



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur
et de la Recherche scientifique



Mémoire de Fin d'Etude

En vue de l'obtention du diplôme de

MASTER ACADEMIQUE

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Génie Électrique

Spécialité: Réseaux Électrique

Thème

**Prédiction de la tension de contournement
par l'approche d'optimisation PSO**

Dirigé par :

Dr : Khechekhouche Ali

Réalisé par :

Berrim Ali

Megdoud Dhia Eddine Abd Alhak

Année universitaire 2018/2019



DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

♦ *À mes très chers parents qui m'ont
aidés et m'ont encouragé durant toutes
mes études.*

♦ *À mes chers frères et mes chères sœurs,*
♦ *À toute ma famille,*
♦ *À tous mes amis, surtout Megdoud Dhia Eddine Abd Alhak
et avec lesquels j'ai partagé mes
meilleurs moments.*

Berrim Ali



DEDICACE

Je dédie ce modeste travail :

◆ *À mes très chers parents qui m'ont
aidés et m'ont encouragé durant toutes
mes études.*

◆ *À mes chers frères et mes chères sœurs,*

◆ *À toute ma famille,*

◆ *À tous mes amis, surtout Berrim Ali*

et avec lesquels j'ai partagé mes

meilleurs moments.

Remerciement

Nous remercions tout d'abord, à Dieu le tout puissant qui nous a donné la foi, le courage et la patience de parvenir à finir ce modeste travail

*Nous tenons à adresser nos vifs remerciements pour sa collaboration son soutien moral, à notre encadreur Mr: **Khechekhouche Ali**, pour nous avoir suivies durant la préparation de ce travail et pour son aide si précieuse, ces nombreux conseils et suggestions.*

Les collègues de la première promotion de notre spécialité à leur soutien que dieu les aide dans leur vie professionnelle, Nos familles respectueuses à leur soutien matériel et moral, et l'atmosphère qui nous ont présenté.

Résumé

Le phénomène du contournement des isolateurs des lignes aériennes soumis à la pollution naturelle, est un problème majeur rencontré dans les réseaux de transport d'énergie électrique. Il entraîne souvent le délestage de la ligne soutenue par l'isolateur perturbant, au moins de façon provisoire.

Dans ce mémoire, notre travail consiste à appliquer la technique d'optimisation par essaim particules PSO. Ce travail porte sur la proposition d'une nouvelle formulation de la résistance de la couche de pollution permettant d'améliorer les modèles dynamiques de contournement, l'estimation des paramètres de l'arc par la méthode PSO et la prédiction de la tension critique de contournement.

À l'aide d'un modèle mathématique de Topalis qui dépend sur les caractéristiques géométriques de l'isolant, nous l'utilisons pour trouver les paramètres de l'arc de dérivation, Nous avons choisi l'approche PSO pour trouver les paramètres de l'arc de contournement.

Pour valider les résultats, nous avons utilisé des valeurs expérimentales et les faisons correspondre aux résultats théoriques proposés dans la littérature.

Dans ce dernier cas, nous avons proposé aux deux formules la tension critique et comparé leurs résultats avec la formule de Wilkins. À la fin, nous avons constaté que la méthode de PSO est efficace pour déterminer paramètres de l'arc et nous les utiliserons pour prédiction de la tension critique de contournement.

Mots-Clés : Haute tension, décharge électrique, contournement des isolateurs pollués, Résistance de la couche de pollution , optimisation par essaim particules.

Abstract

The Phenomenons of flashover airlines insulator that is subjected to natural pollution, is a major problem encountered in power transmission networks. It often leads to the unloading of the line supported by the disturbing insulator, at least temporarily.

In this thesis, our work consists of applying the PSO particle swarm optimization technique. This work concerns the proposal of a new formulation of the resistance of the pollution layer making it possible to improve the dynamic models of bypass, the estimation of the parameters of the arc by the particle swarm optimization method (PSO) and the prediction of the critical flashover voltage.

Using a mathematical model of Topalis that depends on the geometric characteristics of the insulator, we use it to find the parameters of the bypass arc, We chose the PSO approach to find the parameters of the flashover arc.

To validate the results, we use experimental values and make them correspond to the theoretical results proposed in the literature.

In the latter case, we have proposed the two critical tension formulas and compared their results with the Wilkins formula. In the end, we found that the PSO method is effective at determining arc parameters and we will use them for predicting the critical flashover voltage.

Keywords : High voltage , electrical discharge, flashover of polluted insulators, Pollution layer resistance, particle swarm optimization.



Sommaire

Sommaire:

<i>Sommaire:</i>	I
<i>Liste des Tableaux:</i>	IV
<i>Liste des Figures:</i>	V
<i>Liste des symboles:</i>	VII
Introduction générale:	1

CHAPITRE I

REVUE DE LITTERATURE SUR LE PHENOMENE DU CONTOURNEMENT

Introduction:	3
I.1 Phénomène de contournement des isolateurs pollués:	3
I.1.1 Processus de contournement électrique:	3
I.1.2 Diamètre de la décharge:	4
I.1.3 Profil de l'isolateur :	5
I.1.4 Diamètre moyen d'un isolateur réel:	6
I.2 Modélisation théorique et expérimentale du phénomène de contournement:	9
I.2.1 Modèles électriques:	9
I.2.1.1 Modèle d'Obenaus:	9
I.2.1.2 Modèle de Neumarker:	10
I.2.1.3 Modèle de Wilkins:	11
I.2.1.4 Modèle de Zhicheng et Renyu:	12
I.2.1.5 Modèle de Dhahbi et Béréal:	13
I.3 Mécanisme de propagation:	14
I.3.1 Propagation par ionization:	14
I.3.2 Propagation par force électrostatique:	15
I.4 Critères de propagation de la décharge:	16
I.4.1 Critère d'Hampton:	16
I.4.2 Critère d'Hesketh:	17
I.4.3 Critère de Wilkins:	17
I.4.4 Critère d'Anjana et Lakshminarasimha:	17
I.4.5 Critère de Ghosh:	18

Conclusion:.....	18
------------------	----

CHAPITRE II

GENERALITES SUR L'APPROCHE PSO

Introduction:	19
II.1 Définition de l'Optimisation :	19
II.2 Fonction Objectif :.....	20
II.3 Optimisation par Essaim de Particules (PSO):.....	20
II.4 Concept de base de PSO:	20
II.4.1Principe de la Technique PSO :	20
II.4.2Principe de fonctionnement de l'Algorithme PSO :	24
II.4.3Formulation Mathématique de l'Algorithme PSO :	25
II.5 Algorithme de PSO:	27
II.6 Paramètres de l'algorithme :	29
II.6.1 Vitesse maximale:	29
II.6.2 Facteur d'inertie :	29
II.7 Paramétrage de la méthode:	30
II.7.1 Le calcul parallèle:	30
II.7.2 Le critère d'arrêt:	30
II.8 Avantages et l' Inconvénients de PSO:	31
II.8.1 Avantages de PSO:.....	31
II.8.2 Inconvénients de PSO:	31
II.9 Exemple d'Application :	31
Conclusion:.....	34

CHAPITRE III

ESTIMATION DES PARAMETRES DE L'ARC DE CONTOURNEMENT PAR L'APPROCHE PSO

Introduction:	35
III.1.Procédures expérimentales et collection de données :	36
III.2.Estimation des paramètres de l'arc de contournement:	36

III.2.1.Model mathématique :	37
III.2.2.Données expérimentales utilisées :	39
III.3. Procédure d'optimisation:	41
III.3.1. Procédure d'optimisation pour PSO :	41
III.4. Les paramètres de PSO:	43
III.4.1.Les valeurs adoptées pour les paramètres de PSO :	43
III.4.2.L'espace de recherche :	43
III.5. Résultats et discussion:	44
III.5.1.Détermination Les valeurs des paramètres de l'arc A et n par l'approche PSO.....	44
III.5.1.1. simulation en matlab de méthode PSO sur Le phénomène du contournement :	44
III.6.Validité des paramètres A et n :	48
III.7. Estimation analytique de la tension U_C basée sur des formules simplifiées :	50
III.7.1. Travaux de Neumärker :	50
III.7.1.1. Résultats de Travaux de Neumärker :	51
III.7.2. Travaux de Ghosh et Chatterjee:	52
III.7.2.1. Résultats de Travaux de Ghosh et Chatterjee:	52
Conclusion.....	53
CONCLUSION GENERALE	54
Bibliographie:	A



Liste des Tableaux

Liste des Tableaux:

CHAPITRE II

Tableau II.1 Résultats du test N° 1.

Tableau II.2 Résultats du test N° 2.

CHAPITRE III

Tableau III.1 Données expérimentales.

Tableau III.2 : Valeur des constantes A et n selon plusieurs auteurs.

Tableau III.3: Estimation des paramètres de l'arc par l'approche PSO.

Tableau III.4 les valeurs de A et n .

Tableau III.5: Estimation des paramètres de l'arc par l'approche PSO (Neumärker) .

Tableau III.6: Estimation des paramètres de l'arc par l'approche PSO (Ghosh et Chatterjee) .

.



Liste des Figures

Liste des Figures:

CHAPITRE I

Figure I.1: Les étapes du contournement sur une surface polluée.

Figure I.2: Exemple de profil réel d'un isolateur.

Figure I.3: Assimilation théorique d'un isolateur à un cylindre.

Figure I.4: Diamètre moyen des isolateurs IEEE et EPDM.

Figure 1.5: Modèle d'Obenaus. L représente la longueur de fuite totale.

Figure I.7: Modèle de Wilkins.

Figure I.8: Modèle de Zhicheng et Renyu.

Figure I.9 a: Schéma d'un isolateur pollué.

Figure I.9.b: Circuit électrique équivalent.

Figure I.10: Mécanisme de propagation par ionisation.

Figure I.11 : Mécanisme de propagation par force électrostatique.

CHAPITRE II

Figure II.1: Groupe de : (a) oiseaux, (b) poissons.

Figure II.2: Mouvement de chaque particule.

Figure II.3 : Voisinage géographique à l' instant t et t+1.

Figure II.4 : Voisinage en cercle (choix régulier des informatrices).

Figure II.5 : Voisinage en cercle (choix aléatoire des informatrices).

Figure II.6: Schéma vectorielle du déplacement d'une particule.

Figure II.7: Organigramme de principe de PSO.

Figure II.8: Fonction de « *Rastrigin* ».

Figure II.9 Convergence de la fonction objectif « *Rastrigin* » vers l'optimum global TestN°1.

Figure II.10 Convergence de la fonction objectif « *Rastrigin* » vers l'optimum global TestN°2.

CHAPITRE III

Figure III.1: Circuit équivalent pour l'évaluation de la tension de contournement.

Figure III.2: Organigramme de PSO.

Figure III.3: Variation de la constante A en fonction du nombre d'itérations.

Figure III.4: Variation de la constante n en fonction du nombre d'itérations.

Figure III.5: Evolution de la fonction fitness F_g en fonction du nombre d'itérations.

Figure III.6: Tension de contournement en fonction de la conductivité surfacique (profil 1).

Figure III.7: Tension de contournement en fonction de la conductivité surfacique (profil 2).

Figure III.8: Tension de contournement en fonction de la conductivité surfacique (profil 3).

Figure III.9: Evolution de la fonction fitness F_g en fonction du nombre d'itérations.

FigureIII.10: Evolution de la fonction fitness F_g en fonction du nombre d'itérations.

Liste des symboles

Liste des symboles:

Symboles	Signification
PSO	Particle swarm optimisation
r_d	Rayon de la décharge
w_r	Largeur de la rainure
d_r	Hauteur de la rainure
r_r	Distance sépare la rainure et l'axe de symétrie de l'isolateur
ξ_r	Paramètre caractérise l'efficacité de la longueur de fuite
k_c	Paramètre dépend du niveau de contamination
k_r	Rapport entre la longueur de l'arc et la ligne de fuite
k_t	Nombre de couches de pollutions en série
U	Tension appliqué
V_{arc}	Tension d'arc
V_e	La chute da tension cumulée aux bornes des électrodes
U_c	Tension critique de contournement
L	lignes de contournement
L_f	ligne de fuite
I	Le courant de fuite
F	Facteur de forme d'un isolateur
A, n	constants de l'arc
X	Longueur de l'arc
U_m	Tension de mesure
R	rayon
ϵ_r	Permittivité relative
σ_s	Conductivité surfacique de la couche de pollution
σ_e	Conductivité superficielle effective
D	Diamètre maximal de l'isolateur
R_p	Résistance de la couche de pollution
C_s	Capacité de la couche de pollution
ρ_p	résistivité de la pollution
ϵ	permittivité de la pollution
F_g	fonction objectif
N	La taille de l'essaim

C_p	La DDSE (Densité de Dépôt de Sel Equivalente)
$k_{\max}$	Le nombre Maximal d'itérations
X_i	La position actuelle de la particule i
V_i	La vitesse courante de la particule i
$\vec{P}_{\text{best}i}$	meilleure fitness obtenue pour la particule
$\vec{G}_{\text{best}}$	meilleur fitness des voisins
ρ	Valeur aléatoire positive
$F_{\text{obj}}(X)$	fonction objective
$\max F_{\text{obj}}(X)$	fonction objective à maximiser
$\min f_{\text{obj}}(X)$	fonction objective à minimiser
r	nombre réel aléatoire sur l'intervalle [0,1]
w	le facteur d'inertie
c_1 et c_2	les constantes d'accélération
$r1, r2$	Variables aléatoires uniformes
ρ	Valeur aléatoire positive
t	l'itération courante

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale:

Le phénomène du contournement des isolateurs des lignes aériennes soumis à la pollution naturelle, est un problème majeur rencontré dans les réseaux de transport d'énergie électrique. Il entraîne souvent le délestage de la ligne soutenue par l'isolateur perturbant, au moins de façon provisoire.

En effet par temps de pluie ou de brouillard, les dépôts polluants se fixant sur les surfaces isolantes réduisent considérablement la résistivité superficielle et le contournement peut alors survenir. L'humidification des couches polluantes facilite en fait, la circulation d'un courant de fuite sur les surfaces isolantes provoquant des échauffements locaux et par la suite l'assèchement de la couche de pollution. Ainsi, la répartition du potentiel est modifiée d'une façon significative et des arcs partiels peuvent apparaître. Ces derniers peuvent évoluer jusqu'au contournement total de l'isolateur. Les conséquences du contournement vont de la détérioration de la surface de l'isolateur à la mise hors service de l'équipement haute tension et par suite la continuité de service n'est plus assurée. Ainsi, une des caractéristiques principales d'un isolateur haute tension sera donc sa tenue au contournement en fonction de l'environnement dans lequel il est utilisé.

Plusieurs travaux expérimentaux et théoriques ont été consacrés pour expliquer le mécanisme conduisant au contournement des isolateurs pollués. Le but de ces travaux est d'élaborer un modèle pouvant tenir compte des paramètres réels intervenant dans la génération et la propagation des arcs électriques sur les surfaces isolantes. Il s'agit en particulier de la forme des isolateurs, de la répartition des couches polluantes, de la résistivité des échanges thermiques, de la non-uniformité du mouillage, de l'intensité des arcs au voisinage de la surface isolante, de la formation d'arcs multiples et de la détermination de la tension de contournement.

Deux paramètres sont très importants pour calculer la tension critique de contournement, les caractéristiques de la décharge (l'arc électrique) et la résistance de la couche de pollution. Slama [1] dans sa thèse de doctorat, a donné des informations détaillées sur les caractéristiques de la décharge. L'auteur note du fait que les valeurs constantes de l'arc sont dynamiques et dépendent des éléments du système de circuit électrique équivalent et les paramètres statique de la décharge (A, n).

Woodson et McElroy [2] montrent que la résistance superficielle de la couche de pollution humide peut s'exprimer en fonction du rayon de l'électrode externe et de la résistivité superficielle du polluant. En utilisant la méthode des fonctions conjuguées pour résoudre problème de champ Laplacien en deux dimensions, Wilkins [3] a obtenu comme expression la résistance de la couche de pollution en tenant compte de la constriction des lignes de courant au niveau des points formant la base de l'arc.

Le phénomène de contournement dans les isolateurs pollués n'a pas encore été décrit avec précision par un modèle mathématique. La difficulté principale est la définition des constantes de l'arc, qui est formé dans les bandes sèches lorsque la tension est supérieure à sa valeur critique.

Ces dernières années on utilise l'intelligence artificielle dans les applications haute tension, comme l'estimation de la sévérité de pollution et la prédiction de la tension ou le courant de contournement.

Dans cette mémoire, nous avons choisi la technique d'optimisation par essaims de particules (PSO) pour déterminer les paramètres de l'arc électrique, la prédiction de la tension critique de contournement en sélectionnant ses paramètres nécessaires .

Le manuscrit de ce mémoire comporte trois chapitres qui sont organisés comme suit :
Le premier chapitre, présente les informations récoltées de façon générale sur le phénomène de contournement, ainsi que les différents modèles électriques rapportés dans la littérature.

Le second chapitre, contient les concepts et les règles de base de l'optimisation par essaims de particules (PSO).

Le dernier chapitre est consacré pour l'application de la technique d'optimisation par essaims de particules (PSO) dans la modélisation du phénomène de contournement, notamment la détermination des caractéristiques statique de l'arc A et n et prédiction de la tension critique de contournement.

CHAPITRE I

REVUE DE LITTERATURE SUR LE PHENOMENE DU CONTOURNEMENT

Introduction:

Le contournement des isolateurs par un arc électrique dû à la pollution atmosphérique est une des causes principales des interruptions de l'alimentation en énergie des réseaux électriques.

Depuis une cinquantaine d'années, plusieurs travaux ont été menés pour comprendre les mécanismes conduisant au contournement des isolateurs pollués et se prémunir d'outils permettant la prédiction de ce phénomène [1-4].

D'une façon générale, on appelle « Contournement » la rupture diélectrique d'une atmosphère gazeuse ou du vide au voisinage d'une surface isolante. Plusieurs étapes sont franchies avant que n'intervienne le contournement de l'isolateur : amorçage d'une décharge, propagation, rallumage après le passage par zéro du courant pour le cas alternatif et enfin court-circuit et mise hors service du dispositif d'isolement [5-6].

La rupture ne peut être générée que si le champ électrique au niveau des électrodes (C'est la tension appliquée) dépasse une certaine valeur dite « seuil » (la tension d'amorçage). Cette décharge ne peut évoluer que si certaines conditions sont réunies. On parle de rallumage de l'arc lorsqu'il s'agit de courant alternatif. Dans ce cas, l'arc est interrompu à la fin de chaque alternance puis réapparaît quelques instants plus tard lorsque la tension est suffisante pour provoquer le réamorçage de la décharge [7-8].

L'objectif de ce chapitre est donc d'effectuer une revue succincte du phénomène de contournement des isolateurs pollués ainsi que les principaux modèles rapportés dans la littérature.

I.1 Phénomène de contournement des isolateurs pollués:

I.1.1 Processus de contournement électrique:

Le contournement d'une surface isolante polluée est le résultat d'une évolution que l'on peut schématiser par la Figure I.1 [9-10-11]:

- L'écoulement du courant de fuite à travers l'électrolyte qui recouvre l'isolement provoque un échauffement qui accroît la conductivité du milieu.
- L'échauffement croissant provoque une sorte de resserrement circulaire des lignes de courant, une zone sèche se produit.

- La tension se trouve reportée aux bornes de la zone sèche et les arcs locaux sont susceptibles d'apparaître; la zone sèche s'élargit.
- Le contournement est un phénomène aléatoire. En effet, à partir de ce développement :
 - ❖ L'arc peut s'éteindre ou trouver une position plus stable.
 - ❖ L'arc peut atteindre les électrodes et provoquer le contournement.

