l'on a une seule fonction objective à minimiser et les problèmes d'optimisation multicritères, où l'on a plusieurs fonctions objectives à minimiser. On recherche donc un compromis entre plusieurs objectifs souvent antagonistes.
- Les problèmes d'optimisation avec contraintes et les problèmes d'optimisation sans contraintes. Dans ce dernier cas, la variable de décision n'est soumise à aucune restriction.
- Les problèmes d'optimisation déterministes suggèrent que les données du problème sont connues et fixées à l'avance. Par contre, les problèmes d'optimisation stochastique quand ce n'est pas le cas, l'incertitude peut donc être introduite dans le modèle.

II.6.1. Problèmes d'optimisation sans contraintes

Un problème d'optimisation est dit sans contraintes s'il ne contient pas de fonction contrainte, c'est-à-dire, si les fonctions $f(x)$ et $h(x)$ du problème ne sont pas définies :[50]

$$(p) \begin{cases} \{ \text{Min } f(x) \in \mathbb{R}^n \\ x_k^{\min} \leq x_k \leq x_k^{\max} \quad k = 1, \dots, n \end{cases} \quad (2.6)$$

La difficulté d'un problème sans contrainte est liée à la nature de la fonction objective. Celle-ci peut être unidimensionnelle ou multidimensionnelle, linéaire ou non linéaire, continue ou discontinue, différentiable ou non différentiable, ... Elle dépend par ailleurs du nombre de modes que la fonction peut présenter.

II.6.2. Problèmes d'optimisation avec contraintes

En réalité il est quasiment impossible de trouver des problèmes d'optimisation sans contraintes, il est habituel de poser des contraintes sur les variables d'optimisation ou encore des contraintes imposées par le cahier des charges. Donc, la prise en considération de ces contraintes lors de la résolution d'un problème d'optimisation doit avoir lieu. Autrement dit, certaines méthodes d'optimisation avec contraintes doivent être appliquées.

L'idée est de substituer à la fonction à minimiser une autre fonction incluant les contraintes. On obtient alors l'optimum en cherchant les minima d'une suite de fonctions sans contraintes. [50]

II.6.2.1. Minimum local et minimum global

Un point x^* de l'espace de recherche R^n représente un minimum local ou optimum local, s'il existe un voisinage de x^* noté $V(x^*)$, tel que : [50]

$$\forall x \in V(x^*) f(x) \geq f(x^*) \quad (2.7)$$

Cette relation signifie que dans le voisinage de x^* , défini par un ε , il n'existe aucun point pour lequel $f(x)$ est inférieur à $f(x^*)$.

Un point x^* de l'espace de recherche R^n est un minimum global ou optimum global si :

$$\forall x \in R^n f(x) \geq f(x^*) \quad (2.8)$$

Nous pouvons dire aussi que le minimum global est le plus petit minimum local de l'espace de recherche, comme il est indiqué dans la figure 2.1.

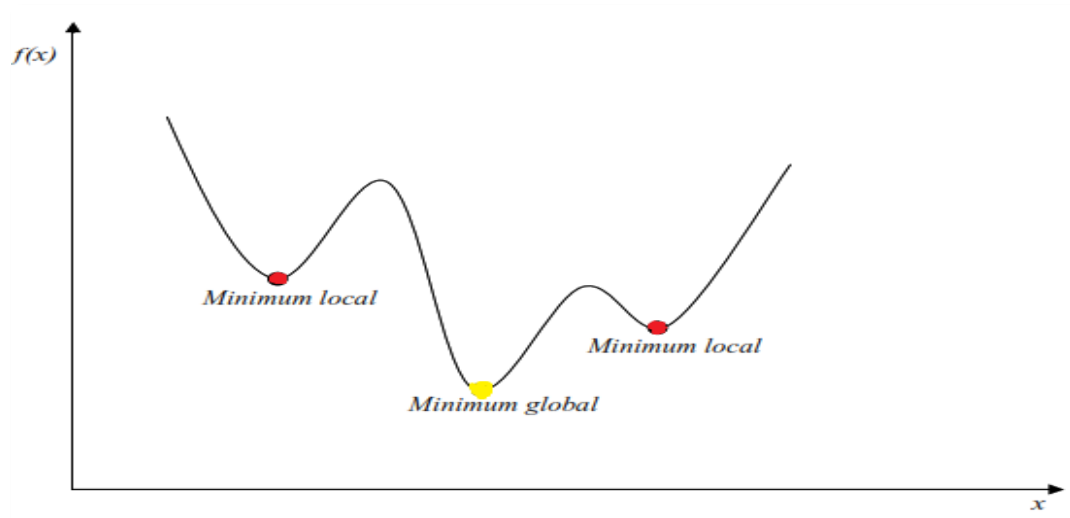


Figure.2.1 : Illustration des différents minima d'une fonction objective [49]

II.7. Etapes d'une opération d'optimisation

II.7.1. Mise en équation mathématique

Cette phase représente la traduction du problème physique en un problème mathématique équivalent. C'est sans doute l'étape la plus délicate du processus d'optimisation, car la formulation

mathématique d'un problème n'est jamais unique, en particulier les définitions du critère d'optimalité et de la fonction caractérisant des performances du système.[44]

II.7.2. Résolution du problème d'optimisation

Face à la résolution d'un problème d'optimisation, il est important de bien identifier à quelle catégorie ce problème appartient. En effet, les algorithmes développés sont conçus pour résoudre un type de problème donné, ils sont peu efficaces pour un type différent. La classification des problèmes d'optimisation change d'un auteur à l'autre. [44]

II.7.3. Exploitation de la solution

Une fois le problème résolu, il est impératif d'évaluer la qualité de la solution et en cas d'échec de s'interroger sur les choix adoptés lors des différentes phases. On impute trop souvent l'échec de l'optimisation à la méthode de recherche employée pour la localisation de l'optimum. Il faut aussi revenir sur les phases 1 et 2, car la résolution d'un problème mal formulé ne peut conduire qu'à une solution erronée, quelle que soit la technique de résolution employée.[47]

II.8. Types des problèmes d'optimisation

Un problème d'optimisation est caractérisé par : [48]

- Le domaine des variables de décision : soit continu, on parle alors de problème continu, soit discret, on parle donc de problème combinatoire.
- La nature de la fonction objective à optimiser : soit linéaire, on parle alors de problème linéaire, soit non linéaire, on parle donc de problème non linéaire.
- Le nombre de fonctions objectives à optimiser : soit une fonction scalaire, on parle alors de problème mono-objectif, soit une fonction vectorielle, on parle donc de problème multi-objectif.
- La présence ou non des contraintes : on parle de problème sans contrainte ou avec contrainte
- Sa taille : problème de petite ou de grande taille ;
- L'environnement : problème statique ou dynamique (la fonction objective change dans le temps).
- Le degré de difficulté : pour résoudre un problème donné avec un algorithme dédié est étroitement lié à sa complexité de calcul, c'est-à-dire, l'existence ou pas d'un algorithme

capable de résoudre ce problème en se basant sur une estimation théorique du temps de calcul nécessaire.

En effet, le problème d'optimisation est considéré difficile, s'il n'existe aucun algorithme qui n'est capable de le résoudre d'une manière exacte en un temps raisonnable et en utilisant un espace mémoire raisonnable. Les problèmes d'optimisation difficiles peuvent se diviser en deux catégories : les problèmes discrets et les problèmes continus. [44]

Dans le premier cas, les variables sont discrètes et doivent être choisies dans un panel de valeurs précédemment définies. Le fait que le nombre de combinaisons possibles (nombre de solutions réalisables) est en général très élevé rend difficile la détermination d'une meilleure solution en un temps de calcul raisonnable. [44]

Dans le deuxième cas, les variables du problème d'optimisation sont continuées et peuvent prendre toutes les valeurs définies sur un intervalle donné (borné ou pas). Les difficultés les plus courantes de ce type de problèmes sont les corrélations non identifiées entre les variables, le caractère bruité des fonctions ou encore des fonctions objectives qui ne sont accessibles que par dispositif expérimental. [52]

La difficulté d'un problème est équivalente à celle du meilleur algorithme proposé pour le résoudre. Un problème est facile (traitable) s'il existe un algorithme capable de le résoudre en un temps polynomial, sinon le problème est considéré comme difficile (intraitable).[52]

La théorie de la complexité s'intéresse à l'étude formelle de la difficulté des problèmes en informatique. [38] L'étude de complexité d'un problème consiste en l'étude de la définition même du problème et de sa structure en se basant sur une estimation théorique du temps de calcul et des besoins en espace mémoire afin de conclure si ce problème peut être résolu efficacement ou pas. Parmi les classes les plus connues, on distingue les deux classes essentielles P et NP. [48]

II.8.1. La classe de complexité P (Polynomiale)

Elle regroupe l'ensemble des problèmes polynomiaux qui peuvent être résolus par un algorithme déterministe de complexité polynomiale. [44]

II.8.2. La classe de complexité NP (Non Polynomiale)

Elle regroupe l'ensemble des problèmes qui peuvent être résolus par un algorithme non déterministe en un temps polynomial. [44] Les problèmes de cette classe peuvent être résolus en énumérant l'ensemble des solutions possibles qui peuvent être évaluées à l'aide d'un algorithme polynomial.

II.9. Classification des méthodes d'optimisation

La grande diversité des problèmes d'optimisation a conduit à une grande variété de méthodes de résolution. Ces méthodes peuvent être réparties en deux grandes catégories : les méthodes exactes et les méthodes approchées. [49]

II.9.1. Les méthodes exactes (conventionnelles ou classiques)

Les méthodes d'optimisation exactes (déterministes) ont l'avantage de fournir des solutions dont l'optimalité est garantie dans un temps de calcul acceptable. Le principe de ces méthodes consiste généralement à examiner de manière implicite l'ensemble des combinaisons de l'espace de recherche. Elles sont dédiées à certaines formes de problèmes auxquels sont associés des fonctions objectives convexes, continues ou encore dérivables. Les méthodes exactes sont efficaces pour les problèmes de taille raisonnable, néanmoins le temps de calcul nécessaire pourrait augmenter exponentiellement en fonction de la taille du problème à résoudre.[30][38]

Les méthodes déterministes se caractérisent par une exploration systématique de l'espace de recherche. D'une manière générale ces méthodes obéissent aux étapes suivantes:

- 1) Choix d'une première solution courante i admissible.
- 2) Génération d'une solution j dans le voisinage de i .
- 3) Si $f(j)$ est meilleur que $f(i)$ alors j devient la solution courante.
- 4) L'algorithme se termine lorsqu'il n'y a plus d'amélioration de la solution.

Parmi les méthodes déterministes nous citons quelques méthodes :

- Méthode de NEWTON ;
- Méthode de gradient ;
- Méthode de point intérieur ;
- Programmation linéaire.

Le tableau 2.1 présente les avantages et les inconvénients de quelques méthodes classiques.

II.9.2. Méthodes approchées

Les méthodes approchées constituent une alternative aux méthodes exactes et s'appliquent principalement aux problèmes de grande dimension ou à des problèmes dont on ne connaît pas d'algorithmes de résolution en temps polynomial et pour lesquels on cherche à déterminer une solution optimale ou quasi optimale. Les méthodes approchées peuvent s'appliquer à n'importe quelle catégorie de problèmes, faciles ou difficiles, bien ou mal formulés, avec ou sans contraintes.

Ces méthodes sont souvent classées en deux catégories : les méthodes d'approximation et les heuristiques [47].

Contrairement aux heuristiques, les méthodes d'approximation assurent une information de garantie sur la qualité des solutions trouvées par rapport à l'optimum global. Les heuristiques peuvent être aussi divisées en deux sous-classes : les heuristiques dédiées qui sont des méthodes spécifiques à un problème donné et les métaheuristiques qui regroupent des méthodes génériques non dédiées à un problème particulier [47].

Les métaheuristiques ont de plus en plus de succès, cela est dû à leur capacité à résoudre des problèmes de taille importante en des temps raisonnables en apportant des solutions de qualité satisfaisante. [36] Il est toujours possible d'obtenir des solutions de meilleures. Deux familles de métaheuristiques peuvent être distinguées : les métaheuristiques à base de solution unique et celles à base de population de solutions. Les premières consistent en une amélioration d'une seule solution existante tant que cela est possible, ce sont donc des méthodes avec un fort pouvoir d'intensification. Par contre, les métaheuristiques à base de population permettent de mieux appréhender les grands espaces de recherche grâce à leur pouvoir de diversification. Même si les métaheuristiques sont applicables à n'importe quel type de problème, il convient toujours d'analyser les caractéristiques du problème à traiter pour évaluer la meilleure méthode à utiliser [53].

II.10. Méthodes heuristiques

Le mot heuristique, dérivé de la langue grecque, vient du verbe **heuriskein** qui signifie "trouver". Une heuristique est un algorithme qui permet de trouver dans un temps polynomial une solution réalisable, tenant en compte d'une fonction objectif, pas nécessairement optimale (approchée) ou exacte pour un problème d'optimisation difficile.[51] Ce type de méthodes traduit une stratégie (une manière de penser) en s'appuyant sur la connaissance du problème. Une heuristique est spécifique au problème et ne peut pas être généralisée. [52]

II.10.1. Présentation des heuristiques

Par définition les heuristiques sont des règles qui utilisent les résultats passés et leurs analogies afin d'optimiser leurs recherches futures en examinant d'abord les cas les plus possibles.

Les heuristiques disposent d'une simplicité et d'une rapidité dans leur exécution que les algorithmes classiques. [51]

Bien que l'obtention d'une solution optimale ne soit pas garantie, l'utilisation d'une méthode heuristique offre de multiples avantages par rapport à une méthode exacte :[52]

- La recherche d'une solution optimale peut être totalement
- Inappropriée dans certaines applications pratiques en raison de la dimension du problème, de la dynamique qui caractérise l'environnement de travail, du manque de précision dans la récolte des données, de la difficulté de formuler les contraintes en termes explicites ou de la présence d'objectifs contradictoires.
- Lorsqu'elle est applicable, une méthode exacte est souvent beaucoup plus lente qu'une méthode heuristique, ce qui engendre des coûts informatiques supplémentaires et des difficultés au niveau du temps de réponse.
- Les principes de recherche qui sont à la base d'une méthode heuristique sont en général plus accessibles aux utilisateurs non expérimentés. Le manque de transparence qui caractérise certaines Méthodes exactes nécessite une intervention régulière de la part d'un spécialiste.
- Une méthode heuristique peut être facilement adaptée ou combinée avec d'autres types de méthodes. Cette flexibilité augmente considérablement les possibilités d'utilisation des méthodes heuristiques.
- Une heuristique d'optimisation est une méthode approchée simple, rapide et adaptée à un problème donné. Sa capacité à optimiser un problème avec un minimum d'informations est contrebalancée par le fait qu'elle n'offre aucune garantie quant à l'optimalité de la meilleure solution trouvée.
- Du point de vue de la recherche opérationnelle, ce défaut n'est pas toujours un problème, tout spécialement quand seule une approximation de la solution optimale est recherchée.

II.11. Méthodes métaheuristiques

La famille des métaheuristiques regroupe un ensemble de méthodes performantes en optimisation difficile. Elles offrent des solutions approchées de bonne qualité en temps raisonnable pour résoudre les problèmes complexes d'aujourd'hui. Elles sont formellement définies comme des

processus de génération itératifs qui guident une heuristique subordonnée en combinant intelligemment différents concepts pour l'exploration et l'exploitation de l'espace de recherche. Des stratégies d'apprentissage sont utilisées pour structurer les informations afin de trouver efficacement des solutions quasi optimales. [54] [55]

II.11.1. Terminologies

On parle de méta, du grec « au-delà » comprendre ici « à un plus haut niveau », heuristique, du grec qui signifie « trouver ». En effet, ces algorithmes se veulent des méthodes génériques pouvant optimiser une large gamme de problèmes différents, sans nécessiter de changements profonds dans l'algorithme employé. [53]

II.11.2. Présentation des métaheuristiques

Les métaheuristiques sont généralement des algorithmes stochastiques itératifs, qui progressent vers un optimum global, c'est-à-dire l'extremum global d'une fonction, en évaluant une certaine fonction objective. [56] Elles se comportent comme des algorithmes de recherches, tentant d'apprendre les caractéristiques d'un problème afin d'en trouver une approximation de la meilleure solution d'une manière proche des algorithmes d'approximation. En outre, elles n'ont pas de critère d'arrêt naturel. Elles utilisent des critères d'arrêt tel le temps de calcul maximum ou le nombre des itérations. [57] Comme les heuristiques, les métaheuristiques n'offrent généralement pas de garantie d'optimalité, bien qu'on ait pu démontrer la convergence de certaines d'entre elles. Non déterministe, elles incorporent souvent un principe stochastique pour surmonter l'explosion combinatoire. L'expérience accumulée durant la recherche de l'optimum est souvent mise à profit pour mieux guider la suite du processus de recherche. Des détériorations de la solution courante peuvent être admises, de même que la génération de nouvelles solutions initiales pour la recherche locale d'une façon plus intelligente que simplement fournir des solutions initiales aléatoires. [58]

II.11.3. Caractéristiques principales des métaheuristiques

Blum et Roli caractérisent les métaheuristiques de la façon suivante : [59]

- Les métaheuristiques sont des stratégies qui permettent de guider le processus de recherche.

- Le but visé par les métaheuristiques est d'explorer efficacement l'espace de recherche afin de déterminer des solutions quasi optimales.
- Les métaheuristiques sont approximatifs, généralement non-déterministes et ne donnent aucune garantie d'optimalité.
- Les métaheuristiques peuvent contenir des mécanismes qui permettent d'éviter d'être piégés dans des zones de l'espace de recherche.
- Les concepts de base des métaheuristiques peuvent être écrits de manière abstraite, sans faire appel à un problème spécifique.
- Les métaheuristiques peuvent faire appel à des heuristiques qui tiennent compte de la spécificité du problème traité, mais ces heuristiques sont contrôlées par une stratégie de niveau supérieur.
- Les métaheuristiques peuvent faire usage de l'expérience accumulée durant la recherche de l'optimum, pour mieux guider la suite du processus de recherche.

II.11.4. Avantages et inconvénients des méthodes métaheuristiques

➤ **Avantages**

- Solutions suffisamment bonnes pour les problèmes NP- difficiles.
- Ne nécessitent aucune information de gradient.
- Capables de récupérer des optima locaux.
- Peuvent gérer plusieurs objectifs avec quelques changements algorithmiques.
- Peuvent être appliquées à tous problèmes d'optimisation de fonction.
- Peuvent être combinées avec d'autres techniques d'optimisation classique.
- Son simple à comprendre, à concevoir et à mettre en œuvre.

➤ **Inconvénients**

- N'ont pas de fondement mathématique solide par rapport aux méthodes classique.
- Ne garantissent pas l'optimalité.
- Leurs performances dépendent fortement de leurs paramètres.

La résolution d'un problème d'optimisation est réalisée à l'aide de diverses méthodes dont la classification est illustrée dans la figure 2.2.

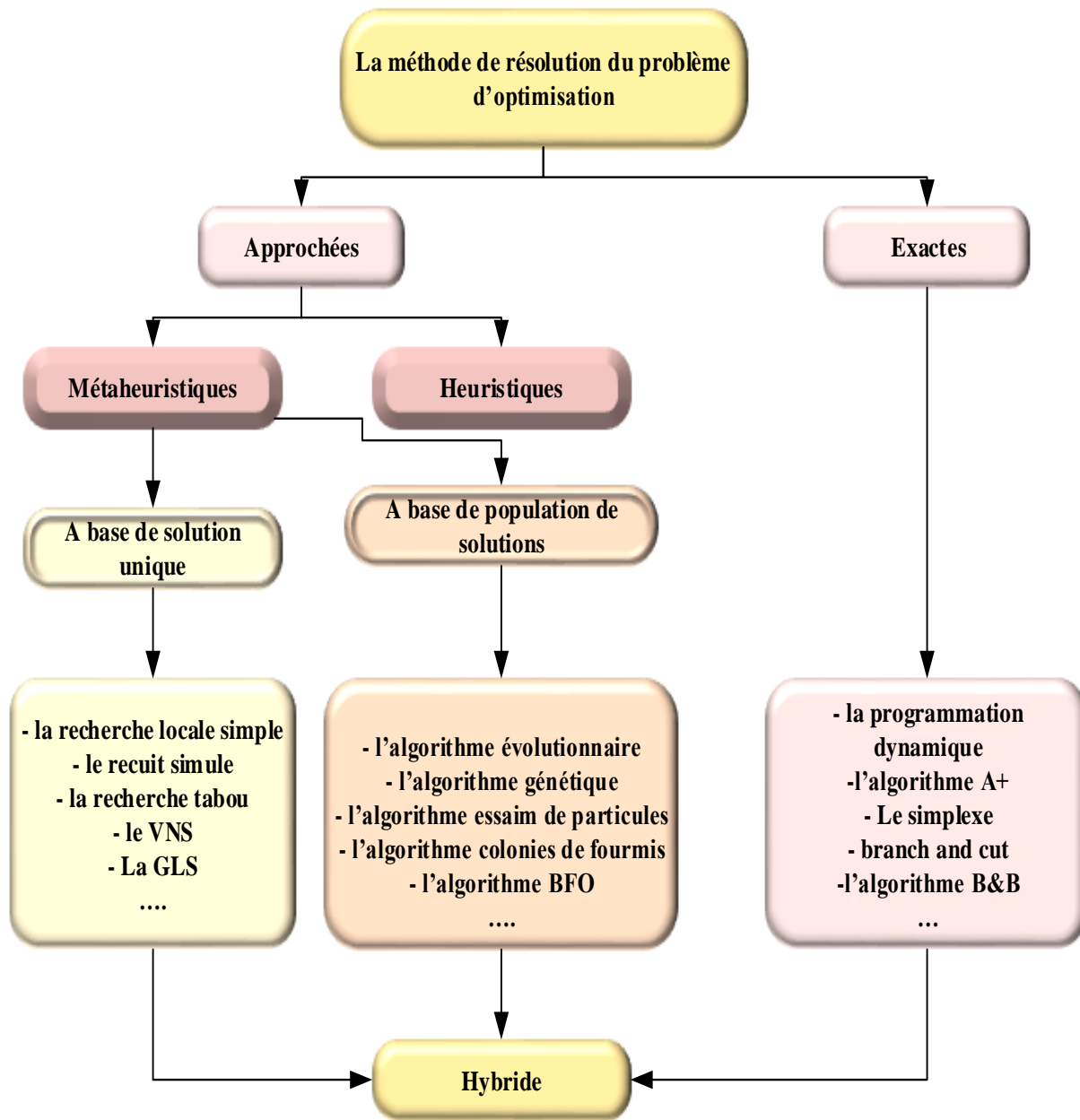


Figure.2.2. Classification des méthodes d'optimisation [44]

Tableau. 2.1. Avantages et inconvénients de quelques méthodes classiques d'optimisation

Méthodes classiques	Avantages	Inconvénients
Gradient	Simple	-Insuffisante pour résoudre les problèmes à fonction objective non linéaire et non continue ; -La méthode risque de converger vers un optimum local dépendant du point de départ (initial) choisi.
Newton	-Simple ; -Rapide si la solution initiale est près de l'optimum ; -Peut résoudre les problèmes d'optimisation avec fonctions objectives linéaire ou non linéaires.	-Limitations sévères avec le traitement des fonctions non linéaires, discontinues et à contraintes ; -La solution initiale doit être proche d'un minimum local ; -Lente pour les grands systèmes ; -Ne converge pas toujours à la solution.
Points intérieurs	-Convergence rapide vers la solution quel que soit la taille du système ; -Peut résoudre les problèmes d'optimisation avec fonctions objectives linéaire ou non linéaires.	-La solution peut ne pas satisfaire toutes les contraintes d'inégalités ;
Programmation linéaire	-Puissante pour traiter les problèmes complexes d'optimisation avec fonctions linéarisées ;	Moins précise pour les problèmes non linéaires.

Conclusion

Ce chapitre nous a permis d'édifier les fondations de notre étude à travers la représentation des concepts de base et la formulation générale du problème d'optimisation, sans oublier la classification des méthodes d'optimisation. Dans le présent travail on s'intéresse aux méthodes métaheuristique simple et hybrides pour la résolution du problème d'optimisation. Dans le chapitre qui suit on va aborder les notions fondamentales de ces méthodes, ainsi que les approches utilisées dans cette étude.

Chapitre 3

Méthodes métaheuristiques

Introduction

Au cours des dernières décennies, les métaheuristiques sont devenues plus populaires car elles présentent plusieurs avantages par rapport aux techniques traditionnelles. Ses méthodes jouent un rôle important dans la résolution des problèmes d'optimisation. [53]

Dans ce chapitre, on abordera les notions de base des méthodes méta-heuristiques en montrant le concept de l'inspiration et le principe de fonctionnement. Ainsi que les méthodes hybride qui occupe une place privilégiée dans ce chapitre.

III.1. Principe des métaheuristiques

Les métaheuristiques fonctionnent selon un comportement itératif c'est-à-dire que le même schéma se reproduit un certain nombre de fois au cours de l'optimisation, généralement elles s'articulent autour de ses notions suivantes :[55]

III.1.1. Représentation des solutions

La représentation de la solution doit être adaptée et pertinente pour le problème d'optimisation considéré, car la qualité d'une représentation a une influence considérable sur l'efficacité des opérateurs de recherche appliqués sur cette représentation. Quatre codages majeurs dans la littérature peuvent être soulignés : le codage binaire, vecteur de valeurs discrètes, permutation et le vecteur de valeur réelles. [55], [57]

III.1.2. Fonction d'évaluation

La fonction objective f formule le but à atteindre. Elle associe à chaque solution de l'espace de recherche une valeur réelle qui donne la qualité ou le fitness de la solution. Puis, elle représente une valeur absolue et permet un classement complet de toutes les solutions de l'espace de recherche. [56]

La fonction objective est un élément essentiel dans la conception d'une métaheuristique. Elle guide la recherche vers « bonnes » solutions de l'espace de recherche. Si la fonction objective est mal définie, elle peut conduire à des solutions non acceptables quelle que soit la métaheuristique utilisée. [59]

III.1.3. Intensification, diversification et mémorisation

Identifier rapidement les régions dans l'espace de recherche avec des solutions de haute qualité et ne pas perdre trop de temps dans les régions de l'espace de recherche qui sont déjà explorées ou qui ne fournissent pas de solutions de haute qualité constituent également une préoccupation majeure dans la conception des métaheuristiques. [60]

Deux concepts fondamentaux sont définis : l'intensification (exploitation de l'expérience de recherche accumulée : on recherche les meilleures solutions dans la région de l'espace de recherche en cours d'analyse) et la diversification (exploration de l'espace de recherche quand il est possible de déterminer que la recherche se concentre sur les zones intéressantes de l'espace de recherche). Un compromis entre ces deux concepts doit être assuré. [55][61]

La mémorisation, elle est le support de l'apprentissage qui permet à l'algorithme de ne tenir compte que des zones où l'optimum global est susceptible de se trouver, évitant ainsi, les optima locaux qui sont de bonnes solutions, mais qui ne sont pas les meilleures solutions possibles. [61]

III.2. Classification des méthodes métaheuristiques

Il existe plusieurs façons de classer les métaheuristiques. La manière la plus courante de classer les techniques métaheuristiques est basée sur le nombre de solutions initiales qui sont modifiées dans les itérations suivantes : [62] [63]

III.2.1. Métaheuristiques à base de solution unique

Les métaheuristiques à solution unique commencent par une solution initiale qui est modifiée de manière itérative. Notez que le processus de modification lui-même peut impliquer plus d'une solution, mais qu'une seule solution est utilisée dans chaque itération suivante.

III.2.2. Métaheuristiques à base de population de solutions

Les métaheuristiques basées sur la population utilisent plus d'une solution initiale pour démarrer l'optimisation. À chaque itération, plusieurs solutions sont modifiées, certains d'entre eux atteignent la prochaine itération. La modification des solutions se fait via des opérateurs qui utilisent souvent des propriétés statistiques particulières de la population.

III.3. L'inspiration des métaheuristiques

Le concept de base de la plupart des algorithmes métaheuristiques s'inspire de la nature, du comportement animal ou des phénomènes physiques. Les algorithmes métaheuristiques sont classés en trois classes principales : techniques basées sur l'évolution, basées sur la physique et basées sur les essaims. Les méthodes évolutives imitent le processus d'évolution dans la nature pour effectuer l'optimisation. Alors que les algorithmes basés sur la physique effectuent une optimisation en utilisant les règles de la physique dans l'univers.

