



FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE



MEMOIRE DE MASTER

**Présenté par : BESSAS Wafa
RAYANE Halima**

**Domaine : Science et Technique
Filière : Génie Electrique
Option : Electrotechnique Industrielle**

Thème

Diagnostic du comportement diélectrique d'un transformateur de puissance à base de modèles mathématiques optimisés par la technique PSO

Jury de soutenance :

Nom et prénom	Grade	Qualité
<i>DJEKIDEL Rabah</i>	<i>PROFESSEUR</i>	<i>Président</i>
<i>MAHI Djillali</i>	<i>PROFESSEUR</i>	<i>Encadreur</i>
<i>BESSEDIK Sid Ahmed</i>	<i>PROFESSEUR</i>	<i>Examineur</i>
<i>SAYADI Ahmed</i>	<i>M.C.B</i>	<i>Co Encadreur</i>

Promotion: 2021/2022

Remerciements

Après avoir rendu grâce à Dieu le tout puissant et le miséricordieux nous tenons à remercier vivement tous ceux qui, de près ou de loin ont participé à accomplir ce modeste travail.

Nos sincères remerciements d'abord à notre encadreur : **«Prof D.MAHI»** qui a suivi l'évolution de notre mémoire, surtout, pour son aide précieuse, nous tenons à lui exprimer notre profonde gratitude et reconnaissance.

Nos remerciements s'adresse à : **«Prof A.SAYADI»** pour son aide et son soutien moral et ses encouragements.

Nos plus vifs remerciements sont adressés à Monsieur **«S. BESSEDIK»** d'avoir été examinateur du jury de soutenance.

Nous tenons à remercier également Monsieur **«R.Djekidel»** Professeur à l'université Amar Telidji de Laghouat, d'avoir été président du jury de soutenance.

Nous adressons nos vifs remerciements à notre famille et à tous nos amis, à tous ceux qui nous ont aidés par leurs encouragements chacun par son nom.

Résumé

De nos jours, l'Industrie observe une mutation de sa politique de maintenance en cherchant à concilier la rationalisation des coûts avec la fiabilité des installations. L'assistance technique, tel que le diagnostic des transformateurs de puissance est devenue nécessaire.

Le diagnostic d'état d'un transformateur se base sur deux approches : l'une basique, s'appuyant sur un ensemble de prise de mesure relevant de la maintenance courante ; l'autre experte, faisant appel à des méthodes qui consistent à évaluer les effets des modes de défaillance affectant les diélectriques.

L'objectif visé de ce travail est la modélisation prédictive par la régression multiple du degré de polymérisation (DPv). Cette modélisation utilise les trois paramètres : le temps de vieillissement, la température d'opération et la concentration du composé chimique 2-furfural. S'agissant de la modélisation et la prédiction de l'indice de traction (Tidx), la régression simple s'est avérée suffisante.

Pour ce faire, nous avons utilisé les données provenant des mesures effectuées sur du papier Kraft imprégné dans l'huile Luminol, servant d'isolant solide dans les transformateurs de puissance, sous l'influence de trois niveaux de température appliquée : (150°C, 170°C et 190°C).

La mise en œuvre d'un algorithme d'optimisation par essaim de particules ou PSO (Particle Swarm Optimization) a permis d'estimer les coefficients du modèle. L'approche préconisée et interprétée en termes d'erreur montre une bonne adéquation avec les relevés expérimentaux. Ce qui justifie l'efficacité de cette technique.

Nous estimons aussi que le suivi du vieillissement du papier par le modèle de régression incluant la méthode d'optimisation PSO permet d'obtenir un facteur de corrélation plus élevé. Il est performant et plus efficace que les RNA.

Mots-clés

Transformateur de puissance, Comportement diélectrique, Diagnostic, Modélisation, Intelligence artificielle, Régression, MATLAB, Optimisation par essaim de particules.

الملخص :

في الوقت الحاضر ، تلاحظ الصناعة تغييراً في سياسة الصيانة الخاصة بها من خلال السعي إلى التوفيق بين ترشيد التكاليف وموثوقية التركيبات. أصبحت المساعدة الفنية ، مثل تشخيص محولات الطاقة ضرورية.

يعتمد تشخيص حالة المحول على طريقتين: أحدهما أساسي ، ويعتمد على مجموعة من القياسات المتعلقة بالصيانة الروتينية ؛ و الآخر ، باستخدام الأساليب التي تتكون في تقييم آثار أنماط الفشل التي تؤثر على العوازل.

الهدف من هذا العمل هو النمذجة التنبؤية عن طريق الانحدار المتعدد لدرجة البلمرة (DPv). تستخدم هذه النمذجة ثلاث معلمات: وقت الشيخوخة ودرجة حرارة التشغيل وتركيز المركب الكيميائي 2-فورفورال. فيما يتعلق بالنمذجة والتنبؤ بمؤشر الجر (Tidx) ، فقد ثبت أن الانحدار البسيط كافٍ.

للقيام بذلك ، استخدمنا بيانات من القياسات التي تم إجراؤها على ورق كرافت مشرب بزيت Luminol ، المستخدم كعزل صلب في محولات الطاقة ، تحت تأثير ثلاثة مستويات من درجة الحرارة المطبقة: (150°C,170°C,190°C)

أتاح تنفيذ خوارزمية تحسين سرب الجسيمات أو (PSO تحسين سرب الجسيمات) تقدير معاملات النموذج. يُظهر النهج الموصى به والمفسر من حيث الخطأ تطابقاً جيداً مع القراءات التجريبية. هذا يبرر فعالية هذه التقنية.

نقدر أيضاً أن مراقبة تقادم الورق بواسطة نموذج الانحدار بما في ذلك طريقة تحسين PSO تجعل من الممكن الحصول على عامل ارتباط أعلى. إنه فعال وأكثر كفاءة من RNA.

الكلمات المفتاحية

محول الطاقة ، السلوك العازل ، التشخيص ، النمذجة ، الذكاء الاصطناعي ، الانحدار ، MATLAB ، تحسين سرب الجسيمات PSO.

Abstract

Nowadays, Industry observes a change in its maintenance policy by seeking to reconcile the rationalization of costs with the reliability of installations. Technical assistance, such as the diagnosis of power transformers has become necessary.

Diagnosing the condition of a transformer is based on two approaches: one basic, relying on a set of measurements relating to routine maintenance; the other expert, using methods that consist in evaluating the effects of failure modes affecting dielectrics.

The objective of this work is predictive modeling by multiple regression of the degree of polymerization (DPv). This modeling uses three parameters: the aging time, the operating temperature and the concentration of the chemical compound 2-furfural. Regarding the modeling and prediction of the traction index (Tidx), simple regression has proven to be sufficient.

To do this, we used data from measurements made on Kraft paper impregnated in Luminol oil, used as solid insulation in power transformers, under the influence of three levels of applied temperature: (150°C, 170°C and 190°C).

The implementation of a particle swarm optimization algorithm or PSO (Particle Swarm Optimization) made it possible to estimate the coefficients of the model. The approach recommended and interpreted in terms of error shows a good match with the experimental readings. This justifies the effectiveness of this technique.

We also believe that monitoring the aging of the paper by the regression model including the PSO optimization method makes it possible to obtain a higher correlation factor. It is efficient and more efficient than RNA.

Key words

Power Transformer, Dielectric Behavior, Diagnosis, Modeling, Artificial Intelligence, Regression, MATLAB, Particle Swarm Optimization.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE	01
-----------------------------	----

CHAPITRE I

Le Transformateur de puissance et le défi du diagnostic : Un état de l'art

I.1 Introduction	05
I.2. Le transformateur de puissance :	05
I.2.1. Définition.....	06
I.2.2. Classification.....	06
I. 3 Principe de fonctionnement.....	06
I. 4 Rôle et domaine d'application.....	07
I. 5 Constitution.....	07
I.5.1 Partie active	08
I. 5.1.1 Circuit magnétique :	08
I. 5.1.2 Enroulements :	08
I.5.2 Composants associés.....	09
I.5.2.1 Bornes de traversée	09
I. 5.2.2. Cuve :	09
I. 5.2.3. Changeurs de prise	10
I.5.2.4. Conservateur	10
I.5.2.5. Capteurs divers.....	10
I.5.3. Système de refroidissement	10
I.5.4. Système d'isolation	11
I.6 Différents types de transformateurs.....	11
I.6.1 Classification selon le type de construction.....	11
I.6.1.1 Transformateur à colonnes.....	11
I.6.1.2 Transformateur cuirassé.....	12
I.6.2 Classification selon le domaine d'application.....	13
I.6.3 Classification selon le type de refroidissement.....	13
I.6.3.1. Transformateur à l'huile.....	13
I.6.3.2. Transformateurs secs.....	14
I.6.3.3 Autotransformateurs	15
I.7. Protection des transformateurs de puissance	15
I.8. Couplage des transformateurs de puissance	16
I.9. Systèmes d'isolation des transformateurs de puissance	17
I.9.1. Isolation liquide	17
I.9.1.1 Fonctions principales des huiles isolantes.....	18
I.9.1.2 Types d'isolants liquides.....	18
I.9.1.3 Choix du type d'huile.....	20
I.9.1.4. Vieillessement des huiles.....	21
I.9.2. Isolation solide.....	21
I.9.2.1. Principaux types d'isolation solide.....	22
I.9.2.1.1 Propriétés du papier isolant.....	25
I.9.2.2. Vieillessement des isolants solides.....	26
I.9.3 Isolation mixte Huile – Papier.....	26
I.9.3.1 Différentes configurations du système d'isolation des transformateurs...	26
I.9.3.1.1 Isolation conventionnelle.....	27

I.9.3.1.2. Isolation haute température homogène.....	28
I.9.3.1.3. Isolation hybride.....	28
I.9.3.1.4. Isolation semi-hybride.....	28
I.9.3.1.5. Isolation mixte ou mélangée.....	28
I.9.3.2. Vieillessement du complexe huile/papier.....	28
I.10. Techniques de diagnostic et d'évaluation de l'état des transformateurs.....	28
I.10.1 Techniques traditionnelles.....	29
I.10.1.1 Qualité de l'huile	29
I.10.1.2 Analyse des gaz dissous (AGD).....	31
I.10.1.3 Analyse de l'état du papier cellulosique.....	32
I.10.1.3.1 Mesure directe sur le papier (degré de polymérisation).....	32
I.10.1.3.2 Analyse furanique.....	33
I.10.1.4 Essais électriques.....	33
I.10.1.5 Surveillance de la température et analyse du bruit	34
I.10.1.6 Techniques Modernes.....	34
Conclusion	36

CHAPITRE II

Généralités sur les régressions polynomiales et la technique d'optimisation PSO

Introduction.....	38
II.1 Les régressions polynomiales.....	38
II.1.1 Définition.....	38
II.1.2 Conception.....	39
II.1.3 Les avantages.....	39
II.1.4 Les inconvénients.....	39
II.2 L'optimisation par essaim de particules (PSO).....	39
II.2.1 Introduction.....	39
II.2.2 Notion de voisinage	40
II.2.3 Principe général Principe.....	41
II.2.4 Fonctionnement.....	42
II.2.5 Avantages et inconvénient de l'algorithme PSO :.....	45
II.2.5.1 Avantages.....	45
II.2.5.2 Les inconvénients.....	45
Conclusion.....	46

CHAPITRE III

Modélisation et analyse prédictive du comportement diélectrique d'un transformateur de puissance par un modèle de régression linéaire multiple intégrant l'algorithme d'optimisation PSO

Introduction.....	48
III.1 Base de données expérimentale utilisée.....	49
III.2 1ere phase : Modélisation du degré de polymérisation.....	52
III.2.1 Introduction	52
III.2.2 Modélisation du degré de polymérisation.....	52
III.2.3 Analyse et discussion.....	58
III.2.4 Diagnostic de degré de polymérisation.....	58
III.3 2eme phase : Modélisation et prédiction de l'indice de traction(Tidx).....	61
III.3.1 Introduction.....	61
III.3.2 Modélisation de l'indice de traction (Tidx) en fonction de degré de	61

polymérisation(DPv).....	
III.3.3 Analyse et discussion.....	64
III.3.4 Diagnostic de l'indice de Traction.....	64
III.3.5 Analyse et discussion.....	66
Conclusion	67

LISTE DE FIGURE

Figure I.1 : Principe de fonctionnement du transformateur.....	07
Figure I.2 : vue intérieure d'un transformateur, type colonne.....	07
Figure I.3 : Présentation des différents types de circuit magnétique.....	08
Figure I.4 : disposition classique des enroulements autour de noyau magnétique.....	08
Figure I.5 : Traversée en porcelaine.....	09
Figure I.6 : La cuve d'un transformateur de puissance.....	09
Figure I.7 : Transformateur à colonnes.....	12
Figure I.8 : Transformateur type cuirassé.....	13
Figure I.9 : Transformateur immergés dans l'huile.....	14
Figure I.10 : Transformateur de distribution sec.....	14
Figure I.11 : Différent types de couplage des transformateurs de puissance	17
Figure I.12 : différentes types d'isolation solide.....	22
Figure I.13 : Motif élémentaire d'une cellulose.....	23
Figure I.14 : Structure chimique élémentaire de l'aramide 24	24
Figure II.1: Voisinage Etoile Anneau Rayon	40
Figure II.2: principe de déplacement d'une particule.....	41
Figure II.3: Conception de modification d'un point de recherche par PSO.....	43
Figure II.4: Organigramme générale de PSO.....	44
Figure III.2.1 : Algorithme de la détermination des coefficients du modèle mathématique optimisé par la méthode PSO.....	54
Figure III.2.2 : Courbe de régression de DPv.....	55
Figure III.2.3 : Modélisation de DPv.....	57
Figure III.2.4 : Évolution du degré de polymérisation en fonction du temps de vieillissement.....	59
Figure III.3.1 : Courbe de régression.....	62
Figure III.3.2 : Prédiction de l'indice de traction.....	64
Figure III.3.3 : Variation de l'indice de traction au cours du vieillissement.....	65
Figure III.3.4 : Corrélacion entre l'indice de traction et le degré de polymérisation.....	66

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Choix du liquide isolant pour différents types de transformateurs.....	21
Tableau I.2 : Les marques de l'aramide de type méta-aramide.....	24
Tableau I. 3 État relatif de l'huile basé sur sa couleur.....	29
Tableau I. 4 Valeurs limites de la teneur en eau de l'huile.....	31
Tableau I. 5 Mesure directe sur papier cellulosique Technique Mode de défaillance...	33
Tableau III.1 : Les résultats expérimentaux à T = 150 °C.....	50
Tableau III.2 : Les résultats expérimentaux à T = 170 °C.....	50
Tableau III.3 : Les résultats expérimentaux à T = 190 °C.....	51
Tableau III.4 : regroupe les différents résultats obtenus.....	56
Tableau III.5 : Degré de polymérisation des deux approches.....	57
Tableau III.6 : Estimation de la durée de vie écoulée et restante du transformateur de puissance étudié.....	59
Tableau III.7 : Résultats de modélisation et prédiction de Tidx.....	63

Abréviations

CEI : Commission Électrotechnique International

HT : Haute tension

BT : Basse tension

ϵ_r : Permittivité

σ : Conductivité électrique

tang δ : Facteur de dissipation diélectrique

E : Rigidité diélectrique

TUK : Papier kraft thermiquement améliorés

DP : Degré de polymérisation

DGA : Analyse de gaz dissous(AGD)

ASTM : Société américaine pour les essais des matériaux (American society for testing material)

FDD : Facteur de dissipation diélectrique

FP : Facteur de puissance

TIF : Tension interfaciale

HPLC : High performance liquid chromatography

RNA : Réseaux de neurones artificiels

PSO : Particle Swarm Optimization

RLM : Régression linéaire multiple

OEP : Optimisation par essaim particulaire

DP_v : Degré de polymérisation viscosimétrique

2-FAL : 2-furfuraldéhyde

Tidx : Indice de traction

GA : Genetic algorithms (Algorithme génétique)

INTRODUCTION GENERALE

Les transformateurs jouent un grand rôle pour assurer la continuité de la distribution de l'énergie électrique. Ce sont les composants les plus critiques et les plus coûteux qui assurent le bon fonctionnement du réseau électrique. En termes d'investissement, ces équipements représentent près de 60 % du prix d'un poste de transformation.