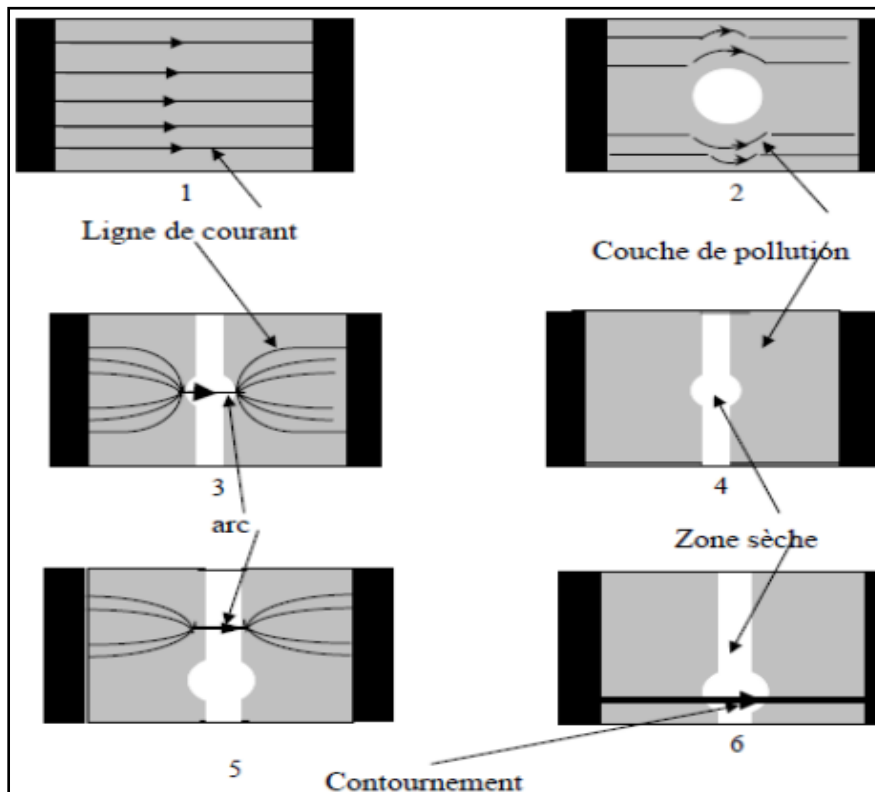


Figure I.1: Les étapes du contournement sur une surface polluée[12].

L'existence de ces phases dépend des nombreux paramètres caractérisant l'isolant pollué ; tension appliquée, conductivité de la couche, largeur de la zone sèche, etc... [13]

I.1.2 Diamètre de la décharge:

Le diamètre du canal de la décharge est un paramètre important, sa connaissance est indispensable à l'élaboration de modèles et la caractérisation physique du phénomène. Sa mesure est cependant très délicate à cause de la diffusion de la lumière. La décharge n'est pas un volume dont les frontières sont parfaitement nettes (bien définies). Il est donc nécessaire de définir un diamètre équivalent.

A partir de la mesure de la densité du courant pendant la propagation de la décharge, Wilkins [13] a montré que le rayon de la décharge peut être estimé par la relation :

$$r_d = \sqrt{\frac{I}{1.45\pi}} \quad (I.1)$$

Cette relation a été confirmée récemment par Farokhi [14] en effectuant les mesures optiques pour le cas d'isolateurs pollués avec du givre et il montre que le diamètre qui assure la conduction peut être approximé par la relation donnée par Wilkins. Matsumoto et al. [15] ont développé un dispositif de mesures optiques composé d'une matrice de 512 photodiodes disposées à des intervalles de 28mm. Ce dispositif leur a permis de mesurer avec une bonne précision le diamètre de la colonne de la décharge. Leurs observations montrent que le diamètre d (mm) de la décharge dépend de la polarité de la tension et du courant I (A) qui la parcourt. À cet effet, ils proposent une relation empirique liant le diamètre de la décharge et le courant :

$$d = aI^b \quad (I.2)$$

où I est le courant et d le diamètre. Les constantes a et b dépendent de la polarité de la tension appliquée à l'électrode haute tension avec :

$a = 14$ et $b = 0,78$ pour la polarité positive

$a = 22$ et $b = 0,78$ pour la polarité négative [15].

I.1.3 Profil de l'isolateur :

Pour assurer sa fonction, le profil de l'isolateur doit satisfaire les conditions suivantes :

- Une longueur de fuite maximale
- Un nombre optimum de nervures (pour une taille donnée de l'isolateur) qui permet d'avoir une tension de contournement plus élevée.
- Une géométrie de l'isolateur permettant le nettoyage naturel de l'isolateur par le vent ou par la pluie.
- Des diamètres de l'isolateur différents assurant une contamination non uniforme et donc des tensions de contournement plus élevées.

Pour tenir compte des deux premières conditions, Cheng et Nour [11] ont défini un paramètre ζ qui caractérise l'efficacité de la longueur de fuite. Ils ont démontré que pour le cas d'une symétrie cylindrique, ce paramètre est généralement fonction de la largeur de la rainure

w_r , sa hauteur d_r et la distance r_r qui sépare la rainure et l'axe de symétrie de l'isolateur (figure I.2).

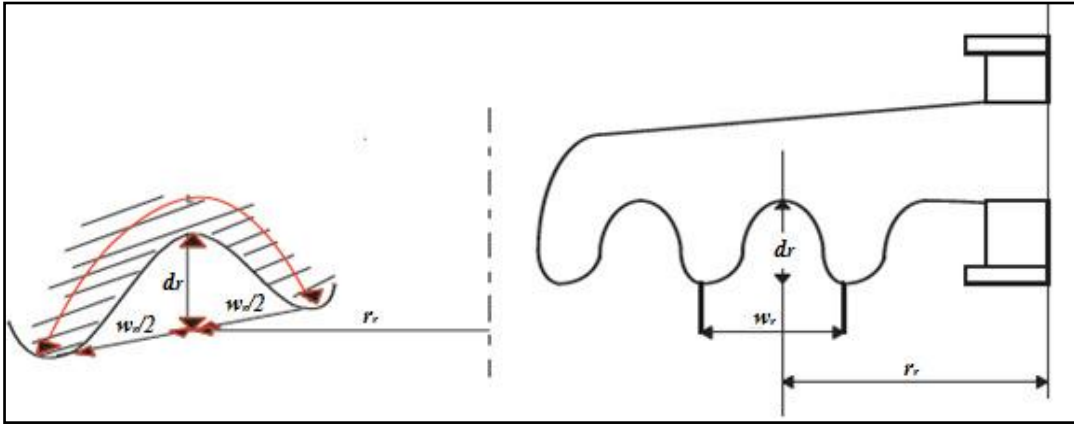


Figure I.2: Exemple de profil réel d'un isolateur.

A partir de mesures expérimentales, ils ont déduit une relation empirique de la forme :

$$\xi_r = 1 - \exp\left(-\frac{k_c w_r}{d_r}\right) \quad (I.3)$$

où k_c dépend uniquement du niveau de contamination. La longueur de fuite effective

$$L_{ff} = L_f \xi_r \quad (I.4)$$

Pour différentes formes d'isolateurs Claverie et Porcheron [16] ont donné des courbes de variation de R_p/ρ en fonction de la longueur de l'isolateurs et en on déduit une fonction $F_r(x)$ telle que :

$$R_p = \rho F_r(X) \quad (I.5)$$

$F_r(X)$ est appelée fonction de répartition de la couche de pollution, R_p et ρ sont respectivement la résistance et la résistivité volumique de la couche polluante.

I.1.4 Diamètre moyen d'un isolateur réel:

Par définition, le diamètre moyen ϕ d'un isolateur réel correspond au diamètre d'un isolateur qui serait cylindrique et qui posséderait la même ligne de fuite L_f , et la même résistance lorsqu'il est recouvert de la même couche polluante e , que l'isolateur réel (figure I.3) [17].

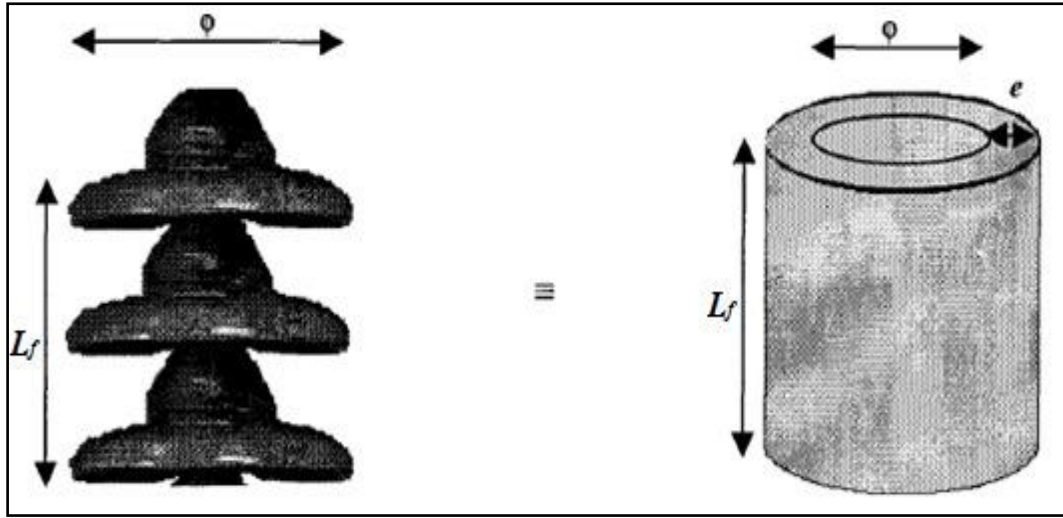


Figure I.3: Assimilation théorique d'un isolateur à un cylindre.

En effet, la longueur d'un cylindre est donné par :

$$L_f = \frac{S}{\pi \varphi} \quad (I.6)$$

Où S est la surface latérale du cylindre et φ est le diamètre.

D'autre part, si on intègre φ le long du profil de l'isolateur, on aura une approximation de son facteur de forme :

$$F = \int_0^{L_f} \frac{dl}{\pi \varphi} \quad (I.7)$$

Où dl est l'abscisse curviligne d'un point de l'isolateur mesuré le long de son profil. φ est le diamètre correspondant à un point quelconque sur la surface de l'isolateur. En assimilant la couche polluante à un film régulier d'épaisseur e et de résistivité volumique ρ la résistance de l'isolateur sera :

$$R_p = \rho \int_0^{L_f} \frac{dl}{\pi \varphi e} = \frac{\rho}{e} F \quad (I.8)$$

où F est le facteur de forme de l'isolateur.

La résistance du cylindre équivalent est :

$$R_p = \rho \frac{L_f}{\pi \varphi e} \quad (I.9)$$

En conclusion, en assimilant l'isolateur réel à un isolateur cylindrique (figure I.4) ayant une même ligne de fuite L_f et une même couche polluante, le diamètre moyen s'écrit [18]:

$$\varphi = \frac{L_f}{\pi f} \quad (\text{I.10})$$

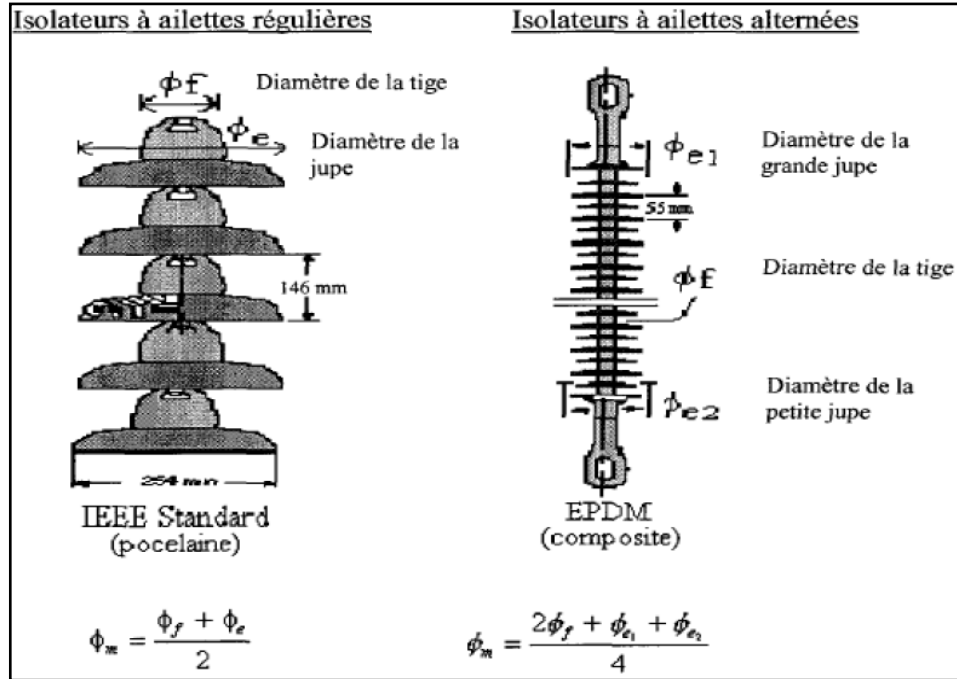


Figure I.4: Diamètre moyen des isolateurs IEEE et EPDM.

Il a été démontré, que pour une certaine densité de contamination, la tension critique de contournement diminue au fur et à mesure que le diamètre augmente et ce, jusqu'à une certaine valeur où la tension de contournement cesse de diminuer [17]. Ce phénomène s'explique par le fait qu'un large diamètre φ signifie une plus grande exposition de la surface à la pollution, diminuant ainsi la résistance et réduisant par conséquent la tension de contournement. Par contre, une augmentation relative du diamètre peut causer un supplément d'arcs locaux provoquant une baisse de tension aux bornes de l'électrode. Cette baisse de tension compense partiellement la baisse de la tension de contournement. De plus, l'augmentation du diamètre peut impliquer l'augmentation de la distance de fuite qui atténue la diminution de la tension de contournement.

I.2 Modélisation théorique et expérimentale du phénomène de contournement:

En raison de la complexité des phénomènes de décharges électriques sur les surfaces isolantes, plusieurs travaux aussi bien théoriques [19] qu'expérimentaux [20-21], ont été entrepris depuis plusieurs décennies, en vue d'étudier leur comportement sous pollution. Ces travaux de recherche ont permis de développer des modèles mathématiques, établissant ainsi, les caractéristiques des décharges évoluant sur les surfaces polluées des isolateurs, et ce, jusqu'au contournement. Néanmoins, ces mécanismes restent insuffisamment compris, à cause d'un grand nombre de facteurs difficiles à cerner, qui interviennent simultanément dans la génération et la propagation des décharges électriques.

I.2.1 Modèles électriques:

Pour adapter plus rationnellement les isolateurs d'un ouvrage à la sévérité de pollution d'un site, ou pour surveiller la qualité de l'isolement et donc d'éviter les éventuelles défaillances, il est impératif de disposer de modèles permettant de prévoir le contournement des isolateurs. C'est dans cette optique que de nombreux modèles théoriques ont été développés.

I.2.1.1 Modèle d'Obenaus:

C'est Obenaus qui est à l'origine des premières analyses quantitatives des phénomènes d'arcs sous tension continue, se produisant sur des surfaces isolantes planes, recouvertes d'une couche polluante. Il a proposé le modèle de type circuit électrique équivalent constitué d'une colonne d'arc en série avec la résistance de la pollution R_p et il représenté sur la figure(I.5) [22-23].

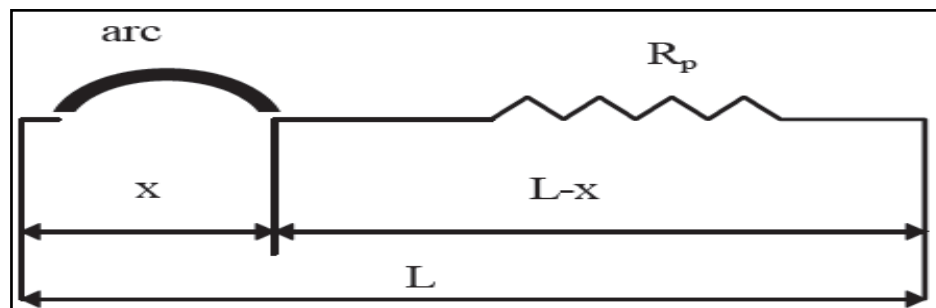


Figure I.5: Modèle d'Obenaus, L représente la longueur de fuite totale.

En appliquant la loi d'Ohm à ce circuit, on peut être écrire :

$$V = V_e + V_{arc} + R_p \cdot I \quad (I.11)$$

Où :

V : est la tension de la ligne ;

V_e : La chute de tension cumulée aux bornes des électrodes ;

R_p : est la résistance de la couche polluée ;

V_{arc} : La tension d'arc telle que :

$$V_{arc} = A \cdot X \cdot I^{-n} \quad (I.12)$$

Où :

I est le courant de fuite, A et n sont les constantes de la caractéristique statique de l'arc dépendent du milieu dans lequel brûle la décharge, X est la longueur d'arc[24].

on obtient l'équation de la tension totale appliquée au système :

$$V = V_e + A \cdot X \cdot I^{-n} + R_p \cdot I \quad (I.13)$$

I.2.1.2 Modèle de Neumarker:

En reprenant les travaux d'Obenaus, et en y ajoutant l'hypothèse d'une couche de pollution de résistance r_p uniforme par unité de longueur de fuite, Neumarker [25] propose, l'expression suivante pour la résistance de pollution R_p :

$$R_p = r_p (L_f - X) \quad (I.14)$$

Où L_f et r_p représentent respectivement la longueur de la ligne de fuite totale et la résistance moyenne par unité de longueur.

En introduisant cette expression dans le modèle d'Obenaus, la tension V aux bornes de l'isolateur sera:

$$V = A \cdot X \cdot I^{-n} + r_p \cdot I (L_f - X) \quad (I.15)$$

Ainsi, Neumarker déduit le courant et la longueur d'arc critiques :

$$I_c = \left(\frac{A}{r} \right)^{\frac{1}{n+1}} \quad (I.16)$$

$$\text{et } X_C = \frac{Lf}{n+1} \quad (\text{I.17})$$

D'où l'expression de la tension critique de contournement :

$$U_c = L_f A^{\left(\frac{n}{n+1}\right)} r_p^{\left(\frac{n}{n+1}\right)} \quad (\text{I.18})$$

I.2.1.3 Modèle de Wilkins:

Pour définir un critère déterminant les conditions de contournement, Wilkins a apporté plusieurs modifications au modèle simple d'Obenaus, tenant compte de la constriction des lignes de courant.

Dans ces études, Wilkins a choisi une représentation de l'isolateur par un canal creusé dans un matériau isolant et rempli d'électrolyte.

Ce modèle expérimental facilite une description par un modèle mathématique et permet en même temps l'étude de l'influence des paramètres liés au contournement [5,13].

L'équation du modèle est la suivante :

$$V = X A I^{-n} + V_e + I r_p \left[(L - X) + \frac{a}{2\pi} \ln \frac{Ja^2}{4\pi I} \right] \quad (\text{I.18})$$

Où :

J est la densité de courant en A/cm^2 traversant la colonne de la décharge et a est la Largeur du canal en cm.

Le second terme entre les crochets a été ajouté par Wilkins pour tenir compte de la chute de tension au pied de la décharge due à la constriction des lignes de courant à cet endroit. La chute de tension due aux électrodes V_e est un paramètre qui dépend des conditions expérimentales : nature et type du matériau ainsi que du gaz d'ambiance. Il peut prendre des valeurs différentes selon les conditions expérimentales.