La troisième classe des algorithmes métaheuristiques sont des techniques basées sur Swarm, qui imitent le comportement des animaux dans un groupe. Compte tenu du phénomène inspirant, les algorithmes méta-heuristiques peuvent être divisés en différentes catégories. Le tableau 1 illustre une classification possible des algorithmes méta-heuristiques et fournit des algorithmes représentatifs pour chaque catégorie. [64] [65]

Tableau.3.1. Classification des algorithmes métaheuristiques

Algorithmes évolutifs	Algorithmes basés sur la physique	Algorithmes basés sur les essaims	Autres algorithmes de base de population
Evolution Strategy (ES) (Rechenberg 1978)	Black Hole Algorithm (BH) (Hatamlou 2013)	Cuckoo Search (CS) (Yang and deb 2009)	Stochastic Fractal Search (SFS) (Salimi 2015)
Biogeography Based-Optimization (BBO) (Simon 2008)	Multi-Verse Optimization Algorithm (MVO) (Mirjalili et al. 2016)	Crow Search Algorithm (CSA) (Askarzadeh 2016)	Sine Cosine Algorithm (SCA) (Mirjalili 2016)
Evolutionary Programming (EP) (Fogel et al. 1966)	Charged System Search (CSS) (Kaveh and Talatahari 2010)	Ant Lion Optimization (ALO) (Mirjalili 2015)	Thermal exchange optimization (Kaveh and Dadras 2017)

Saeid Barshandeh et ses collègues présentent une autre vue schématique de la classification des algorithmes métaheuristiques. Figure 3.1 illustre une classification possible des algorithmes métaheuristiques et fournit quelques algorithmes représentatifs pour chaque catégorie. [66]

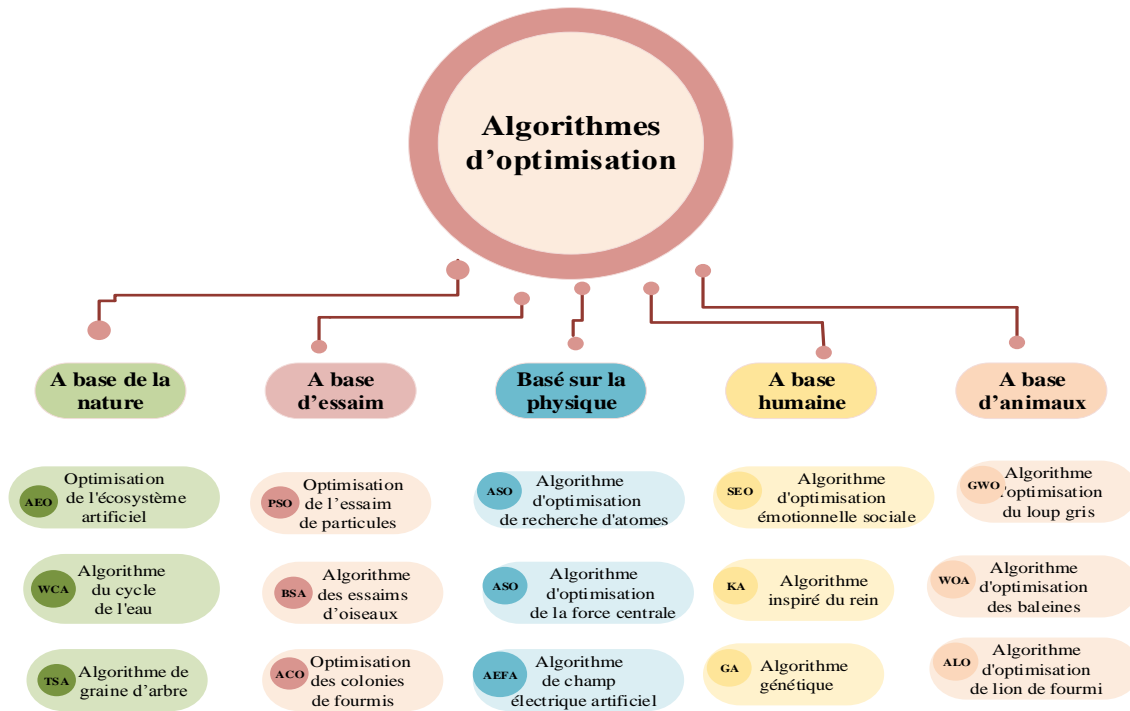


Figure.3.1. Classification des algorithmes métaheuristiques [66]

III.4. Méthodes métaheuristiques utilisées

III.4.1. Algorithme de recherche du corbeau (CSA)

III.4.1.1. Principe de fonctionnement du CSA

L'algorithme CSA a été récemment proposé par Askarzadeh comme un nouvel algorithme d'optimisation métaheuristique basé sur le comportement social des corbeaux, l'idée de la CSA est motivée par le processus de stockage de l'excès de nourriture caché par le corbeau qui le place puis le restaure dans le temps si c'est nécessaire. Les principes de l'algorithme méta-heuristique qui est basé sur l'évolution de la population des corbeaux sont énumérés comme suit :[67]

- Les corbeaux vivent sous forme des essaims.
- Les corbeaux mémorisent la position de leurs cachettes.
- Les corbeaux se suivent pour faire le vol.
- Les corbeaux protègent leurs cachettes contre le vol.

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

$$x^{i,iter} (i = 1, 2, \dots, N; iter = 1, 2, \dots, iter_{max}) \text{ où } x^{i,iter} = [x_1^{i,iter}, x_2^{i,iter}, x_d^{i,iter}] \quad (3.1)$$

Avec $iter_{max}$ est le nombre maximal des itérations. Chaque corbeau à un mémoire dans lequel la position de sa cachette est mémorisée. A l'itération $iter$, la position de la cachette du corbeau i est montrée par $m^{i,iter}$, c'est la meilleure position que le corbeau ait obtenue jusqu'à l'itération courante. En effet, en mémoire de chaque corbeau la position de sa meilleure expérience a été mémorisée. Les corbeaux se déplacent dans l'environnement et cherchent les meilleures sources de nourriture (cachettes). [68] Supposons qu'à l'itération $iter$, le corbeau j veut visiter sa cachette en place $m^{j,iter}$. A cette itération, le corbeau i décide de suivre le corbeau j pour s'approcher de sa cachette. Dans ce cas, deux états pourraient arriver :

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

$$x^{i,iter+1} = x^{i,iter} + r_i \times fl^{i,iter} \times (m^{j,iter} - x^{i,iter}) \quad (3.2)$$

État 2 : le corbeau j sait que le corbeau i le suit. En conséquence, afin de protéger sa cachette contre le vol, le corbeau j va tromper le corbeau i en allant à une autre position de l'espace de recherche en générant une solution aléatoire faisable. Les états 1 et 2 peuvent être exprimés comme suit :

$$x^{i,iter+1} = \left\{ \begin{array}{l} x^{i,iter} + r_i \times fl^{i,iter} \times (m^{j,iter} - x^{i,iter}) \\ \text{une position aléatoire} \end{array} \right\} \quad r_j \geq AP^{j,iter} \quad (3.3)$$

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

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

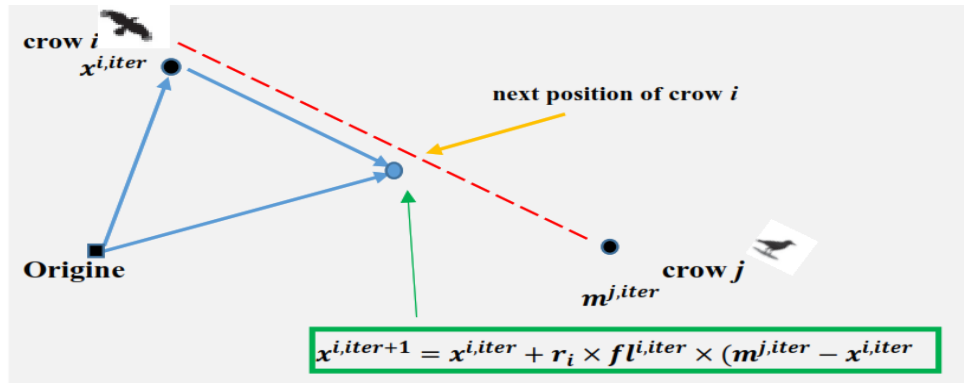
r_i : Est un nombre aléatoire avec une répartition uniforme entre 0 et 1.

➤ L'influence de la portée de vol fl

La figure (3.2) montre le schéma de l'état (1) et l'effet fl sur la capacité de recherche. Les petites valeurs de fl conduisent à une recherche locale (à proximité de $x^{i,iter}$) et les grandes valeurs à une recherche globale (loin de $x^{i,iter}$). Comme le montre la figure (3.2.a), si la valeur de fl est inférieure à 1, la position suivante du corbeau i est sur la ligne en rouge discontinue entre $x^{i,iter}$ et

$m^{i,iter}$. Comme l'indique-la figure (3.2.b), si la valeur de fl est supérieure à 1, la position suivante du corbeau i se trouve sur la ligne en vert continue qui dépasse $m^{i,iter}$.

a) $fl < 1$



b) $fl > 1$

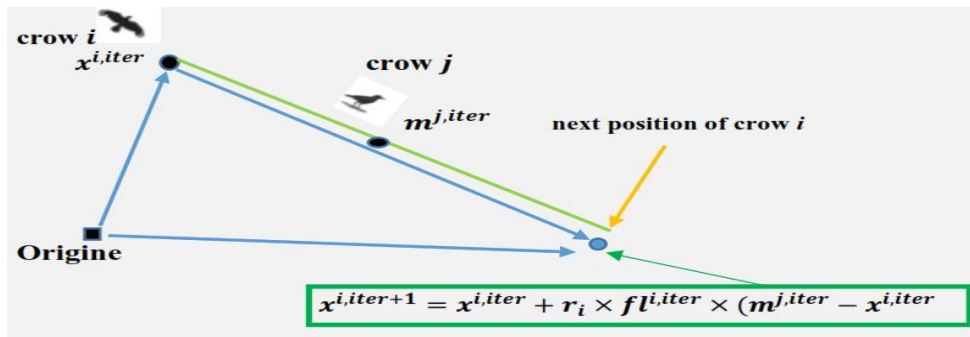


Figure.3.2 : Diagramme d'état 1 dans CSA (a) $fl < 1$ et (b) $fl > 1$ [67]

III.4.1.2. Méthodologie de la CSA pour l'optimisation

La procédure étape par étape pour la mise en œuvre de l'algorithme de CSA est décrite comme suit :[67]

Étape 1 : Initialiser le problème et les paramètres réglables

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

- Taille du corbeau (N)
- Nombre maximal d'itérations ($iter_{max}$)

- La portée de vol (fl)
- Probabilité de conscience (AP)

Étape 2 : Initialiser la position et la mémoire des corbeaux

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

$$corbeaux = \begin{pmatrix} x_1^1 & x_2^1 & \dots & x_d^1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_1^N & x_2^N & \dots & x_d^N \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

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

$$Mémoire = \begin{pmatrix} m_1^1 & m_2^1 & \dots & m_d^1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ m_1^N & m_2^N & \dots & m_d^N \end{pmatrix} \quad (3.5)$$

Étape 3 : Évaluer la fonction fitness (fonction objectif)

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

Étape 4 : Générer une nouvelle position

On suppose que le corbeau i veut générer une nouvelle position, dans ce but, ce dernier choisit au hasard un des corbeaux (par exemple corbeau j) et le suit pour découvrir la position des aliments cachés par ce corbeau (m_j). La nouvelle position du corbeau i est obtenue par l'équation (3.3) ce processus est répété pour tous les corbeaux.

Étape 5 : Vérifier la faisabilité de nouvelles positions

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

Étape 6 : Évaluer la fonction fitness des nouvelles positions

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

Étape 7 : Mettre à jour la mémoire

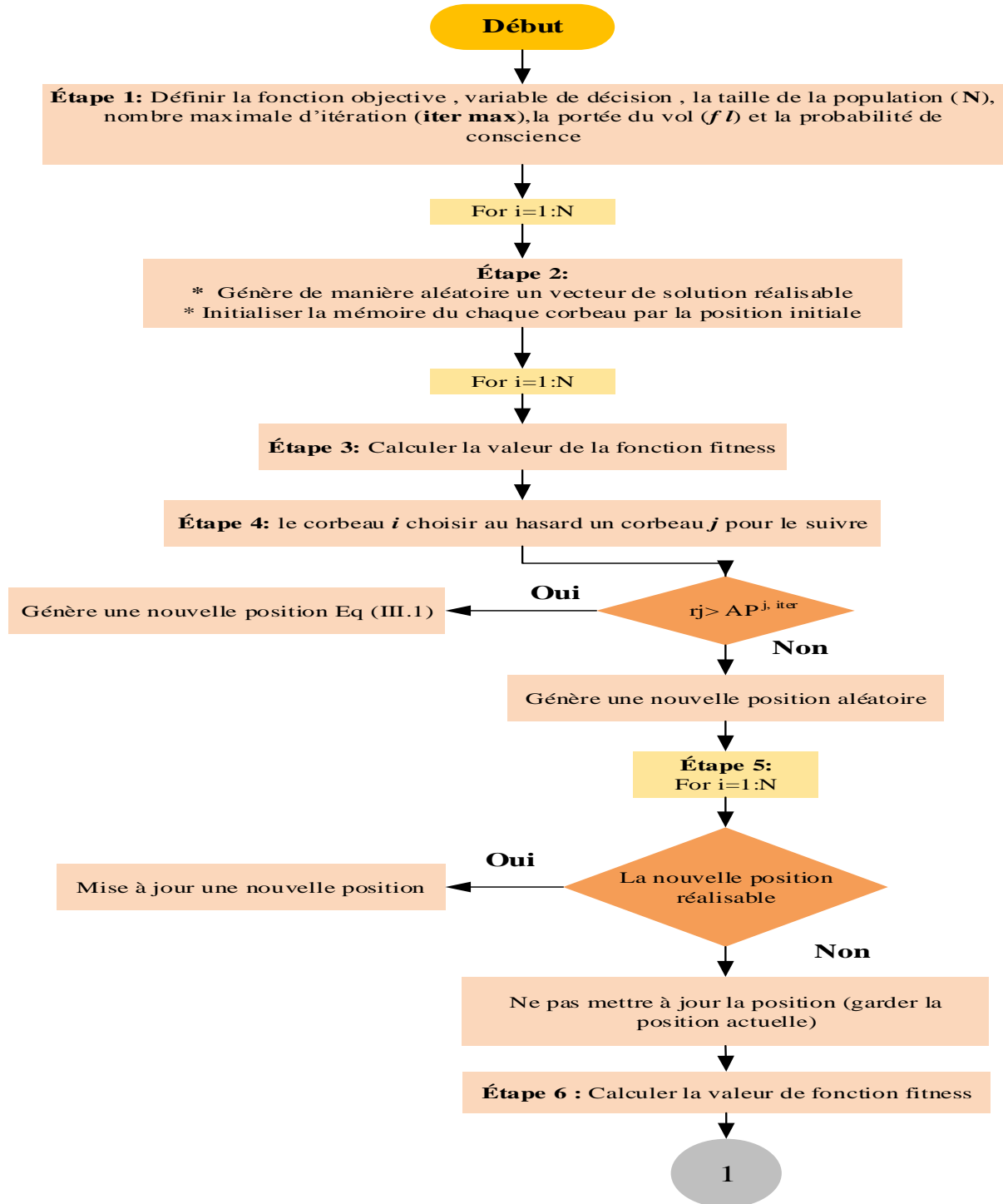
Les corbeaux mettent à jour leur mémoire comme suit :

$$m^{i,iter+1} = \begin{cases} x^{i,iter+1} & \text{if } f(x^{i,iter+1}) \text{ est meilleur que } f(m^{i,iter+1}) \\ m^{i,iter} & \text{sinon} \end{cases} \quad (3.6)$$

Où $f(\cdot)$ désigne la valeur de la fonction objective. On voit que si la valeur de la fonction fitness de la nouvelle position d'un corbeau est meilleure que la valeur de la fonction fitness de la position mémorisée, le corbeau met à jour sa mémoire par la nouvelle position.

Étape 8 : Vérifier le critère d'arrêt

Les étapes 4-7 sont répétées jusqu'à ce que l'itération $iter_{max}$ soit atteinte. Lorsque le critère d'arrêt est atteint, la meilleure position de la mémoire en termes de valeur de fonction objectif est rapportée comme la solution du problème d'optimisation. [67] [68]



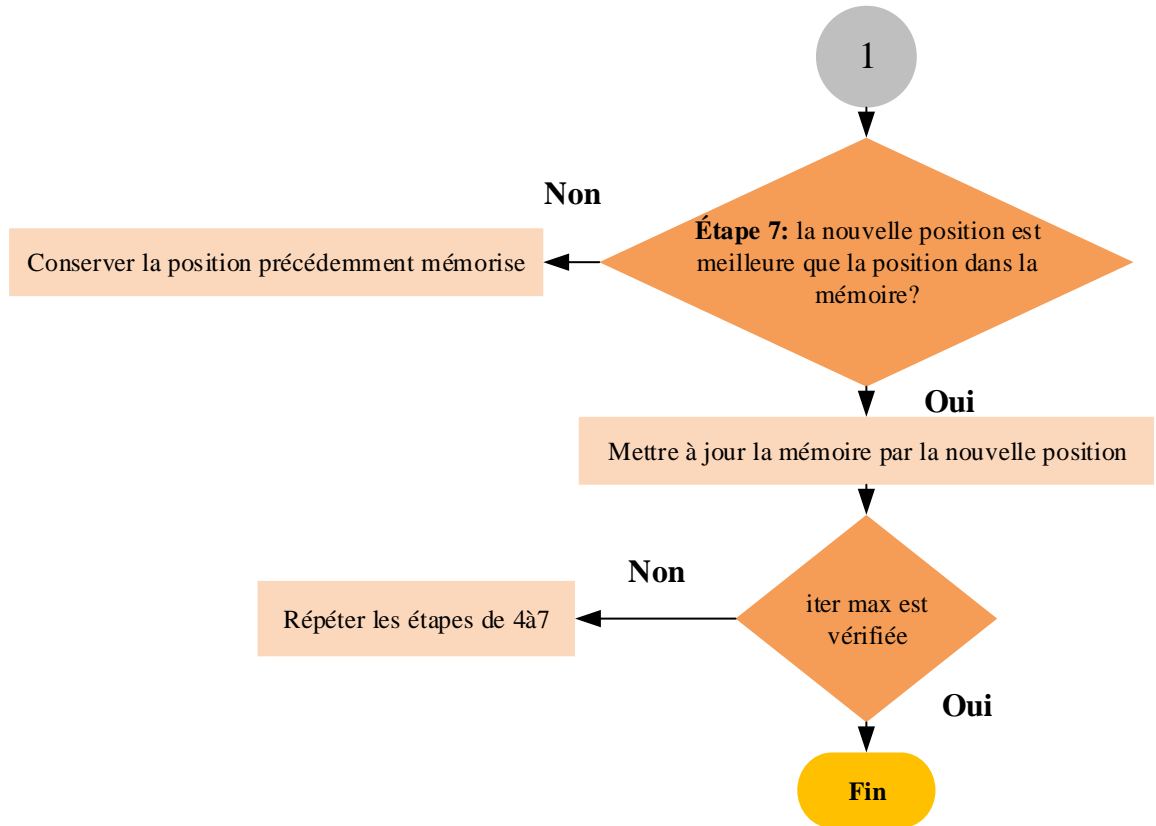


Figure 3.3. Organigramme de l'algorithme de recherche du corbeau CSA [69]

III.4.2. Algorithme Génétique

III.4.2.1. Principe de fonctionnement du AG

Les algorithmes génétiques sont des algorithmes d'exploration fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique, utilisant le principe de survie des structures les mieux adaptées et les échanges d'informations pseudo aléatoire. [70]

Les algorithmes génétiques (AG) se sont des techniques d'optimisation stochastiques qui se base aux mécanismes de la sélection naturelle et de l'évolution. Ils appartiennent à la famille des algorithmes évolutionnistes (un sous-ensemble des métaheuristiques). [70]

III.4.2.2. Terminologie

Avant d'aborder comment fonctionnent les AG s, nous devons également définir la terminologie employée : [70]

- ✓ **Chromosome** : En biologie, il est défini comme le porteur de l'information génétique nécessaire à la construction et au fonctionnement d'un organisme. Dans le cadre des AG, il correspond à un élément représentant une solution possible d'un problème donné.
- ✓ **Gène** : En biologie, il représente une partie du chromosome, chaque chromosome est constitué d'un certain nombre de gènes. Pour un AG, chaque chromosome est divisé en un ensemble d'unités le constituant appelé gènes.
- ✓ **Génotype** : Dans les systèmes naturels, l'ensemble du "matériel" génétique est appelé le génotype. Dans les AG, l'ensemble des chaînes est appelé structure.
- ✓ **Phénotype** : Dans les systèmes naturels, l'organisme formé par l'interaction de l'ensemble du "matériel" génétique avec son environnement est appelé phénotype. Dans les AG, les structures décodées forment un ensemble de paramètres donnés, ou solutions ou bien points de l'espace des solutions.
- ✓ **Allèle** : Dans les systèmes naturels, l'allèle est une composante du gène. Les allèles sont les différentes valeurs que peuvent prendre les gènes. Dans les AG, l'allèle est également appelé valeur caractéristique.
- ✓ **Locus** : Est la position d'un gène dans le chromosome.
- ✓ **Individu** : En biologie un individu est une forme qui est le produit de l'activité des gènes. Pour un AG, il est réduit à un chromosome et on l'appelle donc chromosome ou individu pour désigner un même objet.
- ✓ **Population** : Dans un système naturel, une population est simplement un ensemble d'individus. Par analogie, elle se définit comme l'ensemble des chromosomes. Elle est aussi appelée une génération.

III.4.2.3. Caractéristiques des AG s

Les algorithmes génétiques se caractérisent par quatre aspects : le codage des paramètres du problème, la génération de la population initiale, la fonction à optimiser, et les opérateurs génétiques. [71]

➤ Codage des données

L'étape du codage est fondamentale dans les AG s, elle associe à chacun des points de l'espace considéré une structure de données. Cette structure conditionne les succès des AG s. Historiquement le codage binaire a été le premier à être utilisé car :[72]

- Il peut facilement coder toutes sortes d'objets : des réels, des entiers, des valeurs booléennes, des chaînes de caractères...
- Il permet la création d'opérateurs de croisement et de mutation simples.

Cela nécessite simplement l'usage de fonctions de codage et de décodage pour passer d'une représentation à l'autre. C'est également en utilisant ce codage que les premiers résultats de convergence théorique ont été obtenus. [72]

➤ Génération de la population

La population initiale conditionne fortement la rapidité et la convergence de l'algorithme génétique. On distingue deux cas:[73]

- a) Si la position de l'optimum dans l'espace d'état est totalement inconnue, il est essentiel que la population initiale soit répartie sur tout le domaine de recherche.
- b) Si on a des informations à priori sur le problème, on génère les individus dans un sous domaine particulier (relativement aux informations disponibles) afin d'accélérer la convergence.

➤ Fonction "fitness"

La fonction d'adaptation, ou '*fitness*', associe une valeur pour chaque individu. Cette valeur a pour but d'évaluer si un individu est mieux adapté qu'un autre à son environnement. Ce qui signifie qu'elle quantifie la réponse fournie au problème pour une solution potentielle donnée. Ainsi les individus peuvent être comparés entre eux. Cette fonction, propre au problème, est souvent simple à formuler lorsqu'il existe peu de paramètres. Au contraire, lorsqu'il y a beaucoup de paramètres ou lorsqu'ils sont corrélés, elle est plus difficile à définir.

➤ Opérateurs génétiques

Afin de diversifier les individus d'une génération à l'autre, il est nécessaire d'introduire divers opérateurs selon la complexité de l'application. On peut citer: [72]

✓ Sélection (Reproduction)

La sélection a pour objectif d'identifier les individus qui doivent se reproduire. Elle consiste à choisir les individus les mieux adaptés afin d'avoir une population de solution la plus proche de

converger vers l'optimum global. Cet opérateur est l'application du principe d'adaptation de *la théorie de Darwin*.

Notons que les étapes de sélection et de remplacement sont indépendantes de l'espace de recherche. On distingue deux types de sélections [71]:

- **Sélection déterministe** : On sélectionne toujours les meilleurs individus et on écarte totalement les plus mauvais. Cela suppose un tri de l'ensemble de la population. On parle alors d'élitisme.
- **Sélection stochastique** : On favorise toujours les meilleurs individus mais de manière stochastique, ce qui laisse une chance aux individus moins performants. Il se peut que le meilleur individu ne soit pas sélectionné au profit du plus faible et qu'aucun des enfants ne soit au niveau du meilleur parent.

En général, la sélection doit favoriser les meilleurs éléments selon le critère à optimiser (minimiser ou maximiser). Il existe plusieurs méthodes de sélection, les plus connues étant « la roulette » et « la sélection par tournoi » [71].

✓ **Croisement (Crossover)**

Cet opérateur a pour but d'enrichir la diversité de la population et exploiter l'espace de recherche en manipulant la structure du chromosome. Les croisements sont envisagés avec deux parents en génèrent deux enfants. Les descendants doivent hériter quelques caractères de chaque parent. C'est donc un essai d'amélioration des meilleurs individus (parent) produits jusqu'au moment du croisement. Pour cela, plusieurs techniques sont utilisées selon le codage adopté, les plus connues étant « le croisement en un point » et « le croisement uniforme ». [71]

✓ **Mutation**

Cet opérateur permet aux algorithmes génétiques d'explorer tout l'espace de recherche en modifiant aléatoirement une partie de la population. Il a été conçu pour renforcer les deux opérateurs : reproduction et croisement. Sur le plan théorique, les propriétés de convergence des AG sont fortement dépendantes de cet opérateur et un algorithme peut même convergence rien qu'en utilisant mutations.

Comme pour le croisement, plusieurs techniques de mutation peuvent être utilisées. Pour les problèmes discrets, l'opérateur de mutation consiste généralement à tirer aléatoirement un gène dans le chromosome et à le remplacer par une valeur aléatoire [70].

➤ **Méthode d'insertion**

Après l'étape de mutation, on utilise une méthode d'insertion qui joue un rôle fondamental pour le passage d'une génération à une autre. Lors de la construction de cette population, on se trouve devant un vrai problème : faut-il garder les enfants ou les parents ou bien un certain pourcentage des deux pour laisser la taille de la population (N) constante ? Il s'agit de concevoir une stratégie d'évolution de la population. On distingue deux stratégies :

Première stratégie : notée ($N ; N_f$), consiste à choisir les N individus à partir de N_f enfants déjà créés par les opérateurs de croisement et de mutation. Dans cette stratégie, on suppose que $N_f \geq N$ quand $N_f = N$, nous parlerons de la méthode générationnelle qui remplace les parents par les enfants ;

Seconde stratégie : notée ($N + N_f$), consiste à choisir les N individus à partir de N parents de la population précédente et de N_f nouveaux enfants. A chaque itération quelques chromosomes (parents) ayant les meilleures solutions seront sélectionnés afin de créer des chromosomes fils qui remplaceront les plus mauvais parents. Le reste de la population survie et sera copié dans la nouvelle génération. L'objectif de cette insertion est d'éviter la déperdition des meilleurs chromosomes soient perdus après les opérations de croisement et de mutation. Cette méthode améliore considérablement les algorithmes génétiques, car elle permet de conserver, à une itération K , les meilleurs individus trouvés dans toutes les populations générées antérieurement.[70]

➤ **Tests D'arrêt**

Le critère d'arrêt indique que la solution est suffisamment proche de l'optimum. Plusieurs critères d'arrêt de l'algorithme sont possibles. On peut arrêter l'algorithme après un nombre suffisant de générations pour que l'espace de recherche soit convenablement exploré [73]. On arrête l'algorithme lorsque l'on estime que la population n'évolue pas assez rapidement. On peut supposer qu'on est suffisamment proche de l'optimum.