Les transformateurs ont une durée de vie de 30 à 40 ans dans des conditions normales de fonctionnement [1]. Cependant, ce n'est pas toujours le cas dans la pratique, car les systèmes d'isolation sont soumis à une variété de contraintes dans les applications du monde réel.

D'autre part, les systèmes d'isolation se dégradent dans des conditions de fonctionnement typiques dans des applications réelles. Ils sont soumis à diverses contraintes notamment électriques, thermiques, environnementales et leurs interactions mutuelles entraînent l'apparition de nombreux phénomènes parasites qui provoquent la détérioration et le vieillissement progressifs des isolants.

La vie d'un transformateur dépend principalement de celle de son système d'isolation, lequel est constitué de l'huile et du papier. Le complexe huile/papier possède de fortes propriétés diélectriques et mécaniques. Ce qui le rend idéal pour une utilisation comme matériau isolant.

Le papier est utilisé pour isoler les enroulements et divers autres composants. Contrairement à l'huile, il ne peut être facilement remplacé. Sa durée de vie est donc directement liée à celle du transformateur et son état de santé est fonction de sa qualité, de celle l'huile, de la température de fonctionnement et la charge du transformateur, mais aussi des variations brusques auxquelles le transformateur est exposé. Durant son fonctionnement, le système d'isolation du transformateur subit des contraintes qui affectent sa qualité. La qualité du système d'isolation d'un transformateur est donc dépendante de son cycle de service et de la stratégie de maintenance mise en place par les gestionnaires.

Toute panne ou arrêt non planifié de ces composants peut endommager les réseaux électriques et entraîner des pertes financières importantes. Leur fiabilité est si critique qu'ils doivent être surveillés de près. Il est devenu nécessaire de pouvoir anticiper les défaillances par un diagnostic adéquat.

L'analyse du complexe huile/papier renseigne non seulement sur la qualité de ce dernier mais permet la détection de défaut au moyen d'un contrôle et comprendre et analyser les facteurs responsables de la durée de vie d'un transformateur.

Il existe actuellement un certain nombre de technologie et de méthodes pour surveiller et diagnostiquer les transformateurs de puissance. Ceux-ci peuvent être classés en deux catégories : des méthodes de diagnostic traditionnelles telles que l'Analyse de Gaz Dissous (AGD), le degré de polymérisation, les dérivés furaniques et les méthodes modernes par exemple les décharges partielles, la spectroscopie diélectrique...etc. [2]

L'objectif de ce mémoire de master s'articule autour de l'exploitation d'une base de données de transformateurs, qui a servi comme ressource dans ce travail, afin d'en construire une approche d'exploitation. La base de données expérimentale est constituée de propriétés mécaniques de différents types de papiers cellulosiques imprégnés dans des fluides isolants, lors de vieillissements thermiques accélérés.

La démarche suivie repose sur l'étude des corrélations entre la concentration en méthanol, le degré de polymérisation de la cellulose et les propriétés mécaniques des papiers. Certaines propriétés sont significativement liées à la dégradation. Elles sont utilisées comme paramètres de la modélisation et de prédiction.

Nous présentons une contribution d'amélioration de prédiction et de diagnostic par la combinaison d'une analyse par régression linéaire multiple (RLM) et l'algorithme d'optimisation par essais particuliers (OEP ou PSO en anglais). L'OEP fournit des résultats meilleurs que ceux donnés par la RLM. Mise en application, cette approche permet d'améliorer les résultats du modèle de prévision.

Ce manuscrit est divisé en trois chapitres :

- Le premier chapitre passe en revue de manière générale les éléments constituant les transformateurs de puissance, les différents systèmes d'isolations : liquide, solide, mixte ainsi que les techniques de diagnostic et de surveillance existantes dans la littérature.
- Le deuxième chapitre introduit des notions sur les régressions polynomiales et la technique d'optimisation par essais particuliers (OEP ou PSO en anglais).

- Au troisième chapitre, nous exposons la modélisation mathématique du problème décrivant les variables, les paramètres, les contraintes ainsi que la fonction objective puis nous nous focalisons sur la description de l'algorithme PSO proposé.

Il est divisé en deux phases :

- La première phase : Modélisation de degré de polymérisation en fonction de trois paramètres : les trois niveaux de température appliquée (150°C, 170°C, 190°C), le temps de vieillissement, la valeur de 2-FAL. L'objectif visé par la modélisation mathématique est l'élaboration d'un modèle mathématique multi variables. Ainsi que l'étude de la dépolymérisation et l'influence de la température.
- La deuxième phase : Modélisation et Prédiction de l'indice de traction en fonction du degré de polymérisation ainsi que le diagnostic de l'indice de traction.

Une comparaison entre les résultats obtenus par les réseaux de neurones et la technique d'optimisation par essais particuliers est présentée.

En conclusion nous présenterons un bilan final des résultats, les limites et les perspectives de notre travail à l'issue de ce mémoire.

CHAPITRE I

Le Transformateur de puissance et le défi du diagnostic : Un état de l'art

I.1 Introduction

Le transformateur joue un rôle important dans le transport et la distribution de l'énergie électrique, il permet à l'énergie électrique d'être transporté sur de longue distance, il permet ensuite sa distribution pour les industries et les habitations.

Ces équipements comportent le plus souvent des systèmes d'isolations, combinant au moins deux phases : solide/liquide ou solide/gaz qui jouent le rôle d'un diélectrique.

Ce premier chapitre introduit tout d'abord le contexte dans lequel s'inscrivent les transformateurs de puissance, leur principe de fonctionnement, leurs différents types et composants. On met l'accent sur le système d'isolation, car la durée de vie du transformateur dépend fortement de l'état de son isolation et la plupart des tests d'évaluation de l'état y sont effectués. On récence les différentes techniques utilisées pour diagnostiquer les défauts et évaluer l'état des transformateurs [1].

I.2. Le transformateur de puissance :

Le transformateur est un convertisseur statique à induction qui comporte deux ou plusieurs enroulements fixes, inductivement couplés et destiné à la conversion par l'intermédiaire de l'induction électromagnétique, des paramètres (tension, intensité de courant, fréquence, nombre de phase) de l'énergie électrique à courant alternatif.

Seuls les transformateurs de puissance permettent, très économiquement de minimiser les pertes en ligne, en assurant le transport de l'énergie à longue distance sous tension élevée (200kV et 400kV et plus entre phases) puis d'abaisser ensuite cette tension, étape par étape, pour alimenter les réseaux de distribution régionaux et locaux, jusqu'à la tension d'alimentations domestique [2].

Les normes CEI ne font pas de distinction entre les transformateurs de distribution et ceux de puissance. Ce sont tous des transformateurs de puissance dans le sens où leur but est de transmettre la puissance d'un niveau de tension à un autre [3].

I.2.1. Définition

Selon CEI «le transformateur de puissance est appareil statique à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, transforme un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et de courant de valeurs généralement différentes à la même fréquence dans le but de transmettre de la puissance électrique » [4].

I.2.2. Classification

On peut classer les transformateurs de puissance selon plusieurs aspects. Ces aspects sont indépendants les uns des autres [5] :

- La puissance [2] :
 - Transformateurs de distribution : jusqu'à 2,5 MVA en triphasé ou 0,833MVA en monophasé.
 - Transformateur de moyenne puissance : au-delà de 2,5 MVA et jusqu'à 100 MVA en triphasé et 33,3MVA en monophasé.
 - Transformateur de grande puissance : au-delà de 100 MVA en triphasé 33,3 MVA en monophasé.
- *Le nombre de phases* : monophasé ou triphasé
- *Le milieu réfrigérant et le mode de refroidissement* : air ou huile, naturel ou forcé
- *Le rapport de transformation* : élévateur ou abaisseur
- *La forme du circuit magnétique* : colonne ou galette (cuirassé)
- *Type de respiration* : hermétique ou respiration libre

I. 3 Principe de fonctionnement

L'enroulement primaire est soumis à une tension sinusoïdale. Il est donc traversé par un courant sinusoïdal et donne naissance à travers le circuit magnétique à un flux sinusoïdal.

Ce flux engendre alors une force électromotrice induite dans l'enroulement primaire et dans l'enroulement secondaire. Au niveau des bornes du secondaire, apparaît alors une tension sinusoïdale dont la fréquence est la même que celle de la tension appliquée au primaire et dont l'amplitude est différente [1].

$$\overrightarrow{\text{rot}} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad e = \oint_C \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{d\phi}{dt}$$

Les expressions des forces électromotrices

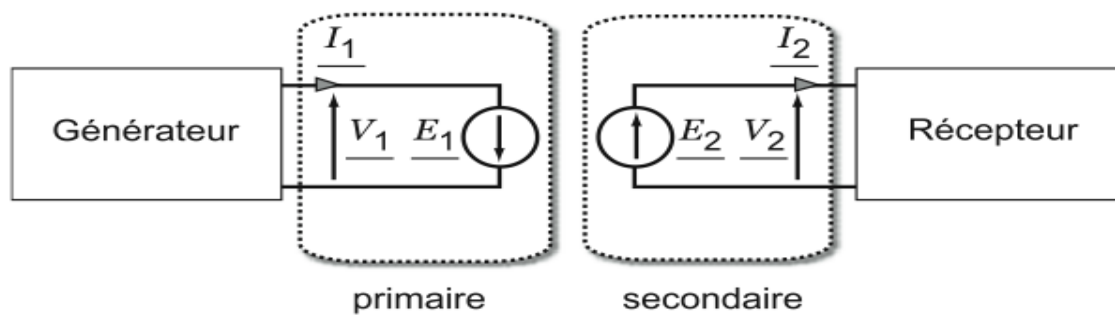


Figure I.1 : Principe de fonctionnement du transformateur

I. 4 Rôle et domaine d'application

Les transformateurs triphasés sont présents à différents endroits dans les réseaux électriques pour adapter les valeurs efficaces des tensions aux niveaux souhaitables. De façon simplifiée, l'énergie électrique est produite dans les centrales sous des tensions moyennes. Le transport à longue distance exige des hautes tensions afin de limiter les pertes par effet Joule et réduire le dimensionnement des conducteurs.

L'utilisation demande des tensions basses ou moyennes. Alors, des transformateurs élévateurs sont nécessaires au départ, et des transformateurs abaisseurs sont indispensables à l'arrivée côté consommateurs [3].

I. 5 Constitution

La figure I.2 suivant montre la constitution d'un transformateur de puissance triphasé

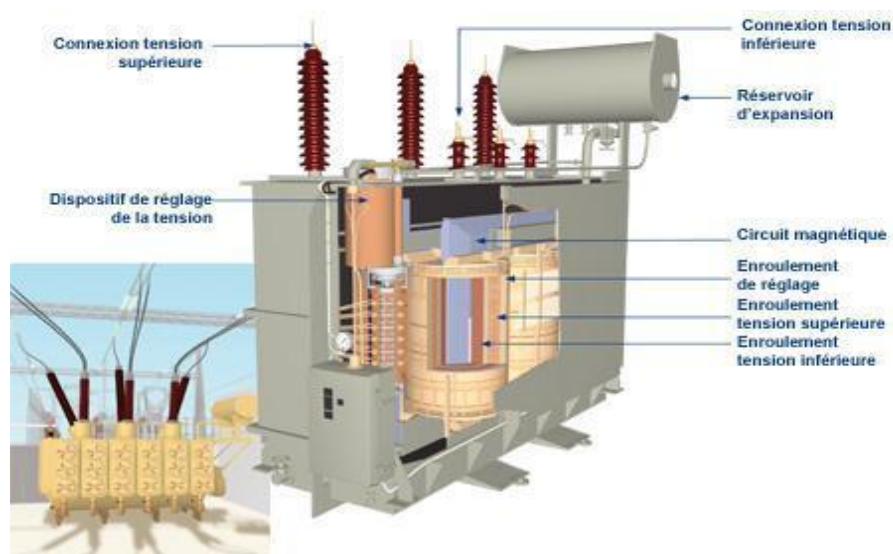


Figure I.2 : vue intérieure d'un transformateur, type colonne.

I.5.1 Partie active

La partie active est définie comme le circuit magnétique et les enroulements

I. 5.1.1 Circuit magnétique :

Le circuit est composé d'un noyau magnétique constitué de tôles d'acier au silicium à grains orientés qui joue le rôle de guider le flux magnétique entre le primaire et le secondaire

L'assemblage des tôles doivent être réalisés de manière à ce que le transformateur ait les meilleures performances possibles du point de vue électrodynamique, électrique et acoustique.

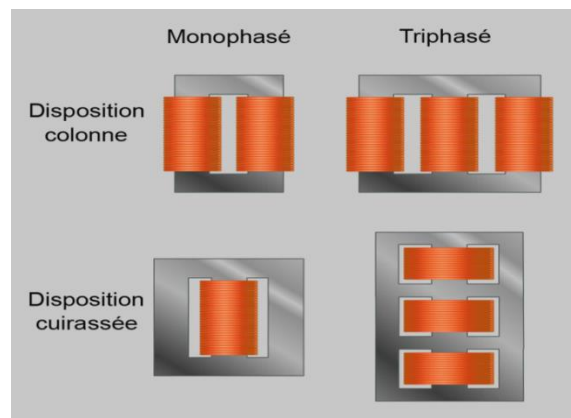


Figure I.3 : Présentation des différents types de circuit magnétique

I. 5.1.2 Enroulements :

Les enroulements (feuillard ou rond, ou méplat de cuivre ou d'aluminium) sont montés sur le noyau. Les formes de bobinages, Les sections et les nombres de spires sont conditionnes par les contraintes à maîtriser en termes électriques, thermique et mécanique. Chaque bobine est munie de canaux de refroidissement permettant d'assurer la circulation d'huile et les échanges thermiques.

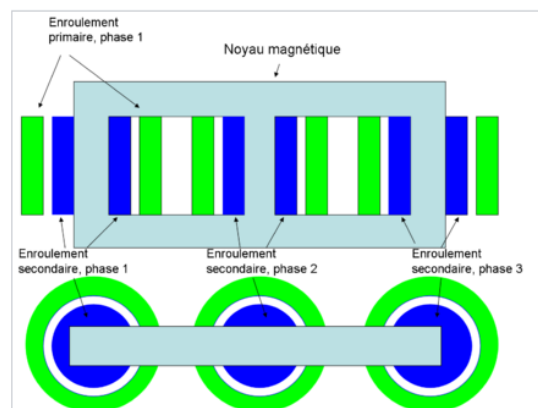


Figure I.4 : disposition classique des enroulements autour de noyau magnétique.

I.5.2 Composants associés

En plus de son noyau magnétique, de ses enroulements, un transformateur dispose de nombreux composants secondaires.

I.5.2.1 Bornes de traversée

Les bornes de traversées basses et hautes tensions qui peuvent être isolées respectivement par de la porcelaine et du papier imprégné d'huile ou de résine époxy.

Elles permettent le transit de la puissance. Certaines sont immergées, notamment pour les très hautes tensions, d'autres sont sèches.

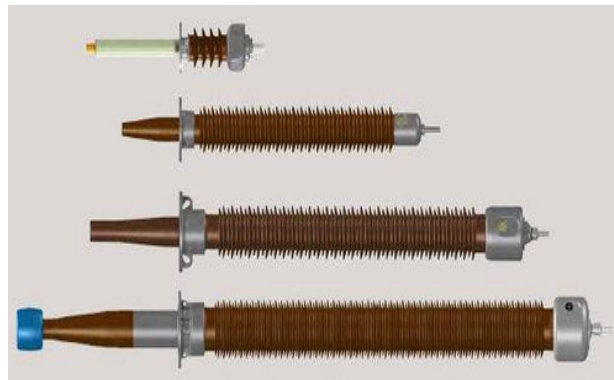


Figure I.5 : Traversée en porcelaine.