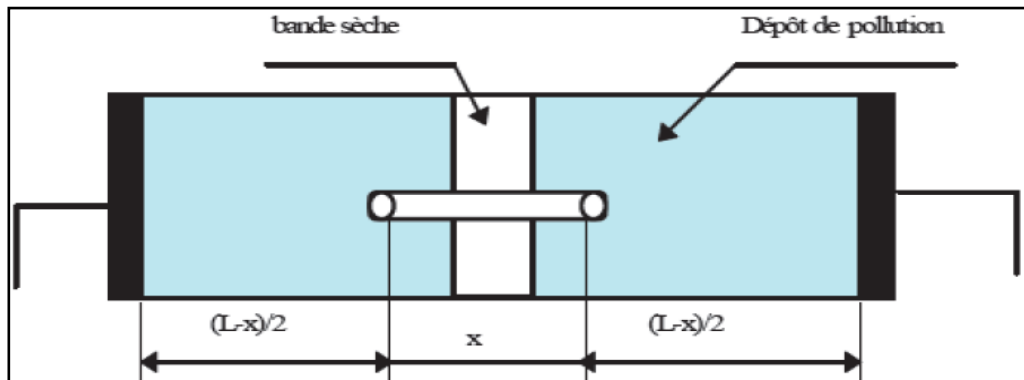


Figure I.7: Modèle de Wilkins.

I.2.1.4 Modèle de Zhicheng et Renyu:

Zhicheng et Renyu [26] ont démontré que la résistance de la couche de la pollution pour des isolateurs de formes complexes peut être ramenée à une résistance d'un isolateur plat (figure II.5). Ils proposent l'expression suivante :

$$R_p = \frac{1}{\pi \sigma_s} \ln \left(\frac{L_f - X}{r_d} \right) \quad (I.19)$$

Où

L_f : est la longueur de la ligne de fuite,

r_d : est le rayon du pied de l'arc

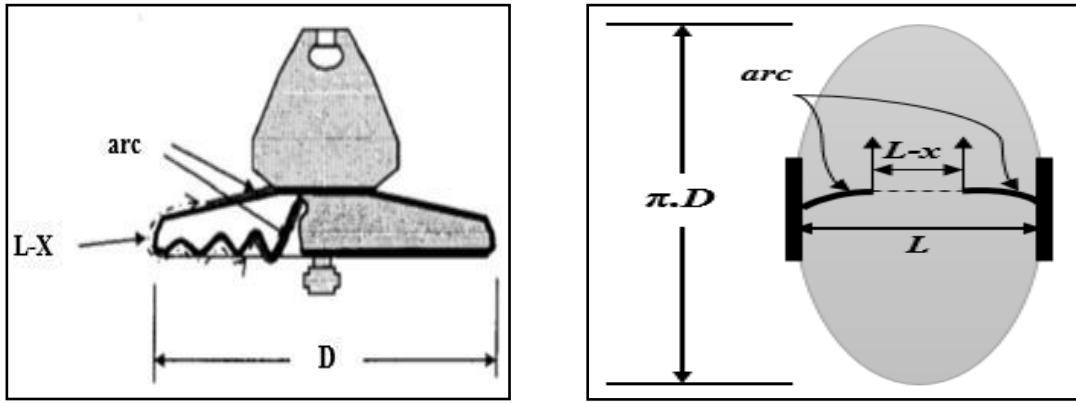


Figure I.8 Modèle de Zhicheng et Renyu.

Les auteurs supposent que la tension de contournement dépend de la conductivité superficielle au moment critique et proposent l'idée de la conductivité superficielle effective σ_e tel que :

$$\sigma_e = 1.25 \sigma_s \quad (I.20)$$

Sachant que le nombre d'arcs en série avant le contournement est aléatoire, ils proposent une nouvelle formule pour calculer la tension de contournement :

$$U_c = A X K_r i^{-n} + \left(\frac{K_t I}{\pi \sigma_e} \right) \ln \left(\frac{(L_f - X)}{K_t \sigma_s} \right) \quad (I.21)$$

avec k_r est le rapport entre la longueur de l'arc et la ligne de fuite sur la surface de l'isolateur.

k_t est le nombre de couches de pollutions en série.

I.2.1.5 Modèle de Dhahbi et Béréal:

Dhahbi et Béréal [7-8] proposent un modèle analytique de propagation de la décharge faisant intervenir l'impédance équivalente d'un circuit électrique simulant un isolateur pollué sur lequel une décharge s'est produite. Pour ce faire, ils considèrent un isolateur plan de longueur de fuite L sur lequel est apparu un arc partiel de longueur X et de résistance R_{arc} comme la montre la figure.9.a.

Le choix de cette représentation en deux dimensions est justifié par le fait que le phénomène de contournement dépend essentiellement des caractéristiques surfaciques de la couche de pollution. Cette couche de pollution peut à son tour être modélisée par une résistance R en parallèle avec une capacité C . Ainsi, le schéma électrique équivalent du modèle sera comme indiqué sur la figure.9.b.

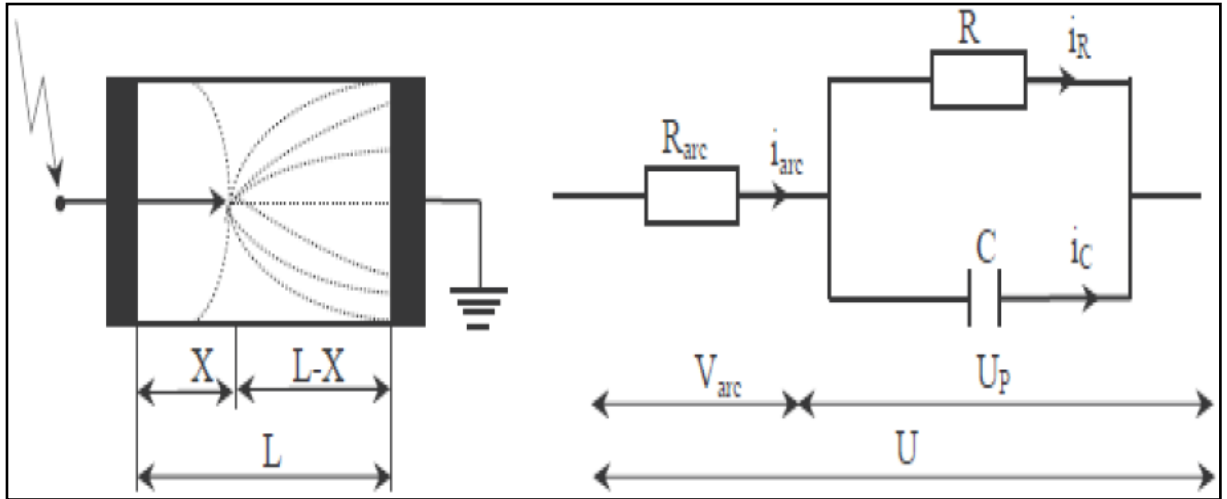


Figure I.9 a : Schéma d'un isolateur pollué.

Figure I.9.b : Circuit électrique équivalent.

Où :

i_{arc} est le courant d'arc,

i_R et i_C étant les deux composantes active et capacitive représentant les courants dans la couche de pollution.

Pour le cas d'un isolateur plan :

$$R_p = \rho_p \frac{(L-X)}{S_p} \quad (I.22)$$

$$C = \varepsilon \frac{S_p}{(L-X)} \quad (I.23)$$

Où :

ρ_p , ε , L , et S_p sont respectivement la résistivité, la permittivité, la longueur de fuite et la section de la couche polluée [19].

Les expressions de R_p et C ne sont que des valeurs approximatives utilisées dans le but de pouvoir les comparer avec d'autres modèles.

D'autre part, en considérant que l'arc est un canal cylindrique de section S , de longueur X et de résistivité ρ_d , sa résistance R_d sera :

$$R_p = \rho_d \frac{X}{S} \quad (I.24)$$

D'où l'expression de l'impédance équivalente :

$$Z_b = R_d + \frac{R_p}{1 + j \omega R_p C_b} \quad (I.25)$$

La résistance R_d en série avec une couche de pollution d'impédance Z_b (R_p , C_b) [29].

I.3 Mécanisme de propagation:

Dans le phénomène de propagation de l'arc électrique, il existe deux modes principaux:

I.3.1 Propagation par ionization:

Wilkins et Al - Baghdadi ont proposé un mécanisme d'élongation basé sur l'ionisation et le déplacement discontinu du pied de la décharge. Selon Wilkins, la probabilité d'ionisation dans la région précédant l'avant pied de la décharge est grande, étant donné que la température ainsi que le potentiel, sont élevés dans cette région. Si l'ionisation est suffisante, alors il y a circulation d'un courant électrique. La conductivité du nouveau trajet du courant va augmenter avec celui-ci, tandis que celle du trajet précédent dans l'électrolyte reste constante (figure.I.10). Par conséquent le courant total change progressivement de trajet, entraînant ainsi une élongation δ de la décharge. Wilkins parle d'ionisation, de passage de courant et de l'existence d'un champ au pied de la décharge sans évoquer le claquage de l'air. Sous le nom d'ionisation, il considère en réalité une rupture diélectrique progressive [29].

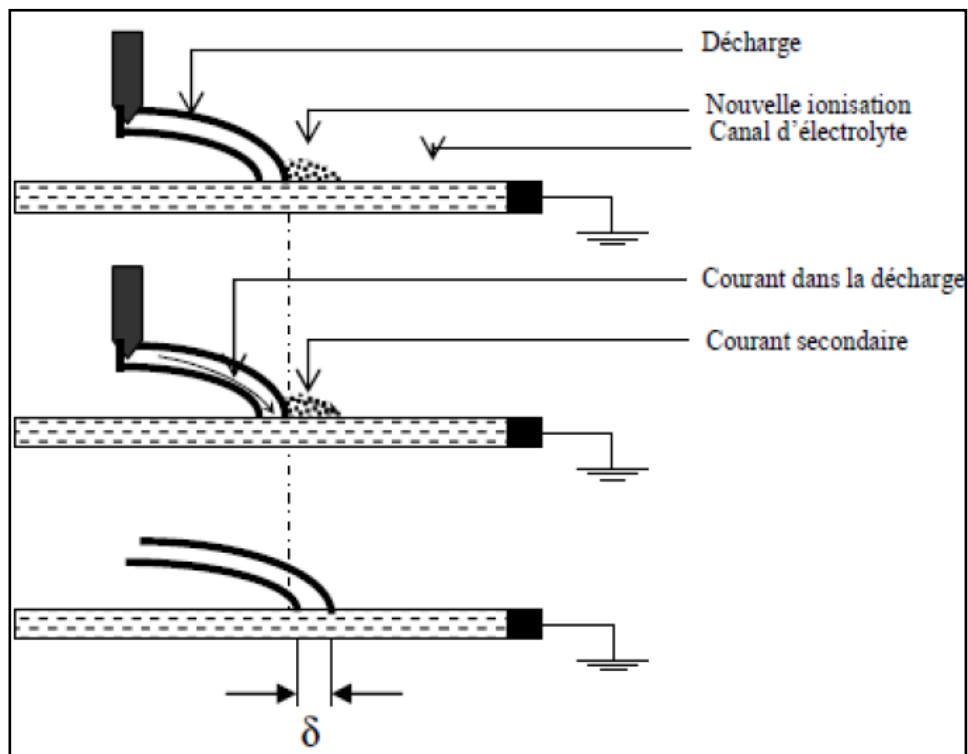


Figure I.10: Mécanisme de propagation par ionisation.

I.3.2 Propagation par force électrostatique:

A partir des observations faites sur un canal d'électrolyte, Rahal [30] a essayé de mettre en évidence l'existence d'une force électrostatique s'exerçant sur la décharge, responsable du déplacement de l'arc. Il a démontré que du point de vue électrique macroscopique, cette force était due à la dissymétrie de la distribution du potentiel, elle-même causée par le passage du courant dans le liquide couvrant la surface isolante. Cette force va provoquer la courbure de la décharge vers l'électrode de masse (figure I.11). Une fois les conditions critiques satisfaites, la décharge se déplacera alors vers l'électrode de masse.

D'après l'auteur, l'existence de cette force implique en effet, que l'on considère la décharge comme un élément de circuit doué d'une certaine auto-consistance macroscopique et susceptible de s'étirer de façon plus ou moins élastique.

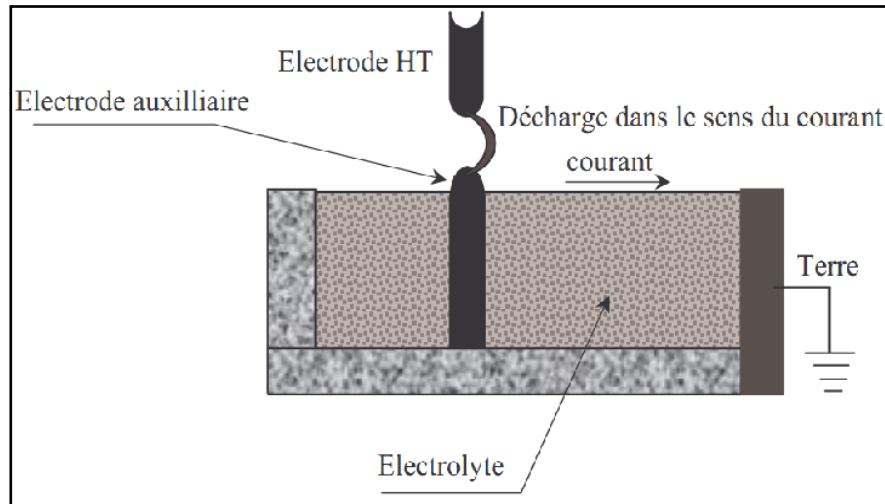


Figure I.11: Mécanisme de propagation par force électrostatique.

Dans une analyse critique sur les différents mécanismes de propagation de la décharge présents dans la littérature, Flazi [31] ne pouvant pas identifier un phénomène élémentaire de rupture diélectrique d'un intervalle gazeux sur le trajet du contournement, au sens de la physique de la décharge, a dû se ramener à une approche plus globale du phénomène, à savoir le mécanisme de la propagation par ionisation progressive. Ainsi, il a déduit que l'augmentation du degré d'ionisation à l'intérieur de la décharge et le démarrage des processus d'ionisation devant elle, sont les facteurs responsables de l'allongement et du changement que subit la décharge, dans ses aspects et ses états dynamiques.

I.4 Critères de propagation de la décharge:

Les principaux critères de propagation rencontrés dans la littérature, ont été établis sur la base de conditions faisant intervenir soit le champ électrique, soit le courant, soit la puissance ou encore l'énergie fournie par la source.

I.4.1 Critère d'Hampton:

Partant de résultats expérimentaux, Hampton [32] a déterminé les conditions critiques de propagation de l'arc, en remplaçant la couche de pollution en série avec l'arc par une colonne d'eau uniforme présentant une résistance linéique constante. Il a pu établir que la condition

pour que le contournement se produise, est que le champ E_p . Dans la colonne d'eau dépasse le champ E_{arc} à l'intérieur de l'arc :

$$E_{arc} < E_p \quad (I.26)$$

I.4.2 Critère d'Hesketh:

En supposant que l'arc en série avec la couche de pollution mouillée change de façon à rendre maximale le courant I qu'il tire de la source d'alimentation, Hesketh a établi un critère de propagation de l'arc, exprimé par la relation :

$$\frac{dI}{dX} > 0 \quad (I.27)$$

Cette relation montre, par conséquent, que la propagation de la décharge est possible, si cette dernière provoque l'augmentation du courant circulant sur la surface isolante.

I.4.3 Critère de Wilkins:

Wilkins [33] a généralisé la condition énoncée par Hesketh et a établi un critère de propagation utilisant la puissance ; en considérant qu'un système placé dans une configuration lui permettant de dissiper le maximum d'énergie, l'allongement de la décharge est assuré par l'augmentation de la puissance P fournie par la source :

$$\frac{dPs}{dX} > 0 \quad (I.28)$$

Lorsque la tension appliquée au système est constante, le critère de Wilkins se réduit à la condition établie par Hesketh .

I.4.4 Critère d'Anjana et Lakshminarasimha:

En assimilant l'arc à une colonne de gaz en équilibre thermodynamique, Anjana et al [34] ont établi une condition nécessaire à la propagation de l'arc, basée sur des considérations énergétiques: l'énergie totale fournie W_{totale} doit être supérieure ou égale à l'énergie W_{th} nécessaire pour maintenir l'arc à sa température:

$$W_{totale} \geq W_{th} \quad (I.29)$$

I.4.5 Critère de Ghosh:

En considérant une série de décharges multiples parallèles, Ghosh et al. [35] ont établi le critère de propagation selon lequel la décharge se propage si la résistance de la décharge diminue avec son allongement :

$$\frac{dR_p}{dX} > 0 \quad (I.30)$$

Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons fait un rappel sur l'état des connaissances du phénomène de contournement des isolateurs pollues ainsi que des paramètres physiques et électriques qui le caractérise. Nous avons également présenté les principaux modèles électriques et les mécanismes physiques proposés pour la description de la dynamique d'allongement de la décharge.

Pour conclure ce chapitre consacré en grande partie à la présentation des modèles actuels de prédiction de résistance de couche de pollution et les modèles développés, il convient de souligner que :

- La majorité des modèles mathématiques, qu'ils soient statiques ou dynamiques, est basée sur le modèle d'Obenaus.
- La détermination de résistance de couche de pollution est indispensable dans la modélisation du phénomène de contournement.
- Les principaux critères de propagation de la décharge rencontrés dans la littérature ont été établis sur la base de conditions faisant intervenir soit l'impédance vue des électrodes, soit le courant, soit le champ électrique, soit la puissance ou encore l'énergie fournie par la source. Le critère d'Hampton (critère de champ électrique) est le plus souvent utilisé dans les modèles dynamiques prédictifs.

CHAPITRE II

GENERALITES SUR L'APPROCHE PSO

Introduction:

En règle générale, on ne connaît pas toujours de méthode exacte pour trouver la solution d'un problème d'optimisation en recherche opérationnelle. Dans ce cas on peut d'abord tenter de voir si le problème que l'on étudie n'a pas de problème équivalent qui a déjà été résolu. Si l'on n'a toujours pas trouvé de méthode de résolution alors on utilise ce que l'on appelle une heuristique, c'est-à-dire un algorithme qui donne une solution approchée. Ces algorithmes sont assez intuitifs ou simples. On les déduit grâce à des observations et en faisant preuve de bon sens. Leur principe consiste souvent à explorer un certain nombre de solutions et de mémoriser la meilleure. Ils peuvent faire intervenir le hasard: cela permet de balayer un plus grand nombre de solution éventuelle, mais il faut les exécuter plusieurs fois pour tendre au mieux vers la solution optimale [36].

Certaines heuristiques sont classées parmi les métaheuristiques. Ce sont des algorithmes dont le principe peut être réutilisé pour traiter différents problèmes d'optimisation. Ce sont des principes génériques que l'on adapte selon le besoin. La plus utilisée des heuristiques et la plus simple est la descente stochastique. Voici son fonctionnement dans le cas d'un problème de minimisation : on choisit une solution initiale, on sélectionne au hasard un de ses voisins :

- Si la valeur de la fonction objectif pour cette nouvelle solution est plus petite alors on prend ce nouveau point comme point de référence et on observe ses voisins.
- Sinon on recherche un autre voisin. On s'arrête quand on se rend compte que l'on ne trouve plus de meilleure solution.

Plus récemment, une méthode d'optimisation nommée « optimisation par essaim particules », soit en anglais « *Particle Swarm Optimization* » (PSO), inspirée de l'intelligence d'essaim a attiré les chercheurs et faite exploiter dans différents domaines d'optimisation. Cette méthode est devenue de plus en plus populaire. Elle est caractérisée par une façon décentralisée de travail qui imite le comportement des essaims d'insectes sociaux, les masses d'oiseaux ou les écoles de poisson. L'avantage de ces approches sur les techniques traditionnelles est la robustesse et la flexibilité [37].

II.1 Définition de l'Optimisation :

Un problème d'optimisation se définit comme la recherche du minimum ou du maximum (de l'optimum) d'une fonction donnée [38]. On peut aussi trouver des problèmes d'optimisation pour lesquelles les variables de la fonction à optimiser sont contraintes

d'évoluer 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 [39].