Il est à noter qu'aucune certitude concernant la bonne convergence de l'algorithme n'est assurée. Comme dans toute procédure d'optimisation l'arrêt est arbitraire, il nous faut donc exécuter plusieurs fois l'algorithme et de procéder à une analyse statistique des résultats. La solution obtenue « en un temps fini » ne constitue qu'une approximation de l'optimum. [73]

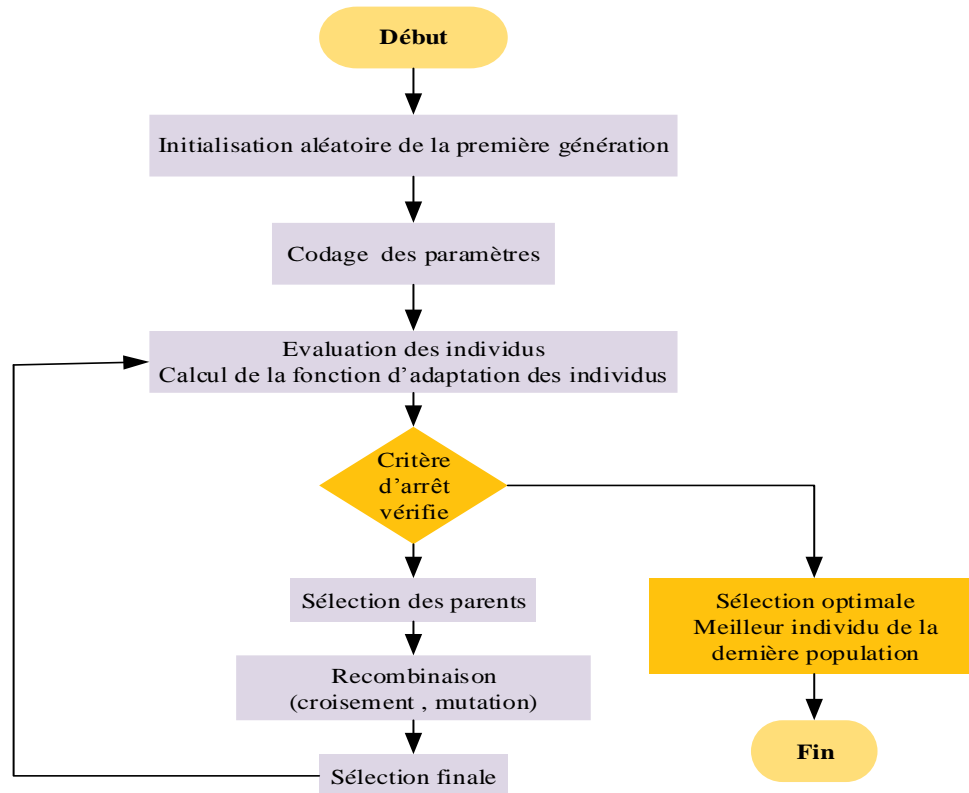


Figure.3.4. Organigramme de l'algorithme génétique AG [72]

III.4.3. L'algorithme d'optimisation de l'écosystème artificiel

III.4.3.1. Concept d'un écosystème

Définition

Un écosystème est un ensemble vivant formé par un groupement de différentes espèces en interrelations (nutrition, reproduction, prédation...), entre elles et avec leur environnement (minéraux, air, eau), sur une échelle spatiale donnée. L'écosystème regroupe des conditions particulières (physico-chimique, température, pH, humidité...) et permet le maintien de la vie [74]. Par leurs interactions entre elles et avec l'environnement, les espèces modèlent l'écosystème qui de ce fait évolue dans le temps. Il a tendance à rester stable mais en perpétuels mouvement et évolution [75].

III.4.3.2. Principe de fonctionnement d'un écosystème

Il se présente comme une unité intégrée, avec ses différentes composantes abiotiques et biotiques, qui fonctionne malgré l'entrée en compétition d'un grand nombre d'organismes pour les ressources. Tout être vivant, même les plus petits (bactérie, champignons, etc.) constitue une source de nourriture pour un autre organisme vivant, ce qui constitue ce qu'on appelle la chaîne trophique ou chaîne alimentaire et qui consiste en un transfert de matière et d'énergie d'un niveau trophique à un autre. [75]

Les chaînes alimentaires concourent pour former un réseau dense et complexe : le réseau trophique formé par un ensemble de chaînes alimentaires reliées entre elles au sein d'un écosystème et par lesquelles l'énergie et la matière circulent. La figure 3.5 représente le flux énergie au sein d'un écosystème.[75]

Le parcours du transfert d'énergie est surligné en bleu. En rouge sont représentés les différents niveaux d'énergie qui vont en diminuant depuis les producteurs vers les décomposeurs. L'énergie circule toujours des organismes vivants à haute énergie vers les organismes vivants à faible énergie. En règle générale, l'écosystème développe ce mécanisme de transfert d'énergie comme stratégie pour maintenir la stabilité des espèces, ce qui permet d'établir l'équilibre écologique et le préserver à long terme.[74]

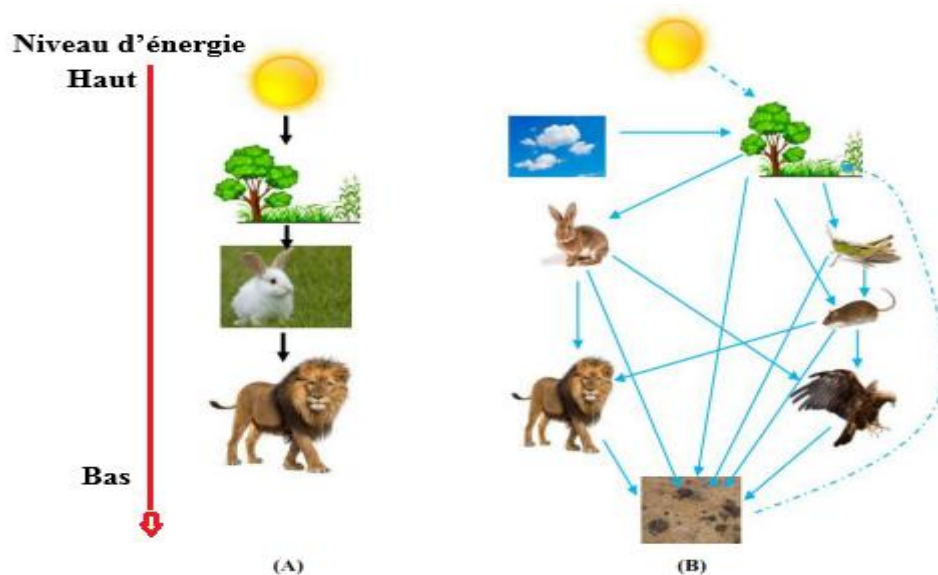


Figure.3.5. Flux d'énergie dans un écosystème ; A) la chaîne alimentaire, B) réseau alimentaire [75]

A la lumière de ce qui précède, l'algorithme d'optimisation basé sur un écosystème artificiel emploie trois opérateurs, dont la production, la consommation et la décomposition. Le premier opérateur consiste principalement à améliorer l'équilibre entre exploration et exploitation. Le deuxième opérateur est utilisé pour améliorer l'exploration de l'algorithme. Pour le troisième opérateur, il est proposé de promouvoir l'exploitation de l'algorithme. Dans son processus de recherche de solutions, AEO suit généralement les règles suivantes [75] :

1. L'écosystème en tant que population comprend trois types d'organismes : producteur, consommateur et décomposeur.
2. Il n'y a qu'un seul producteur en tant qu'individu dans une population.
3. Il n'y a qu'un seul décomposeur en tant qu'individu dans une population.
4. Les autres individus d'une population sont des consommateurs, dont chacun est choisi comme carnivore, herbivore ou un omnivore avec la même probabilité.
5. Le niveau d'énergie de chaque individu dans une population est évalué par la valeur de sa fonction fitness. La population est triée dans l'ordre décroissant de la valeur de la fonction fitness de sorte que la valeur de fitness la plus élevée indique le niveau d'énergie le plus élevé pour un problème de minimisation.

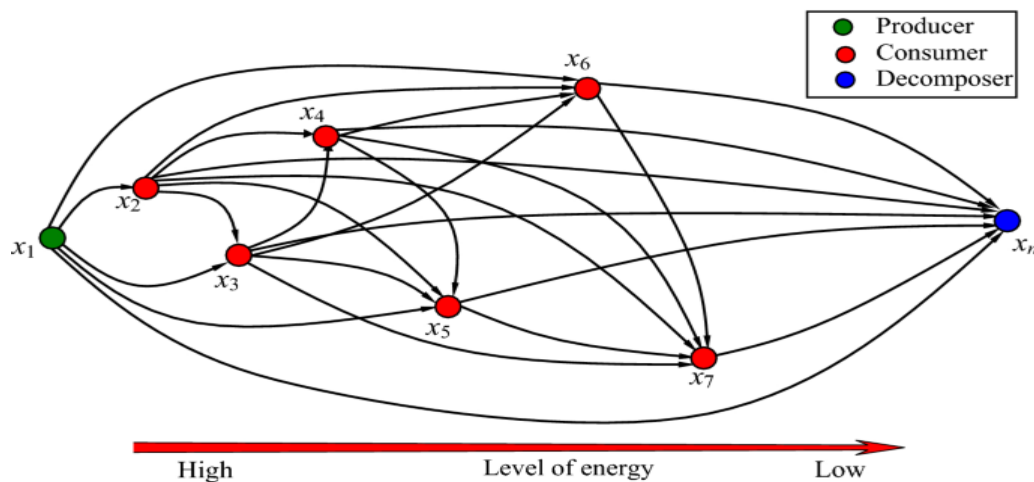


Figure.3.6. Une théorie des graphes pour un écosystème basé sur l'AEO [75]

Dans un écosystème, tous les individus sont triés dans l'ordre décroissant de la valeur de leur fonction fitness. Le pire individu x_1 présentant la valeur de fitness la plus élevée, et le meilleur individu x_n ayant la valeur de fitness la plus basse sont un producteur et un décomposeur respectivement. Les autres sont des consommateurs, on suppose que x_2 et x_5 sont des herbivores,

x_3 et x_6 sont des omnivores, et x_4 et x_7 sont des carnivores. La figure 4 représente le principe d'un écosystème selon AEO.[75]

Production

L'opérateur de production permet à l'algorithme AEO de produire aléatoirement un nouvel individu remplaçant le précédent entre le meilleur individu (x_n) et un individu aléatoirement généré dans l'espace de recherche (x_{rand}). Le modèle mathématique de l'opérateur de production est représenté comme suit :

$$x_1(t+1) = (1+a)x_n(t) + ax_{rand}(t) \quad (3.7)$$

$$a = \left(1 - \frac{t}{T}\right)r_1 \quad (3.8)$$

$$x_{rand} = r(U - L) + L \quad (3.9)$$

Où n est la taille de la population, T le nombre maximal d'itérations, U et L sont les limites inférieure et supérieure respectivement, r_1 est un nombre aléatoire de l'intervalle $[0,1]$, r est un vecteur aléatoire de l'intervalle $[0,1]$, a est un coefficient de pondération linéaire, et x_{rand} est la position d'un individu produit aléatoirement dans l'espace de recherche. Dans l'équation (3.7), le coefficient de pondération a est utilisé pour déplacer linéairement l'individu à partir d'une position produite aléatoirement vers la position du meilleur individu. Au cours des premières itérations $r_1(t+1)$ peut guider les autres individus à effectuer une exploration dans l'espace de recherche de manière extensive.[75]

Consommation

Dans cette phase, les consommateurs mangent d'autres consommateurs d'une basse énergie ou un producteur ou les deux ensembles. Le concept de Levy flight est utilisé dans un effort pour améliorer les modèles d'exploration. Le Levy flight imite généralement le réel mécanisme de recherche des animaux. Un paramètre de consommation traité par le concept de Levy flight est défini comme suit :[76]

$$c = \frac{1}{2} \frac{v_1}{|v_2|} \quad (3.10)$$

$$v_1 \sim N(0,1), v_2 \sim N(0,1) \quad (3.11)$$

Où $N(0,1)$ est une distribution normale de {moyenne = 0 et écart type (std =1)}. Ce facteur de consommation est principalement très utile pour chaque consommateur vivant pour gagner de la nourriture en utilisant les techniques de chasse possibles.

Si un consommateur est choisi au hasard comme herbivore, il ne mangera que les producteurs. Ce comportement est exprimé mathématiquement par :

$$X_i(t+1) = X_i(t) + C. (X_i(t) - X_1(t)), i \in [2, \dots, n] \quad (3.12)$$

Dans le cas où un consommateur est choisi comme un carnivore, alors il ne mangera que les consommateurs ayant moins valeur de fitness. Ce comportement peut être représenté par :

$$\begin{cases} X_i(t+1) = X_i(t) + C. (X_i(t) - X_j(t)), i \in [3, \dots, n] \\ j = randi([2_i - 1]) \end{cases} \quad (3.13)$$

Avec le dernier cas de phase de consommation, lorsque le consommateur est considéré comme un omnivore, alors il pourra manger d'autres consommateurs ayant un niveau d'énergie plus élevé et des producteurs. Ce comportement est donné par :

$$\begin{cases} X_i(t+1) = X_i(t) + C. (r_2 (X_i(t) - X_j(t))) + (1 - r_2)(X_i(t) - X_j(t)) \\ i \in [3, \dots, n] \\ j = randi([2_i - 1]); \quad r_2 = rand \end{cases} \quad (3.14)$$

Décomposition

Le paramètre de décomposition est plus important pour les AEO, qui agissent après la mort de chaque individu de la population pour décomposer les résidus de cet individu. Pour obtenir un modèle mathématique approximatif de ce comportement, certains paramètres tels que le facteur de décomposition D , les variables de poids e et h sont considérés. [75]

Ensuite, chaque X_i individuel met à jour ses coordonnées en fonction du décomposeur X_n et via des paramètres prédéfinis : tels que D , e et h basés sur les équations suivantes :

$$X_i(t+1) = X_n(t) + D. (e.X_n(t) - h.X_i(t)), i = 1, \dots, n \quad (3.15)$$

$$D = 3u, \quad u \sim N(0,1) \quad (3.16)$$

$$e = r_3. randi(2i - 1) \quad (3.17)$$

$$h = 2.r_3 - 1 \quad (3.18)$$

Le processus d'optimisation dans AEO commence par une population d'individus dans laquelle générés aléatoirement dans l'espace de recherche, puis à chaque itération le premier individu (producteur) met à jour ses coordonnées en fonction de l'éq (3.7), tandis que d'autres candidats de la population tenteront donc de mettre à jour leurs coordonnées en fonction de leur propre meilleur consommateur en utilisant les équations (3.8, 3.9 et 3.10), sauf dans le cas de l'individu ayant la valeur de fitness la plus élevée, alors la position de cet individu sera mise à jour en utilisant l'équation (3.12). Enfin, la solution optimale ou quasi-optimale qui correspond à un meilleur individu trouvé jusqu'à présent est mémorisé. [75]

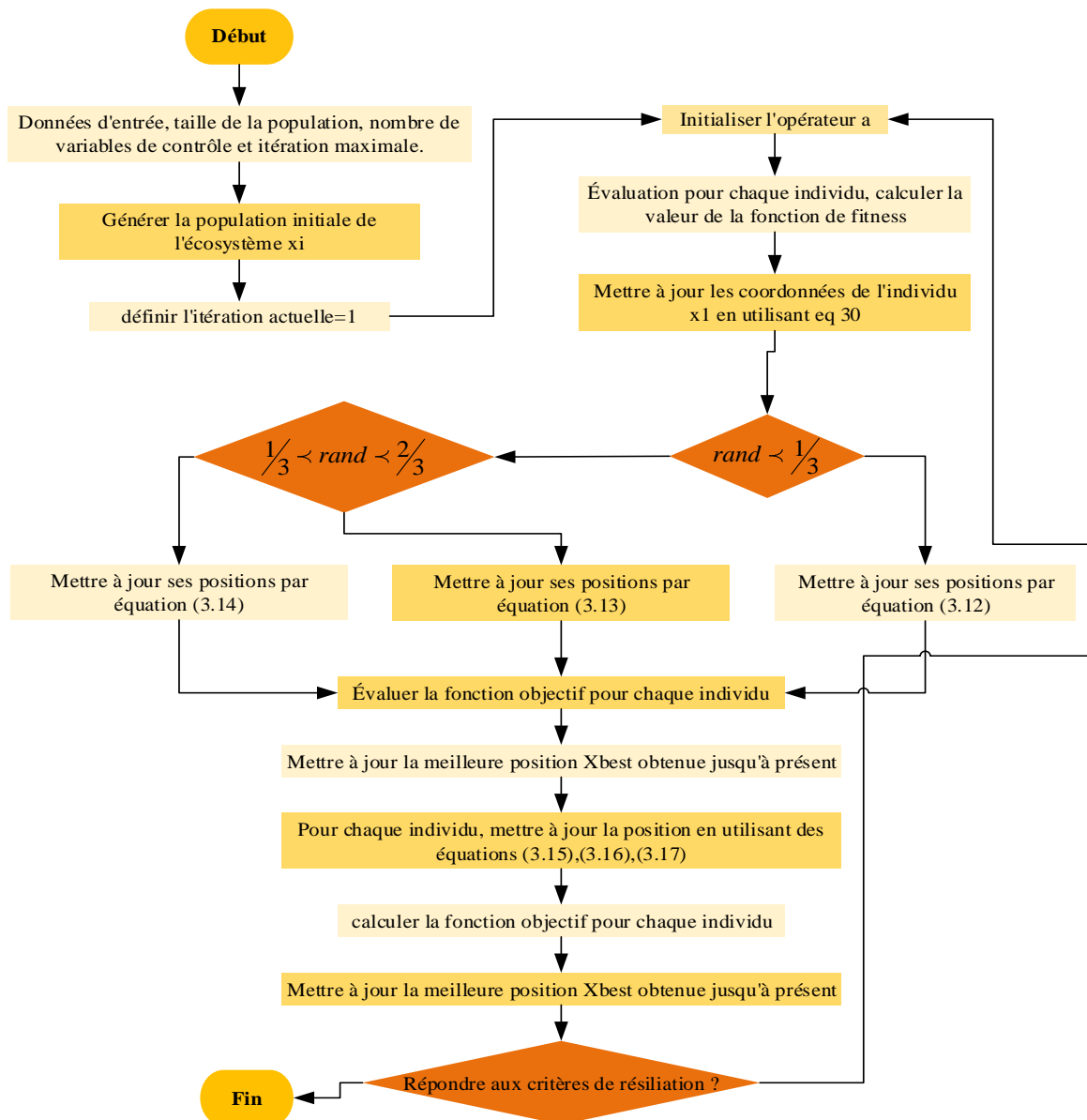


Figure 3.7. Organigramme de l'algorithme AEO [74]

III.4.4. Algorithme du cycle de l'eau (WCA)

L'algorithme du cycle de l'eau (WCA) est proposé pour la première fois par Hadi. Eskandar en 2012. [76] WCA est un nouvel algorithme métaheuristique qui imite le cycle de l'eau dans la nature pour résoudre efficacement les problèmes d'optimisation. [13] L'idée de WCA proposée est inspirée de la nature est basée sur l'observation du cycle de l'eau et de la façon dont les rivières et les ruisseaux descendent vers la mer dans le monde réel.

Pour mieux comprendre cela, une explication des bases de la création des rivières et de l'écoulement de l'eau jusqu'à la mer est donnée comme suit. Une rivière, ou un ruisseau, se forme lorsque l'eau se déplace vers le bas d'un endroit à un autre. La figure 3.8 est un schéma simplifié d'une partie du cycle hydrologique. L'eau des rivières et des lacs s'évapore, tandis que les plantes rejettent (transpirent) de l'eau pendant la photosynthèse.

L'eau évaporée est transportée dans l'atmosphère pour générer des nuages qui se condensent ensuite dans l'atmosphère plus froide, libérant l'eau vers la terre sous forme de pluie. Ce processus est appelé le cycle hydrologique (cycle de l'eau).[76]

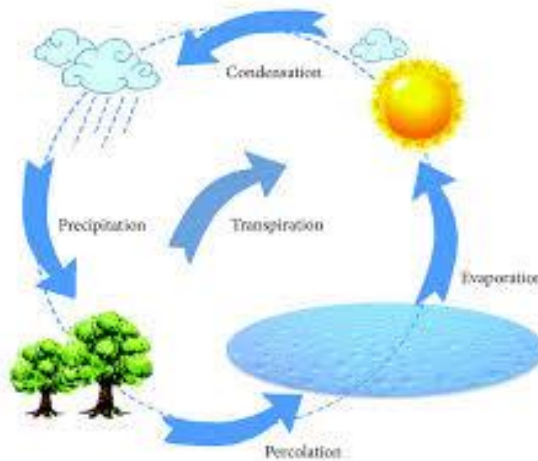


Figure 3.8. Schéma simplifié du cycle hydrologique (cycle de l'eau) [76]

Dans le monde réel, lorsque la neige fond et qu'il pleut, la plupart de l'eau entre dans l'aquifère. L'aquifère est parfois appelé eau souterraine (voir flèche de percolation sur la figure 3.6). L'eau de l'aquifère s'écoule ensuite sous la terre de la même manière que l'eau s'écoulerait à la surface du sol (vers le bas). L'eau souterraine peut être rejetée dans un ruisseau (marais ou lac).

L'eau s'évapore des ruisseaux et des rivières, en plus d'être transpirée des arbres et autres verdure, apportant ainsi plus de nuages et donc plus de pluie à mesure que ce cycle compte. [76]

III.4.4.1. Principe de l'algorithme du cycle de l'eau

Semblable à d'autres algorithmes métaheuristiques, la méthode proposée commence par une population initiale appelée les gouttes de pluie ‘raindrop’. Premièrement, nous supposons que nous avons de la pluie ou des précipitations. Le meilleur individu (la meilleure goutte de pluie) est choisi comme mer. Ensuite, un certain nombre de bonnes gouttes de pluie sont choisies comme rivière et le reste des gouttes de pluie sont considérées comme des ruisseaux qui coulent vers les rivières et la mer.[13]

Initialisation

Étape 1 : Pour résoudre un problème d'optimisation, il est essentiel que les valeurs des variables du problème puissent être formées dans une matrice.

$$\text{Raindrop} = [x_1, x_2, x_3, \dots, x_N] \tag{3.19}$$

Où $x_1, x_2, x_3, \dots, x_N$ montre le nombre de variables de la fonction objectif. Pour lancer l'algorithme d'optimisation, il est indispensable de générer une matrice de gouttes de pluie de taille $N_{pop} \times N_{var}$.

L'équation (3.20) est utilisée pour générer de manière aléatoire les valeurs des gouttes de pluie pour la matrice de population donnée dans l'équation. (3.21).

$$\text{Population of Raindrops} = LB + (UB - LB) \times \text{rand}(1, N_{var}) \tag{3.20}$$

Étape 2 : la matrice X qui est générée de manière aléatoire est donnée par (les lignes et les colonnes sont respectivement le nombre de population et le nombre de variables de conception) :[62]

$$\text{Population of raindrops:} \begin{bmatrix} \text{Raindrop1} \\ \text{Raindrop2} \\ \dots \dots \dots \dots \\ \text{Raindrop } N_{pop} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^1 & x^1_2 & x^1_3 & \dots & x^1_{N_{var}} \\ x^2_1 & x^2_2 & x^2_3 & \dots & x^2_{N_{var}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ x^{N_{pop}}_1 & x^{N_{pop}}_2 & x^{N_{pop}}_3 & \dots & x^{N_{pop}}_{N_{var}} \end{bmatrix} \tag{3.21}$$

Étape 3 : Dans cette étape, la WCA détermine la valeur de la fonction de coût pour chaque flux dans la matrice de population initiale en utilisant l'équation (3.21).

$$c_i = \text{cost}_i = f(X^i_1, X^i_2, \dots, X^i_{N_{sr}}) \quad \text{Où} \quad i = 1, 2, 3, \dots, N_{pop} \tag{3.22}$$

Où N_{pop} et N_{var} sont respectivement le nombre de gouttes de pluie (population initiale) et le nombre de variables de conception.

Un certain nombre de N_{sr} parmi les meilleurs individus (valeurs minimales) sont sélectionnés comme la mer et les rivières. La goutte de pluie qui a la valeur minimale considéré comme une mer.

En fait, N_{sr} est la somme du nombre de rivières (qui est un paramètre utilisateur) et une seule mer comme indiqué dans l'équation. (3.23).

$$N_{sr} = \text{Nombre de Rivière} + 1, 1 \text{ est la mer.} \quad (3.23)$$

Le reste de la population (les gouttes de pluie forment les ruisseaux qui s'écoulent vers les rivières ou peuvent s'écouler directement vers la mer) est calculé à l'aide de l'équation. (3.24).

$$N_{Raindrops} = N_{pop} - N_{sr} \quad (3.24)$$

Étape 4 : Afin de désigner l'intensité du débit des rivières et de la mer en utilisant :

$$NS_n = \text{round} \left\{ \left| \frac{\cos t_n - \cos t_{N_{sr}}}{\sum_{n=1}^{N_{sr}} C_n} \right| \times N_{streams} \right\}, n = 1, 2, \dots, N_{sr} \quad (3.25)$$

Où NS_n est le nombre de cours d'eau qui coulent vers les rivières spécifiques ou la mer.

Étape 5 : Les ruisseaux se jettent dans les rivières par :

Avec C est une valeur comprise entre 1 et 2 (proche de 2)

$$X_{Stream}(t+1) = X_{Stream}(t) + \text{rand} \times C \times (X_{River}(t) - X_{Stream}(t)) \quad (3.26)$$

Étape 6 : Les rivières se jettent dans la mer qui est l'endroit le plus en pente en utilisant :

$$X_{River}(t+1) = X_{River}(t) + \text{rand} \times C \times (X_{Sea}(t) - X_{River}(t)) \quad (3.27)$$

Étape 7 : Échangez les positions de rivière avec un ruisseau qui donne la meilleure solution.

Étape 8 : Similaire à l'étape 7, si une rivière trouve une meilleure solution que la mer, la position de la rivière est échangée avec la mer.

Étape 9 : Vérifiez les conditions d'évaporation en utilisant :

$$|X_{Sea}^i - X_{River}^i| < d_{max} \quad i=1,2,\dots,N_{sr} - 1 \quad (3.28)$$

Où d_{max} est un petit nombre proche de zéro.

Une petite valeur de d_{max} incite à rechercher la mer à proximité. d_{max} Contrôle l'intensité de la recherche à proximité de la mer (solution optimale). Par conséquent, la valeur d_{max} diminue de manière adaptative par Eq. (3.29).

$$d_{max}^{i+1} = d_{max}^i - \frac{d_{max}^i}{\max \text{ iteration}} \quad (3.29)$$

Étape 10 :

Si la condition d'évaporation est satisfaite, le processus de pluie se produira en utilisant :

Dans le processus de pluie, les nouvelles gouttes de pluie forment des flux dans les différents emplacements, pour spécifier les nouveaux emplacements des flux nouvellement formés, l'équation suivante est utilisée :

$$X_{stream}^{nex} = LB + rand \times (UB - LB) \quad (3.30)$$

L'équation (3.31) vise à encourager la génération de cours d'eau qui s'écoulent directement vers la mer afin d'améliorer l'exploration près de la mer (la solution optimale) dans la région réalisable pour les problèmes contraints.

$$X_{stream}^{nex} = X_{Sea} + \sqrt{\mu} \times randn(1, N_{var}) \quad (3.31)$$

μ est un facteur qui indique la portée de la zone de recherche près de la mer. D'un point de vue mathématique, le terme $\sqrt{\mu}$ dans l'équation (3.31) représente la déviation standard par conséquent, μ définit le concept de variance. Une valeur appropriée pour μ est fixée à 0,1.