I. 5.2.2. Cuve :

La cuve constituée de tôles d'acier. Les parois de la cuve sont, selon les modèles, radiantes à ailettes ou rigides équipées de radiateurs amovibles connectés par une vanne d'arrêt. La structure et les soudures d'assemblage peuvent être renforcées dans le cas où une bonne tenue au vide est nécessaire.



Figure I.6 : La cuve d'un transformateur de puissance.

I. 5.2.3. Changeurs de prise

Le changeur de prise est un ensemble de quelques spires de l'enroulement haute tension. Elles permettent de modifier le rapport de transformation en charge et hors charge d'un transformateur de puissance sur une plage de réglage, on distingue deux types de changeur de prise en charge et hors charge (à vide).

I.5.2.4. Conservateur

Le conservateur d'huile (réservoir métallique (acier en général)) est situé sur le dessus du transformateur. Il joue un rôle de vase d'expansion pour l'huile. Les variations de température de l'huile impliquent des variations du volume. Le conservateur permet au niveau d'huile de varier sans affecter la pression dans le transformateur, ni découvrir (mettre à nu) les parties actives. Dans certains cas, une poche souple est présente dans le conservateur; elle permet d'éviter à l'huile d'entrer en contact avec l'air ambiant.

Certains transformateurs sont munis d'assécheur permettant de limiter la teneur en eau de l'air pénétrant dans le conservateur.

I.5.2.5. Capteurs divers

De très nombreux capteurs sont montés sur le transformateur de puissance pour collecter tout un ensemble de paramètres pouvant devenir critiques.

Des systèmes électroniques modernes peuvent ensuite centraliser les informations pour les interpréter, les transmettre à l'exploitant et au besoin déclencher alarmes et systèmes de protection.

I.5.3. Système de refroidissement

Un système de refroidissement est toujours mis en place pour maintenir les températures des enroulements et de l'isolant (huile par exemple) à des niveaux acceptables. Le choix du mode de refroidissement se fait en particulier en fonction des paramètres suivants :

- pertes à évacuer,
- température ambiante extérieure,
- contraintes de bruit,
- contraintes dimensionnelles limitant la taille du transformateur,
- et bien sûr le coût.

Un système de refroidissement est caractérisé par un code de quatre lettres:

- 1- La première lettre désigne le fluide de refroidissement interne : **O** pour l'huile minérale (99 % des cas), **K** pour les liquides isolant ayant un point de feu > 300°C, **L** pour les liquides à point de feu non mesurable.
- 2- La seconde lettre désigne le mode de circulation du fluide de refroidissement interne : **N** pour naturel, **F** pour forcer (présence d'une pompe, mais l'huile circule librement), **D** pour forcée et dirigé (pompe et l'huile est forcée et dirigée à travers les enroulements).
- 3- La troisième lettre indique le fluide de refroidissement externe : **A** pour air, **W** pour eau.
- 4- Enfin la quatrième lettre désigne le mode de circulation du fluide de refroidissement externe : **N** pour naturel, **F** pour forcée (ventilateurs).

I.5.4. Système d'isolation

A pour but de l'isolation diélectrique des enroulements ainsi que le refroidissement du transformateur, peut-être :

- **Liquide** : En fonction des fluides diélectriques (huiles minérales, synthétiques ou organiques).
- **Solide** : Papiers à base de cellulose, coton, rubans, vernis, résines époxydes, carton, bois, etc.
- **Complexe** : Combine les deux types précédents : liquide et solide.

I.6 Différents types de transformateurs

Il existe différents types de transformateur, Pour différencier entre eux, on distingue plusieurs types de classifications à savoir :

I.6.1 Classification selon le type de construction

Du point de vue construction deux principales technologies sont distinguées, à savoir les transformateurs à colonnes et les transformateurs cuirassés [4]

I.6.1.1 Transformateur à colonnes

Le transformateur à colonnes est constitué de deux enroulements concentriques par phase. Ces enroulements sont montés sur un noyau ferromagnétique qui se referme à ses

extrémités via des culasses généralement de sections circulaires afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique. Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique [4].

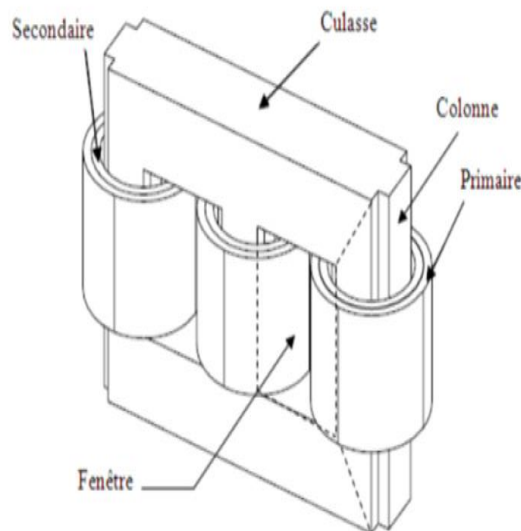


Figure I.7 : Transformateur à colonnes.

I.6.1.2 Transformateur cuirassé

Dans cette technologie, le circuit magnétique entoure les enroulements formés de bobines rectangulaires à axe horizontal, de section rectangulaire est constitué de tôles posées à plat. La cuve assure le calage du circuit magnétique et d'enroulements comme le montre la (figure I.7) Ces transformateurs sont utilisés au sein des réseaux de transport et de répartitions où les surtensions transitoires sont fréquentes. Dans cet environnement, ils doivent se prémunir des effets néfastes de ces surtensions sur les enroulements. Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobinages [4].

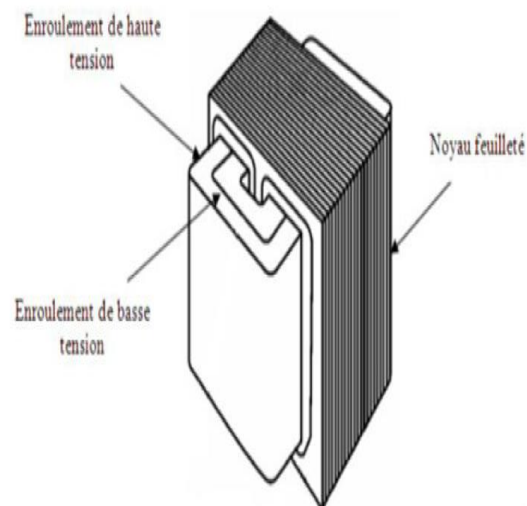


Figure I.8 : Transformateur type cuirassé.

I.6.2 Classification selon le domaine d'application

Du point de vue de leurs applications, les transformateurs ordinaires de phase (monophasé, biphasé, et triphasé), groupés dans trois ou cinq colonnes se classent en trois catégories :

- Les transformateurs pour les grands réseaux de transport et les grandes centrales, leur puissance varie de 100 à 500 MVA;
- Les transformateurs pour réseaux de répartition qui alimentent les lignes à moyenne tension, leur puissance varie de 5 à 40 MVA;
- Les transformateurs de distribution destinés à l'alimentation des utilisateurs de l'énergie électrique en basse tension (380 ou 220V), leur puissance varie de 5 à 1600 KVA [4].

I.6.3 Classification selon le type de refroidissement

Selon le type de refroidissement, on distingue : les transformateurs à l'huile et les transformateurs secs [5].

I.6.3.1. Transformateur à l'huile

Les transformateurs immergés dans l'huile liquide à base minérale, pour prévenir l'action néfaste de l'air sur l'isolation des bobines et améliorer le refroidissement du transformateur, on place le noyau magnétique avec les enroulements dans une cuve remplie d'huile minérale. Sont les plus répandus pour les fortes puissances.



Figure I.9 : Transformateur immergés dans l'huile

I.6.3.2. Transformateurs secs

Transformateurs avec technologie sèche, avec des enroulements enrobés (imprégnés). Le système d'isolation électrique est remplacé par une résine (époxyde) et l'air. Des résines ont été développées pour résister aux tensions électriques et aux contraintes mécaniques, thermiques qui apparaissent dans un transformateur en service. L'aspect favorable est son comportement non inflammable et léger. Ce genre de transformateur est le plus approprié pour la distribution de l'électricité en degré élevé de sûreté [5].



Figure I.10 : Transformateur de distribution sec

I.6.3.3 Autotransformateurs

L'autotransformateur qui a une conception spécifique :

Dans ce type de transformateur de puissance particulier, il n'y a pas d'isolation électrique entre le primaire et le secondaire car le secondaire est une partie de l'enroulement primaire. Cela

économise un enroulement. Le courant alimentant le transformateur parcourt le primaire en totalité et une dérivation à un point donné de celui-ci détermine la sortie du secondaire. La conséquence est qu'une partie du bobinage est traversée par le seul courant du primaire alors que l'autre partie est traversée par le courant du primaire moins celui du secondaire. La section du bobinage peut donc être réduite sur ce secondaire.

- ✓ Les autotransformateurs sont surtout utilisés pour interconnecter des réseaux de très haute tension
- ✓ Les autotransformateurs sont quasiment toujours couplés en étoile et reçoivent une isolation non-uniforme.

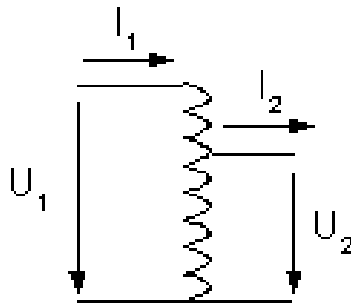


Schéma I.1 : Symbole d'un autotransformateur.

I.7. Protection des transformateurs de puissance

Le système de protection des transformateurs de puissance est nécessaire pour le déclenchement de transformateur lors d'un défaut détecté. Les défauts dans un transformateur sont en quatre types : les surcharges, les courts-circuits, les défauts à la masse et les sur fluxages [6].

- ✓ **La protection contre les surcharges** : les techniques les plus utilisées sont : la protection à maximum de courant de phase temporisée ou la protection à image thermique.
- ✓ **La protection contre les défauts de court-circuit** : la protection différentielle est importante ; elle s'effectue par l'intermédiaire d'un transformateur de courant. La différence entre les courants entrants dans le transformateur et ceux sortants donne un ordre de déclenchement au relais associées. Les relais de Bouchholz

sont utilisés dans le cas de transformateurs respirant. Et les détecteurs de gaz et de pression sont utilisés dans le cas des transformateurs hermétiques.

- ✓ **La protection contre les défauts à la masse :** diverses techniques sont apparues. Parmi lesquelles on trouve : la technique de mesure du courant homopolaire et la technique dite protection terre restreinte. Cette dernière compare le courant dans la connexion au neutre et la somme des courants dans les phases.
- ✓ **La protection contre les sur fluxages :** la mesure de la cinquième harmonique du courant est utilisée. Le flux magnétique est proportionnel au rapport tension sur fréquence, si le phénomène devient trop fort, la déconnexion du transformateur est nécessaire.

I.8. Couplage des transformateurs de puissance

Les transformateurs triphasés disposent au minimum de trois enroulements au primaire et trois au secondaire. Il est nécessaire de les coupler entre eux pour les connecter ou obtenir des réseaux triphasés.

La désignation des couplages des transformateurs de puissance s'effectue en deux lettres : la première lettre majuscule désigne le couplage côté HT et la deuxième lettre minuscule désigne le couplage côté BT

Le nombre suit les lettres indique l'indice horaire, c'est-à-dire l'angle de déphasage des tensions primaires et secondaires homologues. Ce nombre varie de 0 à 11 et exprime le nombre d'angle de 30° qui forment ces deux tensions. À titre d'exemple, un couplage Dy 11 signifie que la haute tension est en triangle (D), la basse tension est en étoile (y) et les tensions simples VA, Va forment un angle de $11 \cdot 30^\circ = 330^\circ$ [7].

Eventuellement, la lettre « n » située avant le nombre indique que le neutre est sorti.

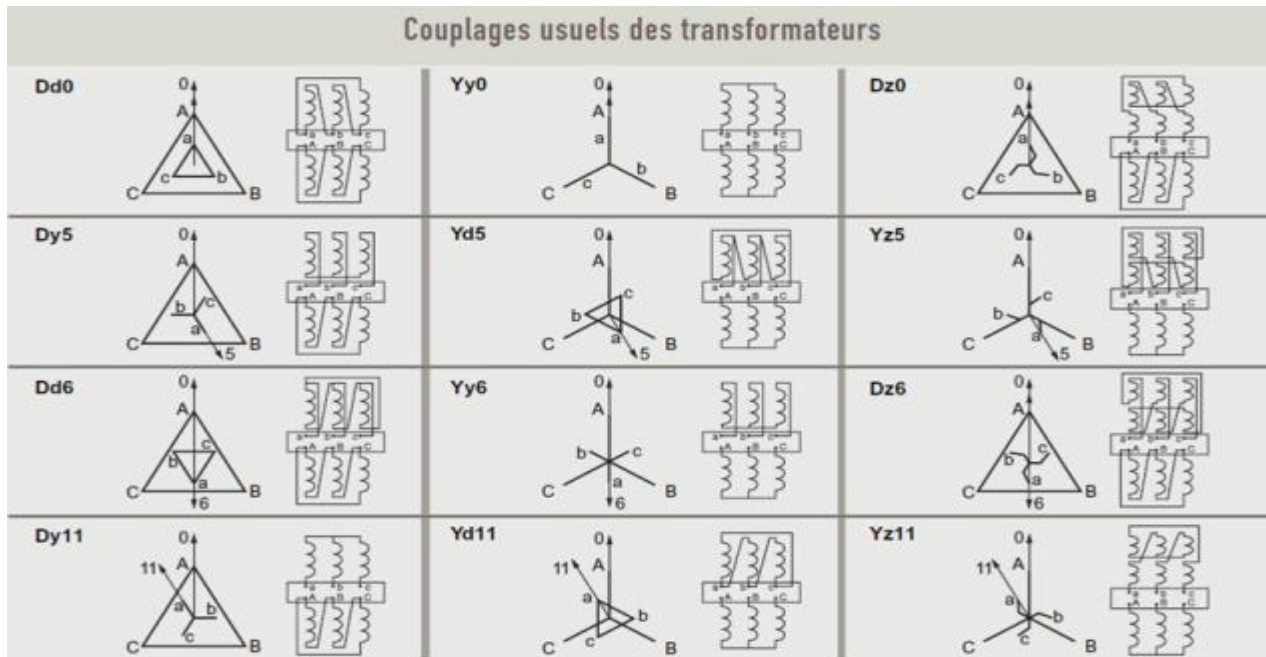


Figure I.11 : Différent types de couplage des transformateurs de puissance [7].

I.9. Systèmes d'isolation des transformateurs de puissance

Dans la partie active d'un transformateur, l'isolation entre les éléments portés à des potentiels électriques différents est assurée:

- ✓ Soit par un diélectrique liquide, exemple des pièces métalliques telles les pièces de connexions.
- ✓ Soit par un isolant solide, généralement du papier imprégné, c'est le cas de spires voisines des enroulements primaire et secondaires ou les plaques de papier imprégnées séparant deux enroulement de tensions différentes.

I.9.1. Isolation liquide

Les isolants liquides sont utilisés en électrotechnique comme imprégnant d'isolations celluloses ou comme produit de remplissage de matériels électriques très divers. Leur rôle principal est d'éliminer l'air et les autres gaz de façon à améliorer la tenue diélectrique de l'isolation.

I.9.1.1 Fonctions principales des huiles isolantes

Les fonctions des huiles isolantes sont essentielles pour prolonger et maintenir le bon fonctionnement des composantes du transformateur au cours de sa vie utile. Elles sont :

- Le fluide isolant joue une fonction importante comme caloporteur, afin d'éliminer l'excès de chaleur produite à l'intérieur du noyau et des enroulements en l'évacuant en dehors du transformateur.
- La deuxième fonction principale est d'isoler les enroulements.