II.2 Fonction Objectif :

C'est le nom donné à la fonction f (on l'appelle aussi fonction de coût, critère d'optimisation ou fitness). C'est cette fonction que l'algorithme d'optimisation va devoir optimiser (trouver un optimum) [39].

II.3 Optimisation par Essaim de Particules (PSO):

L'optimisation par essaim particulaire (OEP), ou Particle Swarm Optimization (PSO) en anglais, est un algorithme évolutionnaire qui utilise une population de solutions candidates pour développer une solution optimale au problème. Cet algorithme a été proposé par Russel Eberhart (ingénieur en électricité) et James Kennedy (socio-psychologue) en 1995 [40]. Il s'inspire à l'origine du monde du vivant, plus précisément du comportement social des animaux évoluant en essaim, tels que les bancs de poissons et les vols groupés d'oiseaux. En effet, on peut observer chez ces animaux des dynamiques de déplacement relativement complexes, alors qu'individuellement chaque individu a une « intelligence » limitée, et ne dispose que d'une connaissance locale de sa situation dans l'essaim.

L'information locale et la mémoire de chaque individu sont utilisées pour décider de son déplacement. Des règles simples, telles que « rester proche des autres individus », « aller dans une même direction » ou « aller à la même vitesse », suffisent pour maintenir la cohésion de l'essaim, et permettent la mise en œuvre de comportements collectifs complexes et adaptatifs.

II.4 Concept de base de PSO:

II.4.1 Principe de la Technique PSO :

Cette méthode est inspirée du comportement social des animaux évoluant en essaim. L'exemple le plus souvent utilisé est le comportement des nuées d'oiseaux et des bancs de poissons, (Figure III.1).



(a)



(b)

Figure II.1: Groupe de : (a) oiseaux, (b) poissons.

En effet, on peut observer chez ces animaux des dynamiques de déplacement relativement complexes, alors qu'individuellement chaque individu a une intelligence limitée et une connaissance seulement locale de sa situation dans l'essaim. Un individu de l'essaim n'a pour connaissance que la position et la vitesse de ses plus proches voisins. Chaque individu utilise donc, non seulement, sa propre mémoire, mais aussi l'information locale sur ses plus proches voisins pour décider de son propre déplacement. Des règles simples, telles que "aller à la même vitesse que les autres", "se déplacer dans la même direction" ou encore "rester proche de ses voisins" sont des exemples de comportements qui suffisent à maintenir la cohésion de l'essaim, et qui permettent la mise en oeuvre de comportements collectifs complexes et adaptatifs. L' "intelligence globale" de l'essaim est donc la conséquence directe des interactions locales entre les différentes particules de l'essaim. La performance du système entier est supérieure à la somme des performances de ses parties. Kennedy et Eberhart se sont inspirés de ces comportements socio-psychologiques pour créer le PSO. Un essaim de particules, qui sont des solutions potentielles au problème d'optimisation, "survole" l'espace de recherche, en quête de l'optimum global. Le déplacement d'une particule est influencé par les trois composantes suivantes [41]:

- Une composante physique : la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement ;
- Une composante cognitive : la particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée ;
- Une composante sociale : la particule tend à se fier à l'expérience de ses congénères et, ainsi, à se diriger vers le meilleur site déjà atteint par ses voisins.

Dans le cas d'un problème d'optimisation, la qualité d'un site de l'espace de recherche est déterminée par la valeur de la fonction objectif en ce point. La figure II.2 illustre la stratégie de déplacement d'une particule.

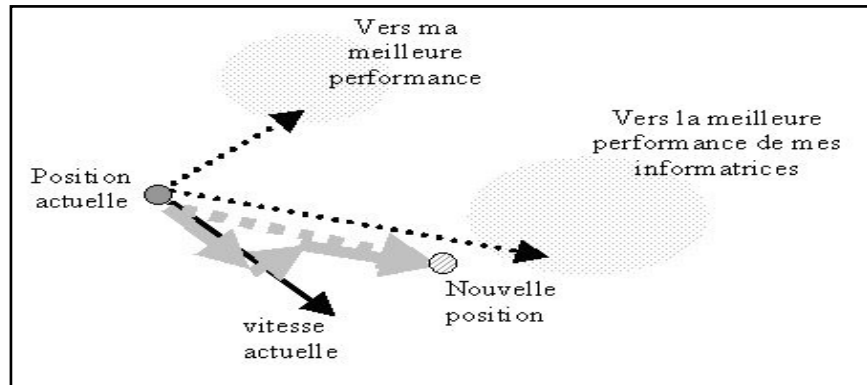


Figure II.2: Mouvement de chaque particule.

Il faut ensuite définir les voisinages et leur structure, il en existe de deux types[42] :

- **Voisinage géographique** : c'est un voisinage dynamique où les voisins sont les particules les plus proches. A chaque itération, les nouveaux voisins ou groupes doivent être réajustés en se référant à une distance prédéfinie dans l'espace de recherche. C'est donc bien un voisinage dynamique tel qu'illustré sur la Figure II.3.

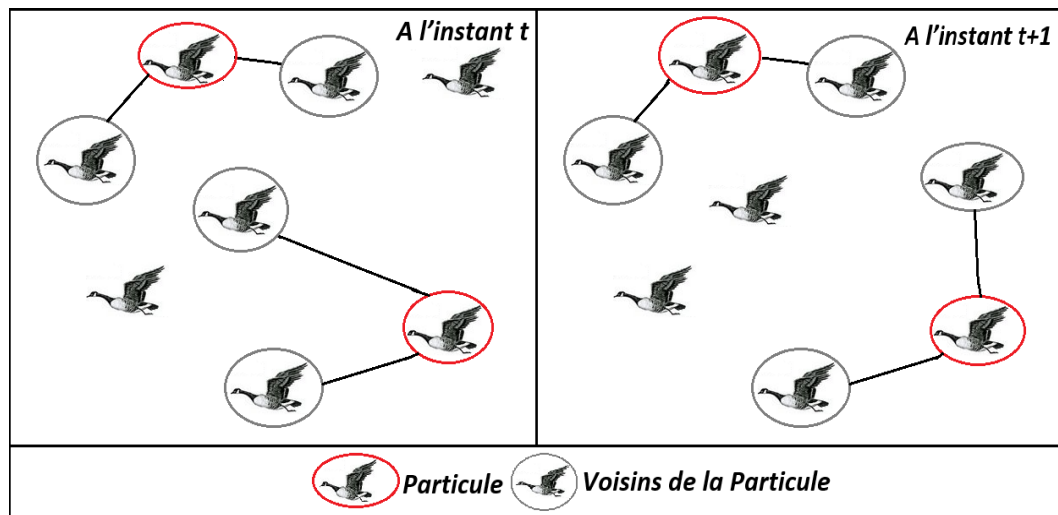


Figure II.3 : Voisinage géographique à l' instant t et t+1.

Dans cet exemple on va supposer que le voisinage d'une particule est un groupe formé des deux particules les plus proches. Dans la Figure II.3, la notion de voisinage dynamique est mise en évidence puisque pour un même essaim à l'instant « t » et à l'instant « t+1 » le voisinage n'est plus le même.

- **Voisinages sociaux** : ce type de voisinage est considéré comme statique, les voisins restent figés, autrement-dit, ils demeurent inchangés. C'est le voisinage auquel on a le plus souvent recours, en raison :
 - ✓ De sa simplicité de programmation.
 - ✓ Parce qu'il offre un meilleur rapport temps/coût, en termes de calcul.
 - ✓ Dans un scénario de convergence, un voisinage social s'oriente forcément vers un voisinage géographique.

Dans la figure qui va suivre, les particules sont d'abord semées de manière fictive en forme de cercle, ensuite pour la particule étudiée, on insère au fur et à mesure dans ses informatrices, dans un 1^{er} temps elle-même, dans un 2^{ème} temps celles qui lui sont adjacentes, puis de proche en proche jusqu'à atteindre la taille souhaitée, ainsi que définie dans la Figure II.4.

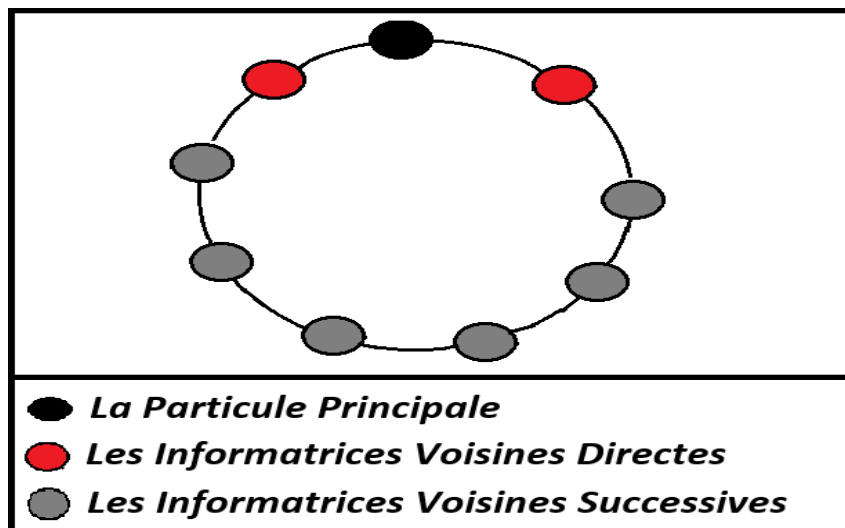


Figure II.4 : Voisinage en cercle (choix régulier des informatrices).

Dans cet exemple, la particule principale est placée en haut (en noir), ses informatrices correspondent aux deux particules directement à sa droite et à sa gauche (en rouge dans notre figure).

Dans l'ébauche ci-dessous par contre, les informatrices sont choisies de manière aléatoire, telle qu'exposée dans la Figure II.5.

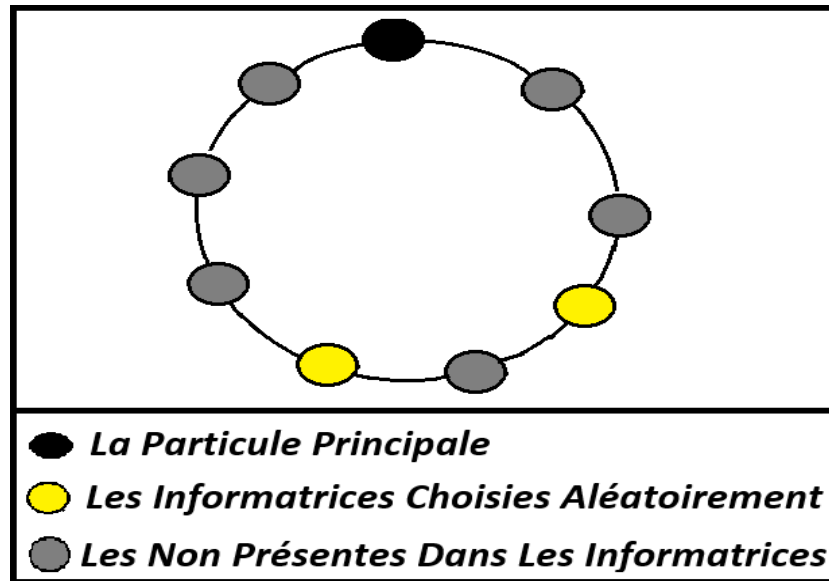


Figure II.5 : Voisinage en cercle (choix aléatoire des informatrices).

Ici, la particule principale est placée en haut (en noir) et ses informatrices sont choisies de façon aléatoire (en jaune par exemple dans notre figure).

II.4.2 Principe de fonctionnement de l'Algorithme PSO :

On dispose une fonction objectif à optimiser dans un sens ou dans l'autre. Un essaim est un ensemble de particules positionnées dans l'espace de recherche de la fonction objectif. Le principe de l'algorithme consiste à déplacer ces particules dans l'espace de recherche afin de trouver la solution optimale [36].

Au départ de l'algorithme, un essaim est réparti au hasard dans l'espace de recherche, chaque particule ayant également une vitesse aléatoire. Ensuite, à chaque pas de temps :

- ❖ Chaque particule est capable d'évaluer la qualité de sa position et de garder en mémoire sa meilleure performance, c'est-à-dire la meilleure position qu'elle a atteinte jusqu'ici (qui peut en fait être parfois la position courante) et sa qualité (la valeur en cette position de la fonction à optimiser).
- ❖ Chaque particule est capable d'interroger un certain nombre de ses congénères de son voisinage et d'obtenir de chacune entre elles sa propre meilleure performance.
- ❖ A chaque pas de temps, chaque particule choisit la meilleure des meilleures performances dont elle a connaissance modifie sa vitesse en fonction de cette information et de ses propres données et se déplace en conséquence.

A partir des quelques informations dont elle dispose, une particule doit décider de son prochain mouvement, c'est-à-dire décider de sa nouvelle vitesse.

Pour ce faire, elle combine trois informations :

- ❖ Sa vitesse actuelle.
- ❖ Sa meilleure position actuelle.
- ❖ La meilleure performance (vitesse et position) de ses voisines.

Le hasard joue un rôle, grâce à une modification aléatoire limitée des coefficients de confiance, ce qui favorise l'exploration de l'espace de recherche. Naturellement, pour pouvoir être programmé, tout ceci est formalisé dans des équations de mouvement. Un point intéressant est que, contrairement à bien d'autres heuristiques qui restent purement expérimentales, il existe une analyse mathématique précisant les conditions de convergence et le choix des paramètres [43].

II.4.3 Formulation Mathématique de l'Algorithme PSO :

Dans un espace de recherche de dimension D [40], la particule i de l'essaim est modélisée par son vecteur position $\vec{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})$ et par son vecteur vitesse $\vec{v}_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{iD})$. La qualité de sa position est déterminée par la valeur de la fonction objectif en ce point. Cette particule garde en mémoire la meilleure position par laquelle elle est déjà passée, que l'on note $\vec{p}_{best_i} = (p_{best_{i1}}, p_{best_{i2}}, \dots, p_{best_{iD}})$. La meilleure position atteinte par les particules de l'essaim est notée $\vec{G}_{best} = (g_{best_1}, g_{best_2}, \dots, g_{best_D})$. Nous nous référons à la version globale de PSO, où toutes les particules de l'essaim sont considérées comme voisines de la particule i , d'où la notation $\vec{G}_{best}$ (global best).

Au départ de l'algorithme, les particules de l'essaim sont initialisées de manière aléatoire/régulière dans l'espace de recherche du problème. Ensuite, à chaque itération, chaque particule se déplace, en combinant linéairement les trois composantes citées cidessus. En effet, à l'itération $t + 1$, le vecteur vitesse et le vecteur position sont calculés à partir de l'équation (II.1) et de l'équation (II.2), respectivement.

$$v_{ij}^{t+1} = w v_{ij}^t + c_1 r_{1ij} [p_{best_{ij}}^t - x_{ij}^t] + c_2 r_{2ij} [G_{best}^t - x_{ij}^t], \quad j \in \{1, 2, \dots, D\} \quad (II.1)$$

$$x_{ij}^{t+1} = x_{ij}^t + v_{ij}^{t+1}, \quad j \in \{1, 2, \dots, D\} \quad (II.2)$$

Où w est une constante, appelée coefficient d'inertie ; c_1 et c_2 sont deux constantes, appelées coefficients d'accélération ; r_1 et r_2 sont deux nombres aléatoires tirés uniformément dans $[0, 1]$, $\rho = c_1 r_j$ à chaque itération t et pour chaque dimension j .

Les trois composantes mentionnées ci-dessus (i.e. d'inertie, cognitive et sociale) sont représentées dans l'équation (II.1) par les termes suivants :

- ❖ $w v_{ij}^t$ correspond à la composante d'inertie du déplacement, où le paramètre w contrôle l'influence de la direction de déplacement sur le déplacement futur ;
- ❖ $c_1 r_{1ij} [pbest_{ij}^t - x_{ij}^t]$ correspond à la composante cognitive du déplacement, où le paramètre c_1 contrôle le comportement cognitif de la particule ;
- ❖ $c_2 r_{2ij} [gbest_j^t - x_{ij}^t]$ correspond à la composante sociale du déplacement, où le paramètre c_2 contrôle l'aptitude sociale de la particule.

Les gammes appropriées de valeur pour c_1 et c_2 sont de 1 à 2, mais 2 est le plus approprié dans beaucoup de cas [44].

Le coefficient d'inertie est donné par [45]:

$$w = w_{max} - \left(\frac{w_{max} - w_{min}}{k_{max}} \right) * k \quad (II.3)$$

Où k_{max} , k sont respectivement le nombre maximum des itérations et le nombre d'itération courante. w_{min} et w_{max} sont respectivement les coefficients minimum et maximum d'inertie.

Le facteur de pondération (inertie) w permet de définir la capacité d'exploration de chaque particule en vue d'améliorer la convergence de l'algorithme[46]. Une grande valeur ($w > 1$) est synonyme d'une grande amplitude de mouvement et donc une capacité d'exploration globale, et à contrario, une faible valeur ($w < 1$) est synonyme de faible amplitude de mouvement, et donc une capacité d'exploration locale. Fixer ce facteur revient donc à trouver un compromis entre l'exploration locale et l'exploration globale.

Dans un algorithme de PSO, les particules volent autour un espace multidimensionnel de recherche. Pendant le vol, chaque particule ajuste sa position selon sa propre expérience [47] (p_{ij}^{best}), et selon l'expérience d'une particule voisine (g_j^{best}), servie la meilleure position produite par elle-même et son voisin [45], (Figure II.6).

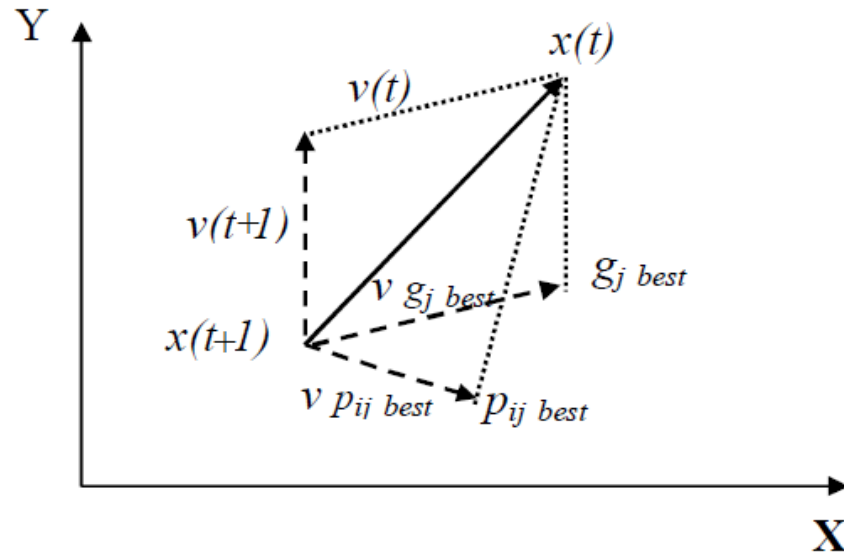


Figure II.6: Schéma vectorielle du déplacement d'une particule.

A chaque itération de l'algorithme, chaque particule est déplacée suivant les équations (II.1) et (II.2). Une fois le déplacement des particules effectué, les nouvelles positions sont évaluées. Les $\vec{P}_{i \text{ best}}$ ainsi que $\vec{G}_{\text{best}}$ sont alors mises à jour. Cette procédure est résumée par l'algorithme II.1.

Le critère d'arrêt peut être différent suivant le problème posé. Si l'optimum global est connu a priori, on peut définir une erreur acceptable " ε " comme critère d'arrêt. Sinon, il est commun de fixer un nombre maximum d'évaluations de la fonction objectif ou un nombre maximum d'itérations comme critère d'arrêt. Cependant, au regard du problème posé et des exigences de l'utilisateur, d'autres critères d'arrêt peuvent être utilisés [41].