Étape 11 : Vérifiez les critères de convergence. Si max_iter est atteint, arrêtez l'algorithme, si non retournez à l'étape 5. Pour l'algorithme WCMFO proposée, la convergence est donnée par :

$$a = 1 + current - iter. \left(\frac{-1}{\max.iter.} \right) \quad (3.32)$$

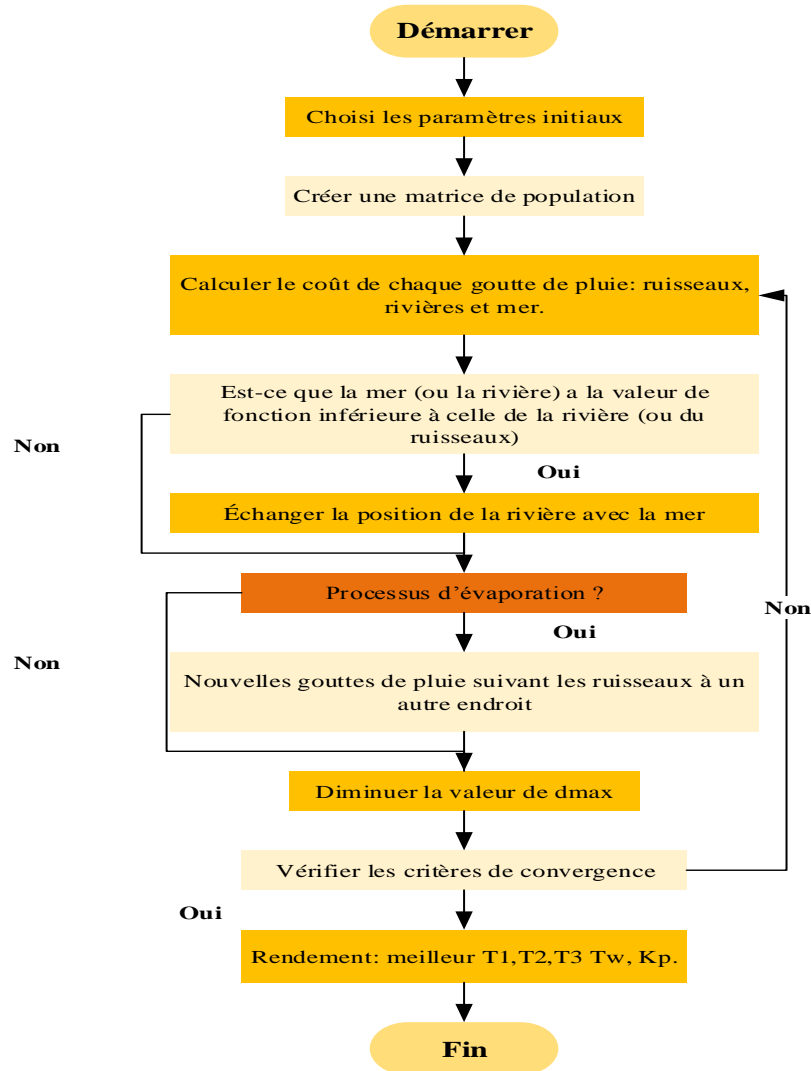


Figure 3.9. Organigramme de WCA [13]

III.4.5. Algorithme d'optimisation de la flamme de papillon (MFO)

Les mites sont des insectes de fantaisie, qui ressemblent beaucoup à la famille des papillons. Fondamentalement, il existe plus de 160 000 espèces différentes de cet insecte dans la nature.

Ils ont deux étapes principales dans leur vie : les larves et les adultes. Les larves sont transformées en mites par les cocons. Le fait le plus intéressant à propos des papillons de nuit est leurs méthodes de navigation spéciales la nuit. Ils ont été évolués pour voler la nuit au clair de lune. Ils ont utilisé un mécanisme appelé transversal orientation pour la navigation. Dans cette méthode, un papillon vole en maintenant un angle fixe par rapport à la lune, un mécanisme très efficace pour parcourir de longues distances en ligne droite. La figure 3.10 montre un modèle conceptuel

d'orientation transversale. La lune étant éloignée du papillon de nuit, ce mécanisme garantit un vol en ligne droite [77].

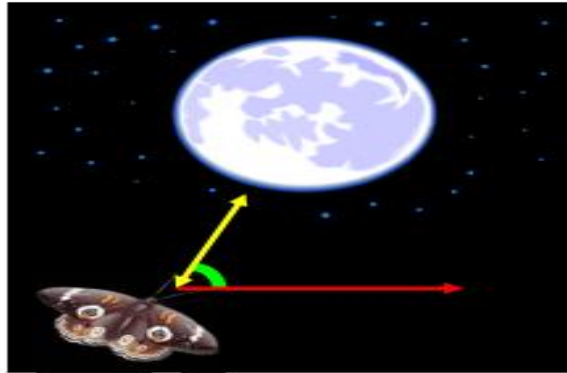


Figure.3.10. Orientation transversale [77]

Malgré l'efficacité de l'orientation transversale, on observe généralement que les papillons volent en spirale autour des lumières. En fait, les papillons de nuit sont trompés par les lumières artificielles et montrent de tels comportements. Cela est dû à l'inefficacité de l'orientation transversale, dans laquelle elle n'est utile pour se déplacer en ligne droite que lorsque la source lumineuse est très éloignée. Lorsque les papillons voient une lumière artificielle fabriquée par l'homme, ils essaient de maintenir un angle similaire avec la lumière pour voler en ligne droite. Étant donné qu'une telle lumière est extrêmement proche par rapport à la lune, le maintien d'un angle similaire par rapport à la source lumineuse provoque un chemin de vol en spirale inutile ou mortel pour les mites. Un modèle conceptuel de ce comportement est illustré à la figure 3.11.



Figure.3.11. Trajectoire de vol en spirale autour de sources lumineuses proches [78]

1. Génération de la population initiale de papillons :

Dans l'algorithme MFO proposé, nous supposons que les solutions candidates sont des mites et que les variables du problème sont la position des mites dans l'espace. Par conséquent, les papillons peuvent voler dans un espace 1D, 2D, 3D ou hyper dimensionnel en modifiant leurs vecteurs de position. Étant donné que l'algorithme MFO est un algorithme basé sur la population, nous représentons l'ensemble des papillons dans une matrice comme suit :[47]

$$M = \begin{bmatrix} m_{1,1} & m_{1,2} & m_{1,3} & \dots & \dots & m_{1,d} \\ m_{2,1} & m_{2,2} & m_{2,3} & \dots & \dots & m_{2,d} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ m_{n,1} & m_{n,2} & m_{n,3} & \dots & \dots & m_{n,d} \end{bmatrix} \quad (3.33)$$

Où n est le nombre de papillons et d est le nombre de variables (dimension).

Pour tous les papillons, nous supposons également qu'il existe un tableau pour stocker les valeurs de fitness correspondantes comme suit :

$$OM = \begin{bmatrix} OM_1 \\ OM_2 \\ \vdots \\ OM_n \end{bmatrix} \quad (3.34)$$

Où n est le nombre de papillons.

Notez que la valeur de fitness est la valeur de retour de la fonction de fitness (objectif) pour chaque papillon. Le vecteur de position (première ligne de la matrice M par exemple) de chaque papillon est transmis à la fonction de fitness et la sortie de la fonction de fitness est affectée au papillon correspondant en tant que fonction de fitness (OM_1 dans la matrice OM par exemple). Les flammes sont d'autres composants clés de l'algorithme proposé. Nous considérons qu'une matrice similaire à la matrice des papillons est la suivante :

$$F = \begin{bmatrix} F_{1,1} & F_{1,2} & \dots & \dots & F_{1,d} \\ F_{2,1} & F_{2,2} & \dots & \dots & F_{2,d} \\ \vdots & \vdots & \dots & \dots & \vdots \\ F_{n,1} & F_{n,2} & \dots & \dots & F_{n,d} \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Où n est le nombre de papillons et d est le nombre de variables (dimension).

$$OF = \begin{bmatrix} OF_1 \\ OF_2 \\ \vdots \\ OF_n \end{bmatrix} \quad (3.36)$$

Les mites sont de véritables agents de recherche qui se déplacent dans l'espace de recherche, tandis que les flammes sont la meilleure position des mites qui obtient jusqu'à présent. En d'autres termes, les flammes peuvent être considérées comme des drapeaux ou des épingles laissés par les mites lors de la recherche dans l'espace de recherche. Par conséquent, chaque papillon cherche autour d'un drapeau (flamme) et le met à jour en cas de recherche d'une meilleure solution. Avec ce mécanisme, un papillon ne perd jamais sa meilleure solution. [78]

2. Mise à jour des positions des papillons :

MFO utilise trois fonctions différentes pour faire converger l'optimal global des problèmes d'optimisation. Ces fonctions sont définies comme suit : [77]

MFO= (I, P, T)

Où I fait référence aux premiers emplacements aléatoires des papillons ($I: \emptyset \rightarrow \{M, OM\}$)

P fait référence au mouvement des papillons dans l'espace de recherche ($P: M \rightarrow M$), et T fait référence à la fin du processus de recherche ($T: M \rightarrow true, false$) L'équation suivante représente la fonction I, qui est utilisée pour implémenter la distribution aléatoire.

$$M(i, j) = (ub(i) - lb(j) * rand + lb(i)) \quad (3.37)$$

Où lb et ub indiquent les bornes inférieures et supérieure de variables, respectivement. Comme mentionné précédemment, les papillons volent dans l'espace de recherche en utilisant l'orientation transversale. Il y a trois conditions qui doivent respecter lors de l'utilisation d'une spirale logarithmique soumise, comme suit :

- Le point initial de la spirale devrait commencer à partir du papillon.
- Le point final de la spirale devrait être la position de la flamme.
- La fluctuation de la plage de la spirale ne doit pas dépasser l'espace de recherche.

Par conséquent, la spirale logarithmique de l'algorithme MFO peut être définie comme suit :

$$S(M_i, F_j) = D_i e^{bt} \cdot \cos(2\pi t) + F_j \quad (3.38)$$

Où D_i fait référence à l'espace entre le $i^{\text{-ème}}$ papillon et la $j^{\text{-ème}}$ flamme (*i.e.*, $D_i = |F_i - M_j|$) b indique un repère pour définir la forme de la spirale logarithmique, et t indique un nombre aléatoire entre [-1, 1].

Dans MFO, l'équilibre entre l'exploitation et l'exploration est garanti par le mouvement en spirale du papillon près de la flamme dans l'espace de recherche. Aussi, pour éviter de tomber dans les pièges des optima locaux, les solutions optimales ont été conservées à chaque répétition, et les papillons volent autour des flammes (c'est-à-dire que chaque papillon vole autour de la flamme la plus proche) en utilisant les matrices OM.

3. Mise à jour du nombre de flammes

Cette section met en évidence l'amélioration de l'exploitation de l'algorithme MFO. Par conséquent, la diminution du nombre de flammes aide à résoudre ce problème sur la base de l'équation suivante :[77]

$$flame\ no = round(N - l * \frac{N-l}{T}) \quad (3.39)$$

Où N est le nombre maximum de flammes, l est le courant nombre d'itérations, et T indique le nombre maximum d'itérations.

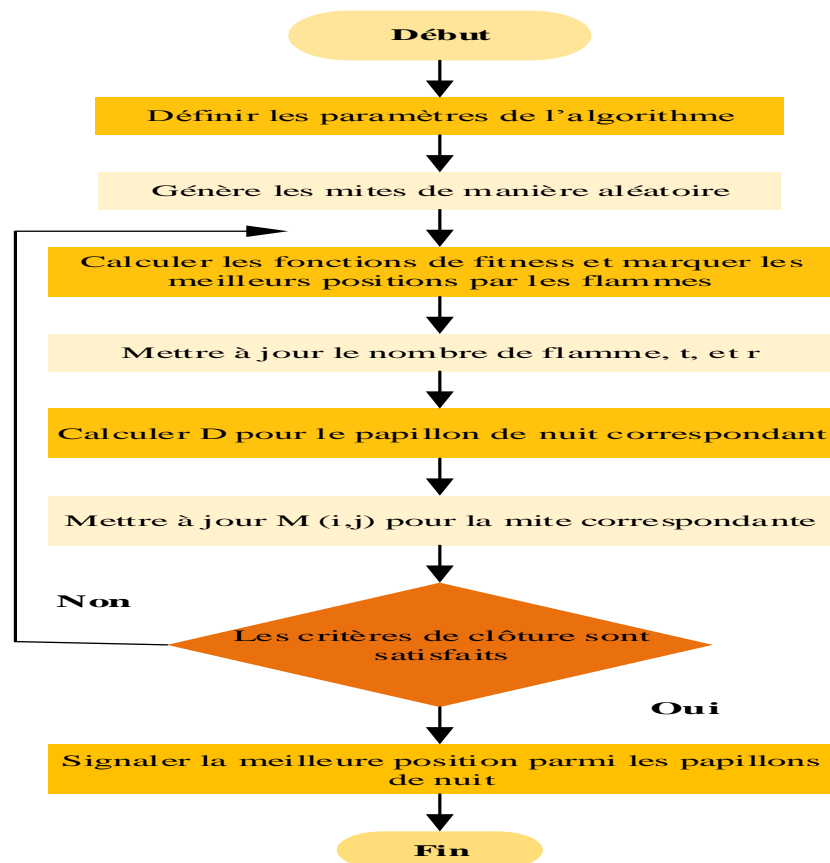


Figure 3.12. Organigramme de l'algorithme MFO [78]

III.5. Métaheuristiques hybrides

III.5.1. Historique

Comme illustré précédemment, de nombreux algorithmes métaheuristiques sont proposés pour résoudre les problèmes complexes d'aujourd'hui. [79] Bien qu'ils puissent obtenir des solutions prometteuses pour les problèmes d'optimisation, ils sont souvent piégés dans des optima locaux lorsque le problème est complexe et a plusieurs optima locaux. [80] Le développement d'algorithmes métaheuristiques hybrides peut améliorer considérablement ce problème. La plupart du temps, les algorithmes métaheuristiques hybrides sont robustes et efficaces par rapport aux versions de base, car ils peuvent bénéficier des avantages de différents algorithmes métaheuristiques. [31] Les méthodes hybrides les plus populaires sont ‘ ‘ hybrid Cultural-trajectory-based search [31], hybrid harmony search-cuckoo (HS/CS) algorithm [81], Hybrid Bat Algorithm with Harmony Search (BHS) [82], hybrid algorithm based on Water Cycle and Moth-Flame Optimization algorithms (WCMFO) [83]’ ’.

III.5.2. Définition

Une méthode hybride est une méthode de recherche constituée au moins de deux méthodes de recherche distinctes. Elle consiste à exploiter les avantages respectifs de plusieurs méthodes en combinant leurs algorithmes suivant une approche synergétique. [84] Une méthode hybride peut être mauvaise ou bonne selon le choix et les rôles de ses composants. Pour définir une méthode hybride efficace, il faut savoir caractériser les avantages et les limites de chaque méthode. [84] Actuellement, les approches hybrides gagnent en popularité car ce type d'algorithme produit généralement les meilleurs résultats pour plusieurs problèmes d'optimisation. [85]

Le développement et l'application des métaheuristiques hybrides est de plus en plus susciter l'intérêt académique, ces les méthodes hybrides combiner différents concepts ou des composants de divers métaheuristiques, ils tentent de fusionner les points forts et éliminent la faiblesse des différents concepts de métaheuristiques. Par conséquent, l'efficacité de l'espace de solution rechercher peut-être encore améliorée et de nouvelles opportunités émergées ce qui peut conduire à des méthodes de recherche encore plus puissante et plus flexible. [86]

III.5.3. Motivation de l'hybridation

Malgré le succès des métaheuristiques pour résoudre les problèmes complexes, plusieurs problèmes ont été rencontrés, à savoir : [87]

- La présence de bruit lors de l'évaluation des solutions.
- La distinction entre une solution optimale locale et une autre globale est parfois difficile à percevoir.
- Le problème de la convergence prématurée.
- Le problème d'ajustement des paramètres.

L'hybridation a permis d'avoir un compromis entre l'exploration et l'exploitation de l'espace de recherche des solutions. Pour avoir une bonne exploitation, un algorithme est utilisé pour localiser les meilleures régions de l'espace de recherche, un autre est utilisé pour converger vers l'optimum global. L'hybridation est utilisée aussi pour optimiser les paramètres généraux [85]. On peut conclure que l'hybridation de métaheuristiques est la voie la plus prometteuse pour l'amélioration de la qualité des solutions dans beaucoup d'applications réelles. Ainsi, le choix d'une approche hybride devient aujourd'hui déterminant pour obtenir de meilleures performances lors de la résolution des problèmes complexes. [88] Les algorithmes hybrides peuvent être divisés en deux catégories:

✓ **Hybridation à usage unique:**

Dans cette catégorie, tous les sous-algorithmes sont utilisés pour résoudre directement le même problème, en outre, différents sous algorithmes sont utilisés dans différentes étapes de recherche. Les algorithmes méta-heuristiques hybrides avec recherche locale sont un exemple typique. La recherche globale explore l'espace de recherche, tandis que la recherche locale est utilisée pour affiner les zones qui peuvent contenir l'optimum global. [88]

✓ **Hybridation à usages multiples:**

Dans cette catégorie, un algorithme principal est utilisé pour résoudre le problème, tandis que le sous algorithme est appliqué pour régler les paramètres de l'algorithme principal. [87]

III.5.4. Challenges des algorithmes hybrides

Bien que les algorithmes hybrides offrent fondamentalement un grand avantage d'augmenter la diversité dans une population et donc d'améliorer la capacité de recherche de l'algorithme hybride développé, certains inconvénients existent, Ces inconvénients sont décrits comme suit :[88]

✓ *Convention de dénomination*

L'inclusion d'un algorithme dans un autre entraîne généralement un problème de dénomination.

Certains chercheurs adoptent des noms très différents pour leurs algorithmes hybrides comme exemple, l'algorithme GA-API [89] est un acronyme pour l'hybridation de " Hybrid Ant Colony-Genetic Algorithm ", ce qui est un peu déroutant pour d'autres chercheurs. Par ailleurs, un nom hybride tel que HPSOBFGS [90] semble être une abréviation fastidieuse, plus difficile à lire

✓ *Complexité de l'algorithme hybride*

En termes d'architecture d'algorithmes, le processus d'hybridation crée généralement des composants supplémentaires dans l'architecture globale de l'algorithme hybride. Cela augmente la complexité de l'algorithme hybride.[90] En raison d'une structure plus complexe, les algorithmes hybrides ont une certaine résistance à être acceptés par les chercheurs.[83]

✓ *Vitesse de calcul*

Dans de nombreux travaux de recherches, les algorithmes hybrides semblent améliorer les résultats en matière de vitesse de convergence globale et de précision. Cependant, ces résultats de convergence sont souvent évalués par rapport au nombre d'itérations.[87] Cela signifie simplement que la convergence plus rapide ne signifie pas le taux de convergence réel, car l'algorithme hybride utilise un plus grand nombre d'itérations (internes ou implicites). Pour éviter ce problème, le temps d'exécution final est considéré comme un facteur important et il doit être utilisé comme métrique lors de la comparaison d'un algorithme hybride avec des algorithmes non hybrides. [88] Il existe d'autres problèmes concernant les algorithmes hybrides. Par exemple, la plupart des algorithmes hybrides augmenteront le nombre de paramètres dans les algorithmes, rendant ainsi plus difficile le réglage de leurs paramètres. [91]

De plus, l'analyse est une tâche difficile pour un schéma compliqué d'un algorithme hybride et ne permet donc pas de comprendre les raisons pour lesquelles ces algorithmes hybrides fonctionnent. En outre, les algorithmes hybrides sont légèrement plus difficiles à mettre en œuvre. Ainsi, il faut être prudent lors de l'interprétation des résultats d'algorithmes hybrides. [92] Le tableau 3.2 illustre les méthodes hybrides les plus populaires.

Tableau 3.2. Les méthodes hybrides les plus populaires.

Méthodes Hybrides	Auteurs	Année
Hybrid Whole Optimization Algorithm with Simulated Annealing (WOASA)	Majid.M. Mafarja, Seyedali Mirjalili	2017
A Heuristic Particle Swarm Ant Colony Optimization Algorithm (HPSACO)	A. Kaveh, S. Talatahani	2009
Hybrid Multi-Population Algorithm (HMPA) Based on (AEO- HHO)	Saeid Barchandeh, Farhad Piri, Simin Rasooli Sangani	2020
Big Bang- Big Crunch Algorithm (BB-BC)	Erol and Eksin	2006
Hybrid Bat Algorithm with Harmony Search (BHS)	Wang and Guo	2013
Hybrid Harmony Search- Cuckoo Search algorithm (HS/CS)	Wang et al.	2016
Hybrid Water Cycle -Moth Flame Optimization algorithms (WCMFO)	Soheyl Khalilpourazari Saman Khalilpourazary	2019

Conclusion

Les méthodes méta-heuristiques sont des techniques de résolution de problèmes qui ont prouvé leur efficacité dans une grande variété de domaines, tels que l'optimisation, l'apprentissage automatique et la recherche opérationnelle. Leur grande flexibilité et leur capacité à trouver des solutions de qualité acceptable en un temps raisonnable les rendent particulièrement utiles dans les situations où les connaissances expertes sont limitées ou le temps de calcul est restreint.

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques méthodes d'optimisation en s'appuyant sur leurs caractéristiques principales, les notions de base des méthodes métaheuristiques simples et hybrides, ainsi que les approches utilisées dans la résolution du problème de cette étude.

Chapitre 4

Applications et résultats

Introduction

Après avoir abordé tous les points relatifs à notre travail de recherche, nous arrivons actuellement à appliquer ces notions théoriques dont le but d'assurer la stabilité du réseau électrique en cas d'une contingence. Des nouvelles techniques d'optimisation ont été adoptés pour atteindre l'objectif souhait. Ce chapitre est subdivisé en trois parties qui sont représentés comme suit :

- ✓ La première partie est une application sous le logiciel PSAT, pour déterminer le (TCID) en cas d'un court-circuit triphasé et d'analysé l'influence de l'intégration des sources PV sur la stabilité du réseau (Réseau test IEEE 30JB).
- ✓ La deuxième partie représente notre modeste contribution à l'amélioration de la stabilité transitoire, en fournissant les paramètres de réglage optimaux des trois systèmes de contrôle (PSS ; PSS-PID ; PSS-FOPID), en utilisant une nouvelle méthode hybride.
- ✓ La troisième partie, se penche sur l'optimisation des paramètres du PSS, en utilisant le WCA visant à l'amélioration de la stabilité du système électrique.

La deuxième et la troisième étude ont été appliquées sur le réseau test SMIB, sous l'environnement MATLAB/SIMULINK.

IV.1. L'amélioration de la stabilité transitoire du système électrique avec une large pénétration du solaire photovoltaïque à l'aide des systèmes FACTS

IV.1.1. L'environnement de simulation

Plusieurs outils de simulation ont été utilisés pour analyser la stabilité des réseaux électriques tels que : (MATLAB, Power World, PSAT, ...etc). Dans cette étude, l'analyse de simulation a été établie dans le célèbre système de test IEEE 30 nœuds à l'aide du PSAT/ MATLAB. Le PSAT (power system analyses toolbox), est une boîte à outils qui s'exécute sous environnement Matlab. C'est un logiciel développé par Dr. Federico Milano de l'université de la Castille-La Mancha, Spain en 2003, depuis cette date plusieurs versions sont apparus, j'ai exploité dans mon présent mémoire la version 2.1.8 datée en 6 JANVIER 2013 dont la page principale est illustrée dans la figure 4.1: [93]

- Le PSAT combine des fonctions traditionnelles de test statistique et de visualisation de données que l'on ne trouve généralement que dans des logiciels spécialisés.

- Le PSAT est compatible avec les bases de données de la plupart des logiciels d'analyse du réseaux électriques.
- Le PSAT est un logiciel " Open Source" qui permet des modifications selon les besoins de l'étude.

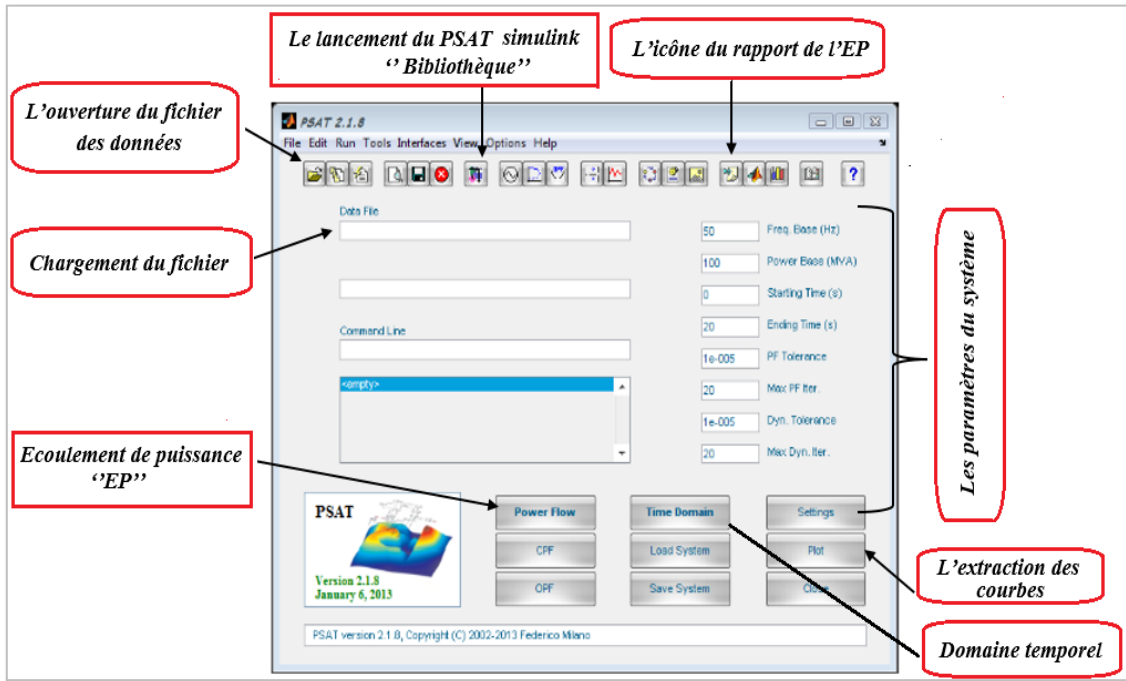


Figure.4.1. La fenêtre d'accueil du PSAT

IV.1.2. Principe de l'étude

Une étude comparative a été réalisée sur les valeurs du temps critique d'isolement de défaut correspondant à chaque simulation. Cette étude est divisée en trois parties:

Partie 1: Etat initial

- La création d'un défaut sur un jeu de barre "i", sauf le jeu de barre de référence.
- Le calcul du temps critique d'isolement de défaut avec la méthode de la valeur singulière minimale, afin d'identifier le JB le plus sensible en présence du défaut.

La même étude sera réalisée pour tous les JB sélectionnés.

Partie 2 : l'intégration des panneaux solaire photovoltaïque

Partie 3 : l'amélioration de la stabilité transitoire à l'aide des systèmes FACTS " SVC STATCOM et L'UPFC".

le concept fondamentale de cette étude est illustrée comme un schéma dans la figure 4.2.