I.9.1.2 Types d'isolants liquides

Il existe trois types de liquides isolants : les huiles végétales (produits naturels), les huiles minérales (à base de produits pétroliers raffinés), les liquides de synthèse (les huiles silicones). Ce classement est lié à leur ordre chronologique d'apparition dans les applications électrotechniques [6].

A- Les huiles minérale

L'huile minérale est le principal fluide diélectrique pour les transformateurs de puissance et la plus utilisée [8], à cause de son faible coût, et de ses bonnes propriétés diélectriques.

Les huiles minérales sont utilisées dans pratiquement tous les types de matériel électrique. La consommation annuelle dans le monde est estimée à 1 million de tonnes. Environ 90% sont utilisées dans les transformateurs, les huiles sont également employées dans les diviseurs capacitifs, les traversées, les changeurs de prise, les répartiteurs, les disjoncteurs et les câbles [9].

Les paramètres suivants ont pour but de déterminer la tenue diélectrique de l'huile et son état, ils sont :

- 1- **La permittivité ou la constante diélectrique (ϵ_r):** Les huiles minérales isolants sont constitués en majeure partie par des hydrocarbures saturés dont les molécules ne sont pas polaires. la permittivité d'une huile minérale pure est donc surtout due aux phénomènes de polarisation électronique et atomique.

La permittivité relative des huiles minérales ϵ_r est 2,2 à 25 °C. Elle décroît légèrement avec la température et la fréquence du courant.

- 2- **La conductivité électrique (σ):** Un liquide, peut être isolant électrique, doit conduire le moins possible l'électricité lorsqu'une tension lui est appliquée. sa conductivité doit donc être la plus faible possible. la conductivité d'un liquide isolant est due a la présence de charges libres positives et négatives (des ions) en quantité égales. sous l'effet d'un champ électrique. ces ions se déplacent provoquant ainsi un courant de conduction
- 3- **Le facteur de dissipation diélectrique ($\tan \delta$) :** Le facteur de dissipation diélectrique d'un matériau isolant est la tangente de l'angle de perte qui est l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée et le courant qui en résulte. . Une huile minérale neuve possède une valeur de $\tan \delta$ à 90 °C de l'ordre de 10^{-3} alors qu'une huile altérée peut avoir une valeur de $\tan \delta$ à 90 °C supérieure à 0.5.
- 4- **La rigidité diélectrique (E) :** La rigidité diélectrique (Kv/cm) d'une huile est la valeur maximale du champ électrique moyen que l'on peut lui appliquer sans décharge disruptive.

Dans l'industrie, elle est maximisée conventionnellement par la tension efficace nécessaire pour provoquer, dans des conditions normalisées, le claquage d'un volume de liquide compris entre deux électrodes dont la forme, la distance et la nature font l'objet d'une norme (la CEI 156). Ce paramètre est connu sous le nom de tension de claquage.

B- Huile ester synthétique

Les esters synthétiques, aussi appelés esters de pentaérythritol ou esters organiques, sont des alternatives aux huiles minérales qui peuvent passer les tests de biodégradabilité immédiate. Les esters de pentaérythritol sont les esters synthétiques les plus communément utilisés dans les transformateurs. Ils peuvent absorber beaucoup plus d'eau que les huiles minérales, sans que cela ait d'effet important sur leur rigidité diélectrique. Cette capacité à absorber l'eau peut permettre de préserver les papiers isolants des transformateurs et de ralentir leur vieillissement.

Les esters synthétiques ont une bonne rigidité diélectrique et un point de feu deux fois plus élevé que celui des huiles minérales. Ils sont également plus chers que les huiles minérales et n'ont été introduits qu'au début des années.

C- Les huiles silicones

Une huile de silicone est constituée de siloxane polymérisé associé à des chaînes organiques. Les composants sont donc de la forme (...Si-O-Si-O-Si...), alors que pour l'huile minérale c'est (...C-C-C-C...). Un exemple typique est le polydiméthylsiloxane (PDMS) de formule $(\text{CH}_3)_3\text{Si}-(\text{C}_2\text{H}_6\text{OSi})_n-\text{Si}(\text{CH}_3)_3$. On peut faire un parallèle avec les alcanes pour les hydrocarbures.

Les huiles de silicone ont une très bonne stabilité chimique, ce qui veut dire une bonne résistance au vieillissement. De plus, les huiles de silicone ont un point de flamme presque deux fois plus élevé que les huiles minérales, de l'ordre de 300 °C au lieu de 150 °C, ce qui réduit le risque d'explosion des transformateurs de puissances. Leur viscosité est également faible à basse température. Au niveau des désavantages, il semblerait que les huiles de silicones n'assurent pas le même niveau d'isolation diélectrique que les huiles minérales pour de grands volumes. La viscosité à haute température est supérieure à celle des autres huiles. Le coût des huiles de silicone est également nettement supérieur à celui de l'huile minérale (d'un facteur environ 8). Le manque de retour d'expérience joue également en leurs défaveurs. Une huile de silicone se dilate également plus sous l'effet de la température que l'huile minérale. Elles sont certes inertes, mais difficilement biodégradables [6].

I.9.1.3 Choix du type d'huile

Le choix d'un liquide pour une application donne se fait pour assurer la fiabilité de fonctionnement des appareils ainsi que la sécurité des opérateurs. C'est toujours un compromis entre les performances technique de liquide et son cout. Avant de choisir un liquide diélectrique, il faut prendre en considération certain facteur à savoir : [10]

- La toxicité du produit : est à prendre en compte dans tous les cas d'éclatement de transformateur sans incendie.
- Le vieillissement : le liquide a-t-il tendance à vieillir et s'altérer très vite en fonction du temps ?
- L'embrassement du diélectrique qui dépend de son point d'ébullition et de la résistance mécanique de transformateur.

Le tableau I.1 illustre les différents types d'huiles pour divers types de transformateurs [11].

Propriétés	Huile minérale	Huile silicone	Ester synthétiques	Huile végétales
Transformateur de puissance	A	X	B	B
Transformateur de traction	A	A	A	X
Transformateur de distribution	A	A	A	A
Transformateur d'instrument	A	X	X	X
A=Largement utilisé; B=utilisé moins fréquemment; X=Couramment non utilisé				

Tableau I.1 : Choix du liquide isolant pour différents types de transformateurs. [11]

I.9.1.4. Vieillessement des huiles

Les isolants liquides, dans les conditions de leur utilisation, sont soumis à différentes contraintes (thermique, électrique, chimique) qui vont modifier leurs propriétés en fonction du temps. Les mécanismes de vieillissement ainsi mis en jeu sont non seulement complexes mais, le plus souvent difficiles à prédire par le manque d'informations sur la composition chimique précise des liquides utilisés.

Dans l'huile minérale, il a été montré que le vieillissement constaté dans les transformateurs et autres appareils est essentiellement produit par un mécanisme d'oxydation accéléré par la présence de métaux (cuivre, fer).

I.9.2. Isolation solide

Les matériaux isolants solides appliqués tels que le papier, le papier compressé, le cylindre isolant et le carton sont faits à partir des matériaux celluloseux qui constituent le meilleur compromis technico-économique de l'isolation du système imprégné dans les transformateurs de puissance.

Elle est constituée de papiers et de cartons. Le papier sert à l'isolation des enroulements et le carton sert à l'isolation entre les enroulements, et entre les enroulements et le noyau. Papiers et

cartons sont imprégnés par le diélectrique liquide (huile) afin d'augmenter leur rigidité diélectrique et réduire le risque de décharges partielles.

Les papiers de type cellulosique végétal tel que le papier Kraft, papier Manille ou coton, qui sont faits à partir de fibres de cellulose [8]. Toutefois, le chanvre de Manille et le coton ont été moins utilisés pour des applications dans des transformateurs de puissance, en raison de la diminution rapide de leurs propriétés mécaniques au cours du vieillissement [9].

Le papier Kraft se compose des groupes complexes de fibres cellulosiques végétales du bois lié par des liaisons hydrogène. Cependant, le bois ne se compose pas uniquement de cellulose. 60 à 80 % du bois est constitué de polysaccharides comme la cellulose et l'hémicellulose. Un autre 20 à 30 % est composé de lignine. Le 5 % restant est composé de : résines, acides gras, gommages, cires, protéines, etc.

Les papiers Kraft thermiquement améliorés (TUK), sont aussi fabriqués à base de cellulose. Cependant, ce type de papier contient des additifs stabilisant à base d'azote pour améliorer la stabilité chimique permettant d'améliorer la performance thermique du papier.

I.9.2.1. Principaux types d'isolation solide

On distingue trois types d'isolation solide :

- Isolation solide conventionnelle : papiers et cartons sont à base de fibres de cellulose.
- Isolation solide haute température : papiers et cartons sont à base de polymères synthétiques (aramide).
- Isolation solide hybride : association des papiers cellulose et aramide [12].



Papier Press-board

Papier Kraft

Papier Diamant

Aramid (Nomex)

Figure I.12 : différents types d'isolation solide.

A. Isolation solide conventionnelle

Le papier et le carton sont constitués de fibres de celluloses (chaînes de glucose extraites de la pulpe de bois ou de fibres de coton). Les celluloses sont formées de longues chaînes comprenant environ 1200 anneaux de glucose reliés par des ponts d'oxygène. La figure I.11 présente le motif élémentaire d'une cellulose :

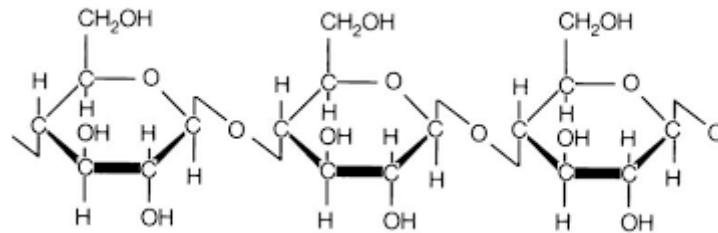


Figure I.13 : Motif élémentaire d'une cellulose.

Le papier est constitué de 90% de cellulose, de 6 à 7 % de lignine, de 3 à 4 % d'hémicellulose (pentasone) et des traces de cations métalliques [13]. La cellulose est un polysaccharide linéaire de la série des (3-D-glucanes. Elle se présente sous forme de longues chaînes (100nm environ) obtenues par enchaînement linéaire de motifs anhydroglucose unis par des liaisons glycosidiques (β -1-4. La cellulose peut être caractérisée par son degré de polymérisation moyen qui est le nombre moyen de motifs de glucose par chaîne de cellulose. Les hémicelluloses sont des hétéropolysaccharides contenant des monosaccharides de types variés (avec 6 ou 5 atomes de carbone). Ils sont partiellement liés aux molécules de cellulose et de lignine par liaison hydrogène. Les lignines sont des polymères tridimensionnels irréguliers constitués de motifs de phenylpropane. Ils jouent un rôle de ciment. La lignine résiduelle dans la pâte après traitement est difficile à éliminer (inaccessibilité physique, liaisons lignines-hydrate de carbonés) sans provoquer des coupures dans les chaînes de cellulose et par conséquent une dépolymérisation importante de la cellulose.

La constante diélectrique du papier est deux fois plus élevée que celle de 38 l'huile. Le papier et le carton seront donc utilisés dans les zones où règne un fort champ électrique pour renforcer l'isolation dans l'huile.

B. Isolation solide haute température

Le papier et le carton sont à base de polymères synthétiques (aramide). Les polyamides aromatiques, ou aramides, sont une classe de matériaux résistant à la chaleur et présentant de bonnes propriétés mécaniques. Le mot-valise «aramide» vient de la contraction de l'anglais «aromatic polyamide», il est le qualificatif donné aux fibres synthétiques dont le polymère de base est constitué d'une longue chaîne polymère dans laquelle au moins 85 % des groupements amides (— NH — CO —) sont directement liés à deux noyaux benzéniques (aromatiques) [11]. Les premières utilisations de l'aramide datent des années 1960 [14]. La figure I.12 présente la structure chimique de l'aramide.

On distingue deux types de polyamides: les para-aramides et les méta-aramides, seuls les types méta-aramides trouvent leurs applications dans le domaine de l'isolation électrique.

Plusieurs fabricants ont produit leurs modèles, Le tableau I.2 indique trois marques de l'aramide de type méta-aramide

Fabricants	Pays	Marque
Du pont de nemrous	USA	Nomex
Teijin	Bays- bas et Japon	Technora et Conex
Yantai	Chine	New star
	/	/

Tableau I.2 : Les marques de l'aramide de type méta-aramide. [15]

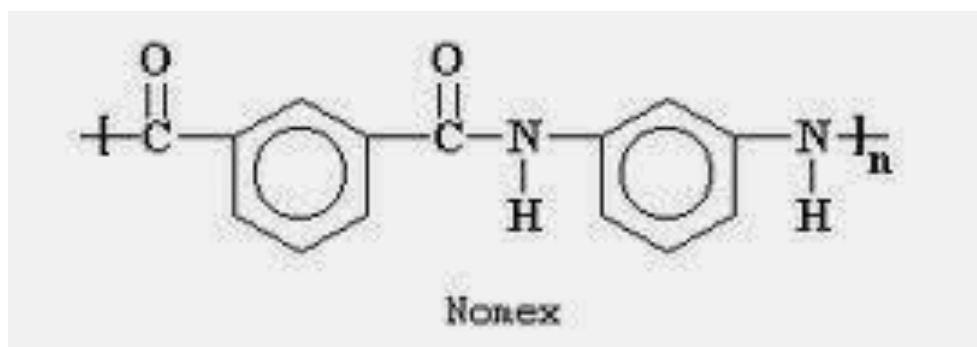


Figure I.14 : Structure chimique élémentaire de l'aramide 24 [16].

Le méta-aramide le plus utilisé est le Nomex de Dupont de Nemours développé en 1961, il a une grande isolation électrique, même en haute température. Le Nomex ne se dégrade pas même à des températures au-dessus de 370°C.

Les principales propriétés du Nomex sont [13]: la résistance à la chaleur et au feu; la haute résistance à l'ultraviolet ; la haute résistance chimique ; la faible conductivité électrique ; faible contraction (rétrécissement) thermique.

C. Isolation solide hybride

Elle combine les caractéristiques diélectriques des papiers celluloseux et aramides.

I.9.2.1.1 Propriétés du papier isolant

A. Propriété diélectriques

Les propriétés diélectriques du papier imprégné dépendent de l'imprégnant, mais aussi, dans une certaine mesure, de la qualité du papier et de sa masse volumique. Dans ses diverses applications, les propriétés du papier que l'on doit prendre en considération sont sa permittivité relative, son facteur de dissipation diélectrique et sa rigidité diélectrique. Ces propriétés sont fonction d'un certain nombre de paramètres parmi lesquels il y a la température

- a. **La permittivité relative** : La permittivité relative ou constante diélectrique ϵ_r d'un isolant est le rapport de la capacité C_x d'un condensateur dans lequel l'espace entre les électrodes et autour d'elles est entièrement et exclusivement rempli de l'isolant en question, à la capacité C_0 de la même disposition d'électrodes dans le vide
- b. **La rigidité diélectrique** : La rigidité diélectrique d'un milieu isolant représente la valeur maximale du champ (V/m) que le milieu peut supporter avant le déclenchement d'un arc électrique (donc d'un court-circuit). Pour un condensateur utilisé en électronique, si la valeur est dépassée, cela conduit à la destruction de l'élément. Cette valeur maximale de la tension appliquée aux bornes est appelée tension de claquage U_c du condensateur.
- c. **Le facteur de dissipation diélectrique ($\tan \delta$)** : la norme CEI 60247 montre en détails la mesure du facteur de dissipation diélectrique. Il existe un modèle de représentation de l'isolant sous forme d'un circuit équivalent composé d'une résistance R_p et d'une capacité C_p montées en parallèle. Le courant circulé dans le circuit n'est pas en quadratique avec la tension appliquée. L'écart se mesure à l'aide de l'angle de perte δ , caractérisé par le

facteur de dissipation diélectrique ($\tan \delta$). Après une simple démonstration, on obtient : [17]

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega C p R p}$$

B. Propriétés mécaniques et physiques

Les Propriétés mécaniques des cartons de transformateurs sont déterminées par le choix de la matière première, les traitements pendant la fabrication, et la préparation des plaques.