II.5 Algorithme de PSO:

Algorithme II.1 : Algorithme d'optimisation par l'essaim de particules:

L'algorithme de base est très simple[48] : On note g la meilleure position connue de l'essaim et $f(x)$ la fonction qui calcule le critère de x .

Pour chaque particule :

On initialise sa position

On initialise sa meilleure position p connue comme étant sa position initiale

Si $f(p) < f(g)$, on met à jour la meilleure position de l'essaim

On initialise la vitesse de la particule.

Tant que l'on n'a pas atteint l'itération maximal ou une certaine valeur du critère :

Pour chaque particule i :

On tire aléatoire c_1 et c_2

On met à jour la vitesse de la particule suivant la formule vue précédemment

On met à jour la position x_i

Si $f(x_i) < f(p_i)$,

On met à jour la meilleure position de la particule

Si $f(p_i) < f(g)$, on met à jour la meilleure position de l'essaim

g est l'optimum.

Le principe de l'algorithme peut être plus facilement visualisé grâce à la figure suivante :

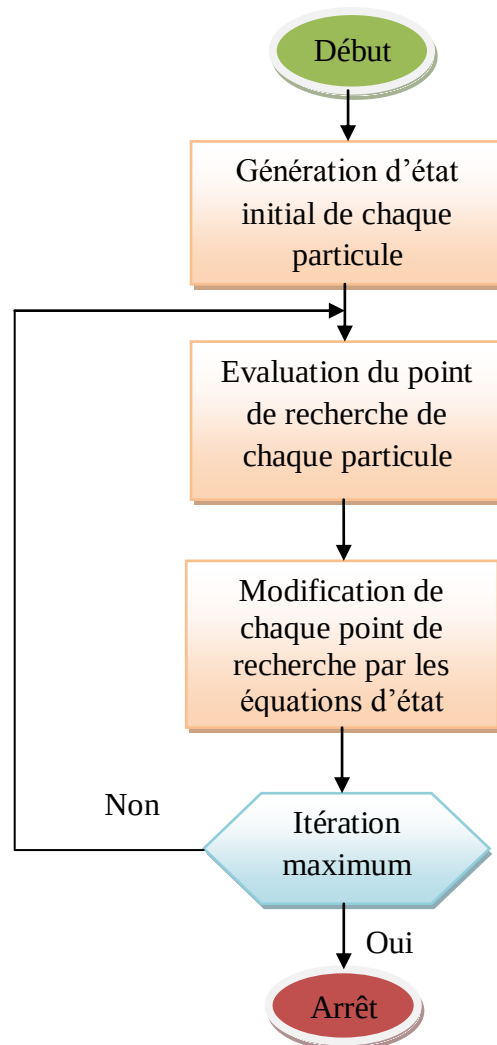


Figure II.7: Organigramme de principe de PSO.

II.6 Paramètres de l'algorithme :

Six paramètres rentrent en ligne de compte :

1. La dimension du problème ;
2. Le nombre de particules (la taille d'essaim) ;
3. Les valeurs des coefficients ρ ;
4. La taille du voisinage ;
5. La vitesse maximale ;
6. L'inertie.

Les quatre premiers paramètres ont déjà été expliqués, dans ce qui suit l'intérêt est concentré plus particulièrement aux deux derniers.[49]

II.6.1 Vitesse maximale:

Pour éviter que les particules se déplacent trop rapidement d'une région à une autre dans l'espace de recherche, on fixe une vitesse maximale V_{max} . Ainsi si $v_{i,j}(t)$ est la vitesse de la particule P_i au temps t dans la dimension j :

Algorithme II.2.Fixation de la vitesse maximale

Si $v_{i,j}(t) > V_{max}$ **Alors**
 $v_{i,j}(t) = V_{max}$
Finsi
Si $v_{i,j}(t) < -V_{max}$ **Alors**
 $v_{i,j}(t) = -V_{max}$
Finsi

V_{max} est généralement dépendante de l'échelle du problème.

II.6.2 Facteur d'inertie :

Le facteur d'inertie w qui décroît en fonction du temps, est introduit pour contrôler l'influence de la vitesse obtenue au pas précédent. Un grand facteur d'inertie provoque une grande exploration de l'espace de recherche alors qu'un petit facteur d'inertie concentre la recherche sur un petit espace. La convergence n'est pas assurée quelques soient les valeurs de w et également de c_1 et c_2 , les études expérimentales [49] montrent que :

$$\frac{1}{2} (c_1 + c_2) - 1 < w \leq 1 \quad (\text{II.3})$$

II.7 Paramétrage de la méthode:

Chaque paramètre de l'algorithme PSO a une influence importante sur le comportement des particules et donc de la convergence de l'algorithme ; et même si la méthode PSO présente des résultats satisfaisants, le choix du bon paramétrage de la méthode reste un point critique en tant qu'une des clés de succès pour tout algorithme PSO. Dans la section précédente, nous avons présenté quelques paramètres qui influencent le comportement des particules dans leurs déplacements à la recherche de l'optimum. Le jeu de paramètres que nous avons élaboré dans notre modèle consiste en l'utilisation de plusieurs paramètres variables, que l'on peut modifier depuis l'interface utilisateur dédiée pour cela, tout dépend des exigences du problème d'optimisation posé. Pour notre problématique, une expérimentation massive a été effectuée, pour trouver le jeu de paramètres adéquat ; et qui a donné des résultats que nous estimons satisfaisants.

À noter, qu'un simple changement de la valeur d'un paramètre peut changer grandement le résultat, et peut même mener à une convergence prématurée. Le principe de création des voisinages, le traitement parallèle, le critère d'arrêt et l'algorithme vont être précisés ci dessous.

II.7.1 Le calcul parallèle:

Notre approche basée sur l'algorithme PSO, consiste à lancer un ensemble de traitements (threads) en parallèle. Chaque thread s'occupe du traitement d'un lot de particules pour toutes les itérations jusqu'à atteinte du critère d'arrêt. À la fin de chaque itération, une synchronisation des threads se fait afin d'évaluer les résultats obtenus pour chaque voisinage et mettre à jour les voisinages pour commencer une nouvelle itération.

II.7.2 Le critère d'arrêt:

Le choix d'un critère optimisé n'est généralement pas simple. Pour plus de diversité dans le programme, nous avons opté pour trois critères d'arrêt :

- 1) le nombre maximum d'itérations sans amélioration ;
- 2) une précision relative au rayon ;
- 3) une précision relative à la distance du G_{best} .

En ce qui concerne le premier critère, nous spécifions un nombre d'itérations au bout duquel sans amélioration remarquable de la solution on arrête le programme. Le deuxième critère est relatif à une valeur précisant le rayon minimal accepté, si cette valeur est atteinte alors l'exécution du programme s'arrête. Le troisième critère concerne la valeur de la meilleure position de tout l'essaim, si la distance entre la valeur de la meilleure position à l'itération t et la meilleure position à l'itération $t+1$ est égale à une précision spécifiée, c'est à dire qu'il n'y a pas d'amélioration notable de la solution alors il y a arrêt des calculs. Tous ces critères sont implémentés, paramétrables depuis l'interface utilisateur, et leurs valeurs varient selon le problème à optimiser. Dans notre cas, nous avons lancé les tests en utilisant ces trois critères, en changeant à chaque fois leurs valeurs, afin de trouver les valeurs les plus optimales à notre problématique. Après avoir trouvé cette combinaison de valeurs, on lance l'exécution et une fois l'un des critères est atteint, le programme s'arrête.

II.8 Avantages et l' Inconvénients de PSO:

II.8.1 Avantages de PSO:

- peut converger rapidement vers des bonnes solutions.
- implémentations simples, avec peu de paramètres.
- versatilité: peut résoudre beaucoup de différents problèmes.

II.8.2 Inconvénients de PSO:

- Tendance à une convergence rapide et prématurée en milieu Optimum
- Convergence lente en phase de recherche détaillée (faible capacité de recherche locale)
- Choix des paramètres d'optimisation, ces derniers sont le plus souvent spécifiques pour chaque type de problème.

II.9 Exemple d'Application :

Pour voir l'efficacité et la robustesse de la méthode PSO, cette partie présente un exemple qui montre comment trouver le minimum de la fonction de « *Rastrigin* » [50], qui est une fonction employée pour examiner la méthode PSO.

Cette fonction a deux variables x et y où elle définie par [50] :

$$f(x, y) = 20 + x^2 + y^2 - 10.(\cos(2.\pi. x) + \cos(2. \pi .y)) \quad (\text{II.4})$$

Cette fonction, comme le montre la figure III.7, a plusieurs optimums locaux (figure III.7.a) et n'admis qu'un seul optimum global (figure III.7.b) défini au point (0,0) tel que $f(0,0) = 0$

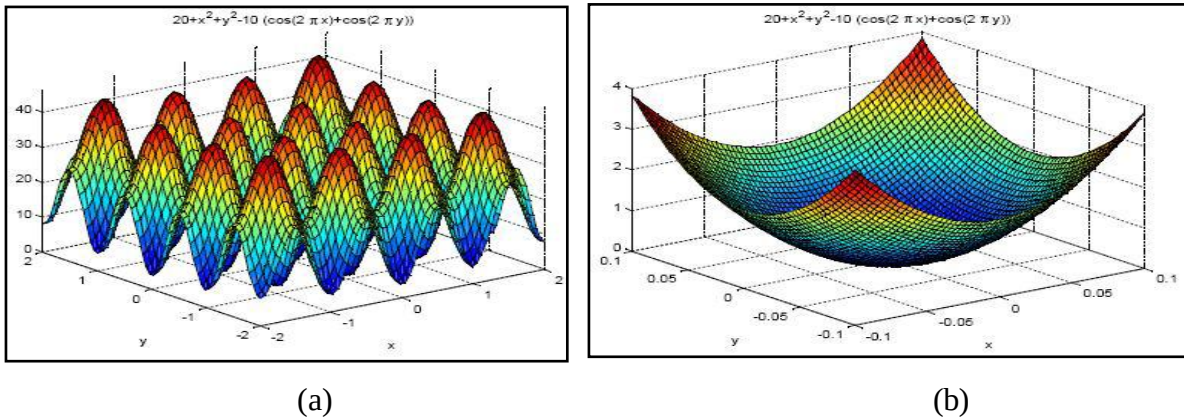


Figure II.8: Fonction de « *Rastrigin* », (a) : avec plusieurs optimums locaux,

(b) : optimum global au point $f(0,0) = 0$

On prend les paramètres suivants de l'algorithme PSO :

Nombre de particules = 40 ;

Itération maximale = 80 ;

$c_1 = c_2 = 2$;

$w_{min} = 0.4, w_{max} = 0.9$;

Le domaine de recherche : $x \in [-0.1, 0.1]$ et $y \in [-0.1, 0.1]$.

On a fait deux tests où leurs résultats sont présentés par les figures II.8 et II.9.

❖ Test N° 1 :

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau II.1.

x	-1.4×10^{-3}
y	5.7×10^{-4}
$f(x, y)$	4.5×10^{-6}
Temps d'exécution	0.4399 s

Tableau II.1: Résultats du test N° 1.

La convergence de la fonction objectif « *Rastrigin* » vers l'optimum global, d'après les résultats du test N° 1, est représentée sur la figure III.8.

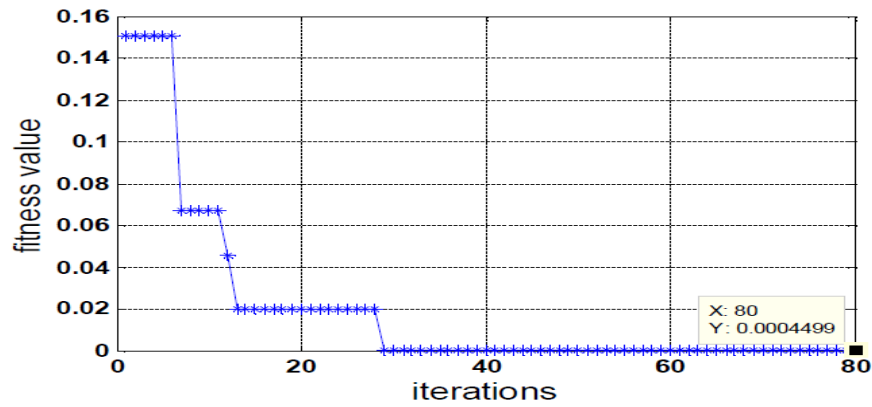


Figure II.9 Convergence de la fonction objectif « *Rastrigin* » vers l'optimum global TestN°1.

❖ **Test N°2 :**

Les résultats obtenus sont représentés dans le tableau II.2.

x	-6.1×10^{-5}
y	-3.7×10^{-4}
$f(x, y)$	2.8×10^{-5}
Temps d'exécution	0.2913 s

Tableau II.2 Résultats du test N° 2.

La convergence de la fonction objectif « *Rastrigin* » vers l'optimum global, d'après les résultats du test N° 2, est représentée sur la figure II.9.

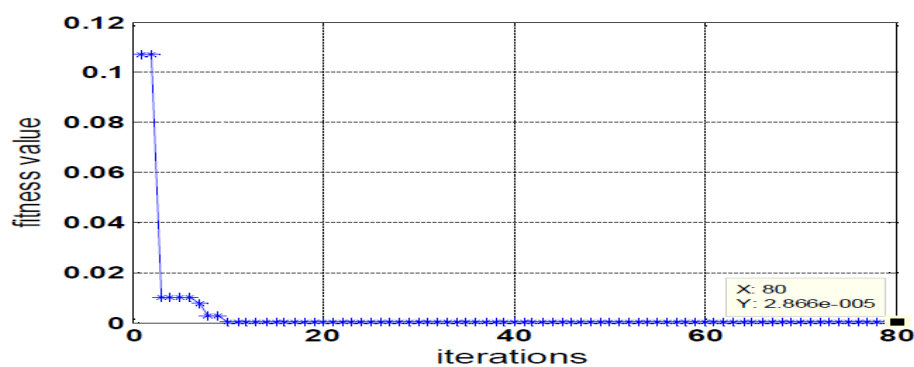


Figure II.10 Convergence de la fonction objectif « *Rastrigin* » vers l'optimum global TestN°2.

D'après le test N° 1 et le test N° 2, on remarque bien que les résultats obtenus sont légèrement différents, ce qui montre que la méthode PSO démarre aléatoirement. De plus, le test N° 2 présente le meilleur résultat où la solution globale telle que $f(x, y) = 2.8 \times 10^{-5}$.

Conclusion:

Dans ce chapitre ont a présenté l'algorithme d'optimisation par essaim particulaire (PSO) inspiré du monde des animaux (espèces d'oiseaux). Depuis sa création, cette méthode a rencontré un franc succès, en raison de sa simplicité et de son efficacité sur une vaste gamme de problèmes, sans toutefois que l'utilisateur ait à modifier la structure de base de l'algorithme.

Le PSO bien qu'il se soit heurté à des problèmes majeurs (comme la convergence prématurée, qui peut conduire les algorithmes de ce type à stagner dans un optimum local par exemple) a pu (grâce à son caractère, capacité/évolutionnaire) être amélioré de façon permanente et significative. Cette maniabilité lui confère sans-contredit de nombreuses perceptives et solutions non anodines.

CHAPITRE III

ESTIMATION DES PARAMETRES DE L'ARC DE CONTOURNEMENT PAR L'APPROCHE PSO

Introduction:

Les algorithmes évolutionnaires (AE) représentent une classe de méthodes d'optimisation par recherche probabiliste de solution basée sur le modèle de l'évolution naturelle. Ils s'inspirent de la théorie naturelle de l'évolution des espèces animales, en vue de s'adapter à leurs environnements. Leur avantage principal est leur capacité à explorer très largement l'ensemble des solutions possibles dans l'espace de recherche. En effet, ils sont capables de localiser rapidement des solutions sous-optimales, lorsque l'espace de recherche possède une taille et une complexité suffisamment importantes pour détourner toute garantie d'optimalité [51]. De plus, ces algorithmes se font moins piéger par des optima locaux que les algorithmes d'optimisation classiques comme la descente de gradient, ou même le recuit simulé, ont du mal à contourner.

La tension critique de contournement d'un isolateur pollué est un paramètre significatif de la fiabilité d'un système d'énergie, plusieurs approches ont été développées pour l'estimation de la tension de contournement. L'exposition du matériel isolant à des différentes conditions environnementales est inévitable dans tous les systèmes énergétiques. L'étude expérimentale de la tension critique de contournement prend beaucoup de temps et rencontre plusieurs obstacles, comme le coût très élevé et la nécessité d'un équipement spécial, sont à l'origine du développement de plusieurs approches pour l'estimation de la tension de contournement d'un isolateur pollué.

La plupart sont basées sur des modèles mathématiques et des relations analytiques pour la tension de contournement des isolateurs pollués.

La technique de l'intelligence artificielle peut être utilisée dans les problèmes exigeants des fonctions d'approximation, des classifications et connaissance schématiques, des estimations et prédictions

Dans le domaine des isolateurs haute tension, l'intelligence artificielle peut être utilisée pour l'estimation du degré de pollution, la prédiction d'un contournement, l'analyse des pistes sur les surfaces des isolateurs pollués et également l'estimation de la tension de contournement d'un isolateur pollué. Ce dernier cas va être soigneusement examiné dans ce travail [52]. L'objectif principal de ce chapitre est d'utiliser l'approche d'optimisation par essaim de particules (PSO) pour estimer les paramètres de l'arc de contournement d'isolateurs pollués.

III.1.Procédures expérimentales et collection de données :

Les expériences ont été réalisées sur un isolateur de station de test installé dans un laboratoire de Haute Tension de PPCTRSC à Athènes et conformément aux normes IEC [53].

Dans cette station qui est constituée principalement de deux chambres, chambre de pollution et chambre de brouillard, les essais ont été faits sur des isolateurs pollués artificiellement dans le but de déterminer la tension de contournement. La pollution est simulée conformément à la méthode de la couche solide. Avant la suspension des l'isolateurs dans la chambre de pollution, ils ont été soigneusement lavés pour enlever toutes les traces de graisse, en les émergeant dans une solution de trisodium de phosphate et en les rinçant avec de l'eau du robinet. Le contaminant utilisé était : 75 g/l d'argile de kaolin, 675 g/l poudre de silice, NaCl comme exigé, et suspendu dans l'alcool isopropyl. La contamination à besoin d'une durée de 30 min. Après que les isolateurs sont contaminés, ils doivent être laissés sécher pendant une heure. La DDSE (Densité de Dépôt de Sel Equivalente) (Cp) sur la surface de l'isolateur est mise selon un index de sévérité de pollution. Durant l'exposition des isolateurs au brouillard dans la chambre de brouillard le système de jet est conforme aux normes de la CEI. Le temps nécessaire pour atteindre le maximum de conductivité de la couche conductrice est d'environ 35-40 min après cela la tension d'essai est appliquée sur l'isolateur dans un temps qui ne doit pas dépasser 5 s et doit être maintenue jusqu'au contournement. On retire l'isolateur de la chambre de brouillard et on le,laisse sécher. On recommence l'opération trois fois.

III.2.Estimation des paramètres de l'arc de contournement:

La modélisation du phénomène de contournement a été un intérêt spécifique pour de nombreux chercheurs [29]. Le problème majeur dans toutes ces investigations est la définition de la valeur des constantes de l'arc qui influer sur le processus de contournement [54-55]. Malheureusement, les valeurs des constantes de l'arc ont été estimées par plusieurs investigations, ces investigations sont basées de façon générale sur les spécificités des conditions expérimentales proposées par les auteurs.

Ce chapitre vise la détermination précise des paramètres de l'arc en utilisant l'approche d'optimisation par essaim de particules, nous essayons donc d'appliquer cette approche

d'optimisation pour construire un modèle mathématique qui permet d'estimer la tension critique de contournement à l'aide des résultats expérimentaux et théoriques de plusieurs chercheurs.