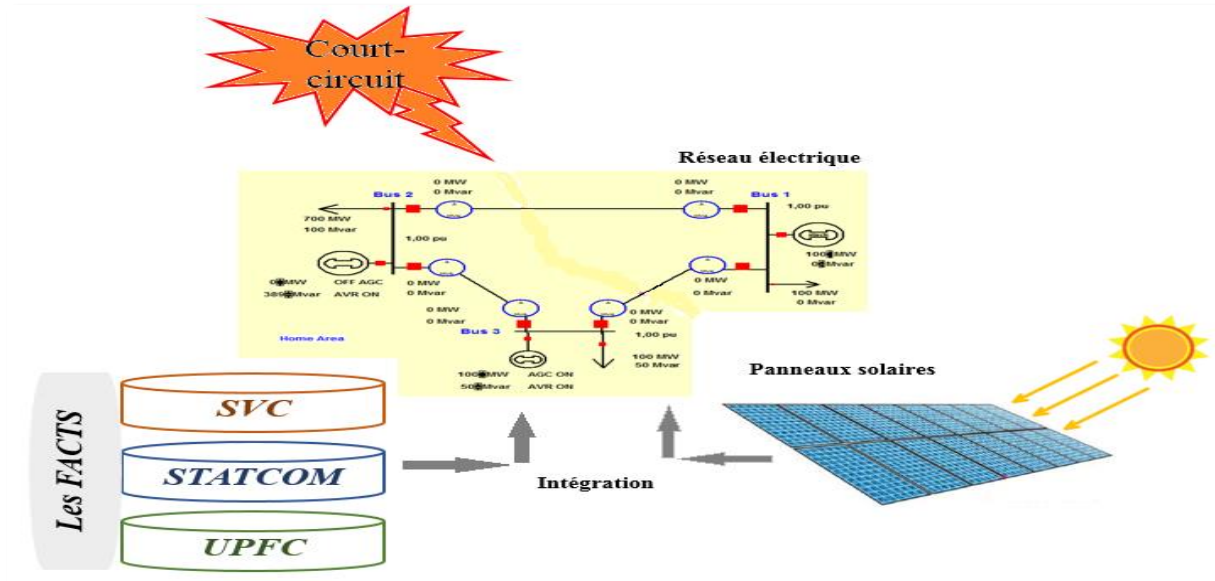


Figure.4.2. Schéma illustratif de cette étude

IV.1.3. Modèle d'étude (réseau test)

C'est le réseau test IEEE 30 JB qui représente une partie du système de puissance électrique américain (Midwestern US) Décembre 1961. Le choix de ce modèle de réseau est dû à ses applications abondantes dans les travaux de recherches relatives aux réseaux électriques, ce qui nous donnera par la suite l'opportunité d'établir des comparaisons des résultats avec des travaux similaires. [94] Afin d'analyser ce réseau électrique, nous devons implanter ce modèle du réseau sous le logiciel PSAT, ce qu'est représenté dans la figure 4.3 :

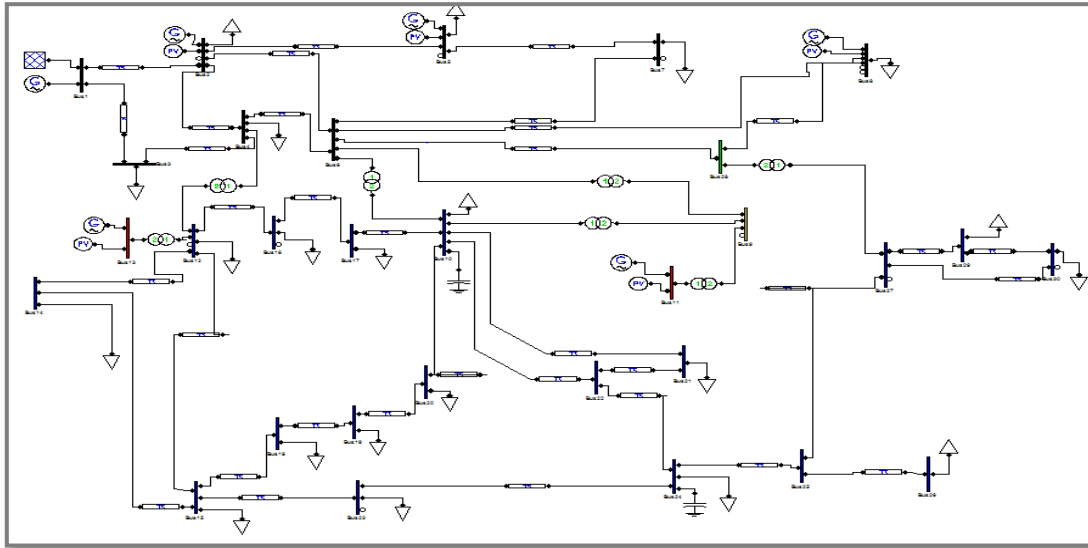


Figure.4.3. Modèle d'un réseau IEEE 30JB sous PSAT

Tableau.4.1 : Données techniques du modèle d'étude

Nombre de JB	Nombre de charges	Nombre de générateurs	Nombre de transformateurs	Nombre de lignes de transmissions
30	21	6	7	33

Tableau.4.2 : Données totales du générateur

Rapport de synthèse global	Puissance active [p.u]	Puissance réactive [p.u]
Génération totale	2.9557	1.2068
Charge totale	2.834	1.0133
Pertes totales	0.12165	0.19353

IV.1.4. Résultats de simulation

a. Analyse de l'état stable (avant de créer la valeur par défaut)

L'analyse en régime permanent du réseau électrique ne représente aucune anomalie, la figure 4.4 montre que les valeurs de tension à tous les JB sont dans leurs limites acceptables (0,90 p.u à 1,1 p.u).

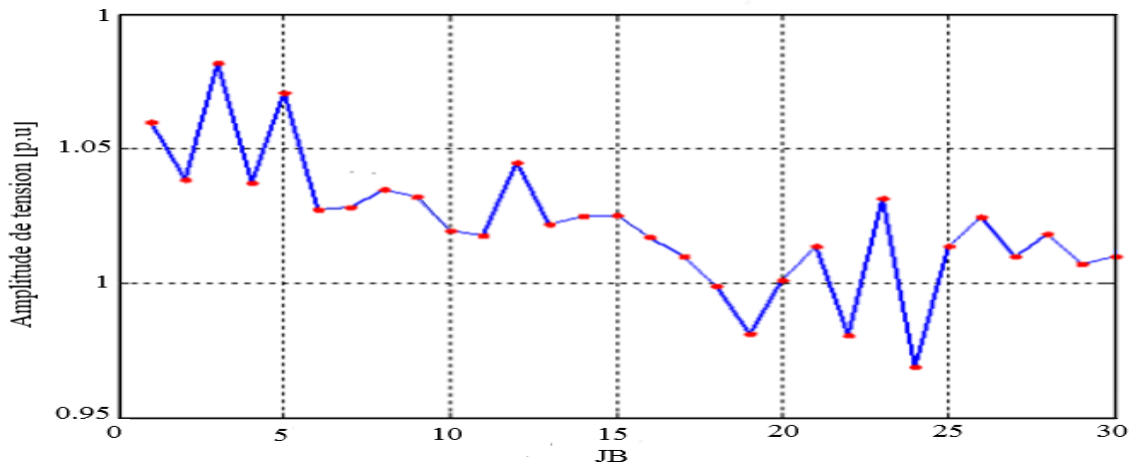


Figure.4.4. Profil de tension

b. État initial

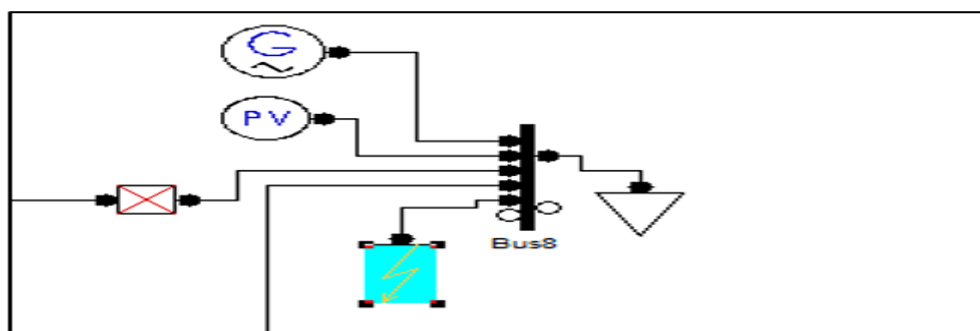


Figure.4.5. Emplacement du défaut sur le JB 8

T : Le temps critique d'isolement de défaut (TCID)

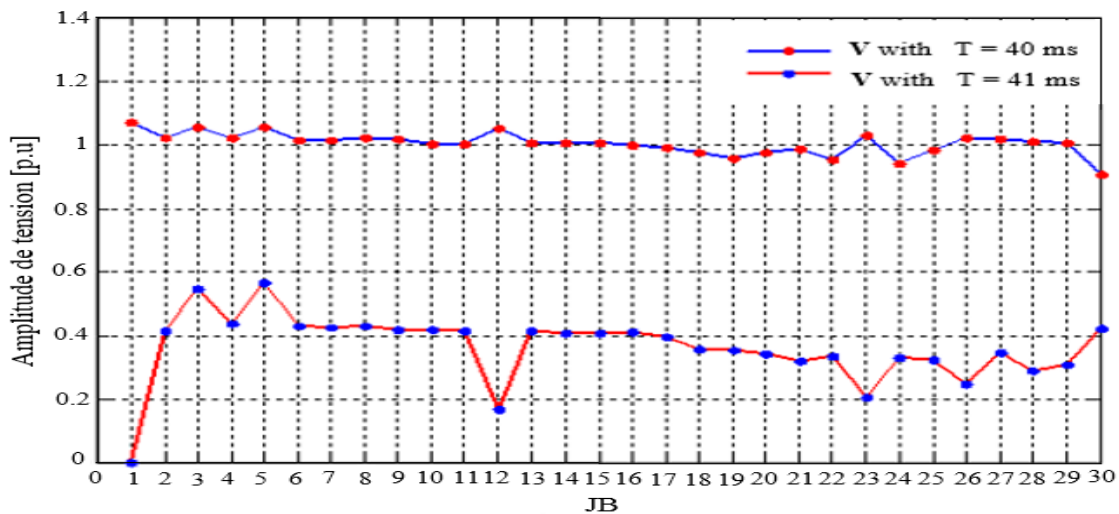


Figure.4.6. Profil de tension en présence d'un défaut sur le JB 12

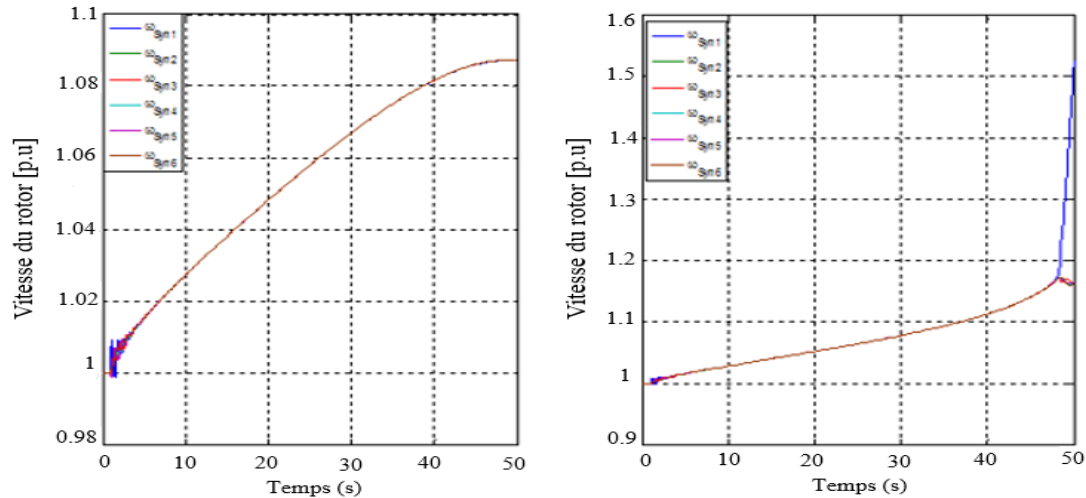


Figure.4.7. La vitesse du rotor

T= 40 (ms)

T= 41 (ms)

Selon la figure 4.7, nous pouvons constater que le défi de seulement 1 (ms) de plus du temps critique (TCID) peut provoquer l'instabilité du système.

L'étude réalisée sur le JB 8 se fera de la même manière pour tous les JB sélectionnés. Les résultats sont présentés dans le tableau 4.3.

Tableau.4.3. Le temps critique d'isolement de défaut pour différents emplacements de défaut

	JB 2	JB 4	JB 5	JB 8	JB 12	JB 17	JB 18	JB 27
CCT	15	19	20	40	20	48	30	20

D'après le tableau 4.3, on constate que le temps critique varie d'un JB à l'autre ; cela est dû à la capacité de chaque JB à supporter le défaut.

c. Pénétration de l'énergie solaire photovoltaïque (PV)

Les sources d'énergie renouvelables, telles que les systèmes photovoltaïques (PV), les éoliennes et les piles à combustible, sont intégrées dans les systèmes électriques classiques afin de remédier à la déficience en combustibles fossiles, à l'intensification de la demande énergétique et à la pollution de l'environnement. Parmi tous les types de ressources d'énergie renouvelable, le solaire photovoltaïque fait l'objet d'une attention particulière en raison de ses ressources énergétiques prometteuses et de son faible coût d'installation. Le système de fonctionnement fondamental du solaire photovoltaïque diffère des autres systèmes de production. Il convertit la

lumière du soleil en courant continu à l'aide de cellules solaires à semi-conducteurs. Le courant continu est ensuite converti en courant alternatif via un convertisseur DC-AC [95]. Le niveau de pénétration du PV est défini entre le rapport de la production totale du PV et la production totale du système, comme l'indique l'équation suivante :

$$Pénétration\ PV\ (\%) = \frac{\text{production totale du PV}}{\text{production totale du système}} \quad (4.1)$$

Un défaut a été considéré au niveau du JB 18 avec l'intégration d'une centrale photovoltaïque. PV. La puissance injectée par la centrale solaire PV dans le réseau électrique est d'environ de 50MW.

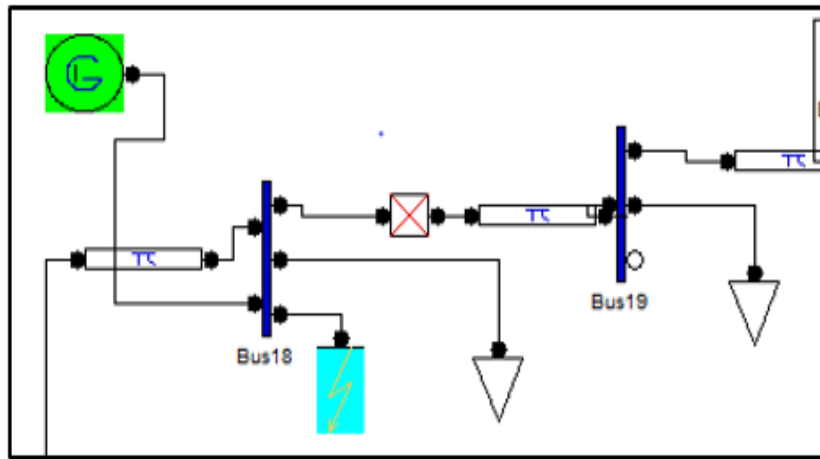


Figure.4.8. Pénétration d'un PV solaire avec présence du défaut au JB 18

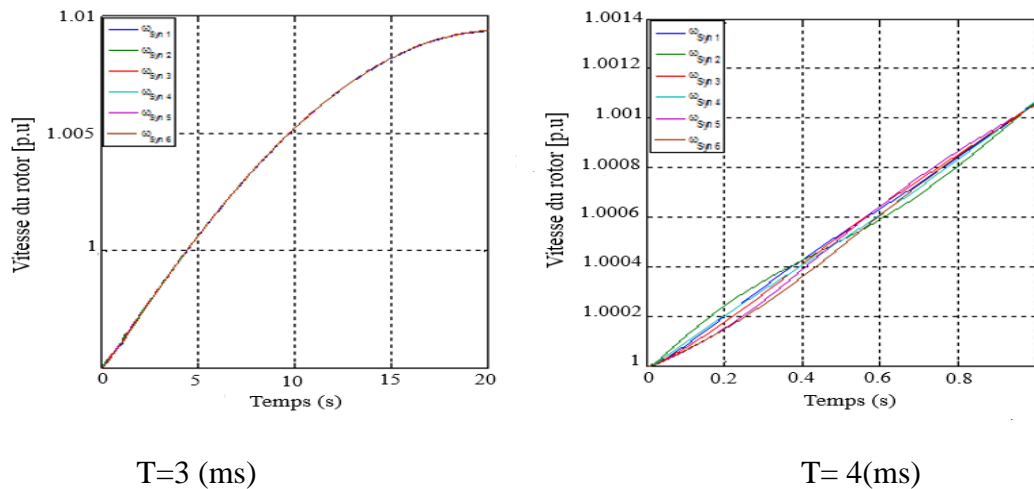


Figure.4.9. Vitesses des rotors correspondant

Une diminution est observée dans les Figures 4.9 et 4.10 lorsque le PV solaire est connecté au réseau électrique. On peut distinguer que la variation de seulement 1 (ms) peut provoquer l'instabilité du réseau électrique.

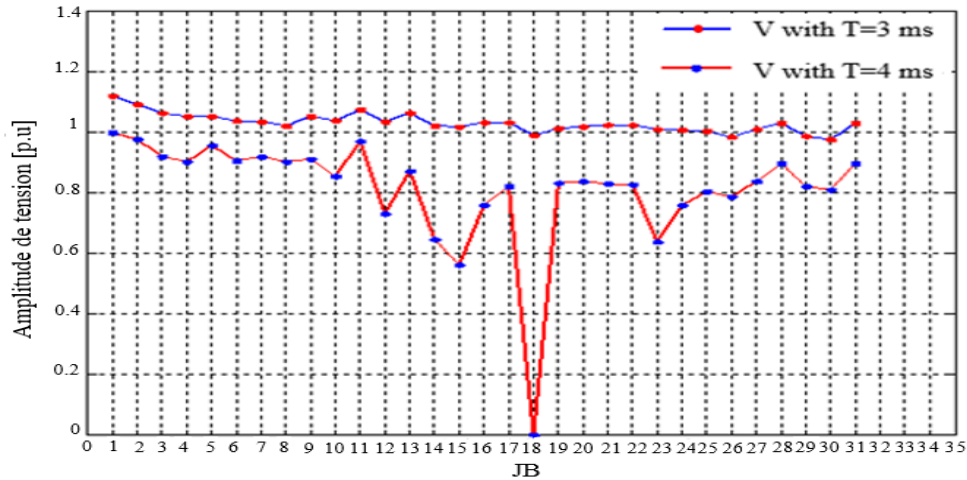


Figure.4.10. Profil de tension avec pénétration du solaire PV au bus 18

Tableau.4.4. Variation du temps critique (TCID) en fonction de pénétration de l'énergie solaire

	JB 2	JB 4	JB 5	JB 8	JB 12	JB 18
Puissance active (MW)	0.2	0.2	0.05	0.05	0.06	0.06
TCID (ms)	3	4	8	9	7	3
Pénétration de photovoltaïque %	23	23	6	6	7	7

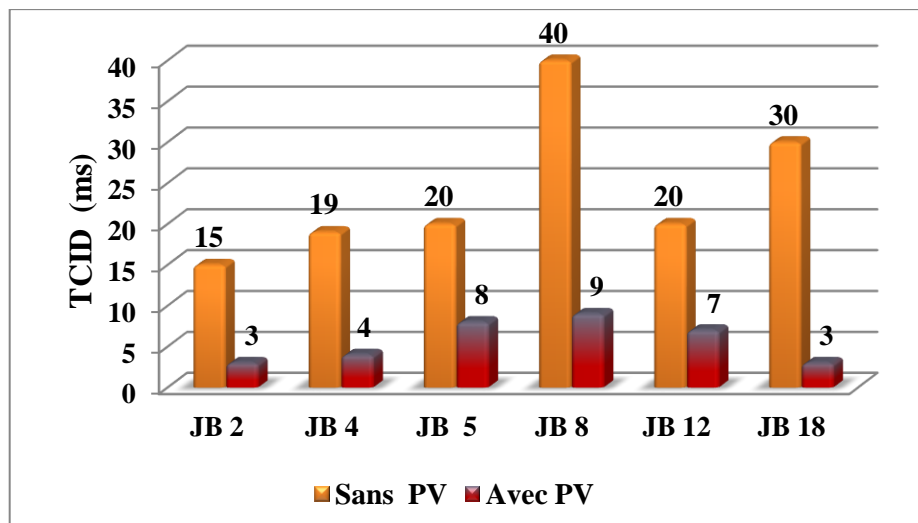


Figure.4.11. Histogramme de comparaison du TCID avec et sans l'intégration de PV

D'après la Figure 4.11, il est clair que la pénétration du solaire PV a énormément réduit le TCID ainsi que la capacité du réseau électrique a maintenu sa stabilité durant le défaut dans tous les cas étudiés. Ceci est dû à l'incapacité du PV de participer aux réglages du plan de tension en l'absence d'énergie réactive dans ces sources. De plus, le taux de pénétration du PV est inversement proportionnel aux valeurs du temps critique correspondant. Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau 4.4.

d. Amélioration de la stabilité transitoire à l'aide de dispositifs FACTS

L'utilisation du système FACTS est justifiée pour améliorer la capacité du réseau à résister aux défauts pendant une longue période. Dans cette section, un SVC, un STATCOM et un UPFC respectivement ont été introduits afin de vérifier leur influence sur l'énergie solaire.

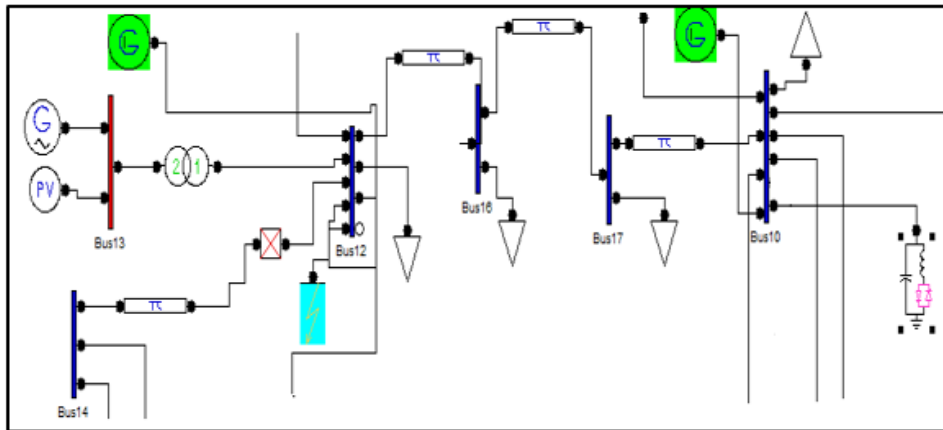


Figure.4.12. Localisation du SVC

Tableau.4.5. Le TCID pour différents taux de pénétration de l'énergie solaire avec et sans SVC

	JB 4	JB 5	JB 8	JB 12
CCT[ms] sans PV	19	20	40	20
CCT [ms] avec PV	4	8	9	7
CCT[ms] avec PV et SVC	90	60	130	419

D'après le tableau 4.5, l'intégration du SVC a amélioré le temps critique d'isolement de défaut du réseau. Prenons comme exemple le JB 4 : une augmentation considérable a été constaté de 4 (ms) à 90 (ms).

Deux autres dispositif FACTS (STATCOM et UPFC) ont été introduit dans le même JB.

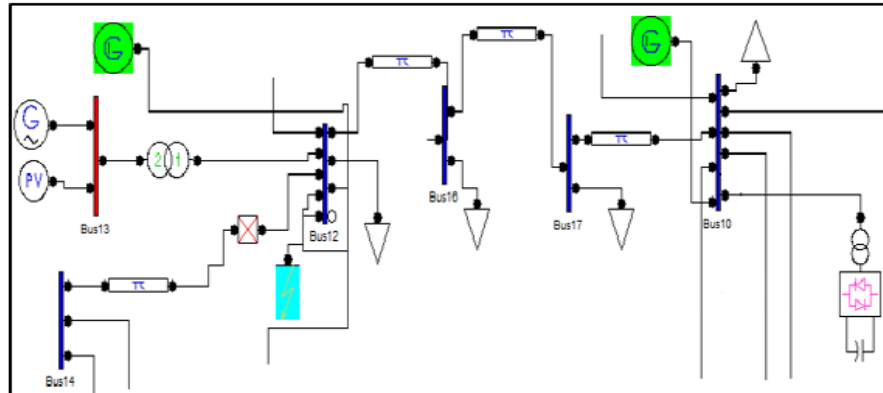


Figure.1.13. Localisation du STATCOM

Tableau .4.6. Le TCID pour différents taux de pénétration de l'énergie solaire avec et sans STATCOM

Bus	Bus 4	Bus 5	Bus 8	Bus 12
CCT [ms] sans PV et STATCOM	19	20	40	20
CCT [ms] avec PV et sans STATCOM	4	8	9	7
CCT [ms] avec PV et STATCOM	100	123	140	421

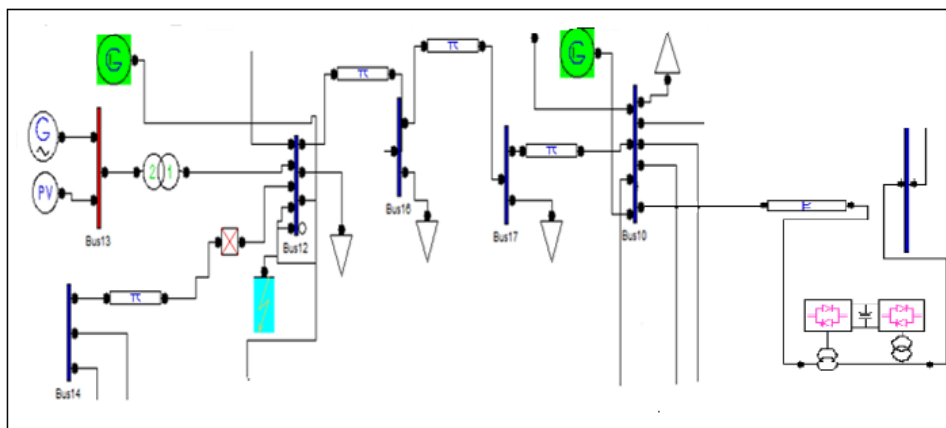


Figure.4.14. Localisation de l'UPFC

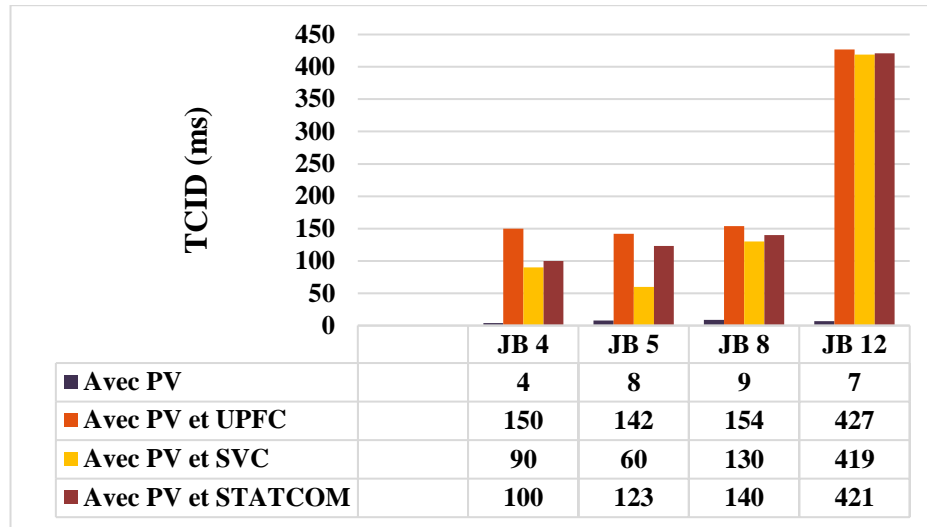


Figure.4.15. Histogramme de comparaison du TCID

Après l'intégration des FACTS (UPFC, SVC et STATCOM), une amélioration considérable du TCID a été remarquée, ce qui donnera l'opportunité d'intégrer plus d'énergie provenant de sources PV. L'histogramme de la figure 4.15, montre une modeste supériorité de l'UPFC par rapport aux STATCOM et SVC.

IV.2. Amélioration de la stabilité du système électrique à l'aide d'un nouvel algorithme hybride basé sur l'optimisation du cycle de l'eau et la flamme de papillon

IV.2.1. Principe de l'étude

La présente étude, propose une technique d'optimisation développée qui fournit les paramètres optimaux du stabilisateur des dispositifs de contrôle (PSS ; PID-PSS ;FOPID-PSS), visant à améliorer la stabilité du réseau électrique, en minimisant la déviation de la vitesse angulaire en présence d'un incident thermodynamique (changement brusque du couple mécanique) sur le modèle expérimental bien connu SMIB, utilisant un nouvel algorithme hybride appelé l'optimisation du cycle de l'eau et de la flamme de papillon (WCMFO). Les résultats obtenus à l'aide de cette technique ont été comparés avec trois d'autres méthodes (AEO, WCA, MFO).

Les indices adoptés dans cette recherche pour l'analyse de la stabilité transitoire sont celui du dépassement ainsi que l'amortissement des oscillations.