C. Propriétés chimiques

- a. **Dissolution de la cellulose** : La cellulose possède un caractère polaire de par la présence de ses nombreux groupements hydroxyle. Elle n'a d'affinité qu'avec les liquides polaires mais la dissolution ne peut avoir lieu que si les zones cristallines de la cellulose sont pénétrées.
- b. **Degré de polymérisation** : Le degré de polymérisation (DP) indique le nombre moyen d'unités d'anhydroglucose constituant la molécule. Le degré de polymérisation de la cellulose varie suivant l'origine des fibres et les procédés d'isolation. Il est de l'ordre de 3000 dans les pâtes cellulosiques de linters de coton, et d'environ 1500 pour les pâtes de bois obtenues avec le minimum de dégradation (pâte kraft).
- c. **Réactivité de la cellulose** : Les groupements réactifs de la cellulose sont les trois groupements alcool des unités anhydroglucoses. Les fonctions -OH sont plus accessibles dans les zones amorphes. Les zones cristallines sont difficilement accessibles : elles réagissent peu ou pas du tout en milieu aqueux non alcalin [18].

I.9.2.2. Vieillessement des isolants solides

Les propriétés diélectriques et mécaniques sont les principales propriétés que le papier doit préserver pendant la durée de vie des transformateurs de puissance. Cependant, le papier imprégné d'un fluide isolant vieillit et perd graduellement certaines de ses propriétés. Les propriétés diélectriques du papier restent presque intactes au cours du vieillissement de la cellulose et ne favorisent pas la défaillance du transformateur, la durée de vie des transformateurs est souvent associée à la dégradation des propriétés mécaniques du papier.

- a. **La pyrolyse ou la thermolyse** : c'est la dégradation thermique de la cellulose, elle provoque la coupure des liaisons glucosidiques et l'ouverture des anneaux de glucose.

Les produits majoritaires formés sont des molécules de sucre libres, du CO, du CO₂, du H₂O et de l'hydrogène. La pyrolyse n'affecte sensiblement les qualités mécaniques du papier qu'au-dessus de 150 °C.

- b. L'oxydation** : elle consiste en l'attaque des anneaux de glucose par l'oxygène. Elle provoque une dépolymérisation. Les produits formés sont des carbonyles, des aldéhydes et des acides, mais aussi des gaz tels que CO, CO₂, H₂ et de l'h₂O.
- c. L'hydrolyse** : C'est la réaction de l'eau avec les ponts d'oxygène et qui provoque la rupture de chaînes sans formation de produits libres. L'eau formée par pyrolyse et par oxydation contribue à augmenter l'hydrolyse.

I.9.3 Isolation mixte Huile – Papier

Un système d'isolation utilisé dans les dispositifs électrotechniques contient un ou plusieurs matériaux solides pour isoler les parties conductrices et un matériau liquide pour à la fois l'isolation et le transfert de chaleur et le refroidissement. Ces matériaux isolants doivent résister aux contraintes électriques, mécaniques, chimiques et thermiques pour la durée de vie prévue du dispositif [20]

L'isolation des parties actives des transformateurs de puissance est réalisée à l'aide de papier, de carton et d'huile (minérale ou synthétique). Le papier sert à l'isolation des enroulements et le carton sert d'isolation entre les enroulements, et entre ces derniers et le noyau.

L'huile assure avec le papier un complexe isolant très efficace. Ce qui constitue une clé maîtresse dans l'isolation électrique dans un transformateur de puissance. Les caractéristiques électriques des complexes sont obtenues grâce à l'huile. La tenue mécanique du groupe est assurée par le papier.

I.9.3.1 Différentes configurations du système d'isolation des transformateurs

Nous présentons cinq configurations du système d'isolation des transformateurs de puissance. Chaque configuration comporte une partie solide et une partie liquide; la partie solide est soit conventionnelle et/ou à haute température et la partie liquide est soit conventionnelle ou à haute température.

I.9.3.1.1 Isolation conventionnelle

La partie solide est exclusivement de type conventionnel et la partie liquide est soit conventionnelle, soit à haute température.

I.9.3.1.2. Isolation haute température homogène

Les parties solide et liquide sont de type haute température. Mais l'isolation solide conventionnelle peut être utilisée à certains endroits où la température moyenne est maintenue en dessous de la température moyenne maximale conventionnelle du point le plus chaud des enroulements.

I.9.3.1.3. Isolation hybride

Pour l'isolation solide : le papier pour l'isolation des enroulements et les barrières en carton, en contact direct avec ceux-ci, sont à haute température et le reste est conventionnel. La partie liquide est soit conventionnelle, soit à haute température.

I.9.3.1.4. Isolation semi-hybride

Pour l'isolation solide : une partie ou tous les enroulements sont isolés par du papier à haute température et le reste est conventionnel. La partie liquide est soit conventionnelle, soit à haute température.

I.9.3.1.5. Isolation mixte ou mélangée

Pour l'isolation solide : le papier pour l'isolation et la protection des enroulements contre la surchauffe localisée, dans des zones spécifiques et les barrières en carton, en contact direct avec ceux-ci, sont à haute température et le reste est conventionnel. La partie liquide est soit conventionnelle, soit à haute température.

I.9.3.2. Vieillessement du complexe huile/papier

Les phénomènes de vieillissement thermique restent essentiellement les mêmes pour chaque composante du complexe. Cependant, il a été constaté que les produits d'oxydation de l'huile contribuent au vieillissement du papier soit par leur action propre, soit par augmentation de l'hygroscopicité de l'huile [20].

Par exemple, la vitesse de dégradation du papier peut être dix (10) fois plus rapide dans l'huile que dans un diélectrique chloré qui ne s'oxyde pas [20].

I.10. Techniques de diagnostic et d'évaluation de l'état des transformateurs:

Dans ce qui suit on présente une revue de littérature sur les différentes techniques de diagnostic et d'évaluation de l'état des transformateurs de puissance qui peuvent être trouvées dans la pratique.

I.10.1 Techniques traditionnelles :

Les méthodes chimiques telles que les analyses physico-chimiques de l'huile isolante (APC) et l'analyse des gaz dissous (AGD) sont les techniques traditionnelles largement utilisées. L'analyse d'huile s'inscrit dans le cadre des inspections de routine qui sont effectuées tous les trois/ six /douze mois, dépendant de la taille du transformateurs et leur importance dans le réseau

I.10.1.1 Qualité de l'huile :**A. Couleur et apparence :**

Ce test est effectué pour déterminer la couleur de l'huile vieillie en service, il suit la norme ASTM D 1500-91. Ce type de test se fait au laboratoire en utilisant des appareils spéciaux et suivant une procédure bien définie dans la norme précédente. Par contre l'inspection visuelle basée seulement sur l'œil nu est réalisée sur site suivant une autre norme qui est ASTM D 1524-84 .

La couleur et l'apparence de l'huile combinées avec son odeur donnent des informations rapides et utiles pouvant être obtenues sur site, selon lesquelles une personne expérimentée peut observer immédiatement si quelque chose est anormal. La couleur foncée peut indiquer que l'huile a commencé à se détériorer, qui est également la première étape de formation des dépôts et de boues libres. Dans ce cas-là il est fortement recommandé de changer l'huile [21]. La couleur de l'huile est exprimée en une valeur numérique (indice de couleur) basée sur une comparaison avec une série de normes de couleur (Tableau I.3) [22]

Indice de couleur	La couleur selon ASTM	État de l'huile
0-0.5	Transparent	Neuve
0.5-1	Jaune pâle	Bonne
1-2.5	Jaune	Huile vieillie
2.5-4	Jaune vif	État marginal
4-5.5	Ambre	Mauvais état
5.5-7	Marron	État sévère
7-8.5	Marron foncé	État extrême

Tableau I.3 État relatif de l'huile basé sur sa couleur

B. Tension de claquage ou (rigidité diélectrique) :

C'est la tension maximale pour que le claquage du diélectrique ait lieu. Elle évalue la capacité de l'isolation de tenir les contraintes électriques aux fréquences industrielles. Une valeur faible de la tenue diélectrique nous informe de la présence d'impuretés, d'eau ou d'autres contaminants. Il existe deux sortes de mesures dans les standards ASTM, le D877 et le D1816 [23].

C. Facteur de dissipation diélectrique (ou facteur de puissance) et la permittivité relative :

D'après le standard D924, cette méthode est applicable aux isolations liquides neuves et en service à la fréquence industrielle, pratiquement entre 45 et 65Hz. Le facteur de dissipation diélectrique (FDD) ou facteur de puissance (FP) représente les pertes diélectriques et par conséquent l'échauffement de l'isolation. Ce facteur est très important du point de vue contrôle de qualité et indication de changement de qualité résultant d'une contamination ou de détérioration en service ou encore de la manipulation. Un FDD élevé est alors une indication de la présence de contaminations ou de produits de dégradation tels que l'humidité, matériaux conducteurs et produits d'oxydation. La permittivité relative est affectée par la présence de l'humidité et le changement des propriétés physiques [23].

D. La viscosité :

La viscosité de l'huile est sa résistance de circuler dans des conditions spécifiques (D445). La viscosité de l'huile utilisée comme liquide de refroidissement influence les taux de transfert de chaleur. Les viscosités élevées sont à éviter, spécialement dans les climats froids.

E. L'acidité et indice de neutralisation :

Ils sont obtenus à l'aide d'un test de neutralisation consistant à déterminer la quantité d'hydroxyde de potassium nécessaire pour neutraliser 1g d'huile. L'indice de neutralisation est exprimé en KOH/g. Il permet de détecter la contamination et le vieillissement de l'huile.

Les acides organiques ne sont qu'un des groupes de produits d'oxydation qui entraîne la détérioration graduelle de l'huile et confirment la disparition progressive de l'antioxydant, ce qui entraîne la formation de limon en attaquant les métaux à l'intérieur de la cuve et réduit la durée de vie du transformateur, ils affectent également la cellulose et accélèrent la dégradation de

l'isolation. Il a été trouvé que la formation de boues commence à s'établir lorsque le nombre d'acides atteint 0.4 mg KOH/g. Il est recommandé que l'huile doit être régénérée lorsque l'indice de neutralisation atteint 0.2 mg KOH/g [24].

F. Tension interfaciale (TIF) :

Ce test selon le standard ASTM D-971-91 est utilisé par les laboratoires de l'AGD pour déterminer la tension interfaciale entre un échantillon d'huile et d'eau distillée pour la mesure des composants polaires. L'échantillon d'huile est placé dans un bécher d'eau distillée à une température de 25 °C. L'huile va flotter parce que sa gravité est inférieure à celle de l'eau. Il devrait y avoir une distinction claire entre les deux liquides. La TIF est définie comme étant la force qu'il faut appliquer par unité de longueur le long d'une ligne perpendiculaire à la surface de l'huile en équilibre pour provoquer l'extension de cette surface, elle se mesure en dynes par centimètre qui est une petite unité de force égale à 10^{-5} Newtons. Une huile propre va créer une ligne très distincte au-dessus de l'eau donnant une tension interfaciale de 40 à 50 dynes par centimètre le long de l'interface [24]. L'acidité et la tension interfaciale ensemble peuvent être une excellente indication du moment où l'huile doit être régénérée.

G. Teneur en eau :

L'humidité (eau) est considérée comme l'un des ennemis un des appareils de haute tension. Pour garantir la tenue diélectrique aux tensions de fonctionnement, la teneur en eau doit être maintenue au plus faible niveau possible. Notons que lors du premier remplissage du transformateur neuf, il est souhaitable de ramener, par traitement préalable, la teneur en eau à une valeur inférieure de 10 ppm environ à celles figurant au tableau I.4 (ISO R760). La méthode de mesure est décrite dans le standard D 1533 [25].

Tensions nominales	$U_n \leq 36$ kV	$36 < U_n \leq 70$	$70 < U_n \leq 170$	$170 < U_n$
Valeurs limites de la teneur en eau de l'huile	40	35	30	20

Tableau I.4 Valeurs limites de la teneur en eau de l'huile.

I.10.1.2 Analyse des gaz dissous (AGD):

L'analyse des gaz dissous (en anglais Dissolved Gas Analysis DGA), introduite depuis plus de quarante ans, est l'une des techniques les plus utilisées pour le diagnostic des

transformateurs grâce au fait qu'elle est non destructive et qu'elle peut être utilisée pour la surveillance en temps réel. Pour effectuer une analyse, cette technique n'exige qu'une petite quantité de l'huile isolante et ne demande pas une interruption de service du transformateur. Les gaz dissous dans les huiles isolantes sont généralement le résultat de la détérioration des systèmes d'isolation (papier et huile) causée par les décharges, les arcs électriques, la surchauffe et le claquage du papier. Les principaux gaz produits sont le méthane (CH_4), l'éthane (C_2H_6), l'éthylène (C_2H_4), l'acétylène (C_2H_2), l'hydrogène (H_2), le monoxyde et le dioxyde du carbone (CO , CO_2). Pour extraire et quantifier ces gaz, la chromatographie en phase gazeuse est appliquée. Les résultats indiquent les taux des gaz dissous dans l'huile en ppm. Les résultats peuvent être comparés aux tests effectués auparavant, leur interprétation est toujours l'objet d'études des chercheurs à travers le monde. Des recherches extensives ont été entreprises pour analyser et interpréter la signification des gaz mesurés et plus particulièrement leurs taux [26].

I.10.1.3 Analyse de l'état du papier cellulosique :

I.10.1.3.1 Mesure directe sur le papier (degré de polymérisation) :

Les méthodes typiques de mesures directes sur papier sont énumérées dans le (**tableau 1.5**). Ces mesures sont beaucoup plus compliquées que dans l'analyse d'huile, car elles nécessitent l'ouverture du transformateur pour prendre un spécimen du papier. Ces mesures ne s'effectuent que si l'état du transformateur les exige. Il est intéressant de mentionner que la résistance mécanique de l'isolation solide d'un transformateur détermine sa durée de vie utile. D'où la connaissance appropriée de l'état du papier est très importante. Quand les échantillons du papier sont pris, normalement la teneur en eau et le degré de polymérisation sont déterminés. La mesure du degré de polymérisation est une technique utilisée comme premier indicateur de l'état du papier dans les transformateurs. Le test de degré de polymérisation de la cellulose est l'un des moyens les plus sûrs pour déterminer la détérioration du papier et pour estimer la durée de vie restante, il est même plus significatif que l'analyse des gaz dissous. Le degré de polymérisation est défini comme étant le nombre moyen de molécules de glucose dans une chaîne de cellulose, il est déterminé à partir de la viscosité intrinsèque de la solution de l'échantillon du papier, mesurée avec un viscosimètre selon D 4243.

Technique	Mode de défaillance
Titration par test de Karl Fisher	Teneur en eau
Degré de polymérisation	Dégradation du papier

Tableau I. 5 Mesure directe sur papier cellulosique Technique Mode de défaillance

I.10.1.3.2 Analyse furanique :

Les dérivées furaniques sont des produits de décomposition organiques du papier cellulosique qui se trouvent sous forme dissous dans l'huile du transformateur en service. L'analyse des dérivées furaniques offrent une approche plus pratique que celle par mesures directes, à cause de la difficulté de prendre des spécimens d'analyse, nécessitant certainement le décuillage du transformateur, par contre la première n'exige qu'un prélèvement traditionnel de l'huile. L'intérêt de cette analyse réside dans le fait que les différents mécanismes de dégradation du papier conduisent à la rupture des chaînes et à la formation de sucres qui se transforment en dérivés furaniques.

L'analyse furanique se fait à l'aide d'un chromatographe en phase liquide (High performance liquide chromatography HPLC). La procédure de test est décrite dans CEI. Cette méthode est appliquée pour évaluer la dégradation de l'isolation solide.

I.10.1.4 Essais électriques :

Une livraison fiable de l'énergie électrique est dépendante, en grande partie, du fonctionnement fiable des transformateurs de puissance. Cette fiabilité est considérablement améliorée par un programme d'essai bien établi, incluant les normes correspondantes à ces essais [27].