III.2.1. Model mathématique :

Le processus de contournement des isolateurs pollués a été soigneusement étudié par plusieurs recherches. Le modèle le plus simple est celui développé par Obenaus qui consiste à un arc qui saute la zone sèche et la résistance de la zone mouillée de la pollution en série [46]. En appliquant la loi d'ohm sur le circuit de la figure III.1:

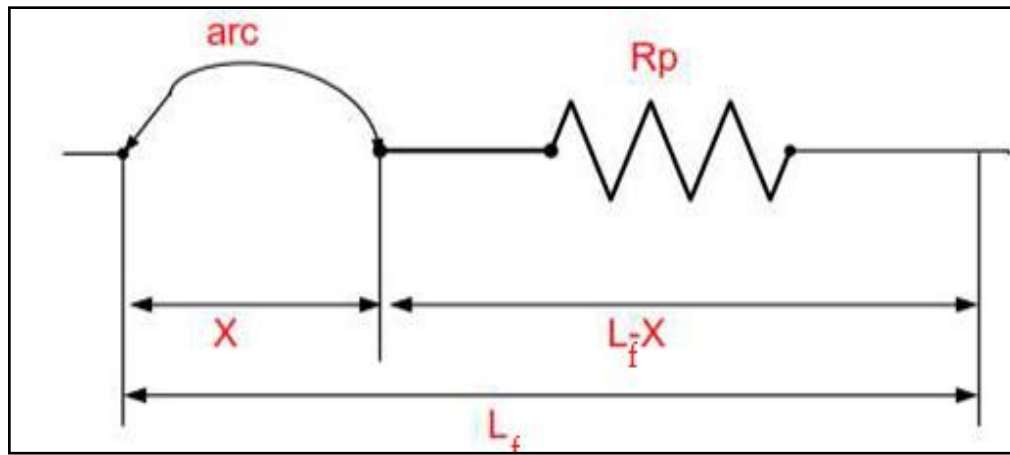


Figure III.1: Circuit équivalent pour l'évaluation de la tension de contournement.

Donc La tension appliquée U aux bornes de l'isolateur est exprimée par :

$$U = A.X.I^n + (L_f - X) . R_p . I \quad (III.1)$$

où

- X : La longueur de l'arc
- L_f : La ligne de fuite de l'isolateur (en cm)
- R_p : La résistance par unité de longueur de la couche de pollution
- I : Le courant de fuite
- A et n sont les constantes de l'arc.
- $A.X.I^n$: est la tension de l'arc
- $(L_f - X) . R_p . I$: est la tension dans la couche de pollution.

La mesure de la résistance R_p de la zone humide est très compliquée. Donc on peut la substituer à la conductivité σ_s (en Ω^{-1}) de la couche de pollution.

$$\sigma_s = \frac{1}{R_p} F \quad (\text{III.2})$$

où : F est le facteur de forme de l'isolateur et qui s'exprime par :

$$F = \int_0^l \frac{1}{\pi D(l)} \quad (\text{III.3})$$

Sachant que $D(l)$ est le diamètre extérieur de l'isolateur.

La condition critique pour la propagation de décharge électrique à la surface de l'isolateur pour cause le contournement est :

$$\frac{dI}{dX} > 0 \quad (\text{III.4})$$

La tension de contournement devient :

$$U_c = X_c . A . I_c^{-n} + (L_f - X_c) . K . R_p . I_c \quad (\text{III.5})$$

Avec :

A l'état critique, la longueur de l'arc prend la valeur [3] :

$$X_c = \frac{1}{n+1} L_f \quad (\text{III.6})$$

Ici le coefficient K a été ajouté pour valider l'équation (III.1) à l'instant critique du contournement. **Wilkins** [3] a introduit ce coefficient pour modifier la résistance de la couche de pollution R_p en tenant compte la concentration des lignes de courant au pied de la décharge. La formule simplifiée pour calculer K est [56] :

$$K = 1 + \frac{n+1}{2 \pi F n} \ln \left(\frac{L_f}{2 \pi R_p F} \right) \quad (\text{III.7})$$

Le courant critique sera calculé par la relation suivante:

$$I_c = (\pi D_m \sigma_s A)^{\frac{1}{n+1}} \quad (\text{III.8})$$

Les valeurs de la conductivité sont calculées comme suit :

$$\sigma_s = (369,05.C_p .0,42).10^{-6} \quad (\text{III.9})$$

où C_p : est la concentration de la couche polluante (mg/cm^2).

La résistance R_p sera donc calculée selon l'équation (II.1):

$$R_p = 0.469 (\pi D_m \sigma_s A)^{\frac{1}{2(n+1)}} \quad (\text{III.10})$$

Et enfin la tension de contournement prendra la forme suivante :

$$U_c = \frac{A}{n+1} (L_f + \pi D_m F K n) (\pi D_m \sigma_s A)^{\frac{-n}{n+1}} \quad (\text{III.11})$$

où D_m est le diamètre maximal de l'isolateur et σ_s est la conductivité surfacique.

L'équation (III.11) représente la valeur critique de la tension de contournement en fonction des paramètres de l'isolateur (D_m , F , K et L_f), les constantes de l'arc A , n et de la conductivité surfacique. La tension critique de contournement peut être calculée après la détermination des constantes de l'arc (A , n). Ces derniers ce sont les paramètres inconnus de l'équation (III.11).

III.2.2.Données expérimentales utilisées :

Le tableau III.1 donne les valeurs des paramètres géométriques et les valeurs de la tension de contournement U_m obtenue expérimentalement en fonction de la concentration de la pollution C_p pour quelques profils d'isolateurs collectées de la littérature (Topalis [57] et Zhicheng [58]), et utilisée dans la présente investigation[26].

Type	D_m (cm)	H	L (cm)	F	C_p (mg/cm ²)	U_m (KV)
profil 1	25.4	14.6	30.5	0.70	0.02	22.0
	25.4	14.6	30.5	0.70	0.05	16.0
	25.4	14.6	30.5	0.70	0.10	13.0
	25.4	14.6	30.5	0.70	0.16	11.0
	25.4	14.6	30.5	0.70	0.22	10.0
	25.4	14.6	30.5	0.70	0.30	8.50
profil 2	25.4	14.6	43.2	0.92	0.02	26.0
	25.4	14.6	43.2	0.92	0.05	19.0
	25.4	14.6	43.2	0.92	0.10	15.0
	25.4	14.6	43.2	0.92	0.16	13.0
	25.4	14.6	43.2	0.92	0.22	12.0
	25.4	14.6	43.2	0.92	0.30	10.5
profil 3	25.4	14.6	27.9	0.68	0.13	12.0
	25.4	14.6	27.9	0.68	0.16	11.1
	25.4	14.6	27.9	0.68	0.23	8.70
	25.4	14.6	27.9	0.68	0.28	9.10
	25.4	14.6	27.9	0.68	0.34	7.50
	25.4	14.6	27.9	0.68	0.37	7.80
	25.4	14.6	27.9	0.68	0.49	6.20
	25.4	14.6	27.9	0.68	0.52	6.80
	25.4	14.6	27.9	0.68	0.55	6.10

Tableau III.1: Données expérimentales.

Où : L : Longueur de la ligne de fuite.

D : Diamètre maximal de l'isolateur.

F : Facteur de forme.

C_p : La DDSE (Densité de Dépôt de Sel Equivalente).

U_m : La tension critique de contournement.

Les données expérimentales de la tension critique de contournement U_m en fonction de la conductivité σ_s et les caractéristiques géométriques de l'isolateur D_m , L_f , F et H du tableau

III.1 sont appliquées à l'équation (III.11) pour un ensemble d'équations à deux inconnues (A et n). Le problème d'optimisation peut s'écrire sous la forme suivante :

$$F_g = \sum_{i=1}^m (U_{mi} - U_c(A, n)) \quad (\text{III.13})$$

Cet ensemble d'équations doit être minimisé sur A et n .

III.3. Procédure d'optimisation:

III.3.1. Procédure d'optimisation pour PSO :

La technique d'optimisation par essaim particulaire travaille sur une population appelée essaim de solutions possibles, elles-mêmes appelées particules. Ces particules sont placées aléatoirement dans l'espace de recherche de la fonction objective.

A chaque itération, les particules se déplacent en prenant en compte leur meilleure position mais aussi la meilleure position de son voisinage.

Pour l'algorithme de PSO la vitesse et la position sont créées de façon aléatoire. F_g (la fonction objectif ou fitness) est l'objectif du groupe des particules. Avec les particules de recherche, nous pouvons obtenir le minimum de F_g , ainsi les valeurs de A et n .

Le processus de calcul pour estimer les paramètres électriques de la décharge (A , n) par l'algorithme PSO peut être décrit dans les étapes suivantes (figure III.2):

- Etape 1 : Initialisation : La vitesse (vélocité) et la position de toutes les particules sont fixées de façon aléatoire à l'intérieur de l'intervalle prédéterminé.
- Etape 2 : Mettre à jour la vitesse : A chaque itération, les vitesses de toutes les particules sont mises à jour suivant l'équation II.1.
- Etape 3 : Mettre à jour la position : A chaque itération, les positions de toutes les particules sont mises à jour suivant l'équation II.2.
- Etape 4 : Mettre à jour la mémoire : Mettre à jour p_{best} et g_{best} lorsque la condition est remplie.
- Etape 5 : Critère d'arrêt : Répéter les étapes 2 à 4 jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit satisfait (nombre maximum d'itérations atteint) [9].

L'organigramme suivant explique le principe de PSO :

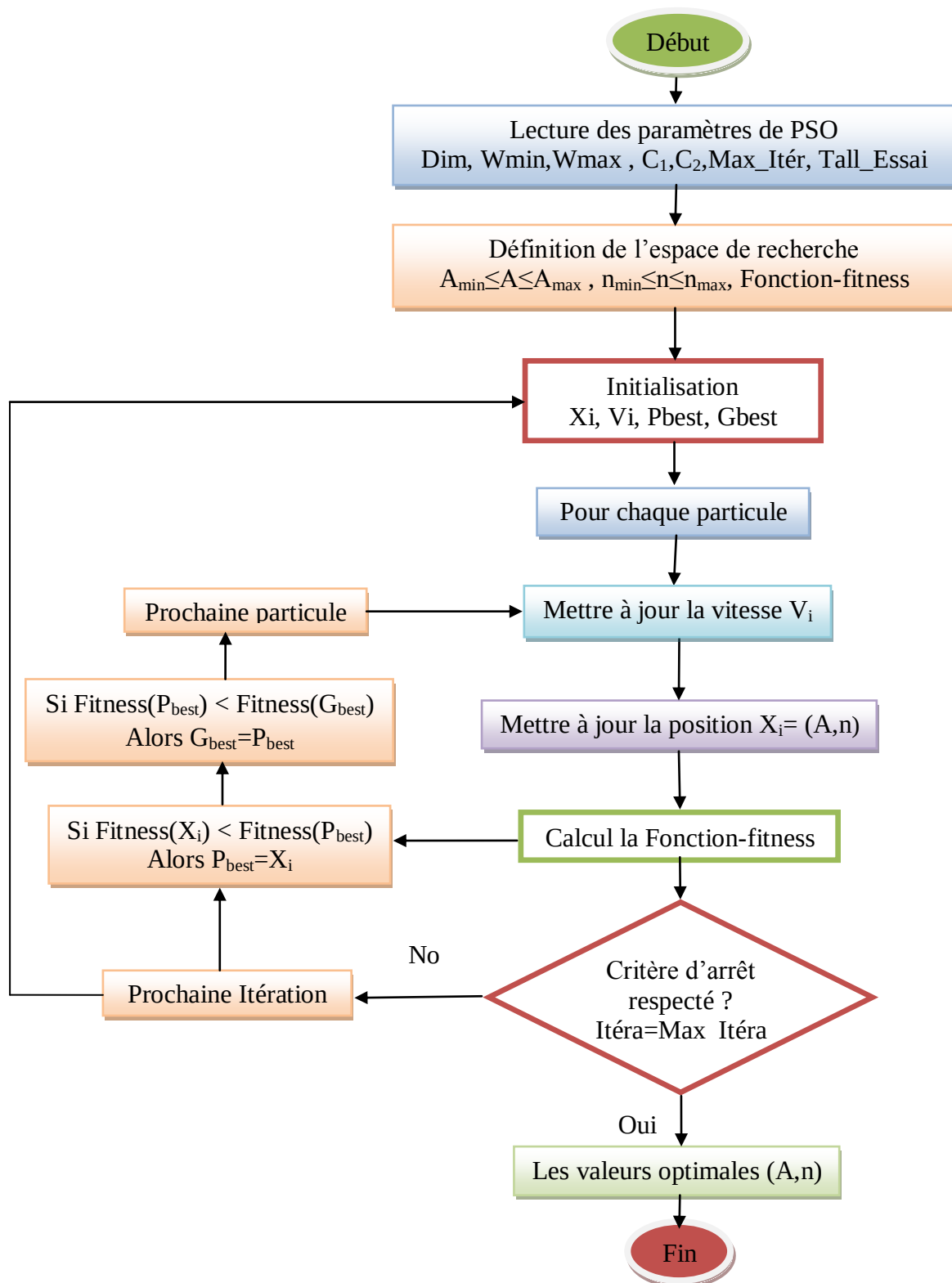


Figure III.2: Organigramme de PSO.

III.4. Les paramètres de PSO:**III.4.1. Les valeurs adoptées pour les paramètres de PSO sont :**

- ❖ La taille de l'essaim (swarm size $N=30$);
- ❖ Les coefficients de confiances (learning factors $C_1=C_2=1.5$);
- ❖ Le nombre Maximal d'itérations, $k_{\max}=200$;
- ❖ Poids, $W_{\min}=0.4$, $W_{\max}=0.8$;

III.4.2. L'espace de recherché :

Les constantes caractéristiques de la décharge A et n dépendent de la nature du milieu où brûle la décharge, elles varient selon les auteurs et les conditions expérimentales (tableau III.2).

Auteurs	A	n	Source de tension	Milieu
Obenaus et al.	100	0.5	ac	air
L. Alston et al.	63	0.76	ac	air
Wilkins	63	0.76	dc	air
Hampton	530	0.24	NS	vapeur
Claverie et al	100	0.5	ac	air
Jolly et al	296	0.397	ac	air
Rumeli	518	0.273	NS	vapeur
Rahal	220	0.31	dc	air
F. A. M. Rizk	130 à 210.6	0.45 à 1.3	dc	air
	138	0.69		
			dc	air
G. Zhanga et al.	140	0.67		
D. A. Swift	80 et 60	0.5	dc	air
R. Sundararajan et al	60 à 63	0.8 à 0.5	dc	air
P.S. Ghosh et NChatterjee	360	0.59	ac	air
H. G. Gopal et al	60 à 100	0.25 à 1.2	NS	air
Chen et Farzaneh	84	0.77	dc-	Air
	209	0.45	dc+	Et
	205	0.56	ac	givre

Tableau III.2: Valeur des constantes A et n selon plusieurs auteurs.

Donc, les valeurs des constantes de l'arc A et n varient respectivement dans les intervalles $[0, 500]$ et $[0, 1]$. Ainsi, les valeurs optimales des paramètres de l'arc qui rendent la fonction fitness F_g minimale en utilisant le approche PSO est sélectionnée comme des paramètres les plus appropriés.

III.5. Résultats et discussion:

L'optimisation par essaim de particules (PSO) est une jeune méta-heuristique. Elle a prouvé sa simplicité, son efficacité et sa convergence très rapide dans plusieurs domaines. Cependant, l'algorithme original du PSO n'opère que dans des espaces continus. En outre, la sélection et l'adaptation du nombre important des paramètres de l'algorithme PSO (la taille de l'essaim, le coefficient d'inertie ω , les coefficients d'accélération c_1 et c_2 ...) jouent un rôle primordial dans l'efficacité et la performance de l'algorithme. D'autre part, le PSO peut être facilement tombé dans la vallée de l'optimum local si la meilleure position globale et la meilleure position locale sont égales à la position de la particule durant plusieurs itérations.

Dans le but de bénéficier des avantages de l'algorithme d'optimisation par essaim de particules, nous avons choisis ces paramètres soigneusement après plusieurs essais en se basant sur des paramètres conseillés par plusieurs chercheurs.

III.5.1.Détermination Les valeurs des paramètres de l'arc A et n par

l'approche PSO:

Une première investigation dans cette section consiste à appliquer l'approche PSO pour estimer les paramètres de l'arc de contournement en utilisant les données expérimentales de trois profils d'isolateurs disponible dans la littérature (tableau III.1) [59]. Les valeurs des paramètres de l'arc A et n des trois profils obtenues par la présente investigation sont présentés au tableau III.3. Ce tableau montre le processus de recherche et d'optimisation entreprise par l'approche PSO.

III.5.1.1. simulation en matlab de méthode PSO sur Le phénomène du contournement:

```
clear;clc;

popsize=30;                               % population size
Max_iteration=200;                         % Max_iteration
```

```

LB = [0 0 ];
UB = [500 1 ];
Nvars=size(LB,2);
Obj_fun=@Fitness;% La fonction à optimisée
[Fg,sol]=Particle_Swarm_Optimization(popsiz,Max_iteration,LB,UB,Nvars,Obj_
fun);
x(1)=sol(:,1);
x(2)=sol(:,2);
load Param_Insulators.dat (tableau III.1)
Dm=Param_Insulators(:,1);
L=Param_Insulators(:,3);
F=Param_Insulators(:,4);
esdd=Param_Insulators(:,5);
Um=Param_Insulators(:,6)*1000; % Kv
sigm = (369.05*esdd+0.42)*1e-6;
R=0.469*(pi*x(1)*Dm.*sigm).^(1/(2*(x(2)+1)));
K=1+((x(2)+1)/(2*pi*F*x(2))).*log(L./(2*pi*R.*F));
Uc=(x(1)/(x(2)+1)).*(L+pi*x(2)*Dm.*F.*K).*(pi*x(1))*
Dm.*sigm).^(-x(2)/(x(2)+1));
y=sum(abs(Um-Uc));
data=[Um Uc];

```

```

function
[gBestScore,gBest]=Particle_Swarm_Optimization(popsiz,Max_iteration,lb,ub,
dim,fobj)
Vmax=6;
noP=popsiz;
wMax=0.8;
wMin=0.4;
c1=1.5;
c2=1.5;
Fg=[];A=[];n=[];
% Initializations
iter=Max_iteration;
vel=zeros(noP,dim);
pBestScore=zeros(noP);
pBest=zeros(noP,dim);
gBest=zeros(1,dim);
cg_curve=zeros(1,iter);
pos=initialization(noP,dim,ub,lb);

for i=1:noP
    pBestScore(i)=inf;
end

% Initialize gBestScore for a minimization problem
gBestScore=inf;
for l=1:iter
    % Return back the particles that go beyond the boundaries of the search
    % space
    Flag4ub=pos(i,:)>ub;
    Flag4lb=pos(i,:)<lb;
    pos(i,:)=(pos(i,:).*(~(Flag4ub+Flag4lb)))+ub.*Flag4ub+lb.*Flag4lb;

    for i=1:size(pos,1)

```

```

        fitness=fobj(pos(i,:));

        if(pBestScore(i)>fitness)
            pBestScore(i)=fitness;
            pBest(i,:)=pos(i,:);
        end
        if(gBestScore>fitness)
            gBestScore=fitness;
            gBest=pos(i,:);
        end
    end
    w=wMax-1*((wMax-wMin)/iter);
    %Update the Velocity and Position of particles
    for i=1:size(pos,1)
        for j=1:size(pos,2)
            vel(i,j)=w*vel(i,j)+c1*rand()*(pBest(i,j)-
                pos(i,j))+c2*rand()*(gBest(j)-pos(i,j));

            if(vel(i,j)>Vmax)
                vel(i,j)=Vmax;
            end
            if(vel(i,j)<=-Vmax)
                vel(i,j)=-Vmax;
            end
            pos(i,j)=pos(i,j)+vel(i,j);
        end
    end
    cg_curve(1)=gBestScore;
    disp(['Fg = ', num2str(gBestScore), ' A = ', num2str(gBest(1)), ...
        ' n= ', num2str(gBest(2))]);
    Fg=[Fg gBestScore];
    A=[A gBest(1)];
    n=[n gBest(2)];
end
figure(1);
plot(Fg);
legend('Fg','Nb Iterations');
figure(2)
plot(A);
legend('A','Nb Iterations');
figure(3)
plot(n);
legend('n','Nb Iterations');

```

Tableau III.3: Estimation des paramètres de l'arc par l'approche PSO.