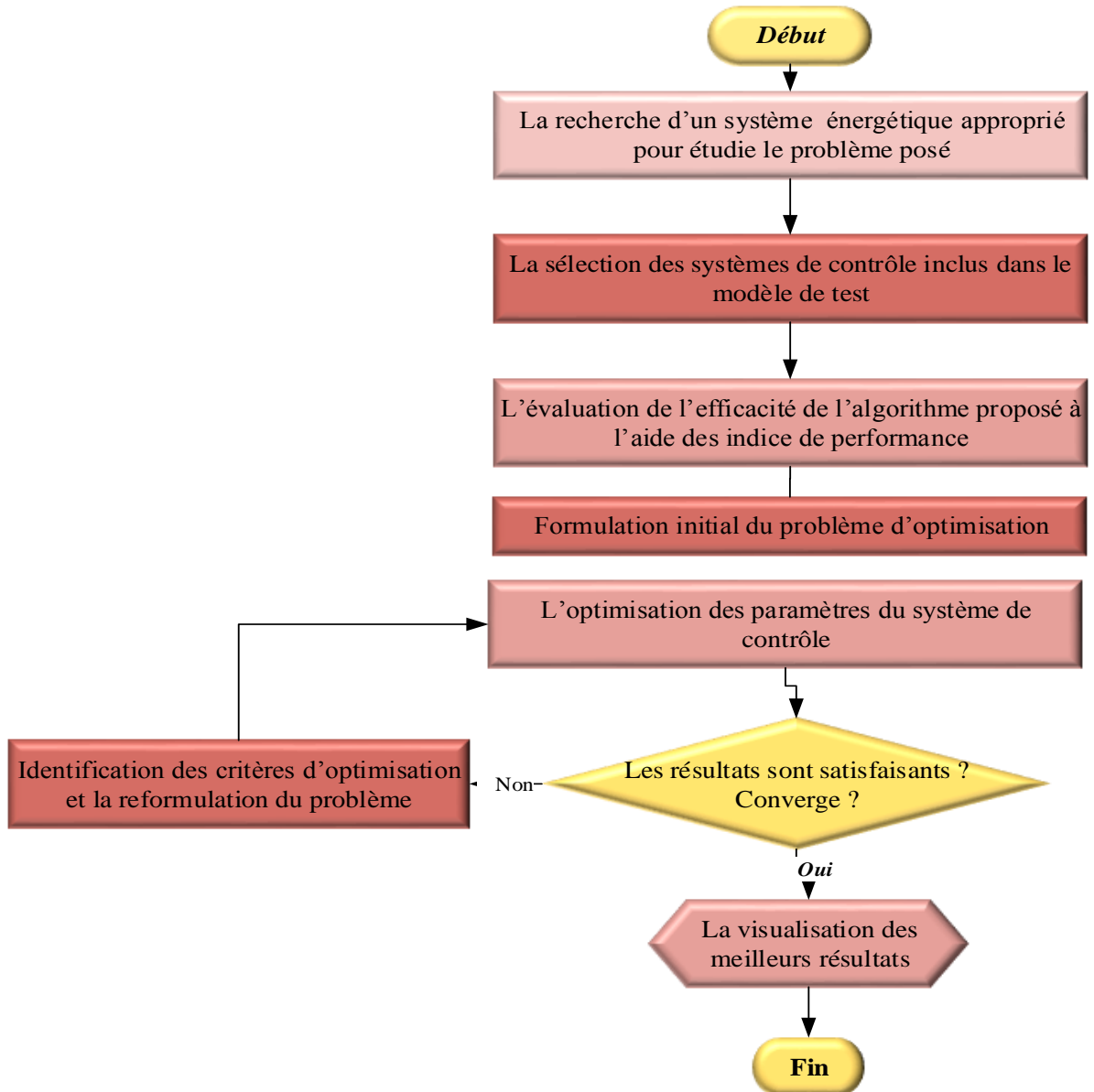


Figure.4.16. Organigramme présentant les étapes de l'étude

Le concept fondamentale de cette étude est illustrée comme un schéma dans la figure 4.17.

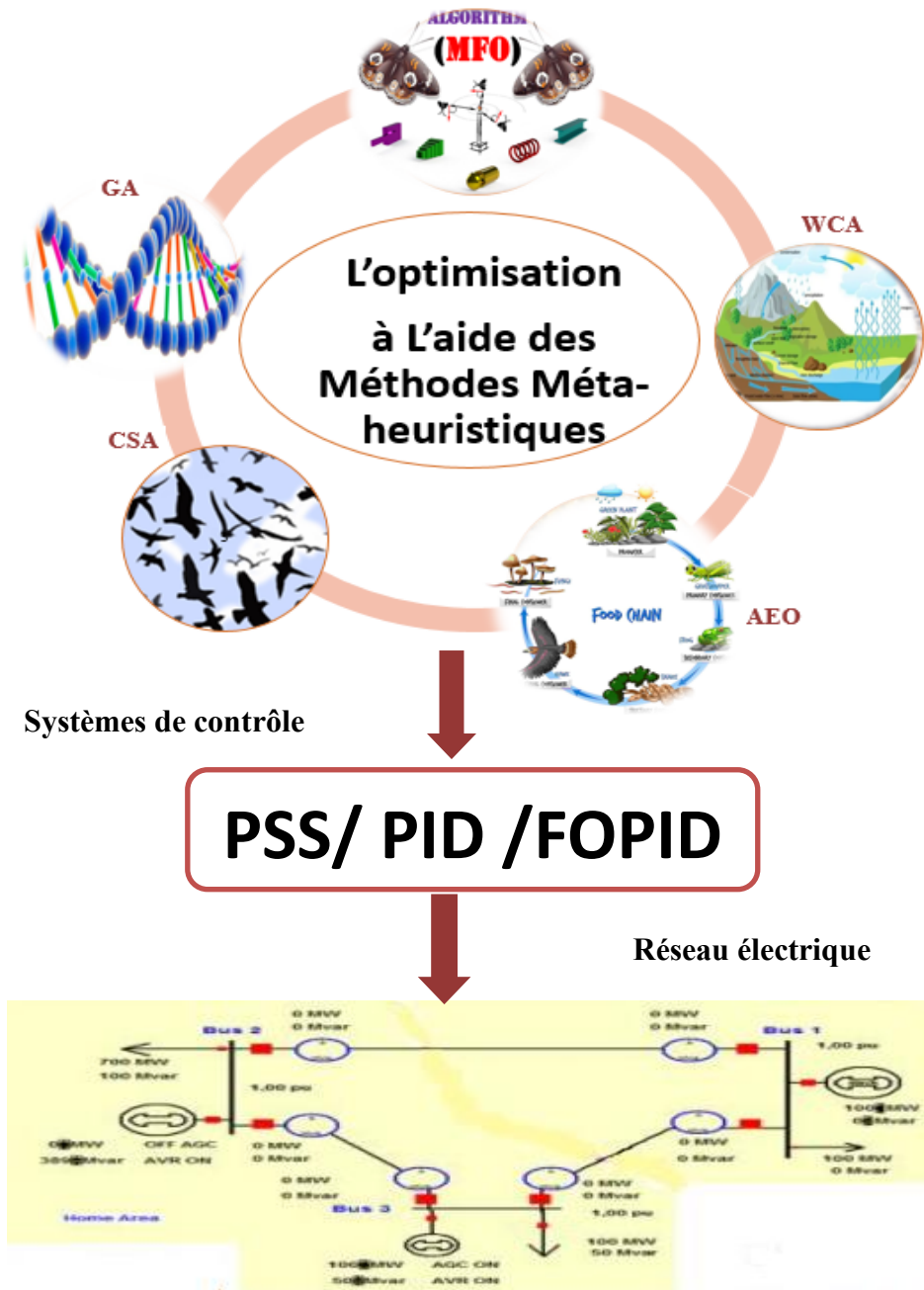


Figure.4.17. Schéma présentant la réalisation de l'étude

IV.2.2. Modélisation du système électrique

Le système considéré dans cette étude est le modèle linéaire du générateur synchrone connecté à un JB infini via une ligne de transmission électrique (SMIB) [4]. Il se compose d'une excitatrice et d'un régulateur de tension qui contrôle la tension (V_t) aux bornes de la génératrice synchrone. La tension du JB infini (V_{in}) est maintenue à une valeur nominale constante. Ce

système fournit des aspects significatifs du comportement du système multi-machine car il est plus facile à étudier, très utile pour illustrer l'impact de divers facteurs sur la stabilité du système électrique [10]. Dans cette étude, le modèle SMIB est utilisé afin d'examiner les dispositifs de contrôle dans un environnement virtuel pour une simulation en temps réel. La figure 4.18 présente un diagramme de ligne principale pour le modèle (SMIB) connecté avec trois dispositifs de contrôle différents qui sont PSS, PSS-PID, et PSS-FOPID. Les données du réseau électrique et le modèle en MATLAB/SIMULIN sont données dans l'annexe A.

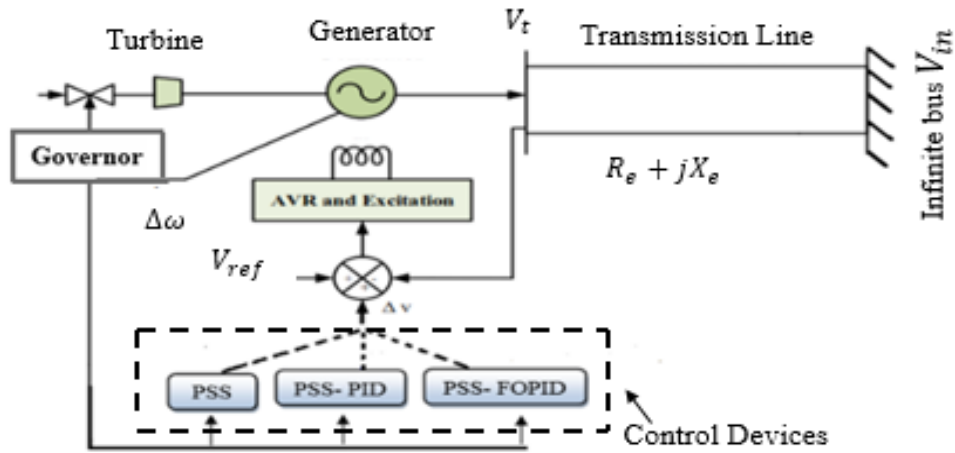


Figure 4.18. Schéma de principe du système (SMIB) [2]

IV.2.3. Description des stabilisateurs proposés

Les stabilisateurs proposés sont destinés à minimiser les oscillations du système d'alimentation, le dépassement et le temps de stabilisation après un incident grave, afin d'améliorer la stabilité du système d'alimentation.

➤ Stabilisateur du système électrique (PSS)

L'objectif principal d'un PSS est de fournir un couple approprié sur le rotor de la machine concernée pour améliorer les performances du système de puissance électrique. Le signal d'entrée du PSS est généralement l'écart de la vitesse synchrone $\Delta \omega$ [16][22]. L'équation (4.2) présente la fonction de transfert du PSS.

$$U(s) = k_{pss} \left(\frac{sT_w}{1+sT_w} \right) \left(\frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right) \left(\frac{1+sT_3}{1+sT_4} \right) \Delta \omega(s) \quad (4.2)$$

➤ PID basé sur le PSS

Le PID-PSS assure une performance de contrôle robuste. Il opère une fonction qui fournit un couple approprié sur le rotor du générateur en compensant le retard de phase entre le couple électrique de la machine et l'entrée de l'excitatrice [21][34]. La fonction de transfert du PID_PSS est donnée par l'équation (4.3) :

$$U(s) = \left[K_{pss} \left(\frac{sT\omega}{1+sT\omega} \right) \left(\frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right) \left(\frac{1+sT_3}{1+sT_4} \right) \right] \left[K_P + \frac{K_i}{s} + K_D s \right] \Delta\omega(s) \quad (4.3)$$

➤ FOPID basé sur le PSS

L'utilisation d'un (FOPID) dans les industries a attribué de grands avantages qui peuvent être utilisés pour résoudre de nombreux problèmes dans le système électrique [20]. Le régulateur FOPID possède les paramètres suivants : les constantes K_i l'intégrale, K_d la différentielle, K_p proportionnelles, la dérivée d'ordre fractionnaire μ et l'élément intégral λ [35]. L'équation suivante démontre la fonction de transfert (TF) du contrôleur (FOPID) :

$$U(s) = \left[k_{pss} \left(\frac{sT_w}{1+sT_w} \right) \left(\frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right) \left(\frac{1+sT_3}{1+sT_4} \right) \right] \left[k_p + k_i s^{-\lambda} + k_d s^\mu \right] \Delta\omega(s) \quad (4.4)$$

IV.2.4. Fonctions objectives

La méthode WCMFO a été utilisée pour réduire les valeurs obtenues par les fonctions objectives du système afin d'obtenir les paramètres optimaux du stabilisateur. Nous avons utilisé des indices de performance (PI) afin de réduire les dépassements et les oscillations du système électrique.

Erreur absolue intégrale (IAE)

$$IAE = \int_0^{t_{sim}} |e(t)| dt \quad (4.5)$$

Erreur quadratique intégrale (ISE)

$$ISE = \int_0^{t_{sim}} e(t)^2 dt \quad (4.6)$$

Intégrale de l'erreur absolue pondérée dans le temps (ITAE)

$$ITAE = \int_0^{t_{sim}} t |e(t)| dt \quad (4.7)$$

IV.2.5. Sélection du type de défaut

Le changement soudain du couple mécanique (incident thermodynamique) a été considéré comme l'un des incidents les plus graves tels que le court-circuit, la surcharge, la perte d'un groupe électrogène ou la perte d'une charge importante.

Cet incident peut entraîner une augmentation progressive de l'écart entre les angles de rotor des générateurs ou une diminution graduelle des tensions des nœuds du réseau, provoquant par la suite une avalanche de pannes, une déconnexion d'une grande partie du réseau électrique et parfois même un effondrement total (Blackout), comme c'est le cas en Algérie le 3 février 2003, où 38 états se sont soudainement retrouvés dans le noir pendant 6 h. [3]

IV.2.6. L'algorithme hybride proposé "WCMFO"

Récemment, diverses techniques hybrides inspirées de la nature ont été introduites par les chercheurs pour améliorer l'efficacité de l'espace de recherche d'exploitation et d'exploration des algorithmes existants. En 2012, H. Eskandar a introduit l'algorithme du cycle de l'eau (WCA), qui imite le phénomène du cycle de l'eau dans la nature [76], il a une grande capacité à explorer les zones de solution. D'autre part, le WCA souffre de l'absence d'un opérateur adéquat pour assurer la phase d'exploitation. L'optimisation de la flamme de papillon (MFO) a été inspirée par le mouvement en spirale du papillon de nuit par Mirjalili qui a été proposé en 2015 [77]. Malgré les très bonnes performances de la capacité de mouvement en spirale de MFO dans la phase d'exploitation, elle est toujours incapable d'explorer efficacement l'espace des solutions car elles sont souvent piégées dans un optimum local. [2]

Ainsi, la combinaison des avantages de la (WCA) et de la (MFO) conduit à un algorithme hybride moderne (WCMFO) proposé par Khalilpourazari en 2019 [83], qui peut être considérablement performant dans la résolution de problèmes d'optimisation complexes. Pour l'algorithme WCMFO, le WCA a été considéré comme l'algorithme de base. Le mouvement en spirale de la MFO est utilisé pour mettre à jour la position des ruisseaux et des rivières, afin d'améliorer la zone d'exploitation. En outre, les ruisseaux sont autorisés à maintenir leur position

en utilisant une marche aléatoire (Levy flight) pour améliorer la randomisation dans le WCA.[2] Le processus global de l'algorithme suggéré (WCMFO) est résumé dans un organigramme illustré à la figure 4.19.

Le modèle mathématique de l'algorithme hybride WCMFO proposé est expliqué dans la section suivante. [83]

✓ **Modèle mathématique de WCMFO**

Initialisation

- Réglez les paramètres initiaux Nsr, Npop, max-iter.
- Générer une population initiale aléatoire à l'aide de l'équation (3.20) pour générer les valeurs des gouttes de pluie pour la matrice de population donnée dans l'équation (3.21).

Création de mer, de rivières et de ruisseaux.

- Les fonctions de coût pour chaque flux dans la matrice de population initiale sont calculées à l'aide d'Eq (3.22).
- Trier la valeur de la fonction objective basée sur le flux pour former la mer, la rivière et les ruisseaux en utilisant Eq (3.23 et 3.24)

Determination of the Intensity of rivers and sea

Afin d'affecter les gouttes de pluie à la mer et aux rivières en fonction de l'intensité du flux en WCA, l'équation (3.25) est utilisée.

Phase d'exploitation

La phase d'exploitation des MFO est intégrée dans le WCA afin d'améliorer les performances d'exploitation en suivant l'équation en spirale :

$$X_{stream}^{i+1} = \left| X_{stream}^{i+1} - sea \right| \times \cos(2\Pi t) + sea \quad (3.8)$$

Où : 't' est un nombre aléatoire uniforme [- 1,1] afin de définir la prochaine position fermée du courant vers la mer.

L'addition du Levy flight

En WCA, si après quelques itérations, le flux met à jour son positions et ne peut même pas trouver la meilleure solution, alors la position des rivières et la position de la mer ne seront pas mises à jour avant les prochaines itérations.

Par conséquent, pour améliorer la randomisation dans l'algorithme WCMFO, les flux sont autorisés à mettre à jour leurs positions en utilisant la fonction de Levy flight en utilisant l'équation suivante.

$$x_{i+1} = x_i + \text{levy}(\text{dim})x_i \quad (3.9)$$

Où x_{i+1} est la position suivante du flux, x_i est la position actuelle du flux et dim est la dimension du problème ou le nombre de variables de décision. Le Levy flight est calculé à l'aide de la formule ci-dessous.

$$\text{levy}(x) = \frac{0.01 \times \sigma \times r_1}{|r_2|^\beta} \quad (3.10)$$

Où r_1 et r_2 sont des nombres générés aléatoirement entre 0 et 1. Dans la formulation ci-dessus, le paramètre σ est calculé comme suit :

$$\sigma = \left(\frac{\Gamma(1+\beta) \times \sin\left(\frac{\Pi\beta}{2}\right)}{\Gamma\left(\frac{1+\beta}{2}\right) \times \beta \times 2^{\left(\frac{\beta-1}{2}\right)}} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (3.11)$$

Condition d'évaporation et processus de pluie

Pour éviter de rester bloqué par les optima locaux, le taux d'évaporation et le processus de pluie ont été ajoutés. Lorsque la distance entre la mer et les rivières est $< d_{max}$, des conditions d'évaporation et de pluie se produisent et sont indiquées par l'équation. (3.28). Par conséquent, la valeur d_{max} diminue de manière adaptative par Eq. (3.29).

Pour satisfaire les nouvelles positions des flux nouvellement générés, l'équation (3.30) est utilisée.

Afin d'améliorer le taux de convergence pour le problème contraint Eq. (3.31) n'est utilisé que pour les cours d'eau qui se dirigent directement vers la mer.

Critères de convergence

Les critères de convergence pour le WCMFO proposé sont donnés par l'équation (3.32).

$$a = 1 + \text{current} - \text{iter} \cdot \left(\frac{-1}{\text{max.iter.}} \right) \quad (3.32)$$

Où 1 : est la mer

a : représente le coefficient de convergence

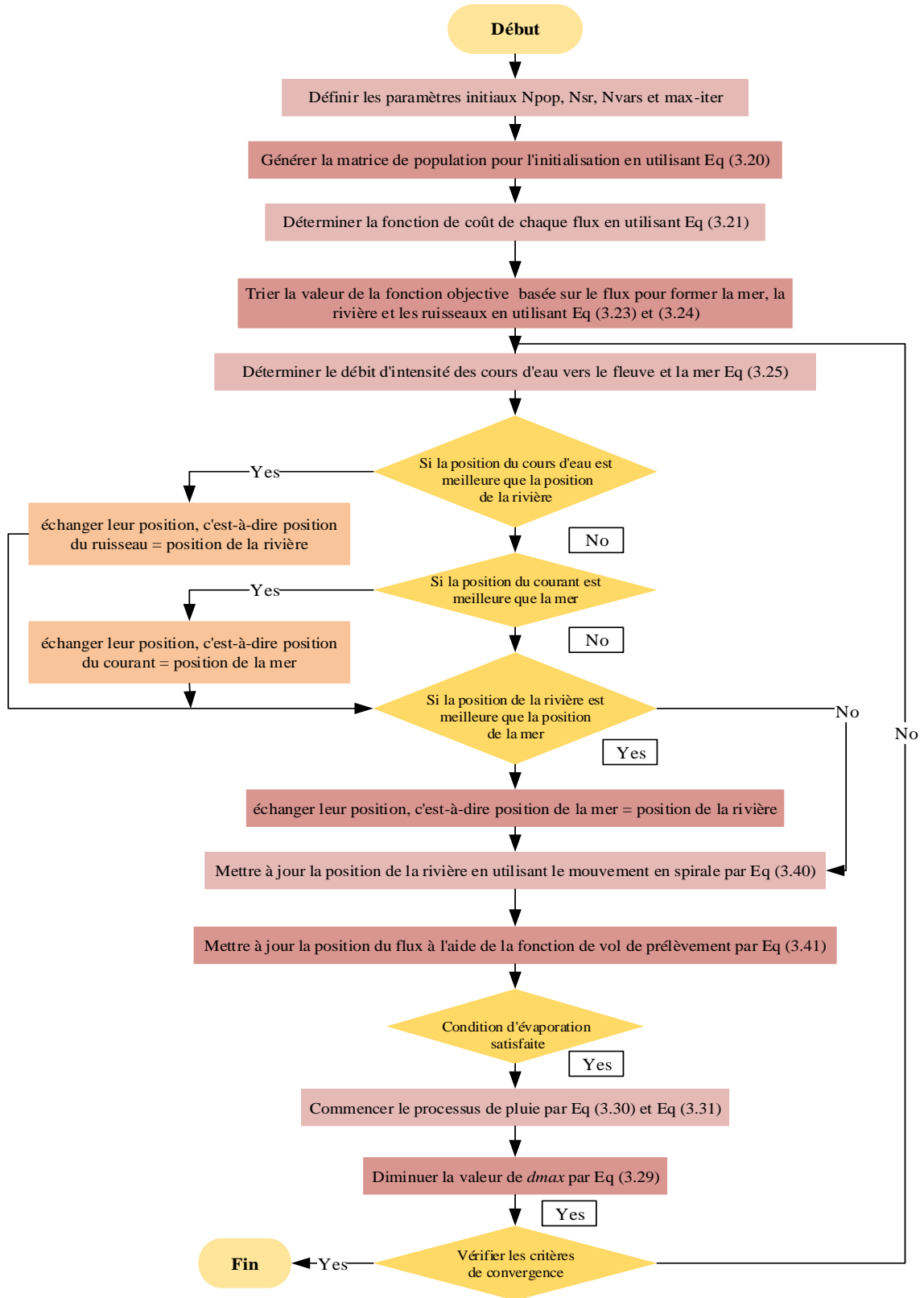


Figure 4.19. Organigramme de l'algorithme hybride WCMFO [2]

IV.2.7. Stratégie d'analyse

La présente étude se concentre sur l'évaluation de la stabilité du système électrique en introduisant l'un de ces stabilisateurs distincts, respectivement (PSS, PID-PSS et FOPID-PSS), dans le fameux système de test (SMIB), en présence d'un incident thermodynamique.

L'analyse de cette étude a été divisée en deux parties. La première partie vise à démontrer l'efficacité du (WCMFO) suggéré en utilisant les indices de performances dont l'IAE, l'ISE et l'ITAE. Les résultats de la simulation sont comparés à trois autres techniques d'optimisation méta-heuristiques (WCA, MFO, AEO).

La deuxième partie se concentre sur l'amélioration de l'efficacité de la stabilité du système électrique. Trois stabilisateurs (PSS, PSS-PID, PSS-FOPID) ont été appliqués afin de prouver l'efficacité de la méthode WCMFO dans différentes conditions de fonctionnement. L'analyse du comportement de la vitesse angulaire a été utilisée pour évaluer la stabilité du réseau électrique. Les critères de stabilité utilisés pour valider cette étude sont les suivants :

- Les dépassements
- Oscillations du système électrique
- Temps de stabilisation

IV.2.8. Résultats de la simulation

L'efficacité de la méthode proposée a été évaluée dans l'environnement MATLAB/Simulink. Avant d'effectuer le processus d'optimisation, certains paramètres doivent être définis dans la méthode proposée (WCMFO) pour obtenir de meilleures performances. Le tableau1 présente la description de chaque système.

Tableau.4.7. Paramètres de l'algorithme

Paramètres	PSS	PSS-PID	PSS-FOPID
Nombre d'itérations	50	50	50
Variables de décision (Nvars)	5	8	10
Nombre de personnes (Nvars×3)	15	24	30

Le tableau 4.8 illustre les limites standard des paramètres optimisés. La constante de temps (T_w) est supposée être de 10s.

Tableau.4. 8. Limites des paramètres du stabilisateur

	Paramètres des stabilisateurs									
	Kps	T1	T2	T3	T4	Kp	Ki	Kd	μ	λ
Min	0.1	0.01	0.01	0.01	0.01	0.001	0.001	0.001	0.1	0.1
Max	5	2	2	2	2	1.2	1.2	1.2	0.9	0.9

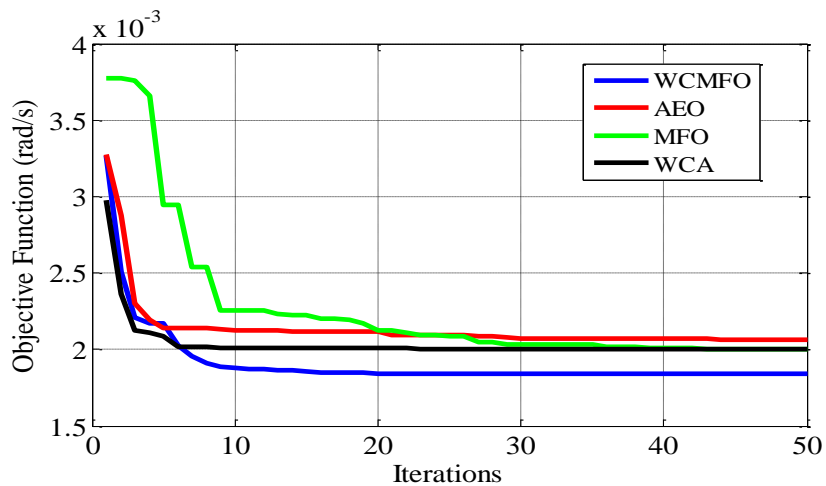
Tableau.4. 9. Paramètres optimaux du stabilisateur basés sur le WCMFO proposé

Stabilisateurs	PI	Paramètres du stabilisateur									
		Kps	T1	T2	T3	T4	ki	Kp	Kd	μ	λ
PSS_FOPID	IAE	4.9987	0.0345	0.1957	2	0.618	1.2	1.2	1.2	0.1	0.8019
	ISE	5	2	0.6882	1.9891	0.6883	1.2	1.1989	1.2	0.1	0.7926
	ITAE	4.9896	0.01	0.7025	2	0.1554	1.1954	1.2	1.1987	0.1	0.8183
PSS_PID	IAE	5	2	0.5901	2	0.1478	1.2	1.00E-03	0.001		
	ISE	5	2	0.6468	1.1145	0.6468	1.2	1.2	1.00E-03		
	ITAE	5	1.9332	0.6118	2	0.1447	1.2	1.00E-03	1.00E-03		
PSS	IAE	3.3204	1.0799	0.9917	1.5239	1.9805					
	ISE	5	0.2924	0.8689	1.997	0.822					
	ITAE	2.9575	1.9998	1.1218	0.9513	1.999					

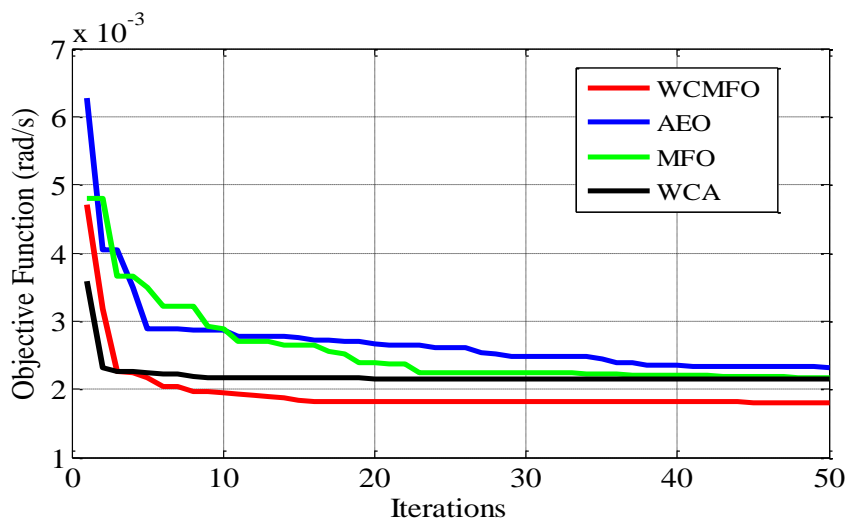
Les paramètres optimisés obtenus à l'aide du WCMFO pour chaque stabilisateur sont mentionnés dans le tableau 4.9. Il convient de noter que les algorithmes suggérés sont exécutés plusieurs fois pour sélectionner les paramètres optimaux du stabilisateur.