En général, on peut dire que ces tests ont une très bonne efficacité pour le diagnostic de pannes électriques. Mais le cas des déformations mécaniques, leurs détections sont souvent difficiles. Seul l'essai d'impédance en court-circuit peut fournir une information sur l'état mécanique de l'équipement.

Généralement, les normes distinguent trois catégories d'essais [28] :

- Les essais individuels sont à exécuter sur tous les appareils, sans exception :

1. Mesure de la résistance des enroulements.

2. Vérification du sens relatif des bobinages, du schéma des connexions entre enroulements et bornes, et du rapport de transformation.
3. Mesure des pertes dues à la charge et des tensions de court-circuit.
4. Mesure des pertes et du courant à vide.
5. Epreuves électriques à fréquence industrielle (par tension induite, par tension appliquée).
6. Essai de tenue aux chocs de foudre en onde pleine (transformateurs dont la tension est ≥ 220 kV).
7. Essai de tenue aux surtensions de manoeuvre (transformateurs dont la tension est > 220 kV).

- **Les essais de type** sont, en principe, destinés à éprouver une nouvelle fabrication ou une série de transformateurs:

1. Essai de tenue aux chocs de foudre en onde pleine (transformateurs dont la tension est < 220 kV).
2. Essai d'échauffement.

- Enfin, **les essais spéciaux** correspondent soit à des conditions de service particulières, soit à des investigations:

1. Mesure de l'impédance homopolaire.
2. Essai de tenue au choc en onde coupée.
3. Essai de tenue au court-circuit.

I.10.1.5 Surveillance de la température et analyse du bruit

D'autres facteurs de défaillance et de vieillissement tels que la température et le bruit émis par les transformateurs en service devraient être surveillés et analysés.

I.10.1.6 Techniques Modernes

D'autres outils de diagnostic, relativement nouveaux dans le domaine du diagnostic, pourraient être utilisés. Parmi ces techniques on trouve :

- Mesure de décharges partielles
- Mesure de réponse diélectrique
 - Spectroscopie en domaine fréquentiel (FDS)
 - Mesure de la tension de rétablissement (RVM)

- Mesure du courant de polarisation et de dépolarisation (PDC)
- Tests chimiques :
 - Spectroscopie photo-électronique par rayon X (XPS)
 - Produits de dégradation de l'huile
- Analyse de la réponse en fréquence (FRA) ou fonction de transfert
- Diagnostic de l'équipement auxiliaire
 - Bornes de traversées.
 - Changeur de prise en charge.
- Diagnostic par mesure des courants.
- Mesure de température interne par système à fibres optiques.

Conclusion

Le transformateur de puissance est classé parmi les composants les plus importants et les plus onéreux du secteur de l'électricité. Une grande attention est accordée aux techniques de gestion du cycle de vie et de surveillance de son état.

Plusieurs méthodes, issues de la littérature, de surveillance pour évaluer l'état des transformateurs sont présentées. Ces techniques sont mises en application par des entreprises, qui, pour des raisons économique et technique, tendent à changer leur stratégie de surveillance et privilégient désormais une surveillance basée sur l'état de l'équipement plutôt que sur l'entretien périodique. En général les techniques les plus répandues dans le diagnostic de l'état des transformateurs sont les essais du système d'isolation notamment l'analyse des gaz dissous et la qualité de l'huile, d'autres nouvelles méthodes chimiques ont été également présentes dans ce chapitre.

CHAPITRE II

Généralités sur les régressions polynomiales et la technique d'optimisation PSO

Introduction

L'intelligence artificielle est l'une des techniques modernes de prédiction et d'estimation. Elle est utilisée à titre d'exemple en électrotechnique (les réseaux intelligents, les véhicules intelligents, la robotique, etc.), à la métrologie et autres. Parmi lesquelles, il existe : la logique floue (LF), les réseaux de neurones artificiels (RNA), les réseaux neuro-flous génétiques (AG), optimisation par essaim de particules (PSO), etc.

A cause de la simplicité et la facilité de l'utilisation de l'algorithme PSO, nous choisissons ce dernier.

Dans ce chapitre, nous avons présentons une substance générale sur les régressions polynomiales : leur conception, leur avantage et inconvénient. Et les méthodes d'optimisations notamment optimisation par essaim de particules (PSO), leur principe de fonctionnement, les avantages, les inconvénients.

II.1 Les régressions polynomiales

II.1.1 Définition

La régression est définie comme la méthode pour trouver la relation entre les variables indépendantes et dépendantes pour prédire le résultat. Le premier modèle de régression polynomiale a été utilisé en 1815 par Gergonne. Il est utilisé pour trouver la ligne de meilleur ajustement en utilisant la ligne de régression pour prédire les résultats. Il existe de nombreux types de techniques de régression, la régression polynomiale en fait partie. Avant de comprendre cela, il est conseillé d'avoir une bonne connaissance de la régression linéaire, il sera donc facile de marquer les différences entre eux.

II.1.2 Conception

La régression polynomiale est une forme d'analyse de régression dans laquelle la relation entre la variable indépendante x et la variable dépendante y est modélisée comme un polynôme de n ième degré dans x . La régression polynomiale ajuste une relation non linéaire entre la valeur de x et la moyenne conditionnelle correspondante de y , notée $E(y | x)$. Bien que la régression polynomiale adapte un modèle non linéaire aux données, en tant que problème d'estimation statistique, elle est linéaire, en ce sens que la fonction de régression $E(y | x)$ est linéaire dans les paramètres inconnus estimés à partir des données. Pour cette raison, la régression polynomiale est considérée comme un cas particulier de régression linéaire multiple.

Les variables explicatives (indépendantes) résultant de l'expansion polynomiale des variables « de base » sont appelées termes de degré supérieur. Ces variables sont également utilisées dans les paramètres de classification Régression polynomiale [29].

II.1.3 Les avantages

- Le polynôme fournit la meilleure approximation de la relation entre la variable dépendante et la variable indépendante.
- Il permet d'intégrer une large gamme de fonctions.
- Le polynôme s'adapte fondamentalement à une large gamme de courbures.

II.1.4 Les inconvénients

La présence d'une ou deux valeurs aberrantes dans les données peut sérieusement affecter les résultats de l'analyse non linéaire.

Celles-ci sont trop sensibles aux valeurs aberrantes.

En outre, il existe malheureusement moins d'outils de validation de modèles pour la détection des valeurs aberrantes dans la régression non linéaire que dans la régression linéaire.

II.2 L'optimisation par essaim de particules (PSO)

II.2.1 Introduction

L'optimisation par essaim particulaire (OEP), ou Particle Swarm Optimization (PSO) en anglais, est une méthode d'optimisation stochastique 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 enseignant à l'Université Purdue à Indianapolis) et James Kennedy (socio-psychologue travaillant à Washington) en 1995. Elle 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. tout en y apportant leurs variations personnelles [30][31].

En effet, on peut observer chez ces animaux des dynamiques de déplacement relativement complexes. Des règles simples, telles que « rester proche des autres individus », « aller dans une même direction » ou « aller avec même vitesse », suffisent pour maintenir la cohésion de l'essaim. L'essaim particulaire correspond à une population d'agents simples,

appelés particules. Chaque particule est considérée comme une solution du problème, où elle possède une position (vecteur solution) et une vitesse. De plus, chaque particule possède une mémoire lui permettant de se souvenir de sa meilleure performance et de la meilleure performance atteinte par les particules « voisines » (informatrices) : chaque particule dispose en effet d'un groupe d'informatrices, historiquement appelé son voisinage [32], [33].

II.2.2 Notion de voisinage

Le voisinage d'une particule est le sous-ensemble de particules de l'essaim avec lequel il a une communication directe. Ce réseau de rapports entre toutes les particules est connu comme la sociométrie, ou la topologie de l'essaim. Il existe de nombreuses combinaisons dont les suivantes sont les plus utilisées [33], [34]:

- Topologie en étoile (figure II.1. (a)) : chaque particule est attirée vers la meilleure particule notée g_{best} et communique avec les autres.
- Topologie en anneau (figure II.1. (b)) : chaque particule communique avec n particules (en général, $n = 3$) immédiates. Chaque particule tend à se déplacer vers la meilleure dans son voisinage local notée l_{best} .
- Topologie en rayon (figure II.1. (c)) : une particule « centrale » est connectée à toute les autres. Seule cette particule centrale ajuste sa position vers la meilleure, si cela provoque une amélioration l'information est propagée aux autres.

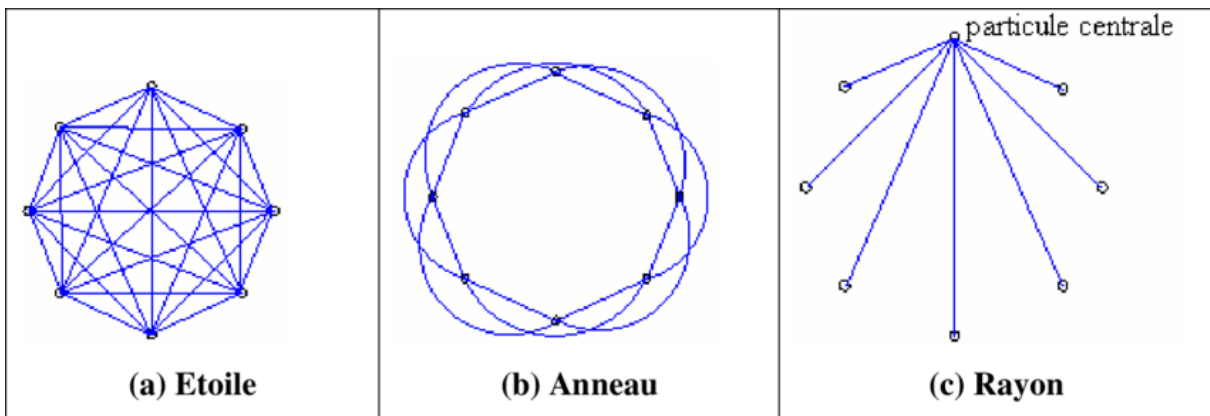


Figure II.1: Voisinage Etoile Anneau Rayon

II.2.3 Principe général Principe

On dispose d'une fonction objective à optimiser dans un sens ou dans l'autre. Un essaim est un ensemble de particules positionnées dans l'espace de définition de la fonction objectif.

Le principe de l'algorithme consiste à déplacer ces particules dans l'espace de définition afin de trouver la solution optimale. Une particule est caractérisée par plusieurs attributs : Sa position actuelle : c'est-à-dire ses coordonnées dans l'ensemble de définition et la valeur de la fonction objective lui correspond.

Sa meilleure position : c'est la valeur obtenue par la particule et ses coordonnées.

Sa vitesse : cette donnée, recalculée à chaque itération de l'algorithme, permet de déduire la position suivante de la particule. Elle est fonction de la meilleure position de la particule depuis le début de la recherche, du voisin le mieux positionné à l'instant actuel et de la vitesse précédente de la particule.

Ses voisins : c'est un ensemble de particule qui influe sur ses déplacements, en particulier celui qui est le mieux positionné.

La figure (II.2) présente le principe de déplacement d'une particule dans l'espace de recherche à chaque itération et pour réaliser son prochain mouvement Chaque particule change sa position actuelle via l'intégration de trois vecteurs [35] :

- Suivre sa propre vitesse.
- Revenir vers sa meilleure performance.
- Aller vers la meilleure performance de ses informatrices.

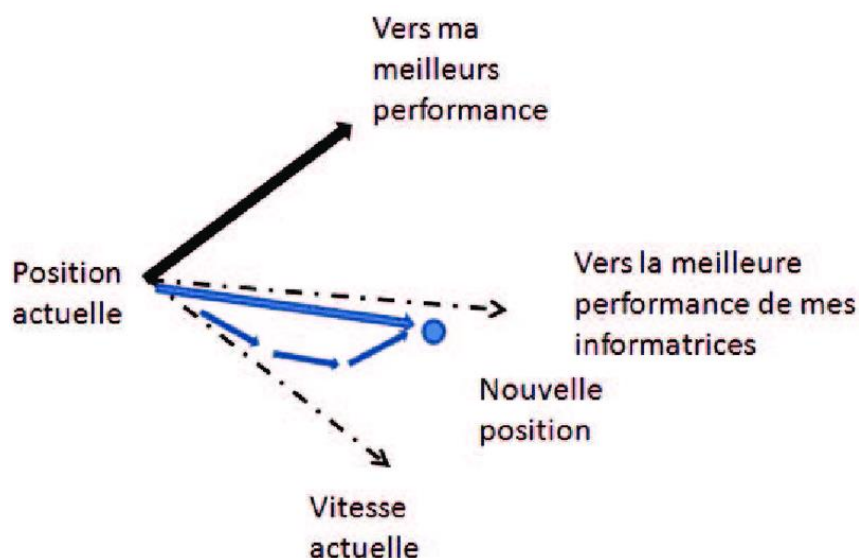


Figure (II.2) : principe de déplacement d'une particule

II.2.4 Fonctionnement :

L'initialisation de l'algorithme OEP se fait par une population de solutions potentielles aléatoires, interprétées comme des particules se déplaçant dans l'espace de recherche. Chaque particule est attirée vers sa meilleure position atteinte par le passé $pbest$ ainsi que vers la meilleure position atteinte par les particules de tout l'essaim $gbest$. L'algorithme OEP comprend plusieurs paramètres de réglage qui permettent d'agir sur le compromis exploration. L'exploration est la capacité de tester différentes régions de l'espace à la recherche de bonne solution candidates. L'exploitation est la capacité de concentrer la recherche autour des solutions prometteuses afin de s'approcher le plus possible de l'optimum.

A travers la coopération et la compétition parmi les solutions potentielles, l'heuristique OEP est motivée par la simulation du comportement social. Dans cette technique, pour la génération initiale ($K=0$), une population initiale (de taille T_{pop}) constituée d'un ensemble de solution S_i^0 est aléatoirement choisie dans le domaine de la fonction fitness, et chacune des particules aura une position S_i^k et une vitesse V_i^k .

A chaque génération K , la fonction d'adaptation f de chaque position S_i^k est calculée. Si $Pbest$ désigne la meilleure position de la particule i dans sa vie passée, il faut choisir la meilleure position globale $gbest$ de l'ensemble du groupe, de telle sorte que les règles de mise à jour soient : [36]

$$V_i^{k+1} = wV_i^k + c_1rand_1 \times (pbest - S_i^k) + c_2rand_2 \times (gbest - S_i^k) \quad (1)$$

$$S_i^{k+1} = S_i^k + V_i^{k+1} \quad (2)$$

Où V_i^{k+1} : Vitesse du particule i à l'itération $k+1$.

w : Fonction de pondération.

c_i : Facteur de pondération.

Rand : Nombre aléatoire entre 0 et 1.

S_i^k : Position actuelle de la particule i à l'itération k .

P_{besti} : $pbest$ du particule i .

g_{besti} : $gbest$ du groupe.

L'expérience montre qu'une bonne exploration du domaine de recherche est obtenue en introduisant les nombres aléatoires $rand_1$ et $rand_2$, en général avec une réparation uniforme entre 0 et 1

La figure (II.3) montre un concept de la modification d'un point de recherche par l'OEP ou chaque particule change sa position actuelle en tenant compte des différents facteurs.

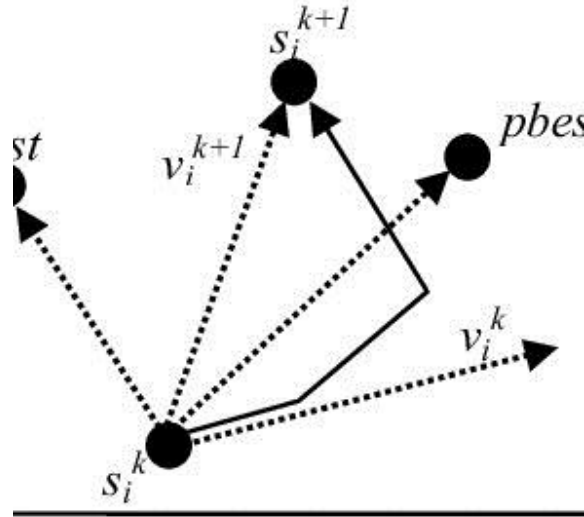


Figure II.3 : Conception de modification d'un point de recherche par PSO.