Iterations	10	20	40	100	140	200
A	132.8133	125.4555	124.3563	124.3563	124.3563	124.3563
n	0.37305	0.41414	0.41414	0.41414	0.41414	0.41414
F_g	8550.3974	6576.5826	6468.3792	6468.3792	6468.3792	6468.3792

Pour mieux voir l'évolution du processus d'optimisation, nous avons tracé la variation de la fonction fitness en fonction du nombre de générations (figure III.5).

Au cours des générations, nous approchons de plus en plus de la solution optimale (paramètres de l'arc optimaux). En effet, on remarque sur la figure III.5 que la valeur de la fonction fitness Fg de la meilleure solution est une fonction décroissante au cours des itérations. Au moment où l'algorithme converge (dans notre cas ~ 40 itérations), la valeur de la fonction fitness est très minimale. À ce moment-là, on considère la meilleure solution des dernières itérations comme étant la valeur optimale des paramètres de l'arc recherchés.

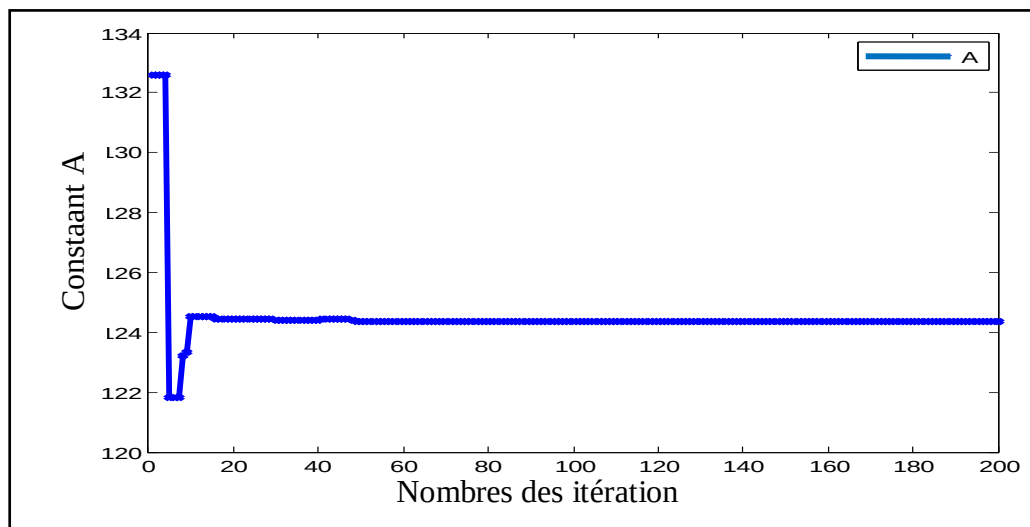


Figure III.3 : Variation de la constante A en fonction du nombre d'itérations.

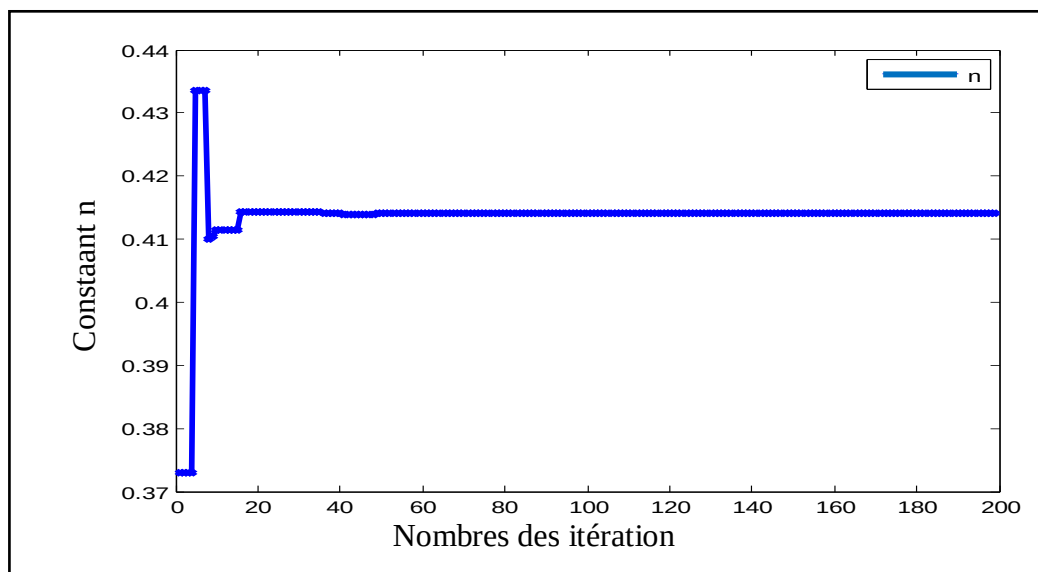


Figure III.4 : Variation de la constante n en fonction du nombre d'itérations.

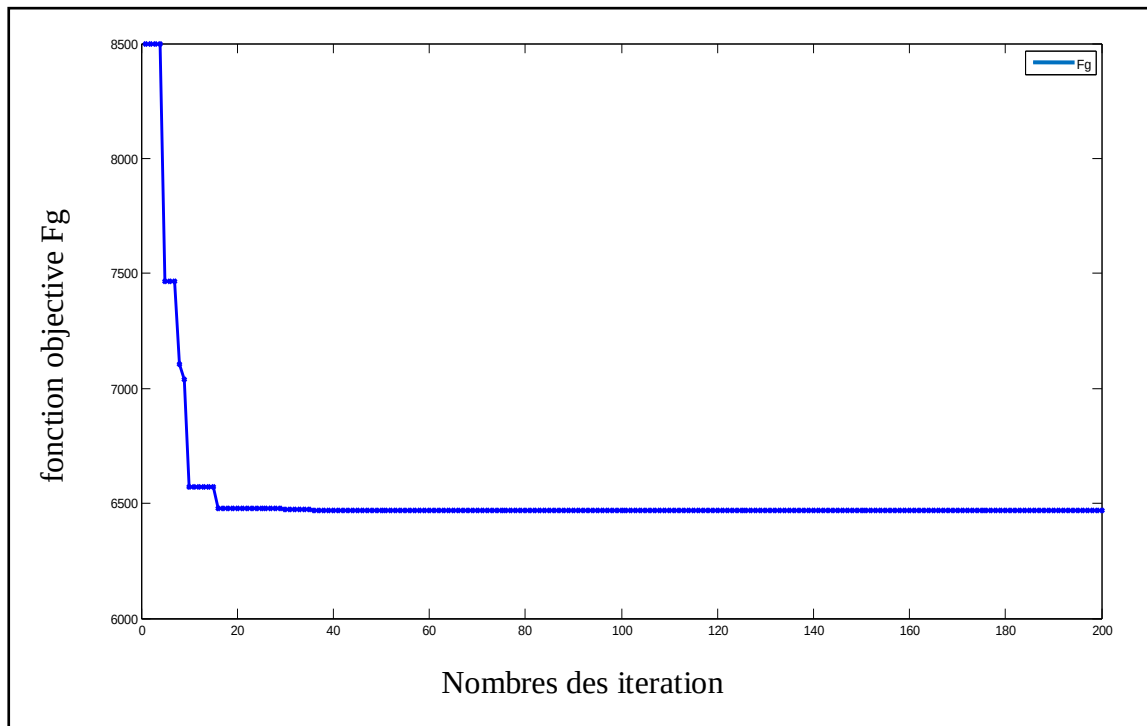


Figure III.5 : Evolution de la fonction fitness F_g en fonction du nombre d'itérations.

III.6.Validité des paramètres A et n:

Le tableau suivant représenté les constants de l'arc que nous avons obtenues par PSO :

	La méthode PSO
A	124.3563
n	0.41414

TableauIII.4: les valeurs de A et n .

Les paramètres de l'arc optimaux trouvés par l'approche proposée seront par la suite utilisés dans le modèle mathématique de l'équation III.11, afin de prédire la tension critique de contournement. nous avons effectué sur les mêmes figures une comparaison entre ces valeurs calculées et celles mesurées par Zhicheng [58] et Topalis [57]. Ces valeurs expérimentales sont introduites pour but de comparaison et de validation de la présente approche, Les courbes suivants représenté la variation de la tension de contournement calculé a l'aide du tableau ci-dessus en fonction de la conductivité pour chaque profile séparément.

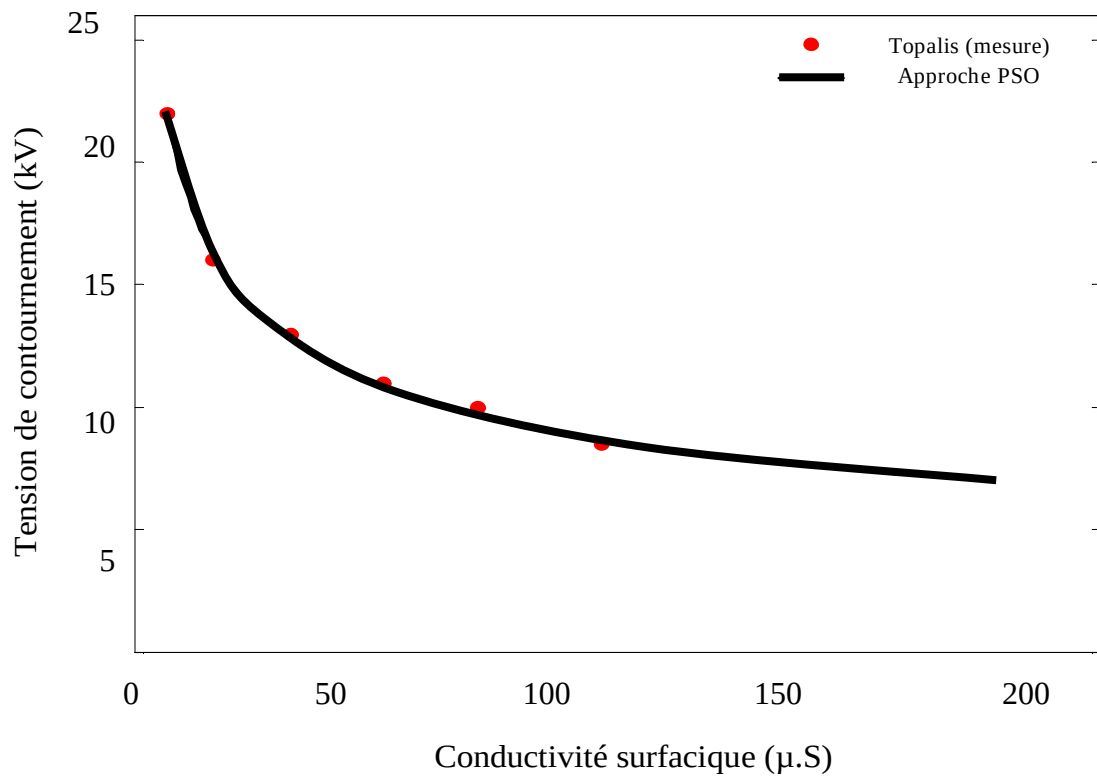


Figure III.6: Tension de contournement en fonction de la conductivité surfacique (profil 1).

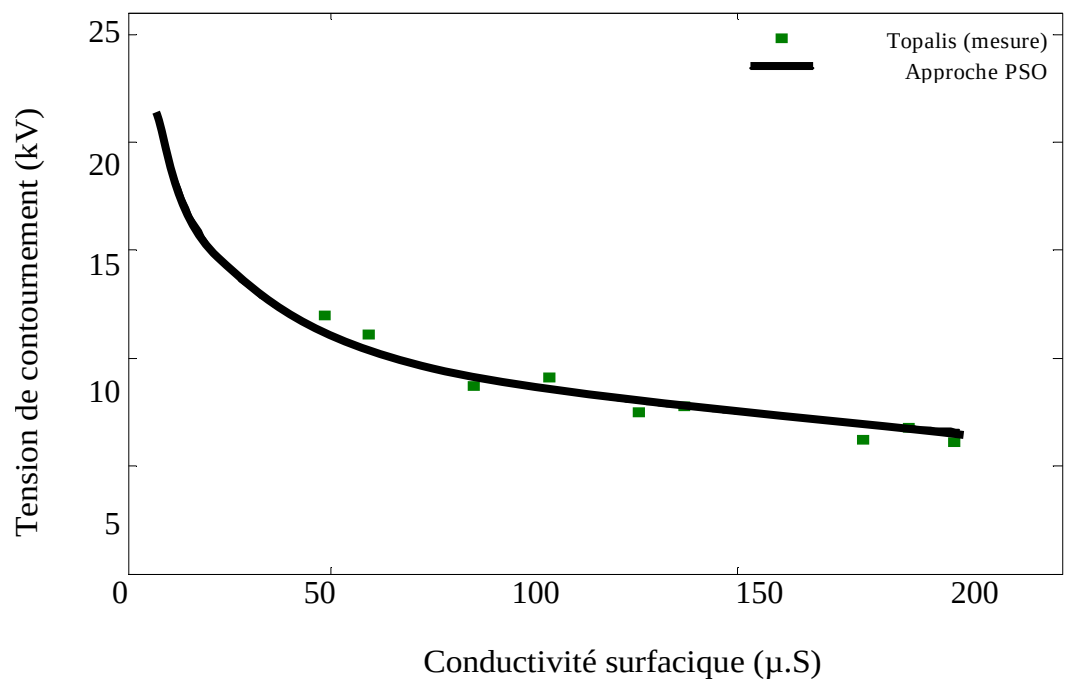


Figure III.7: Tension de contournement en fonction de la conductivité surfacique (profil 2).

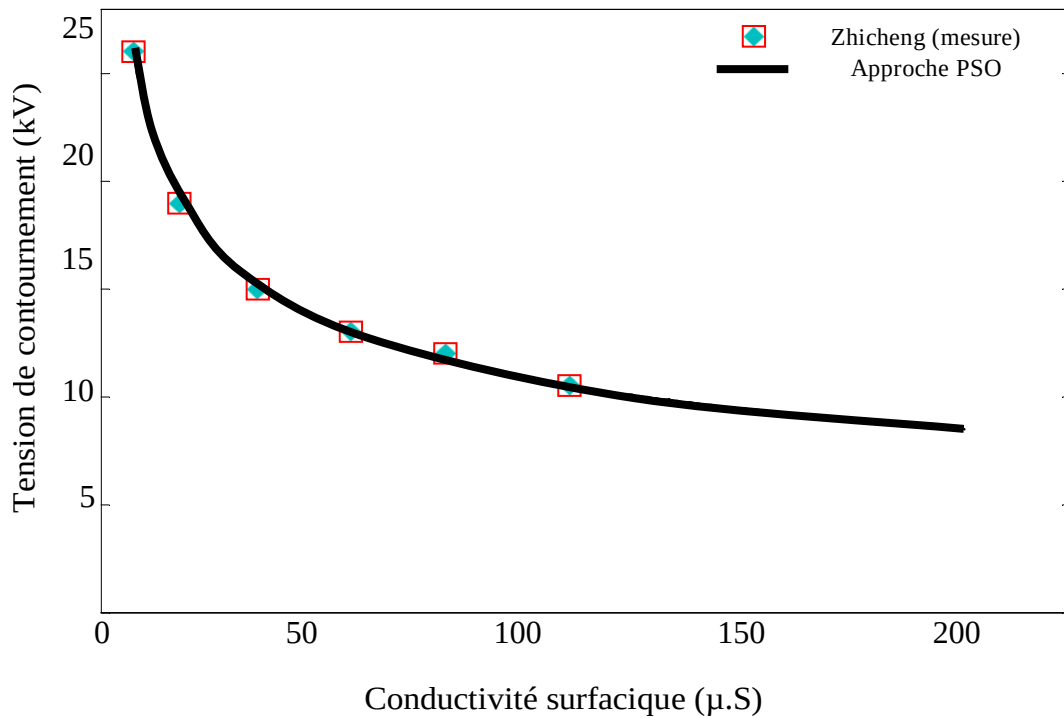


Figure III.8: Tension de contournement en fonction de la conductivité surfacique (profil 3).

On peut dire que cette méthode est très efficace dans ce domaine (Estimation des paramètres de L'arc de contournement) , Parce que nous avons remarqué après courbes l'analyses des résultats que les trois figures représentant la variation de la tension de contournement en fonction de la conductivité surfacique, nous remarquons clairement que les valeurs calculées par le modèle mathématique combiné avec PSO pour chaque type de l'isolateur sont en bon accord avec les valeurs expérimentales.

III.7. Estimation analytique de la tension U_C basée sur des formules simplifiées :

Les chercheurs ont trouvé de nombreuses expressions mathématiques concernant U_C et sa simplification utilisé dans ce model mathématique. Nous choisissons deux formules **Neumärker** et **Ghosh et Chatterjee** Et comparez leurs résultats avec **Wilkins** (III.11).

III.7.1. Travaux de Neumärker :

En utilisant le modèle mathématique a été trouvé à la fin la tension de contournement prendra la forme suivante :

$$U_C = A^{\frac{1}{n+1}} \cdot r_p^{\frac{n}{n+1}} \cdot L_f \quad (\text{III.13})$$

III.7.1.1. Résultats de Travaux de Neumärker :

Tableau III.5: Estimation des paramètres de l'arc par l'approche PSO (Neumärker) .

Iterations	10	19	50	100	140	200
A	120.9952	124.3563	124.3563	124.3563	124.3563	124.3563
n	0.432	0.41414	0.41414	0.41414	0.41414	0.41414
F_g	7224.7678	6468.379	6468.379	6468.379	6468.379	6468.379

On remarque sur la figure III.9 que la valeur de la fonction fitness F_g de la meilleure solution est une fonction décroissante au cours des itérations. Au moment où l'algorithme converge (dans notre cas ~ 19 itérations), la valeur de la fonction fitness est très minimale.

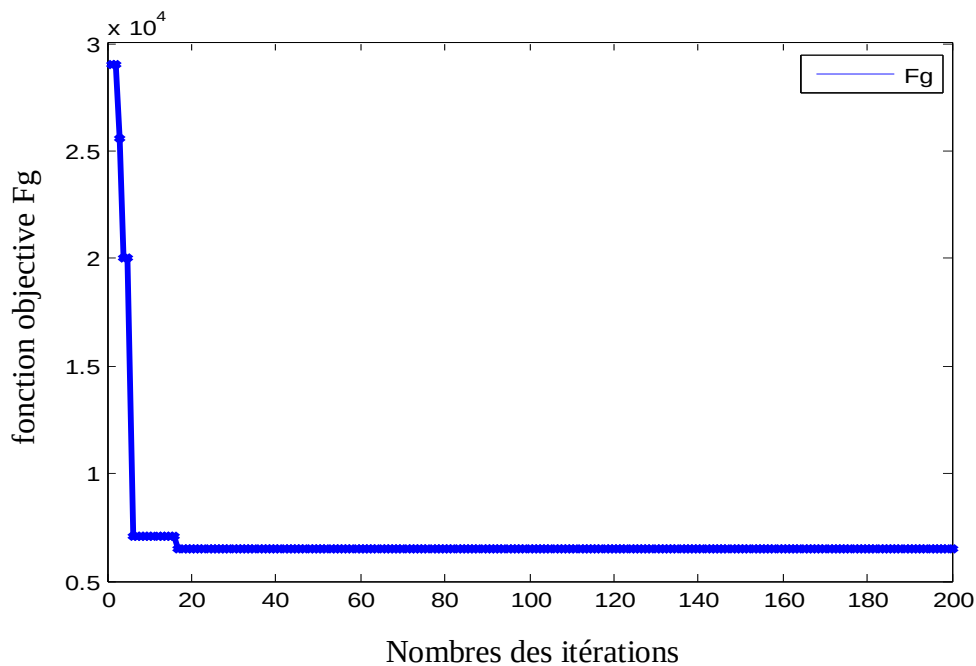


Figure III.9: Evolution de la fonction fitness F_g en fonction du nombre d'itérations.