➤ **Première partie**

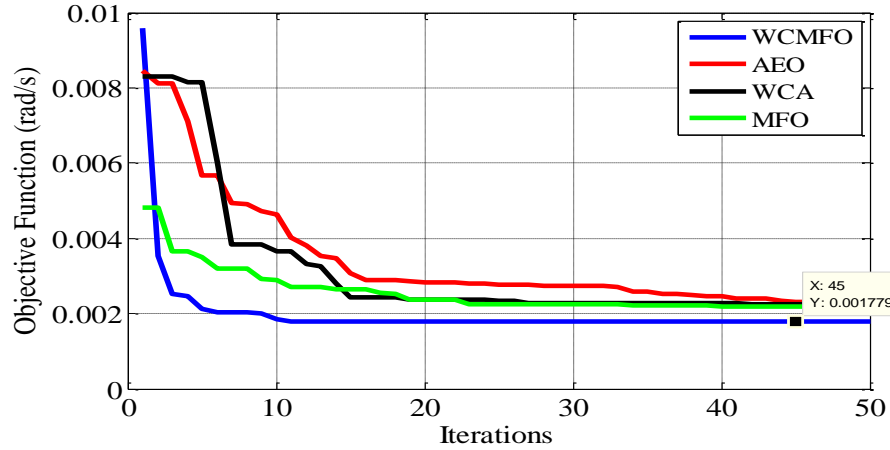
L'objectif de cette section est d'évaluer l'efficacité du WCMFO proposé en utilisant les indices de performance, y compris l'IAE, l'ISE et l'ITAE. Les résultats de la simulation obtenus sont comparés avec trois autres techniques d'optimisation méta-heuristiques telles que (WCA, MFO, AEO).



a. IAE

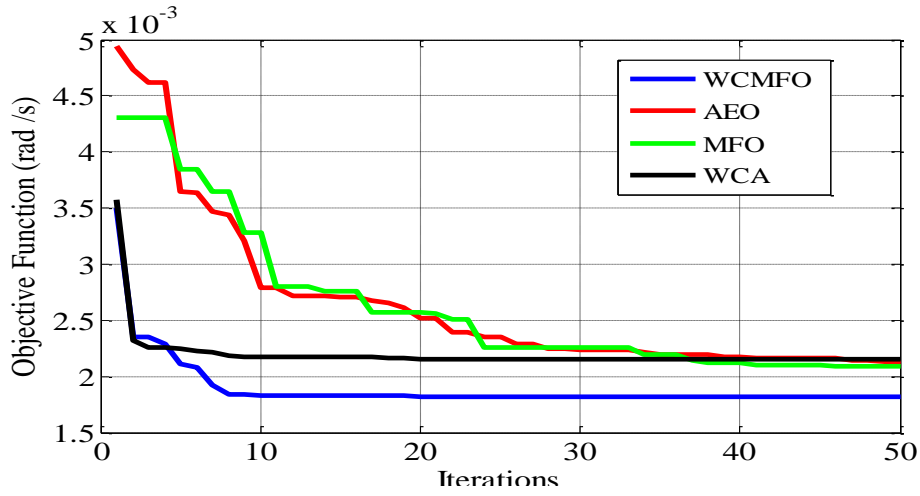


b. ISE

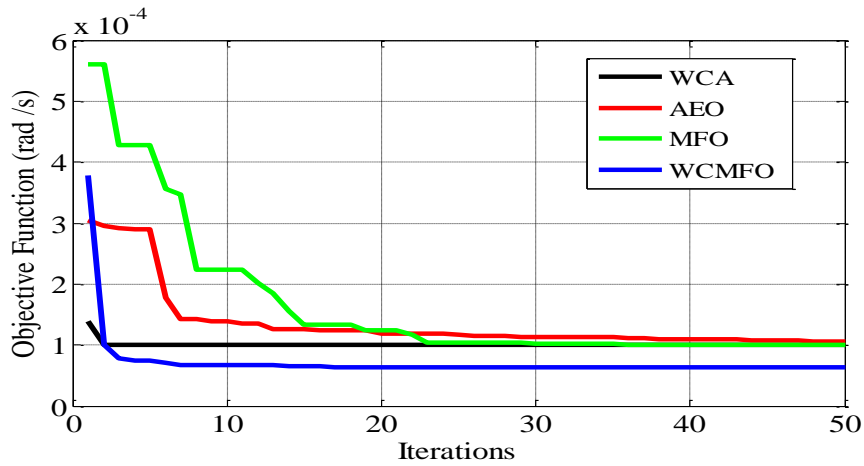


c. ITAE

Figure.4.20. Profil de convergence (a) IAE, (b) ISE, (c) ITAE utilisant le FOPID-PSS

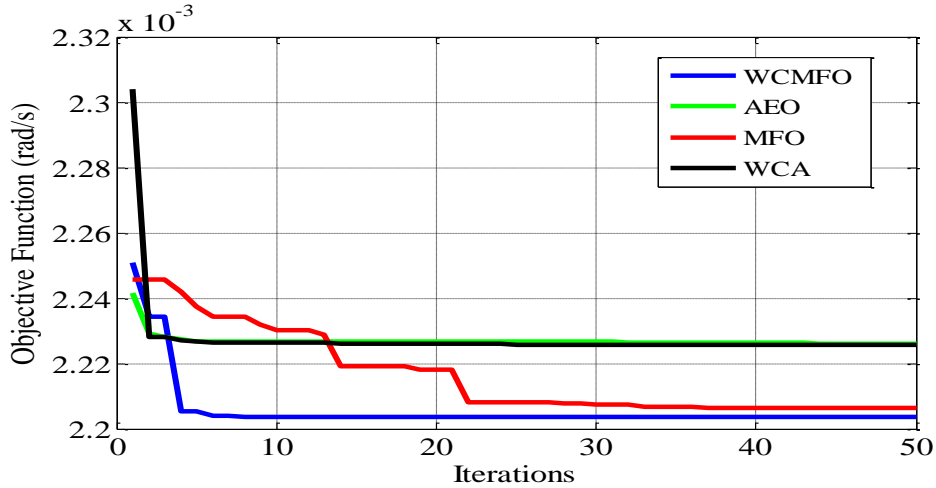


a. IAE

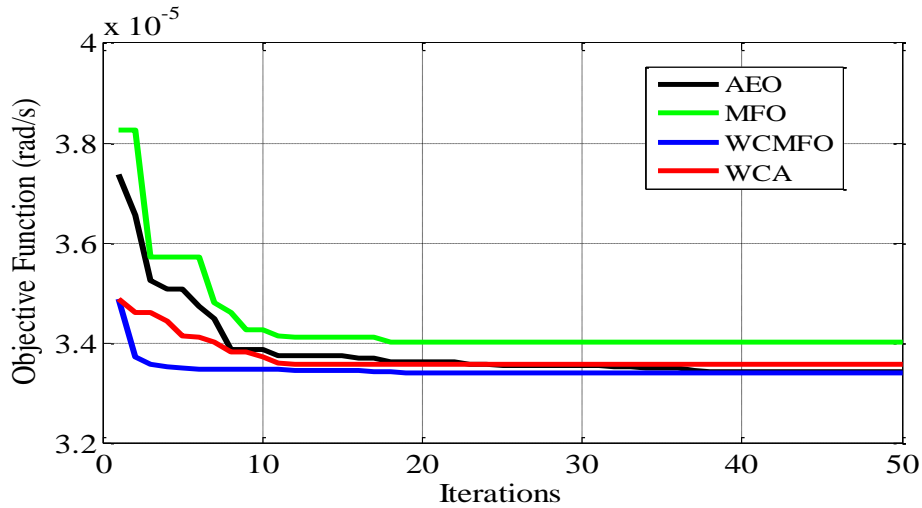


b. ISE

Figure.4.21. Profil de convergence (a) IAE, (b) ISE utilisant le contrôleur PID-PSS



a. IAE



b. ISE

Figure.4.22. Profil de convergence (a) IAE, (b) ISE utilisant le contrôleur PSS

La comparaison des profils de convergence des méthodes proposées pour chaque fonction objective est présentée dans les figures (4.20- 4.21- 4.22). Les résultats obtenus ont prouvé la robustesse et la rapidité de l'algorithme (WCMFO) pour résoudre le problème de la stabilité transitoire.

En outre, toutes les figures montrent une modeste supériorité de l'algorithme suggéré (WCMFO) par rapport aux algorithmes (WCA, MFO, AEO) en termes de qualité de la solution et de temps d'établissement minimum pour tous les indices de performance analysés comme (IAE, ISE, ITAE).

Tableau 4. 10. Valeurs optimales de la fonction objective

Valeurs des fonctions objectives (rad/s)				
	PI	PSS_FOPID	PID_PSS	PSS
WCMFO	IAE	0.00184	0.001902	0.002203
	ISE	2.84E-06	3.34E-05	6.31E-05
	ITAE	0.001763	0.001828	0.002065
WCA	IAE	0.002004	0.002154	0.002329
	ISE	3.28E-05	3.36E-05	1.00E-04
	ITAE	0.002154	0.002269	0.002154
MFO	IAE	0.002033	0.002094	0.002208
	ISE	3.29E-05	4.41E-05	1.04E-04
	ITAE	0.002109	0.002176	0.002103
AEO	IAE	0.002105	0.002144	0.002327
	ISE	3.51E-05	3.37E-05	1.05E-04
	ITAE	0.002313	0.002341	0.002204

Le tableau 4.10 montre que les résultats des indices de performance obtenus par le stabilisateur (PSS-FOPID) basé sur (WCMFO) sont les meilleurs que ceux des stabilisateurs PSS et PSS-PID dans toutes les conditions de fonctionnement. (IAE, ISE, ITAE) ont la valeur minimale avec PSS-FOPID (0.00184, 2.84E-06, 0.001763 rad/s) en raison de leur capacité et de leur vitesse par rapport aux autres stabilisateurs.

➤ *Deuxième partie*

Trois cas ont été réalisés dans les mêmes conditions dans lesquelles : le système est stable de 0 s à 0,5 s, ensuite défaut thermodynamique a été appliqué.

1er cas : analyse du système sans stabilisateur

Une perturbation soudaine sur la variation du couple mécanique est introduite, puis la réponse du système est analysée en fonction de l'évolution de la variation de la vitesse angulaire.

2^{-ème} cas : l'analyse du système avec l'intégration du stabilisateur

Les stabilisateurs sont introduits dans le système d'essai SMIB comme il est indiqué dans la figure 4.18.

3^{ème} cas : réglage des paramètres du stabilisateur

Les paramètres de stabilisation optimaux du (PSS, PID-PSS, FOPID-PSS) sont fournis en utilisant l'algorithme hybride WCMFO.

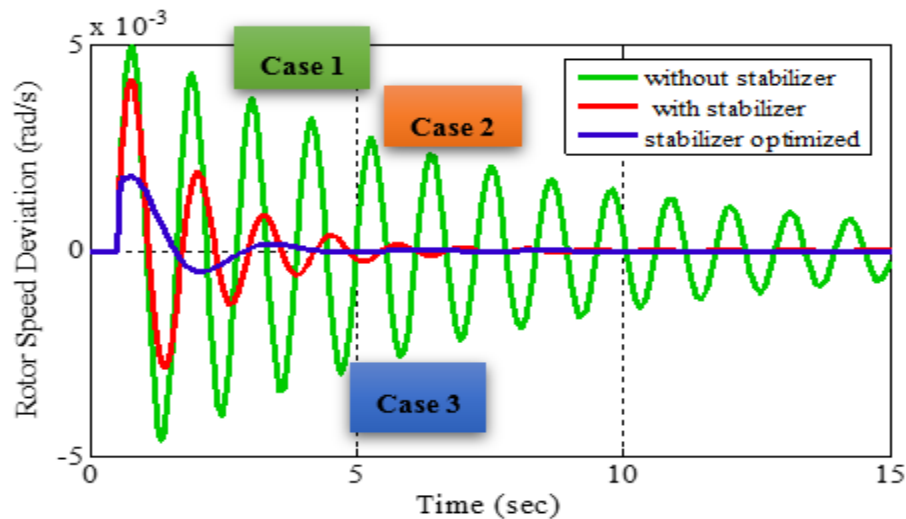
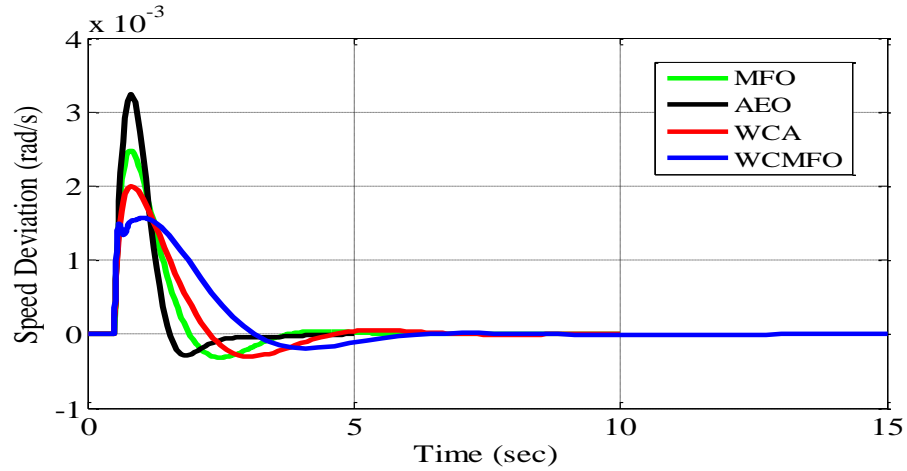


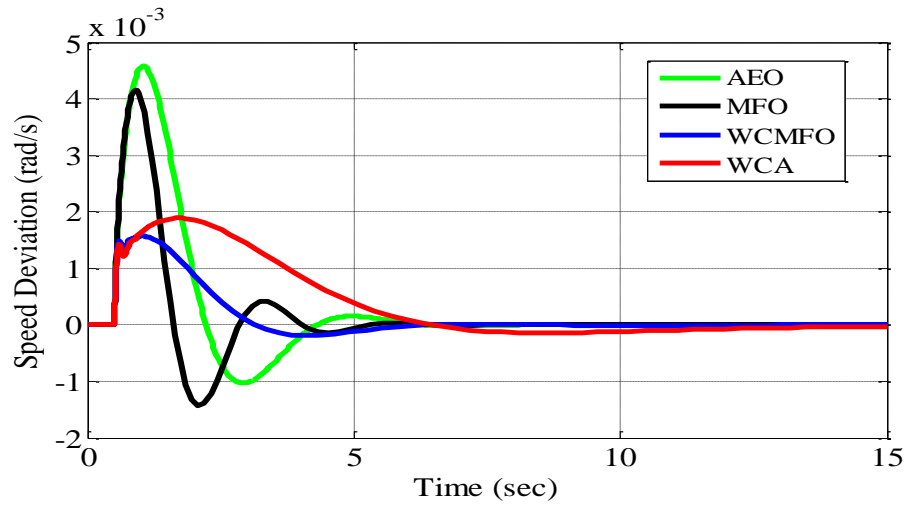
Figure.4.23. Déviation de la vitesse angulaire (avec et sans stabilisateur)

Dans le dernier cas, on constate une amélioration significative du système d'alimentation en minimisant la déviation de la vitesse angulaire. Une réduction considérable du dépassement (de 0,00412 à 0,00181 (rad/s) avec une amélioration de 44%), et un amortissement des oscillations, comme le montre la figure 4.23.

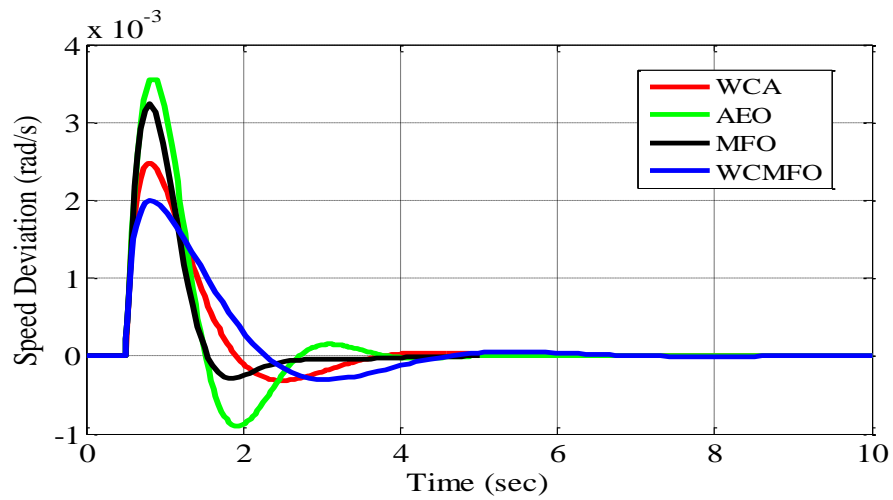
Il convient de noter que pendant le processus de simulation, une différence a été observée entre les dispositifs de contrôle en termes de temps de réponse et de nombre d'exécutions pour atteindre la solution appropriée. En ce qui concerne (FOPID-PSS) et (PID-PSS), les résultats obtenus étaient très satisfaisants dans les premières itérations en très peu de temps. Par contre, pour obtenir des résultats adéquats avec (PSS), le processus a nécessité d'être exécuté plus de 30 fois.



a. FOPID-PSS (IAE)



b. PID-PSS (IAE)

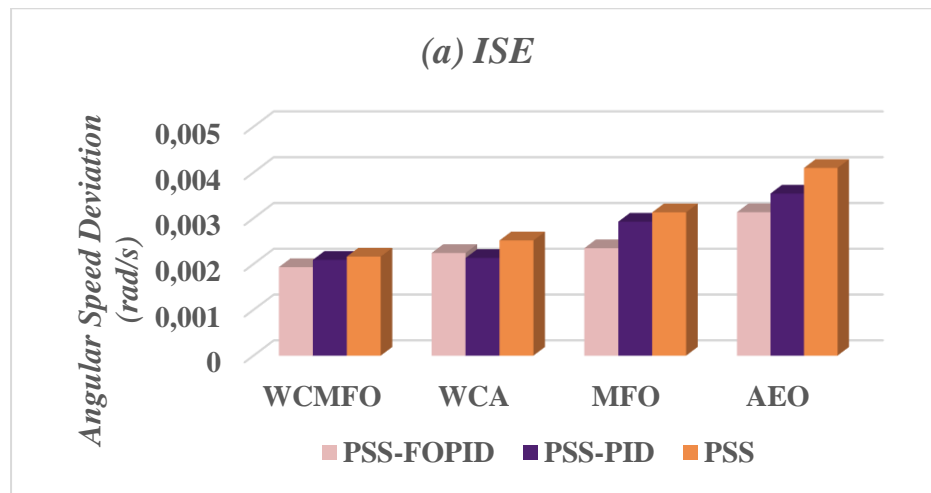


c. PSS

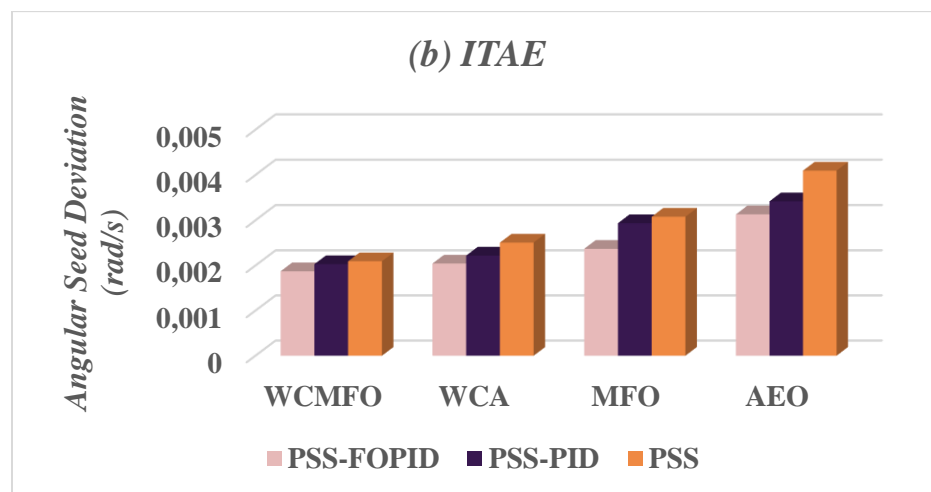
Figure.4.24. Déviation de la vitesse angulaire (a, b, c)

Les résultats précédents montrent que l'algorithme proposé (WCMFO) a démontré une performance de supériorité en termes d'amortissement des oscillations, de temps de stabilisation et de dépassement par rapport aux autres algorithmes, comme l'indique la figure (4.23). En d'autres termes, le système de contrôle (PSS-FOPID) montre une amélioration considérable de la stabilité du système électrique, les oscillations sont rapidement amorties et le système atteint l'état stable plus rapidement que les autres stabilisateurs proposés.

Afin de fournir une comparaison claire et d'évaluer les performances de chaque technique proposée. Les résultats de l'écart de vitesse angulaire pour chaque stabilisateur sont présentés dans l'histogramme, figure (4.25).



a. ISE



b. ITAE

Figure.4.25. Valeurs d'écart de vitesse angulaire (a, b)

Selon la figure (4.25), les résultats obtenus à partir de l'histogramme pour chaque fonction objective ont été prouvés de manière évidente l'efficacité du (WCMFO) pour résoudre le problème de stabilité transitoire en présence de cette perturbation sévère.

IV.3. L'algorithme du cycle de l'eau appliqué pour améliorer la stabilité transitoire du système électrique.

IV.3.1. Stratégie d'analyse

Cette étude est consacrée à l'analyse de la stabilité dynamique du système électrique en intégrant des systèmes de contrôle tels que AVR et PSS en présence d'une perturbation de couple mécanique. Dans cette étude, l'analyse du comportement de la vitesse angulaire du rotor a été utilisée pour évaluer la stabilité du système.

Les critères de stabilité utilisés pour la validation de cette étude sont les suivants :

- Les dépassements
- Oscillations du système électrique

Pour réaliser cette tâche, nous suivons ces étapes :

- ✓ Etude de l'état initial du réseau sans PSS.
- ✓ Analyse du comportement du système après l'intégration du PSS.
- ✓ Étude comparative après l'optimisation des paramètres du PSS.

IV.3.2. Résultats de simulation

➤ Sans PSS

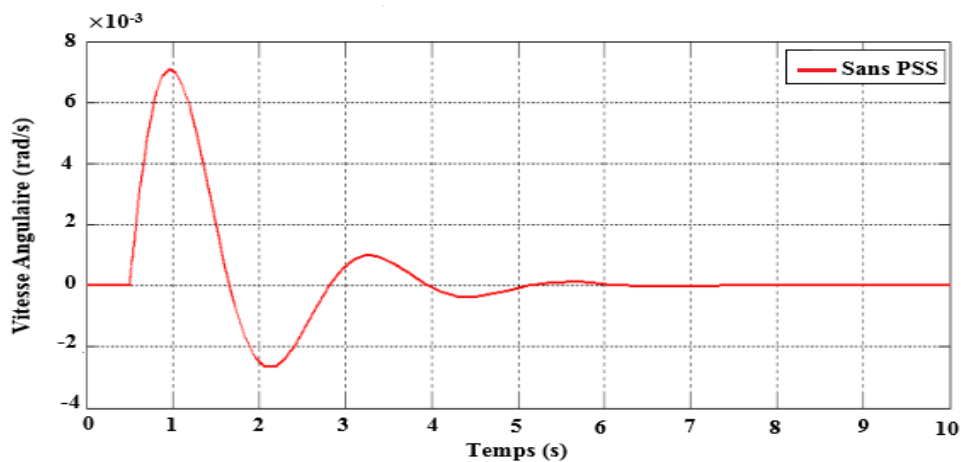


Figure.4.26. L'écart de la vitesse du rotor

➤ Avec PSS

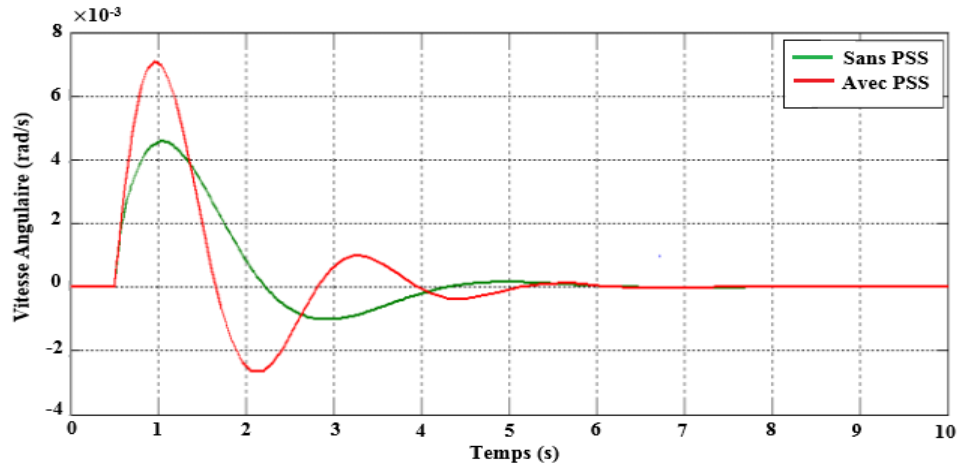


Figure. 4.27. L'écart de vitesse du rotor (avec et sans PSS).

Avant la perturbation, la déviation de la vitesse du rotor est égale à zéro, une fois que le défaut apparaît après (0,5s), la déviation devient significative. Les figures 4.26 et 4.27 montrent clairement l'influence de l'intégration du PSS sur l'amélioration de la stabilité en réduisant la vitesse maximale du rotor. (Réduction du dépassement, l'amortissement des oscillations), de $7.09 \cdot 10^{-3}$ à $4.56 \cdot 10^{-3}$ (rad/s) une amélioration de 45%.

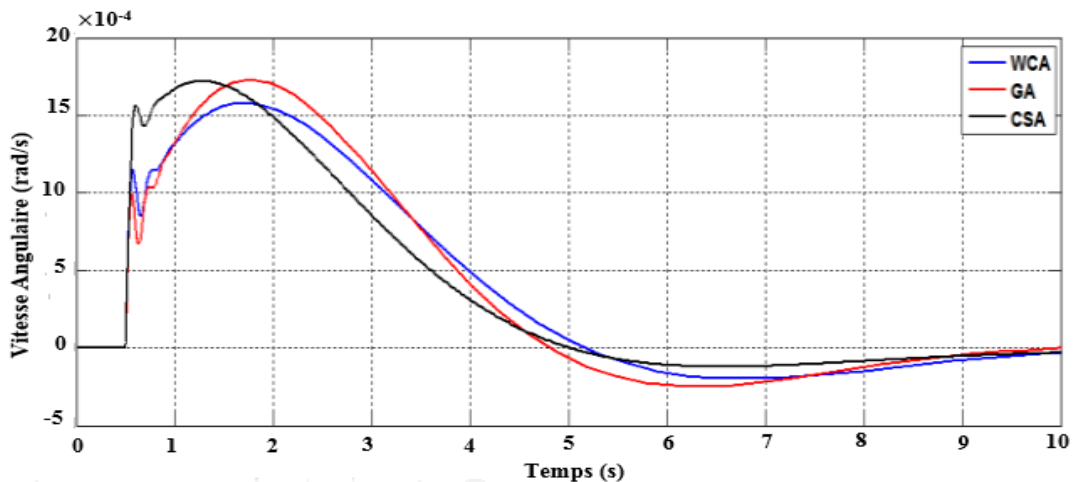


Figure. 4.28. Écart de vitesse du rotor (Comparaison entre trois algorithmes)

Il apparaît clairement que la minimisation des oscillations est assurée par les trois algorithmes de manière similaire par le GA et le WCA par rapport au CSA comme le montre la figure 4.28. Par

contre, pour la minimisation de la déviation de la vitesse du rotor, le WCA a une nette supériorité par rapport aux deux autres algorithmes, conformément aux valeurs indiquées dans le tableau 4.11.

Tableau.4. 11. Comparaison des résultats de la déviation de la vitesse maximale du rotor.

	Déviatiion maximale de la vitesse du rotor (rad/s)
Sans PSS	$7.09 \cdot 10^{-3}$
Avec PSS	$4.56 \cdot 10^{-3}$
GA	$1.66 \cdot 10^{-3}$
CSA	$1.72 \cdot 10^{-3}$
WCA	$1.57 \cdot 10^{-3}$

Les paramètres correspondant aux valeurs de la fonction objectif illustrées sont représentés dans le tableau 4.12.