La fonction de pondération qui est habituellement utilisée dans l'équation (3) et qui permet de s'approcher graduellement de $pbest$ et de $gbest$ peut être écrite sous la forme suivant :

$$w = w_{\max} - \frac{w_{\max} - w_{\min}}{iter_{\max}} \times Iter \quad (3)$$

Ou: w_{\max} : Poids initial.

w_{\min} : Poids final.

$Iter_{\max}$: Nombre maximal d'itérations.

$Iter$: Nombre actuel d'itérations.

L'organigramme général de la méthode PSO peut être décrit comme suit figure (II.4) :

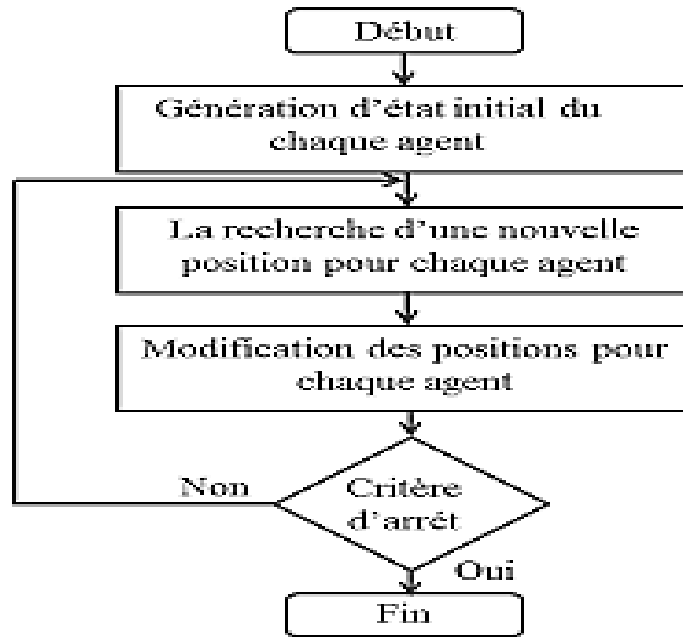


Figure II.4: Organigramme générale de PSO.

a) Etape 1 (Génération d'un état initial de chaque particule)

Les points de recherche initiaux, position (S_i^k) et vitesse (V_i^k) de chaque particule sont générés aléatoirement dans l'espace de recherche. Le point de recherche courant est placé à $pbest$ pour chaque agent. La meilleure valeur évaluée de $pbest$ est placée à $gbest$.

b) Etape 2 (Recherche d'une nouvelle position pour chaque agent)

La valeur de la fonction objective est calculée pour chacun des agents. Si la valeur d'un agent est meilleure que son $pbest$ courant, $pbest$ prend cette nouvelle valeur. Si la meilleure valeur de $pbest$ est meilleure que $gbest$ courant, $gbest$ est remplacé par celle-ci et l'agent qui correspond à cette valeur est ainsi stocké.

c) Etape 3 (Modification de chaque point de recherche)

Le point de recherche courant de chaque agent est changé en utilisant les équations (1), (2), (3)

d) Etape 4 (Vérification de l'état de sortie)

Le nombre courant d'itération atteint le nombre maximum d'itération $iter_{max}$, alors fin du programme, autrement, retourner à l'étape 2.

II.2.5 Avantages et inconvénient de l'algorithme PSO :

II.2.5.1 Avantages

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

II.2.5.2 Les inconvénients

- 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.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons décrit brièvement les régressions polynomiales : leur conception, leur avantage et inconvénient.

On a présenté le principe de l'algorithme qui permet d'aborder la majorité des problèmes d'optimisation, notamment un formalisme simple qui est l'essai particulière.

Dans le chapitre suivant on va utiliser et appliquer cette méthode pour optimiser les résultats de l'approche mathématique obtenue par la régression multiple pour le diagnostic de l'état de papier et de faire une comparaison avec les résultats des réseaux de neurones.

CHAPITRE III

Modélisation et analyse prédictive du comportement diélectrique d'un transformateur de puissance par un modèle de régression linéaire multiple intégrant l'algorithme d'optimisation PSO



Introduction

Le transformateur est un élément-clé du réseau de transport et de distribution d'électricité. De conception fiable, il est parfois trop négligé par les utilisateurs au détriment d'installations moins sûres et à priori plus sensible. Pourtant, sa défaillance se traduit la plupart du temps par des pertes financières importantes voire humaines, conséquence d'une défaillance de production, ou de destruction d'une partie de l'infrastructure de l'entreprise. La prise de conscience de sa criticité fait qu'il entre aujourd'hui de plus en plus dans le cadre d'une stratégie liée à la maîtrise des risques appliquée à la maintenance industrielle. Le contexte économique actuel contraint un certain nombre de secteurs de l'entreprise au contrôle des dépenses. C'est notamment le cas de la maintenance, pour laquelle la planification des arrêts de production liée à l'Entretien Préventif Périodique Programmé (E3P) de tous les éléments de la chaîne ne trouve plus sa place. En terme de coût (indisponibilité des processus et remplacement systématique), ni en terme de souplesse, dans un monde piloté par le « juste-à temps ».

C'est pourquoi, actuellement, certaines entreprises s'orientent vers une politique de maintenance préventive séquentielle. Le concept consiste à ne pas réaliser les maintenances à âge fixe, mais à rapprocher les intervalles de maintenance à mesure que le matériel vieillit. Le coût s'en trouve encore optimisé, et confère à ce type de maintenance une approche plus rationnelle, puisque la fréquence de panne augmente naturellement en fin de vie du matériel. C'est là, que le diagnostic d'état trouve toute sa pertinence. En effet, il permet à partir d'intervention non intrusive parfois réalisée en fonctionnement ou lors de brèves coupures, soit de conforter le programme de maintenance, soit d'alerter l'exploitant sur le besoin d'adapter sa politique à la vue des signaux précurseurs d'avaries.

Le diagnostic d'état d'un transformateur se base sur deux approches : l'une basique, s'appuyant sur un ensemble de prise de mesure relevant de la maintenance courante ; l'autre experte, faisant appel à deux méthodes innovantes. Ces dernières consistent à évaluer les effets des modes de défaillance affectant les diélectriques [37].

Les méthodes d'analyse chimique tels que l'analyse des gaz dissous dans l'huile, la mesure du degré de polymérisation, la chromatographie en phase liquide, la spectrométrie de masse, etc. sont très utilisées pour évaluer l'état de dégradation des isolations des équipements de la haute tension.

La mesure du degré de polymérisation est une technique utilisée comme premier indicateur de l'état du papier dans les transformateurs. Le test de degré de polymérisation (DP) de la cellulose est l'un des moyens les plus sûrs pour déterminer la détérioration du papier et pour estimer la durée de vie restante.

La mesure de la Résistance à la traction permet une évaluation directe de la qualité de l'isolation solide dans les transformateurs.

L'objectif fixé dans ce chapitre est la modélisation à visée prédictive ainsi que le diagnostic du papier Kraft utilisé comme isolant solide dans les transformateurs de puissance.

Pour cela nous avons subdivisé le travail en trois phases :

- **1^{ère} phase** : la modélisation du degré de polymérisation (**DP_v**) en fonction de trois paramètres :

- -le temps de vieillissement
- -le niveau de température appliqué
- -la valeur de composant furanique **2-FAL**

- **2^{ème} phase** : la modélisation et la prédiction de l'indice de traction (**T_{idx}**) ou la résistance à la traction en fonction du degré de polymérisation (**DP_v**) pour les niveaux de température appliqué.

- **3^{ème} phase** : Diagnostic du papier isolant du transformateur de puissance.

III.1 Base de données expérimentale utilisée

Nous avons utilisées les données provenant des mesures effectuées sur du papier Kraft imprégné dans l'huile Luminol lors de vieillissements thermiques accélérés, sous l'influence de trois niveaux de température appliquée : 150°C, 170°C et 190°C [38].

Les données expérimentales portent sur la perte des propriétés mécaniques de différents types de papiers cellulosiques imprégnés dans des fluides isolants, lors de vieillissements thermiques accélérés. Le but étant d'étudier les corrélations quasi linéaires entre la concentration en méthanol, le degré de polymérisation de la cellulose et les propriétés mécaniques des papiers.

Les résultats expérimentaux sont présentés dans les tableaux (III.1, III.2 et III.3).

Tableau III.1 : Les résultats expérimentaux à T = 150 °C

Température (°C)	Temps de vieillissement (h)	2-Furfural (ppm)	Degré de polymérisation (ppm)	Indice de traction(%)
150	0	0,00	1222,47	100,00
	232	72,00	686,06	74,20
	402	46,00	507,93	59,15
	737	20,00	460,96	59,07
	1072	7,00	343,96	43,51
	1293	0,00	300,05	28,00
	1626	7,00	287,53	35,09
	2443	7,00	216,11	16,00
	2666	0,00	173,96	14,93
	2829	0,00	195,98	40,49
	3740	0,00	155,04	14,41
	4626	0,00	151,81	9,36

Tableau III.2 : Les résultats expérimentaux à T = 170 °C

Température (°C)	Temps de vieillissement (h)	2-Furfural (ppm)	Degré de polymérisation (ppm)	Indice de traction(%)
170	0	0,00	1222,47	100,00
	15	124,00	564,23	77,89
	39	345,00	461,88	66,96
	69	23,00	370,26	50,86
	128	0,00	270,85	34,00
	212	0,00	255,74	31,70
	317	0,00	192,01	26,59
	364	0,00	193,67	18,78
	424	0,00	181,61	23,02
	568	0,00	168,4	13,68
	784	0,00	151,18	13,11
	0	0,00	1222,47	100,00

Tableau III.3 : Les résultats expérimentaux à T = 190 °C

Température (°C)	Temps de vieillissement (h)	2-Furfural (ppm)	Degré de polymérisation (ppm)	Indice de traction(%)
190	0	0,00	1222,47	100,00
	40	985,00	383,08	66,61
	49	2743,00	243,54	33,21
	64	0,00	244,37	48,27
	88	2936,00	220,83	33,62
	112	0,00	212,4	22,83
	118	13079,00	163,88	23,50
	148	13483,00	146,1	22,68
	216	27345,00	117,14	19,57
	236	1984,00	145,27	18,66
	285	18747,00	131,53	16,13

III.2 1^{ère} phase : Modélisation du degré de polymérisation

III.2.1 Introduction

L'isolation de papier dans les appareillages électriques remplis d'huile est un produit à base de cellulose. La cellulose est un polymère naturel fait d'un ensemble des monomère de type DGlucopyranose, ce qui lui procure sa solidité [38].

Le degré de polymérisation (DP_v) est défini comme étant le nombre moyen de molécules de glucose dans une chaîne de cellulose.

Le test de degré de polymérisation de la cellulose est l'un des moyens les plus sûrs pour déterminer la détérioration du papier et pour estimer la vie restante.

Pour la modélisation, nous avons utilisé le modèle de régression linéaire multiple sur les mesures relevées. Afin de tester la validité de l'approche, nous avons effectué une comparaison avec les résultats issus de la modélisation par réseaux de neurone.

III.2.2 Modélisation du degré de polymérisation

La modélisation est faite comme suit :

La modélisation du degré de polymérisation en fonction de trois paramètres : le temps de vieillissement, les différents niveaux de température appliquée (150°C, 170°C, 190°), et Le composé 2-furfuraldéhyde (2-FAL).

Une analyse de régression linéaire multiple (RLM) est proposée pour la modélisation de forme suivante :

$$DP_v(x_1, x_2, x_3) = w_1 + w_2x_1 + w_3x_3 + w_4x_2 + \dots \quad \text{(III.1)}$$

Où w_1, w_2, w_3, \dots : sont des constantes du modèle qui peuvent être déterminées par la technique d'optimisation ' Particle Swarm Optimization (PSO) '.

Pour réduire l'erreur nous appliquons la méthode d'optimisation par essaim de particules (OEP), ou en anglais Particle Swarm Optimization (PSO).

Application de la méthode PSO :

L'étude d'un phénomène conduit l'expérimentateur à s'intéresser à une grandeur Y dépendant d'un certain nombre de variable. Sous une forme mathématique, on peut écrire que la grandeur d'intérêt Y appelée également réponse est une fonction de plusieurs variables X_i appelée facteurs. Chaque facteur à un coefficient, le polynôme constitue un bon modèle mathématique pour la fonction de réponse

L'équation s'écrit :
$$Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_i) \quad (\text{III.2})$$

Dans notre étude, la sortie du modèle est :
$$DP_v = Y = f(X_1, X_2, X_3)$$

Les entrées du modèle sont :

- X_1 : Le temps de vieillissement $t(h)$
- X_2 : Le niveau de température appliqué $T (^{\circ}C)$
- X_3 : 2-FAL (ppb)

L'algorithme de calcul est comme suit :

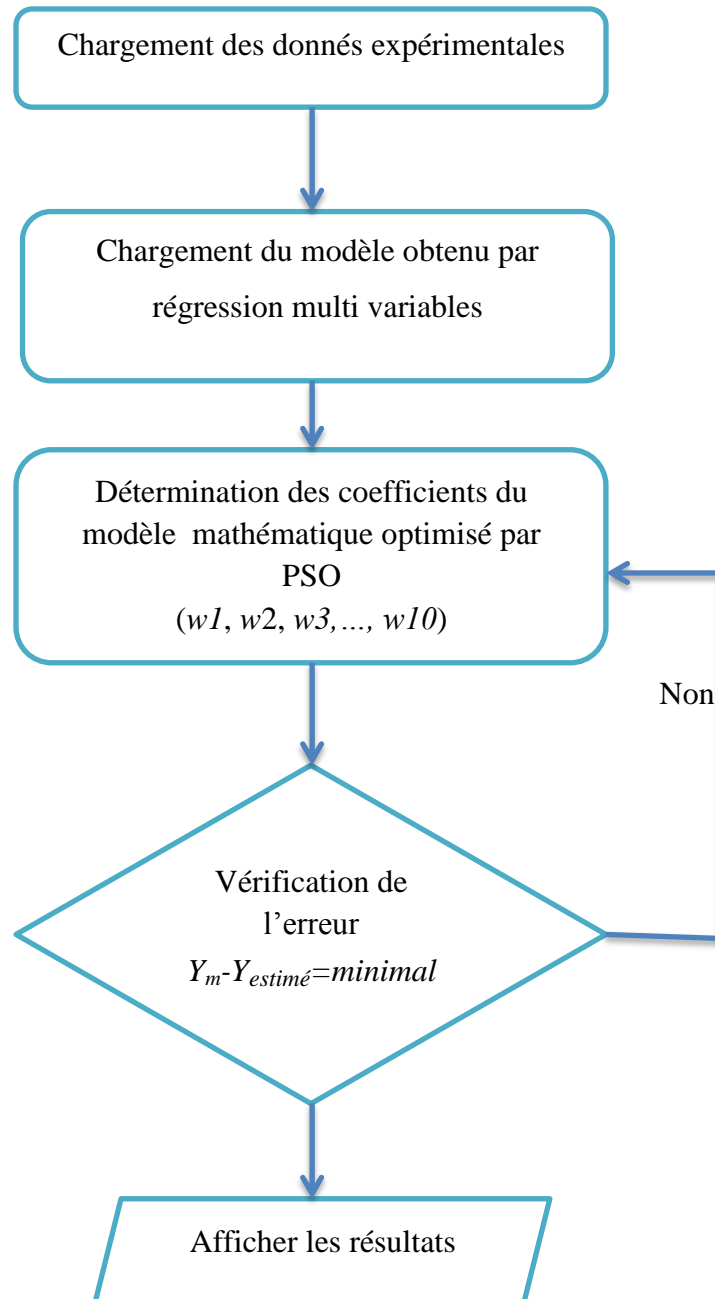


Figure III.1 : Algorithme de la détermination des coefficients du modèle mathématique optimisé par la méthode PSO.