A ce moment on constate que la convergence de l'algorithme est très rapide par rapport au précédent (Wilkins) , 19 iterations petit comparé à 40 iterations . Bien que nous ayons trouvé exactement les mêmes résultats qu'auparavant.

III.7.2. Travaux de Ghosh et Chatterjee:

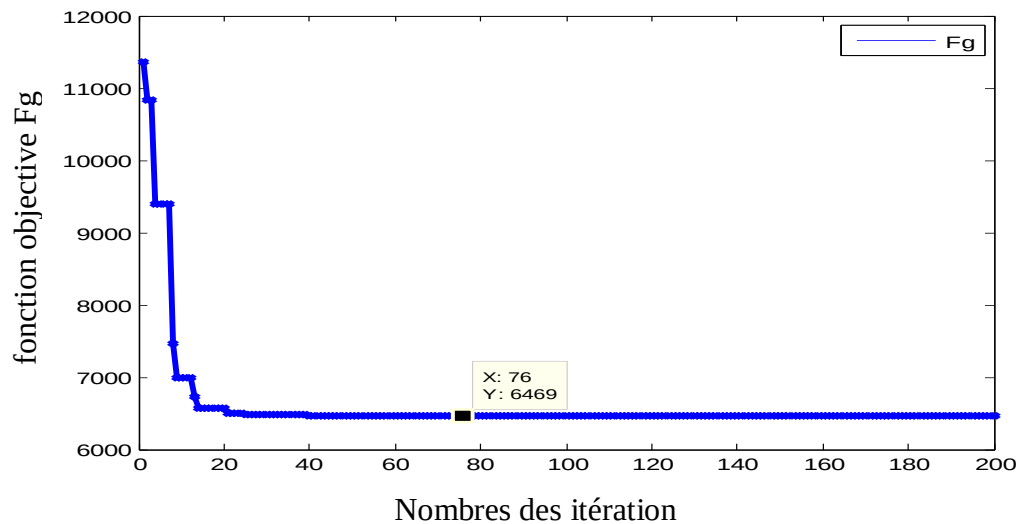
En utilisant le modèle mathématique a été trouvé à la fin la tension de contournement prendra la forme suivante :

$$U_C = \left(\frac{1,3}{\sqrt{2}} \right) \cdot L_f \cdot A^{\frac{1}{n+1}} \cdot r_p^{\frac{n}{n+1}} \quad (\text{III.14})$$

III.7.2.1. Résultats de Travaux de Ghosh et Chatterjee:**Tableau III.6:** Estimation des paramètres de l'arc par l'approche PSO (Ghosh et Chatterjee).

Iterations	10	30	50	77	100	200
A	126.084	124.4553	124.4231	124.3563	124.3563	124.3563
n	0.40779	0.41374	0.41388	0.41414	0.41414	0.41414
F_g	6644.0074	6470.0849	6469.4819	6468.379	6468.379	6468.379

On remarque sur la figure III.10 que la valeur de la fonction fitness F_g de la meilleure solution est une fonction décroissante au cours des itérations. Au moment où l'algorithme converge (dans notre cas ~ 77 itérations), la valeur de la fonction fitness est très minimale.

**Figure III.10:** Evolution de la fonction fitness F_g en fonction du nombre d'itérations.

Dans ce cas, nous remarquons que la convergence de l'algorithme était grande comparée aux deux cas précédents, C'est-à-dire avoir une solution optimale dans 77 itérations .

Conclusion:

Dans ce chapitre, nous avons proposé l'approche d'optimisation par essaim de particules afin d'estimer les paramètres de l'arc (A et n) de contournement, et ainsi prédire la tension critique de contournement en se basant sur le modèle mathématique de Topalis, ce dernier ne nécessite que les caractéristiques géométriques de l'isolateur, la sévérité de pollution et les paramètres de l'arc que nous avons optimisé par l'approche proposée. Les résultats de simulation montrent que l'approche PSO a été appliquée avec succès dans l'estimation des paramètres de l'arc. De plus, des valeurs expérimentales de la tension de contournement disponible dans la littérature sont introduites pour but de valider le modèle mathématique basé sur l'approche proposée, ces valeurs mesurées sont en bon accord avec celles calculées par ce dernier.

PSO est un méthode rapide de déterminer les constantes l'arc électrique (A et n) et possède un nombre réduit d'itérations et moins d'opérations.

Nous avons expliqué dans cette dernière que l'équation de tension joue un rôle très important dans la convergence de la fonction et dans la recherche de la solution optimale. Nous avons pris des équations pour les chercheurs Neumärker et Ghosh et Chatterjee et les comparer avec Topalis.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale:

Ce travail nous avons étudié le phénomène de contournement des isolateurs pollués utilisé dans lignes aériennes de transport de l'énergie électrique. En particulier, nous nous sommes intéressés à la formulation de la résistance de la couche de pollution, l'estimation des paramètres de l'arc par l'approche d'optimisation par essaim de particules (PSO) et la prédiction de la tension critique de contournement. D'autre part, ce travail a été consacré à la caractérisation électrique des décharges qui se propagent sur la surface de l'isolateur pollué en tenant compte de la valeur efficace de la tension appliquée, conductivité et quantité de la pollution de l'isolateur.

Le but de ce mémoire est prédiction de la tension de contournement par l'approche d'optimisation par essaim particulaire PSO utilisé dans l'estimation des constantes de l'arc électrique (A et n) nécessaires au modèle mathématiques pour l'évaluation de la tension de contournement.

Après avoir examiné les concepts fondamentaux sur le phénomène de contournement des isolateurs pollués. nous avons mené une recherche dans laquelle nous illustrons la modélisation du phénomène et Mécanisme de propagation et Critères de propagation de la décharge.

Par la suite, nous avons présenté les concepts de base et l'état de l'art l'optimisation par essaim particulaires.

Les résultats de simulation obtenus, montrent que les valeurs calculées de la tension critique de contournement par le modèle mathématique combiné avec l'approche PSO sont en bon accord avec les valeurs expérimentales de Zhicheng et Topalis.



BIBLIOGRQPHIE

Bibliographie:

- [1] **S. M. Gubanski**, “Modern outdoor insulation- Concerns and challenges”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol. 21, N°6, pp. 5-11, Nov./Dec. 2005.
- [2] **Woodson H. H. and McElroy A. J.**, “Insulators with Contaminated Surfaces Part II: Modeling of Discharge mechanisms”, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. PAS-89, No. 8, pp. 1858-1867, 1970.
- [3] **R. Wilkins**, “Flashover Voltage of High Voltage Insulators with Uniform Surface-Pollution Films”, Proc. IEE, Vol. 116, pp. 457-465, 1969.
- [4] **M. Farzaneh and W. A. Chisholm**, “Insulators for icing and polluted environments”, IEEE Press, John Wiley & Sons, Inc. Publication, 2009.
- [5] **D. Mahi**, “Observation de l’allongement d’une décharge électrique sur des surfaces faiblement conductrices et corrélation avec les modèles de contournement électrique d’isolateurs HT pollués ”, Thèses Doctorat d'Etat de l'Université Djilali Liabès, Sidi Belabès, Algérie, 2001.
- [6] **R. Sundarajan and R.S.Gorur**, “Dynamic Arc Modelling of Pollution Flashover on Insulators under DC Voltage”, IEEE Trans.on Elect.Insul, Vol.28, nr.2, pp.209, April 1993.
- [7] **S. Diampeni** , “Modélisation Dynamique Des Décharges Se Propageant Sur Des Surfaces Isolantes Polluées Avec Des Dépôts Discontinus Sous Différentes Formes De Tension”, Thèses Doctorat de l'Université Lyon , France, 2007.
- [8] **H. Edels**, “Arc Interruption and Thermal Reignition”, Proc. IEE, Vol. 109, pp. 89-98, Feb.,1962.
- [9] **M. El-A. Slama, A. Beroual and H. Hadi**, “Analytical Computation of Discharge Characteristic Constants and Critical Parameters of Flashover of Polluted Insulators”, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 17, No. 6, pp. 1764-1771, December 2010
- [10] **R.Matsuoka, S.Ito K. Sakanishi and K. Naito**, “Flashover on Contaminated Insulators with different diameters”, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol.26 No. 6, December 1991.
- [11] **T.C Chen and H.I.M. Nour**, “A study on Profile of HVDC Insulators”, IEEE Trans.on Elect.Insul, Vol.24, No. 1, pp.113-117, Februray1989
- [12] **P. Claverie et Y. Porcheron** : “La pollution des isolateurs, les phénomènes de pollution des isolateurs et l’isolement des ouvrages en régions polluées”. RGE, tome 82, n°3, Mars 1973.
- [13] **R.Wilkins**, “Flashover voltage of high-voltage insulators with uniform surface pollution films” Proc IEE.Vol 116 n°3- pp.457-465 March 1969.

- [14] **Shahab Farokhi**, “Mecanismes de propagation de l’arc électrique a la surface de glace ”, These de doctorat, UQAC, Quebec, Canada, Decembre 2010.
- [15] **T. Matsumoto, M. Ishi, T. Kawamura**, “Optoelectronic measurement of partial arcs on contaminated surface”, IEEE Trans. on Electr. Insul., Vol. 19, pp 531-548, 1984.
- [16] **P. Claverie and Y. Porcheron**, “How to Choose Insulators for Polluted Areas”, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 92, N° 3, pp. 1121-1131, 1973.
- [17] **Le Roy et Cie**, “Propriétés diélectriques de l’air et très haute tensions collection de la direction des études et recherches d’électricité de France”, Paris 1984.
- [18] **G.E. Asimakopoulou, V.T. Kontargyri, G.J. Tsekouras, Ch. N. Elias, F.E. Asimakopoulou and I.A. Stathopoulos**. “A fuzzy logic optimization methodology for the estimation of the critical flashover voltage on insulators”, Electric Power Systems Research, 81, pp. 580-588. 2011.
- [19] **Z. Aydogmus, M. Cebeci**, “A New Flashover Dynamic Model of Polluted HV Insulators”. IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 11, No. 4, pp. 577-584; August 2004.
- [20] **H. Hadi**, “Étude expérimentale et modélisation de l’influence de la constitution chimique et de la répartition de la pollution sur le contournement des isolateurs haute tension”, Thèse de Docteur d’Etat, Université USTO, Algérie. Mai 2002.
- [21] **H. Hadi and S. Flazi**, “New approach of determination of the pollution resistance of an insulator in presence of an electric discharge”, IEEE Conf. Electr. Insul. Dielectr. Phenomena (CEIDP), pp.387-390, 2003
- [22] **S. Flazi**, “ Etude du Contournement Electrique des Isolateurs Haute Tension Pollués, Critère d’Elongation de la Décharge et Dynamique du phénomène ”, Thèses Doctorat d’Etat-Sciences de l’Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 1987.
- [23] **F. Obenaus**, “Fremdschichtüberschlag und Kriechweglänge”, Deutsche Elektrotechnik, vol. 4, 1958, p. 135-136.
- [24] **P. S. Gohsh, S. Chakravorti and N. Chatterjee**, “Estimation of Time to Flashover Characteristics of Contaminated Electrolytic Surfaces using a Neural Network”, IEEE Trans. on Dielect and Electr Insul, Vol. 2, N° 6, pp. 1064-1074, 1995.
- [25] **F. Rizk**, "Mathematical Models for Pollution Flashover", Electra, Vol. 78, pp. 71-103, 1981.
- [26] **Mr. Sid Ahmed Bessedik**, “ Contournement des isolateurs pollutes ”, these de doctorat, Département d’électrotechnique, Option: Haute Tension et Décharges Electriques. Université des Sciences et de la Technologie D’Oran Mohamed Boudiaf, Soutenue le 28 juin 2015.

- [27] **N. Dhahbi**, “ Modélisation Dynamique Des Décharges Sur les Surfaces d’Isolateurs Pollués Sous Différentes Formes De Tension : Elaboration d’un Critère Analytique de Propagation ”, Thèses Doctorat de l’Université Lyon , France, 1998.
- [28] **N. Dhahbi Megriche, A. Beroual and L. Krahenbuhl**, “A New Proposal Model for Flashover of Polluted Insulators”, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 30, pp. 889-894, 1997.
- [29] **Nisrine Mhaguen**, “ Développement De Modèles Dynamiques De Prédiction De La Tension Critique De Contournement Des Isolateurs Recouverts De Glace Basés Sur La Méthode Des Éléments Finis ” Mémoire de Maîtrise en Ingénierie, Université du Québec Janvier 2011.
- [30] **A. M. Rahal and C. Huraux** “Flashover Mechanism of High Voltage Insulators”, IEEE, Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol.98, No. 6, pp. 2223-2230, 1979.
- [31] **S. Flazi**, “Etude du Contournement Electrique des Isolateurs Haute Tension Pollués Critère d’Elongation de la Décharge et Dynamique du Phénomène”, Doctorat d’Etat-Sciences de l’Université Paul Sabatier, Toulouse, 1987.
- [32] **B.F Hampton** “Flashover mechanism of polluted insulation ”,Proc. IEE. Vol 111, No 5, Mai 1964.
- [33] **Y. Yamano, Y. Takahashi And S. Kobayashi** “Improving insulator reliability with insulating barriers ”,I.E.E.E. vol 25 N° 6 PP 1174-1179 , December 1990.
- [34] **S. Anjana and C. S. Lakshminarasmha**, “Computed of Flashover Voltages of Polluted Insulators Using Dynamic Arc Model ”, 6th International Symposium on High Voltage Engineering, paper. 30.09, New Orleans, 1989.
- [35] **P. S. Ghosh and N. Chatterjee**, “Arc propagation over Electrolytic Surfaces under Power Frequency Voltage”, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol.3, No. 4, pp. 529-536, August 1996.
- [36] **A. Rioland, A. Eudes**, “Optimisation par essaim particulaire pour un problème d’ordonnancement et d’affectation de ressources,” Rapport de Projet 3ème année Modélisation et Calcul Scientifique, Institut Supérieur d’Informatique de Modélisation et de Leurs Applications Complexe des Cezeaux, AUBIERE CEDEX, 2007.
- [37] **R.Charrier**, “l’intelligence en essaim sous l’angle des systems complexes”, these doctorat, 2009.
- [38] **M. Clerc, M. and J. Kennedy**, “The particle swarm: explosion, stability, and convergence in a multi-dimensional complex space,” In Proceedings of the IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002.

- [39] **R. Benabid**, “Optimisation multiobjectif de la synthèse des FACTS par les particules en essaim pour le contrôle de la stabilité de tension des réseaux électriques”, Mémoire de Magister en Electrotechnique de l’Université Amar Telidji, Laghouat, 2007.
- [40] **J. Kennedy and R. C. Eberhart**. “Particle Swarm Optimization”. In : Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks IV, pp. 1942–1948, Perth, Australia, November 1995.
- [41] **Y. Cooren**, “Perfectionnement d’un algorithme adaptatif d’optimisation par essaim particulière - applications en génie médical et en électronique”, Thèse de Doctorat de l’Université Paris 12, Val de Marne, 2008.
- [42] **Gourgand et Kemmoe**, Particle Swarm Optimization “A study of particle displacement for solving continuous and combinatorial optimization problems”, 2009.
- [43] **M. Clerc, M. and J. Kennedy**, “The particle swarm: explosion, stability, and convergence in a multi-dimensional complex space”, In Proceedings of the IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002.
- [44] **R. Eberhart, Y. Shi**, “Comparing inertial weights and constriction factor in particle swarm optimization”, Proceeding of the International Congress on Evaluation of Computation, San Diego, California, IEEE Service Center, Piscataway, NJ, pp. 84- 88, 2000.
- [45] **M. Padma Lalitha, V. C. Veera Reddy, V. Usha**, “Optimal DG placement for minimum real power loss in radial distribution systems using PSO”, Journal of Theoretical and Applied Information Technology, pp. 107- 116, 2010.
- [46] **IEEE Committee Report**, “Tutorial on Modern Heuristic Optimization Techniques with Applications to Power Systems”, IEEE Power Engineering Society, 02-TP-160, 2002.
- [47] **I. N. Kassabalidis**, “Dynamic security border identification using enhanced particle swarm optimization”, IEEE Transactions on Power System, Vol. 17, No. 3, August 2002.
- [48] **M. Cherif**. “Capacité d’une mémoire associative à fonction de sortie chaotique”, Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Montréal, Décembre 2010.
- [49] **Clerc M. and Kennedy J.**, The Particle Swarm: Explosion, Stability and Convergence in a Multi- Dimensional complex Space, IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 6, 2001.
- [50] **Matlab 7.4.0 (R2007)**, “Genetic algorithm and direct search toolbox →getting started with the genetic algorithm →Example: *Rastrigin’s* function,” The MathWorks, Inc., 2007.

- [51] **K.A. De Jong**, “Learning with genetic algorithms: an overview”, Machine learning Vol.3, pp. 121-138, 1988.
- [52] **Mr. Riad Lakhdar Kherfene**, “Exploration de différentes techniques de l'intelligence artificielle pour la prédiction du contournement électrique des isolatrices hautes tensions dans leur environnement réel”, mémoire de magister, Département d'électrotechnique, Option: Haute tension et Environnement. Université des Sciences et de la Technologie D'Oran Mohamed Boudiaf, Soutenue le 4 octobre 2011.
- [53] **V.T. Kontargyri, A.A. Gialketsi, G.J. Tsekouras, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos** “Design of an Artificial Neural Network for the Estimation of the Flashover Voltage on Insulators”, National Technical University of Athens, pp. 1532-1540, December 2006.
- [54] **D.C. Chaurasia**, “Scintillation modelling for insulator strings under polluted conditions”, 1th Int. Symp. On High Voltage Engineering, London, Vol. 4, pp. 1-2. 1999.
- [55] **X. Chen**, “Modeling of Electrical Arc on Ice Surfaces”, Thèse de Doctorat, UQAC, Ecole Polytechnique de Montréal, Québec, Canada, Février 2000.
- [56] **I.F. Gonos, F.V. Topalis and I.A. Stathopoulos**, “A model for the determination of the dielectric strength of non-uniformly polluted insulators”, Int. Conf. on Power and Energy Systems: Las Vegas, USA, pp. 472-476, 8-10 Nov. 1999.
- [57] **F.V. Topalis, I.F. Gonos, I.A. Stathopoulos**, “Dielectric behaviour of polluted porcelain insulators”, IEE Proceedings Generation Transmission and Distribution Vol.148, pp. 269-274. July.2001.
- [58] **G. Zhicheng, and Z. Renyu**, “Calculation of dc and ac Flashover Voltage of Polluted Insulators”, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul., Vol. 25, pp. 723-729, 1990.
- [59] **S.A Bessedik, H.Hadi**, “Particle swarm optimization technique for the estimation of arc parameters for pollution flashover”, 9ème Conférence Nationale sur la Haute Tension, CNHT'2013, Univ. laghouat. Avril 2013.