Tableau 4.12. Paramètres du PSS optimisés par différents algorithmes

	K_P	T_1	T_2	T_3	T_4	T_w
CSA	63.937	0.730	0.456	0.852	0.320	9.616
GA	69.611	0.996	0.482	0.977	0.504	9.893
WCA	70	1	0.504	1	0.5038	10

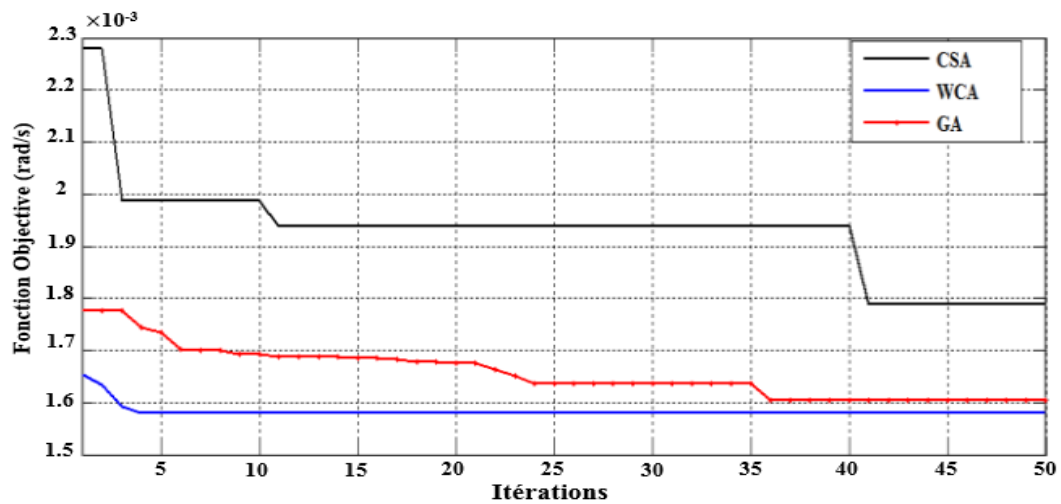


Figure.4.29. Comparaison des profils de convergence

Selon la figure 4.29, les résultats obtenus ont démontré l'efficacité et la rapidité de WCA à résoudre le problème de la stabilité transitoire par rapport aux autres méthodes proposées (GA, CSA).

Une amélioration considérable de la fonction objective ainsi que la vitesse de convergence de l'algorithme WCA. Une réduction remarquable du dépassement contribue à l'amélioration de la stabilité transitoire.

Conclusion

La stabilité transitoire est un problème sérieux et crucial dans l'exploitation des systèmes électriques. C'est dans ce cadre que notre travail de recherche se focalise où l'amélioration de la stabilité du système électrique constitue le but essentiel.

- L'intégration des sources PV ont réduit le temps critique (TCID), ainsi que la capacité du réseau électrique à maintenir sa stabilité pendant la perturbation dans tous les cas étudiés.
- Une amélioration appréciable du TCID a été constaté après l'intégration des systèmes FACTS (SVC, STATCOM, et l'UPFC).
- Les résultats de simulation ont clairement montré qu'il existe une opportunité d'intégrer plus d'énergie provenant de sources PV dans le réseau électrique grâce aux systèmes FACTS.
- Les résultats de la simulation démontrent que les dispositifs de contrôle basés sur le WCMFO offrent une grande performance de contrôle par rapport aux autres techniques.
- Il est également intéressant de mentionner que le PSS-FOPID proposé basé sur le WCMFO est un contrôleur approprié pour améliorer le système électrique, en termes d'amortissement des oscillations et de réduction du dépassement, avec une amélioration de 44%. Par rapport aux (AEO, WCA et MFO)
- Les résultats expérimentaux obtenus ont démontré la supériorité et l'efficacité de l'approche développée (WCMFO) dans la sélection des paramètres optimaux du stabilisateur dans des conditions de fonctionnement sévères.

Conclusion générale

Conclusion Générale

Comme nous avons pu le constater tout le long de cette thèse, l'évaluation de la stabilité transitoire constitue un sujet d'actualité et revêt une importance primordiale dans l'exploitation et la planification des réseaux électriques.

Cette thèse contribue au domaine de recherche en développement de l'amélioration de la stabilité du système électrique. Le présent travail propose une approche d'optimisation développée qui fournit les paramètres de stabilisation optimaux des dispositifs de contrôle (PSS, PSS-PID, PSS-FOPID), visant à améliorer la stabilité du réseau électrique en minimisant l'écart de la vitesse angulaire, le temps de stabilisation et d'assurer un amortissement maximal des oscillations en présence d'un incident thermodynamique, en utilisant une nouvelle technique hybride appelée (WCMFO). Les performances du WCMFO ont été comparées avec trois d'autres techniques métaheuristiques, l'optimisation de l'écosystème artificiel (AEO), l'algorithme du cycle de l'eau (WCA) et l'optimisation de la flamme papillon (MFO) pour confirmer son efficacité. D'autre part, une étude montrant l'impact de l'intégration des sources d'énergie solaire (PV) a été réalisée.

Les principaux piliers de contribution du présent travail de recherche sont les suivants :

- Développement d'un code de calcul en utilisant l'algorithme hybride WCMFO pour la première fois pour optimiser les paramètres de trois systèmes de contrôle différents (PSS, PSS-PID, PSS-FOPID), afin d'améliorer les performances de la stabilité du réseau électrique.
- Il convient également de mentionner que le PSS- FOPID proposé basé sur le WCMFO est un contrôleur approprié pour améliorer la stabilité transitoire.
- Les résultats expérimentaux obtenus ont prouvé la supériorité et l'efficacité de l'approche développée en termes d'amortissement des oscillations et de la réduction du dépassement avec une amélioration de 44% (de 0.00412 à 0.00181 (rad/s)) par rapport aux autres techniques.
- Le modèle présenté dans cette étude permet une stabilisation plus réaliste et plus précise du système électrique.
- Le modèle développé vise à améliorer la stabilité du réseau électrique par la minimisation de la vitesse angulaire en présence d'une perturbation sévère.

Conclusion Générale

- Une amélioration considérable du TCID a été constatée après l'intégration des systèmes FACTS (SVC, STATCOM, et UPFC). L'UPFC montre une modeste supériorité par rapport au SVC et STATCOM.
- Les résultats obtenus offrent la possibilité d'intégrer plus d'énergie provenant de sources PV.

Les résultats présentés ouvrent la porte vers les perspectives suivantes :

- Intégrer le système de contrôle robuste (PSS-FOPID) dans un système d'alimentation multi-machines, en utilisant l'algorithme WCMFO basé sur une fonction multi-objectif pour obtenir les meilleurs paramètres du stabilisateur.
- Imposer des perturbations soudaines (court-circuit, surcharge et rupture de ligne), afin d'évaluer la capacité et l'efficacité du système de contrôle proposé (PSS-FOPID à base de WCMFO) à maintenir la stabilité du système électrique dans diverses conditions de fonctionnement.
- L'intégration des autres sources d'énergie renouvelable comme l'énergie éolienne.

Les différents résultats de ce travail de recherche ont donné naissance à plusieurs publications et conférences scientifiques :

- ✓ ‘‘L'amélioration de la stabilité transitoire du système électrique avec une large pénétration du solaire photovoltaïque à l'aide de FACTS’’ a été publié comme ‘‘chapitre dans Springer’’ en 2020.
- ✓ ‘‘L'algorithme du cycle de l'eau appliqué pour améliorer la stabilité transitoire du système électrique’’ a été publié comme un article de conférence dans ‘‘IEEE xplore, en 2020’’.
- ✓ ‘‘L'amélioration de la stabilité du système électrique à l'aide d'un nouvel algorithme hybride basé sur l'optimisation du cycle de l'eau et la flamme de papillon’’ les résultats de cette étude ont été valorisés dans un article scientifique dans le journal ‘‘Energies MDPI’’ en 2022.

Bibliographies

BIBLIOGRAPHIES

- [1] Sekhane Hocine. "Amélioration de l'écoulement des puissances à travers les systèmes FACTS pour les réseaux électriques". Thèse de doctorat, université Frères Mentouri de Constantine 1, 2019.
- [2] Ikram Boucetta, Djemai Naimi, Ahmed Salhi, Saleh Abujarad et Laid Zellouma. "Power System Stability Enhancement Using A Novel Hybrid Algorithm based on the Water Cycle Moth- Flame Optimization". *Energies*, 2022, volume 15, N: 14 pp 5060.
- [3] Fethi Boussadia, S. Blkhiat. "Analysis of February 3,2003 Blackout in Algerian Power System" International Conference on Processing Information and Electrical Engineering. Tebessa, Algeria, January 2014.
- [4] Liu Shuran, Deng Hui, Guosu. "Analyses and discussions of the Blackout in Indian power grid". *Energy Science and Technology Journal*, Volume 6 (1) pp 61-66, 2013.
- [5] Gurunath Gurrala, Indraneel Sen. "Power System Stabilizers Design for Interconnected Power Systems" *IEEE Transactions on Power System*. 2010, volume 25, Issue 2, pp 1042-1051.
- [6] Saleh M. Bamasak , Ahmed Bensenouci. "Tuning of fractional order- PID Controller for TCSC- based stabilizer". *IEEE International Energy Conference (ENERGYCOM)*, Croatia, 13-16 May 2014.
- [7] Pasuparti Sunil Kumar. "Transient Stability Enhancement of Power System Using TCSC". *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*, Volume 2, Issue 3, 317-324. 2012.
- [8] Endeshaw Solomon Bayu, Baseem Khan, Zaid M. Ali, Zuhair Muhammed Alaas, Om Prakash Mahela. "Mitigation of Low-Frequency Oscillation in Power System through Optimal Design of Power System Stabilizer Employing ALO". *Energies*, Volume 15, Issue 10, pp 3809.2022.
- [9] Javad Morsali, Rasool Kazemzadeh, Mohammad Reza Azizian, Hossein Morsali. "Novel Coordination of Dual Channel PSS, AVR and TCSC Damping Controller to Enhance Power System Overall Stability". 20th Iranian conference on Electrical Engineering (ICEE), Tehran, Iran, 15-17 May 2012.
- [10] Sheshnarayan; Bharat Verma; Prabin Kumar Padhy. "Design PID Controller based PSS using Cuckoo Search Optimization Technique". 4th International Conference on Recent Trends on Electronics Information, Communication and Technology (RTEICT), Bangalore, India, 17-18 May 2019.
- [11] Lakhdar Chaib, Abdelghani Choucha, Salem Arif. "Optimal design and tuning of novel fractional order PID power system stabilizer using a new metaheuristic Bat algorithm", *Ain Shams Engineering Journal*. J. 2017 volume 8, Issue 2, pp 113-125.
- [12] Nedumal Pugazhenthii, S. Selvaperumal, and K. Vijayakumar. "Nonlinear PID controller Parameter Optimization using Enhanced Genetic Algorithm for Nonlinear Control System. *J. of Cont. Eng. and Appl. Inf.* 2016, volume 18, pp 3-10.
- [13] Ikram Boucetta, Djemai Naimi, Ahmed Salhi, Saleh Abujarad et Laid Zellouma. "Water Cycle Algorithm Applied to Improve Transient Power System Stability. 1th International

BIBLIOGRAPHIES

- Conference on Communication, Control System Processing (CCSSP), El Oued, Algeria, 16-17 May 2020.
- [14] Thang Nguyen, Dieu Vo, "Improved social spider optimization algorithm for optimal reactive power dispatch problem with different objectives," *Neural Computing and Applications*, 2019, volume 32, no. 6, pp. 1-32.
- [15] Hasan Alkhatib, "Etude de la stabilité aux petites perturbations dans les grands réseaux électriques : optimisation de la régulation par une méthode métaheuristique". Thèse de doctorat. L'Université Paul Cézanne D'Aix-Marseille, 2008.
- [16] Hussein Suprême, "Détection en Temps Réel de L'instabilité Transitoire Des Réseaux Électriques Avec Les Mesures Synchronisées de Phaseurs", Thèse de doctorat. École de Technologie supérieure Université du Québec, 2017.
- [17] Gacem Abdelmalek, "Commande Robuste d'un Dispositif FACTS par les Méthodes Métaheuristiques pour la Stabilité de Tension d'un Réseau Electrique". Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider – Biskra 2019.
- [18] Kundur, Prabha, John Paserba, Venkat Ajjarapu, Göran Andersson, Anjan Bose, Claudio Canizares, Nikos Hatziargyriou, David Hill, Alex Stankovic et Carson Taylor. "Definition and classification of power system stability IEEE/CIGRE joint task force on stability terms and definitions". *IEEE transactions on Power Systems*. 2004, volume 19, n° 3, p. 1387-1401.
- [19] Zabaïou, Tarik, Louis-A Dessaint et Innocent Kamwa. "Preventive control approach for voltage stability improvement using voltage stability constrained optimal power flow based on static line voltage stability indices". *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 8, N° 5, p. 924-934. 2014.
- [20] Billinton, Roy. "Power system reliability evaluation". Edition Taylor & Francis. En 1970.
- [21] Diane Leblanc, "Contribution à l'étude de la stabilité et stabilisation des réseaux électriques industriels", Thèse de doctorat. Université de Lorraine, France. 2014.
- [22] Kamel Saoudi, "Stabilisateurs intelligents des systèmes électro-énergétiques", Thèse de doctorat, Univ Ferhat Abbas — Setif1, Novembre 2014.
- [23] P Kundur, "Power System Stability and Control", New York: Mc Graw Hill, 1994.
- [24] Basler M J and all, "Understanding power system stability", *Proceedings of the 58th Annual Conference for Protective Relay Engineers*, April 2005, pp 46-67.
- [25] Fetissi Selwa, "Impacts de l'insertion des énergies renouvelables sur le réseau de transport HTB", Thèse de doctorat. Université des Frères Mentouri de Constantine.2018.

BIBLIOGRAPHIES

- [26] Kundur P., Klein M., Rogers G.J. and Zywno M.S., "Application of Power System Stabilizers for Enhancement of Overall System Stability", IEEE Transaction on Power System, May 1989 volume 4, n°2, pp. 614-626.
- [27] Larsen E.V. and Swann D.A., "Applying power system stabilizers part-I: General concepts", IEEE Trans. Power App. Sys. Jun. 1981, volume, 100, n°. 6, pp. 3017-3024.
- [28] Fleming R.J., Mohan M.A. and Parvati Sam K., "Selection of parameters of stabilizers in multimachine power systems", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1981, volume 100, pp. 2329-2333.
- [29] Ostojic D.R., "Identification of optimum site for power system stabilizer applications". IEE Proc, Pt. C. September 1988, volume 135, n°. 5, pp. 416-419.
- [30] Rihem Farkh, Kaouther Laabidi, Mekki Ksouri," Robust PI/PID controller for interval first order system with time delay", International Journal of Modelling, Identification and Control. 2011, volume13 N°.1/2, pp.67 – 77.
- [31] Rihem Farkh," Commande PID Des Systèmes À Retard". Thèse de doctorat. École Nationale d'Ingénieurs de Tunis 2011.
- [32] Daniel Garcia," Auto-Ajustement de Régulateurs PID robustes dans le domaine Fréquentiel", Thèse de doctorat. École Polytechnique Fédérale De Lausanne,2006.
- [33] Aleksei Tepljakov, Baris Baykant Alagoz, Celaledin Yeroglu, Emmanuel Gonzalez, S. Hassan Hossein Nia, and Eduard Petlenkov." FOPID Controllers and Their Industrial Applications: A Survey of Recent Results". 3rd IFAC Conference on Advances in Proportional Integral-Derivative Control, Ghent, Belgium, May 9-11, 2018.
- [34] Nabil Lachhab, Ferdinand Svaricek, Frank Wobbe and Heiko Rabba." Fractional Order PID Controller (FOPID)-Toolbox", European Control Conference (ECC) July 17-19, Zürich, Switzerland, 2013.
- [35] Majid Zamani, Masoud Karimi-Ghartemani, Nasser Sadati." FOPID Controller Design for Robust Performance Using Particle Swarm Optimization" An International Journal for Theory and Applications. 2007, volume 10, N° 2.
- [36] H. Boubakeur, "Contribution à l'Amélioration de l'Efficacité des Réseaux Electriques par l'Intégration et le Contrôle Flexible de l'Energie Eolienne et des Systèmes FACTS", Thèse de Doctorat, Université de Mohamed Khider, Département de génie électrique, électrotechnique, Biskra, 2017.
- [37] A. Adel, "Apport du STATCOM et du SSSC (Static Synchronous Series Compensator) l'amélioration du comportement des réseaux électriques", Thèse de Doctorat, Université de Badji Mokhtar, Département d'électrotechnique, Annaba, 2016.

BIBLIOGRAPHIES

- [38] Herbadji Ouafa, "Contribution à l'optimisation des réseaux électriques en présence des Multi-FACTS par des méthodes métaheuristiques hybrides", Thèse de Doctorat. Université Ferhat Abbas - Sétif 1, 2019.
- [39] J.-C. Passelergue, "Interaction des dispositifs FACTS dans les grands réseaux électriques", Thèse de doctorat de l'INPG, 1998.
- [40] S. Escander Gholipour, "Apport de l'UPFC à l'amélioration de la stabilité transitoire des réseaux électriques", Thèse de Doctorat, Université de Henri Poincar Nancy 1, 2003.
- [41] B. Gattal, K. Chikhi et C. Fetha, "Amélioration de la qualité de l'énergie électrique : Identification des creux de tension", Revue des Energies Renouvelables. 2014, volume 17 N°4 651 – 661.
- [42] Vanya Ignatova, "Méthodes d'analyse de la qualité de l'énergie électrique. Application aux creux de tension et à la pollution harmonique". Thèse de Doctorat. Université Joseph-Fourier - Grenoble I, France 2006.
- [43] Haddad Salim, "Gestion de la Qualité D'énergie Electrique dans un Réseau de Transmission", Thèse de Doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba, 2010.
- [44] Harfouchi Fatima, "Contribution à l'optimisation par colonies d'abeilles artificielles : Application à la conception de systèmes intelligents" Thèse de Doctorat. Université M'Hamed Bougara – Boumerdes. 2019.
- [45] S. Khalilpourazari et S. Khalilpourazary "Optimization of production time in the Multi-pass Milling Process via a Robust Grey Wolf Optimization". Neural Computing Application. Volume16, 2016.
- [46] S. Khalilpourazari et S. Khalilpourazary "A Robust Stochastic Fractal Search approach for Optimization". Swarm Evolution Computing, 2017.
- [47] Salim ABDESSELAM, "Conception d'un système d'optimisation pour le positionnement de caméras pour la motion capture MOCAP", Thèse de Doctorat. Université Mohamed Khider – Biskra, 2018.
- [48] Ilhem Boussaid, "Perfectionnement de métaheuristiques pour l'optimisation continue" Thèse de Doctorat. Université Paris-Est ; Université des sciences et de la technologie Houari Boumediene 2013.
- [49] Kherfane Riad Lakhdar, "Optimisation Multi-objectif de L'écoulement de Puissance Par des Algorithmes Multi-agents Probabilistes". Thèse de Doctorat. Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2017.

BIBLIOGRAPHIES

- [50] Jean-Charles Boisson, "Modélisation et résolution par métaheuristiques coopératives : de l'atome à la séquence protéique", Thèse de Doctorat. Université des Sciences et Technologies de Lille, 2008.
- [51] Abbas El Dor, "Perfectionnement des algorithmes d'optimisation par essaim particulaire : applications en segmentation d'images et en électronique", Université Paris-Est, France 2012.
- [52] Johann Dréo "Adaptation de la méthode des colonies de fourmis pour l'optimisation en variables continues. Application en génie biomédical" Thèse de Doctorat. Université Paris12. France 2004.
- [53] D. H. Wolpert et W. G. Macready. No free lunch theorems for optimization. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 1(1) :67–82, 1997.
- [54] M. Mihoub, A. Rhaman, and P. Lorenz. Metaheuristic rssi based for node localization in distributed wireless sensor network. Global Information Infrastructure and Networking Symposium, pages 64-70,2017.
- [55] Mourad Daoudi "Approches de résolution par les métaheuristiques de problèmes d'optimisation combinatoire NP-Difficiles" thèse de doctorat, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene.2012.
- [56] Ilhem Boussaid, "Perfectionnement de métaheuristiques pour l'optimisation continue". Thèse de doctorat. Université Paris-Est Créteil, 2013.
- [57] Vincent Gardeux, "conception d'heuristiques d'optimisation pour les problèmes de grande dimension application à l'analyse de données de puces à ADN. Thèse de doctorat, Université de PARIS-EST CRÉTEIL, 2011.
- [58] Lapetoule Kévin" Les Algorithmes Métaheuristiques" Création Commons Paternité France Edition Juin 2006.
- [59] Blum et A. Roli. Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual comparison. ACM Computing Surveys, 35(3) :268–308, 2003.
- [60] Luong, T.V " Métaheuristiques parallèles sur GPU", Thèse de doctorat Université Lille Nord-de- France Sciences et Technologies, 2011.
- [61] Osman, I, H. An introduction to metaheuristic. In Lawrence M Wilsdon C (eds) Operational Research tutorial papers, Stockton Press, Hampshire. Publication of the Operational Research Society Birmingham, UK 1995, pp 92-122.

BIBLIOGRAPHIES

- [62] Khalilpourazari S, Khamseh Arshadi.A. “Bi-objective emergency blood supply chain network design in earthquake considering earthquake magnitude: a comprehensive study with real world application”. *Ann Oper Res.* 2017, pp 1-39.
- [63] AMROUCHE Hakima, “l’hybridation des métaheuristiques” Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri, Tizi -Ouzou 2012.
- [64] Khalilpourazari S, Khalilpourazary S “A lexicographic weighted Tchebycheff approach for multi-constrained multi-objective optimization of the surface grinding process”. *Eng Optim.* 2017, volume 49, pp 878-895.
- [65] Mirjalili S, Lewis A.” The Whale Optimization Algorithm”. *Adv Eng Soft.* 2016, volume 95, pp51-67.
- [66] Saeid Barshandeh, Farhad Piri, Simin Rasooli Sangani,” HMPA: an innovative hybrid multi-population algorithm based on artificial ecosystem-based and Harris Hawks optimization algorithms for engineering problems”. *Engineering with Computers* part of Springer Nature, 2020.
- [67] Gehad Ismail, S. Aboul Ella, H. Ahmad Taher, A. “Feature selection via a novel chaotic crow search algorithm” *Neural Computing and Applications*, 2019, volume 31, pp 171-188.
- [68] Yassine Meraihi, Asma Benmessaoud, G. Amar Ramdane, C. and Dalila A. “A comprehensive survey of crow search algorithm and its applications”, *Artificial Intelligence Review.* 2021, volume 54, pp 2669-2716.
- [69] Askarzadeh A. “A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: crow search algorithm”. *Comput Struct* 169. pp 1–12, 2016.
- [70] M. Mitchell. “An introduction to genetic algorithms”. MIT press, 1998.
- [71] Dréo, J., Pétrowski, A., Siarry, P. et Taillard, E. *Métaheuristiques pour l'optimisation difficile.* Eyrolles, 2003.
- [72] Seyedali Mirjalili, “Genetic Algorithms”, *Evolutionary Algorithms and Neural Networks* part of the studies in computational Intelligence book series, Volume 780, 2019.
- [73] Marino Widmer,” Les Métaheuristiques : Des Outils Performants Pour Les Problèmes Industriels” 3 Conférence Francophone de Modélisation et Simulation “Conception, Analyse et Gestion des Systèmes Industriels” MOSIM’01 — Troyes (France) du 25 au 27 avril 2001.
- [74] Ahmad Eid, Salah Kamel, Ahmed Korashy, and Tahir Khurshaid,” An Enhanced Artificial Ecosystem-Based Optimization for Optimal Allocation of Multiple Distributed Generations”, *IEEE Access* 2020.

BIBLIOGRAPHIES

- [75] Zhao W, Wang L, Zhang Z. "Artificial ecosystem-based optimization: A Novel nature-inspired meta-heuristic algorithm". *Neural Comput Appl.* 2020, volume 32, pp 9383–9425.
- [76] Hadi Eskandar, Ali Sadollah ,Ardeshir Bahreininejad ,Mohd Hamdi. " Water cycle algorithm – A novel metaheuristic optimization method for solving constrained engineering optimization problems", *Computers & Structures.* Volumes 110–111, Pages 151-166, 2016.
- [77] Seyedali Mirjalili. "Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm" *Knowledge-Based Systems.* Volume 89, Pages 228-249, 2015.
- [78] Mohammad Shehab, Laith Abualigah, Husam Al Hamad, Hamzeh Alabool, Mohammad Alshinwan, Ahmad M. Khasawneh. "Moth–flame optimization algorithm: variants and applications" *Neural Computing and Applications part of Springer Nature* 2019.
- [79] Ali MZ, Awad NH, Suganthan PN, Duwairi RM, Reynolds RG "A novel hybrid Cultural Algorithms framework with trajectory-based search for global numerical optimization". *Inf Sci.* 2016, volume 334, pp 219-249.
- [80] Khalilpourazari S, Pasandideh SHR. "Multi-item EOQ model with nonlinear unit holding cost and partial backordering: moth-flame optimization algorithm". *J Indust Prod Eng.* 2017, volume 34, pp 42-51.
- [81] Wang GG, Gandomi AH, Zhao X, Chu HC. "Hybridizing harmony search algorithm with cuckoo search for global numerical optimization". *Soft Comput.* 2016, volume 20, pp 273-285.
- [82] Wang G, Guo L. "A novel hybrid bat algorithm with harmony search for global numerical optimization". *J Appl Math.* 2013.
- [83] Khalilpourazari, S and Khalilpourazary, S. "An efficient hybrid algorithm based on Water Cycle and Moth-Flame Optimization algorithms for solving numerical and constrained engineering optimization problems". *Soft Computing.* 2019.
- [84] Günther R. Raidl. "A Unified View on Hybrid Metaheuristics, Institute of Computer Graphics and Algorithms Vienna University of Technology", Vienna, Austria, 2006.
- [85] D. Duvidier, Etude de l'hybridation des méta-heuristiques, application à un problème d'ordonnancement de type jobshop, Thèse de Doctorat, université du littoral France, décembre 2000.
- [86] JEBARI. H, RAHALI. S, SAMADI. H. "Hybridation des métaheuristiques pour la résolution de problème d'ordonnancement multi-objectif dans un atelier flow-shop". *Xème Conférence Internationale : Conception et Production Intégrées, CPI 2015, 2-4 Décembre 2015, Tanger - Maroc.*

BIBLIOGRAPHIES

- [87] E. Burke, M. Gendreau, M. Hyde, G. Kendall, G. Ochoa, E. Özcan, et R. Qu. “Hyper-heuristics: a survey of the state of the art”. *Journal of the Operational Research Society*. 2013, volume 64, pp 1695–1724.
- [88] Miloud Mihoubi, “ Une métaheuristique hybride pour le problème d’optimisation dans les réseaux de capteurs sans fils” Thèse de Doctorat Université Djillali Liabès de Sidi Bel Abbès. 2021.
- [89] I. Ciornei et E. Kyriakides. “Hybrid ant colony-genetic algorithm (gaapi) for global continuous optimization”. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 2012, volume 42, pp 234–245.
- [90] S. Li, Mingkui Tan, I. Tsang, et J. Kwok. “A hybrid pso-bfgs strategy for global optimization of multimodal functions”. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, 41:1003–1014, 2011.
- [91] J. Tsai, T. Liu, et J. Chou. “Hybrid taguchi-genetic algorithm for global numerical optimization”. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*. 2004, volume 8, pp 365–377.
- [92] Duvivier, D. “Étude de l’hybridation des méta-heuristiques, application à un problème d’ordonnement de type job-shop”. Thèse de doctorat, Université du Littoral Côte d’Opale, France. 2000
- [93] F. Milano, “An Open Source Power System Analysis Toolbox”, *IEEE Transactions on Power Systems*. August 2005, volume 20, N 3.
- [94] Naimi Djemai, “ optimisation de l’intégration des ressources énergétiques décentralisées (RED) aux réseaux de distribution dans un marché de l’électricité dérégulé”. Thèse de doctorat. Université Mohamed Khider Biskra, 2014.
- [95] Mr. B. T. Ramakrishna Rao, P. Chanti, N. Lavanya, S. chandra Sekhar, Y. Mohan kumar “ Power System Stability Enhancement Using Fact Devices “*Journal of Engineering Research and Applications*. April 2014, volume. 4, Issue 4 (Version 1), pp.339-344.

Annexe

A

Les données du système électrique (SMIB)

Parameters	Valeurs (p.u)
Impédance de ligne $R_e + jX_e$	0.02 + j 0.65
Réactance de l'axe D, X_d	1.81
Réactance de l'axe Q, X_q	1.76
Résistance d'induit, R_a	0.003
Tension de JB infinie, V_{in}	1
Constante d'inertie, H	3.5
Vitesse nominale, w_0	377
Constante de temps du circuit de champ, T'_{d0}	8 (s)
Facteur d'amortissement, K_D	0
Gain de regulation, K_A	200
Constante du temps d'excitateur, T_E	1
Gain d'excitation, K_E	-0.05
La constante de temps, T_w	10
Charges nominales, P_t, Q_t	0.5, 0.3
Fréquence	60 HZ

Le modèle du système électrique en MATLAB/SIMULINK

SMIB+ PSS-FOPID