Les coefficients ($w_1, w_2, w_3, \dots, w_{10}$) sont calculés en utilisant les variables ($h, 2-FAL, T$), donc notre modèle mathématique est décrit comme suit :

$$Y = w_1 + w_2 * t + w_3 * T + w_4 * 2Fal + w_5 * t * T + w_6 * t * 2Fal + w_7 * T * 2Fal + w_8 * t^2 + w_9 * T^2 + w_{10} * 2Fal^2$$

Selon cet algorithme de calcul. On détermine les coefficients. Le modèle mathématique de DPv est comme suit :

$$DPv = 7,73 + 0,8 * t - 78,39 * T + 4,5 * 2Fal - 0,007 * t * T + 2,53 * t * 2Fal - 0,02 * T * 2Fal + 3,99 * t^2 + 0,20 * T^2 + 6,66 * 2Fal^2$$

Sur la figure III.2. sont portés les résultats de la modélisation, incluant l'optimisation, à côté des valeurs expérimentales.

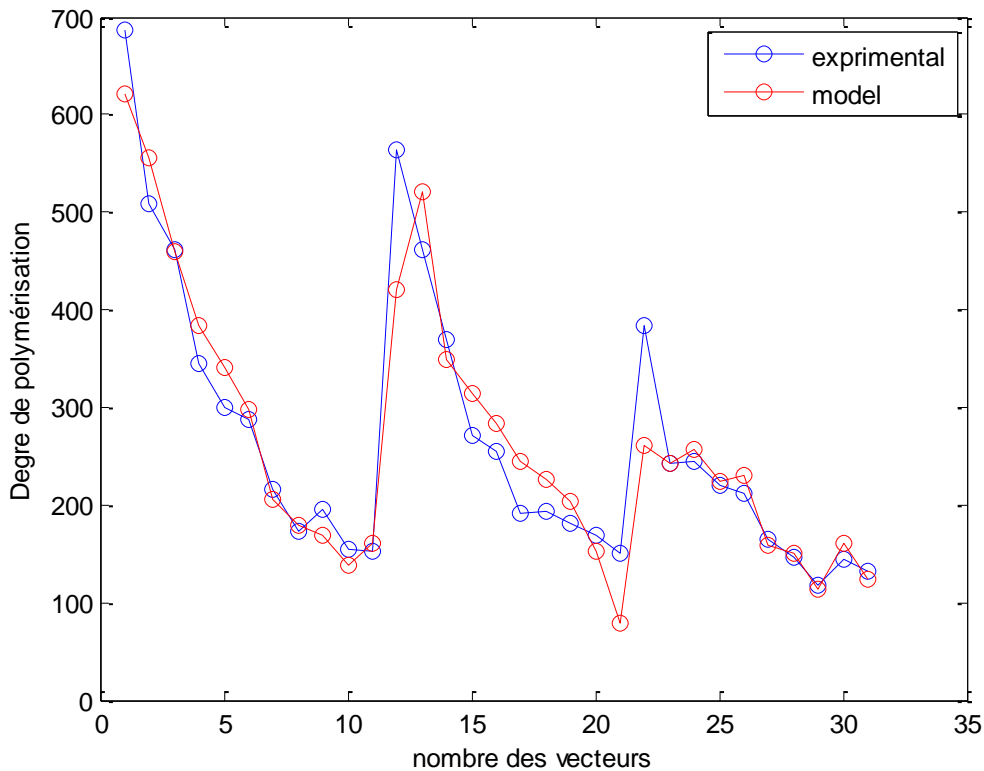


Figure III.2: Courbe de régression de DPv

Tableau III.4 : regroupe les différents résultats obtenus

Température	Temps de vieillissement (h)	2-Furfural (ppm)	DPv expérimental	DPv simulation	Erreur relative absolues(%)
150	232	72,00	686,06	632,48	7,81
	402	46,00	507,93	564,74	11,18
	737	20,00	460,96	461,54	0,13
	1072	7,00	343,96	379,44	10,31
	1293	0,00	300,05	331,59	10,51
	1626	7,00	287,53	283,93	1,25
	2443	7,00	216,11	187,81	13,10
	2666	0,00	173,96	163,78	5,85
	2829	0,00	195,98	153,85	21,50
	3740	0,00	155,04	137,43	11,36
4626	0,00	151,81	185,01	21,87	
170	15	124,00	564,23	432,87	23,28
	39	345,00	461,88	525,86	13,85
	69	23,00	370,26	363,10	1,93
	128	0,00	270,85	327,75	21,01
	212	0,00	255,74	293,20	14,65
	317	0,00	192,01	250,80	30,62
	364	0,00	193,67	232,11	19,85
	424	0,00	181,61	208,51	14,81
	568	0,00	168,4	153,02	9,13
	784	0,00	151,18	72,90	51,78
190	40	985,00	383,04	270,05	29,50
	49	2743,00	243,54	251,19	3,14
	64	0,00	244,37	264,72	8,33
	88	2936,00	220,83	230,58	4,41
	112	0,00	212,4	237,72	11,92
	118	13079,00	163,88	161,29	1,58
	148	13483,00	146,1	152,87	4,64
	216	27345,00	117,14	120,96	3,26
	236	1984,00	145,27	162,20	11,65
	285	18747,00	131,53	123,57	6,05

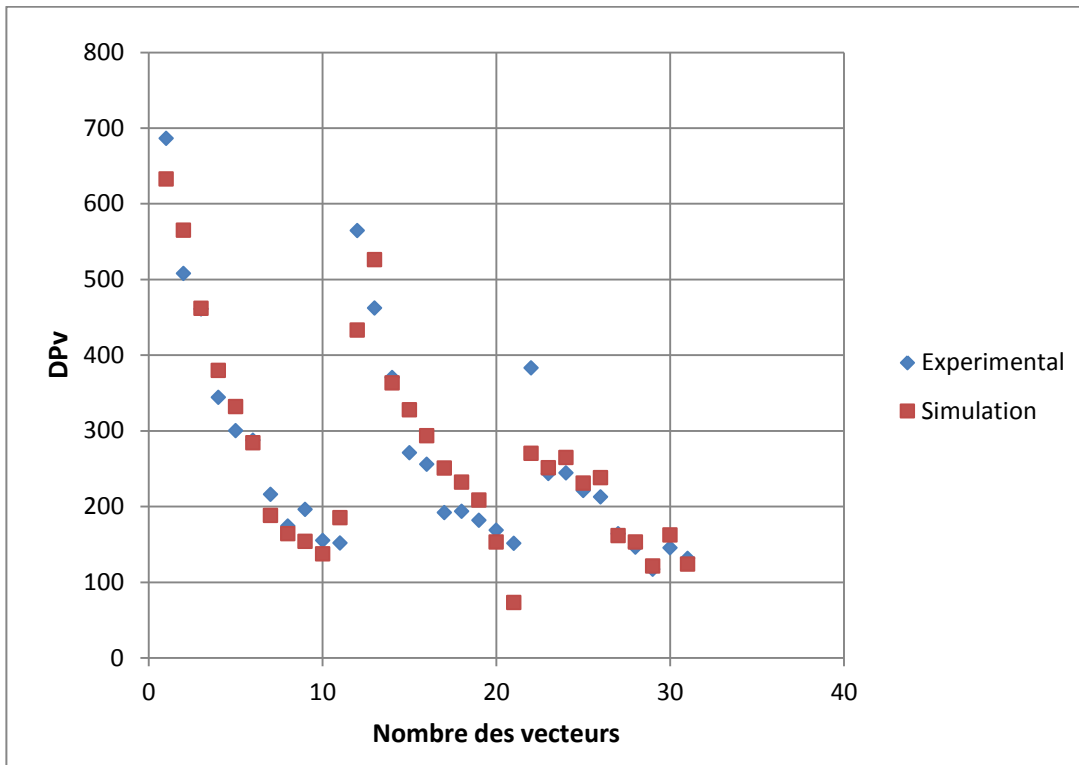


Figure III.3 : Modélisation de DPv.

Le tableau III.5 présente une comparaison des résultats de DPv entre le modèle neuronal (approche1) obtenue par Mr.Benyammi [40] et celle trouvé par le modèle mathématique optimisé par PSO, proposé.

Tableau III.5 : Degré de polymérisation des deux approches.

	Erreur relative absolues			Coefficient de corrélation
	Min	Moy	Max	
Approche1	0	23,66	78,19	0,91
Approche2	0,12	12,91	51,77	0,94

III.2.3 Analyse et discussion

Suivant D'après le tableau III.4, nous avons remarqué que la valeur de l'erreur relative moyenne est de l'ordre **12,91**. Elle est inférieure par rapport à celle trouvée par le modèle neuronal. Ce dernier est de l'ordre **23,66**.

Les résultats obtenus par le modèle de régression linéaire multiple, optimisé par PSO, sont plus précis. D'après le tableau III.5 les valeurs de l'erreur sont faibles

Cette approche de modélisation a permis de dégager des résultats très intéressants. Ce qui justifie son efficacité.

III.2.4 Diagnostic de degré de polymérisation

La mesure de DP permet de déterminer l'état du papier Kraft dans les transformateurs de puissance. Les deux formules de Pradhan et AL [39]. Sont utilisées pour calculer la durée de vie écoulée et restante d'un transformateur de puissance.

Les valeurs DP vont de 1200 à 1000 ppm et 200 ppm pour un papier détérioré [39].

L'équation (III.2) exprime la vie écoulée d'un transformateur en années et l'équation (III.3) exprime la vie restante en pourcentage [39].

$$\textit{Durée de vie écoulée (années)} = 20,5 * \ln \left(\frac{1100}{DP_v} \right) \quad (\text{III.2})$$

$$\textit{Durée de vie restante (\%)} = 100 * \left[\frac{(DP_v - 200)}{(1200 - 200)} \right] \quad (\text{III.3})$$

L'estimation de la durée de vie moyenne d'un transformateur de puissance est 35 années [3].

L'application des deux équations (III.2) et (III.3) aux résultats issus de la base de données utilisée permet de calculer les durées de vie écoulée et restante du transformateur de puissance étudié. Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau (III.6) :

Tableau III.6 : Estimation de la durée de vie écoulée et restante du transformateur de puissance étudié

Température (°C)	150	170	190
Valeur moyenne du DPv (ppm)	316,50	286.01	235.92
Durée d'opération du transformateur (années)	35	35	35
Durée de vie écoulée (années)	25.53	27.61	35.20
Durée de vie écoulée (%)	72.94	78.88	100.75
Durée de vie restante (%)	11.65	8.6	3.5
Durée de vie restante (années)	4.07	3.01	1.22

Nous avons exploité les résultats de l'approche 2 pour tracer l'évolution de DPv.

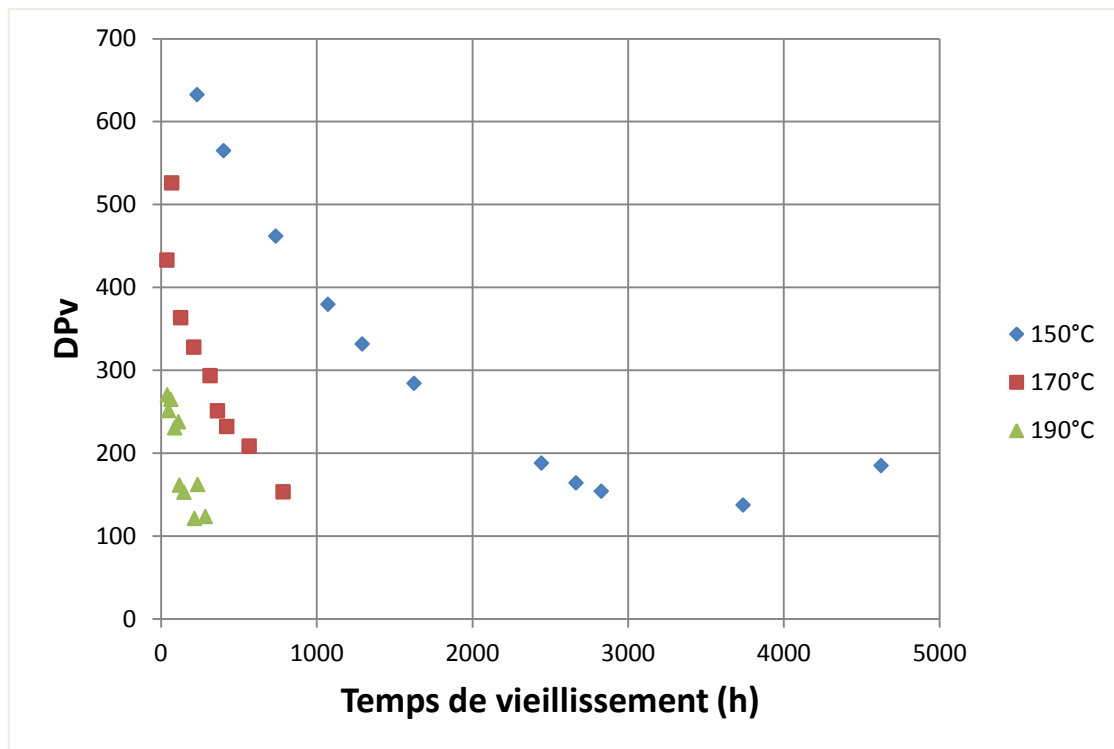


Figure III. 4 : Évolution du degré de polymérisation en fonction du temps de vieillissement.

La diminution du degré de polymérisation de la cellulose au cours du vieillissement est observée dans la figure (III.4)

D'après la figure (III.4) et le tableau (III.6) nous constatons que :

A 150°C et plus de 4000 heures, la durée de vie écoulée du transformateur est 72,94%. Nous remarquons que le DPv atteint la valeur maximale puis diminue progressivement ainsi la dépolymérisation est lente.

A 170°C et moins de 1000 heures, la durée de vie écoulée du transformateur est 78,88 %. Nous remarquons que le DPv atteint une valeur faible comparativement à celle obtenue à 150°C. La dépolymérisation est plus rapide que celle constatée à 150 °C. Donc, nous pouvons constater que le papier Kraft perd ses performances mécaniques à un vieillissement accéléré.

A 190°C, la durée de vie écoulée du transformateur est 100,75 %. Nous remarquons que le DPv atteint une valeur très faible par rapport à celle constatée à 170°C. Ainsi une dépolymérisation très rapide est remarquée. Ce peut entraîner la fin de vie du transformateur de manière beaucoup plus rapide.

Donc l'influence de la température sur la dépolymérisation des chaînes de cellulose semble être directe. L'effet sur la dépolymérisation, en augmentant la température de 150 °C à 170°C, est plus marqué que dans le cas d'une augmentation de la température comprise entre 170 °C et 190°C.

III.3 2^{ème} phase : Modélisation et prédiction de l'indice de traction (Tidx)

III.3.1 Introduction

L'indice de traction est la méthode courante pour décrire la résistance de traction dans les échantillons de papier. Cet indice est défini comme une force à la rupture par unité de longueur et divisé par le grammage de papier [38].

La résistance à la traction du papier donne une indication relative du nombre de chaînes intactes de cellulose ainsi qu'une idée de l'état des liens entre les fibres de celluloses [38].

Dans cette phase nous allons exploiter les résultats expérimentaux pour faire la modélisation et la prédiction de l'indice de traction (Tidx) en fonction du degré de polymérisation (DP_v) pour les différents niveaux de température appliquée.

III.3.2 Modélisation de l'indice de traction (Tidx) en fonction de degré de polymérisation (DP_v)

Une régression simple est proposée pour la modélisation de l'indice de traction. Sous la forme suivante :

$$\text{Tidx\%(X)} = 99,99 * X^{12} + 74,20 * X^{11} + 59,19 * X^{10} + 63,32 * X^9 + 39,46 * X^8 + 32,15 * X^7 + 33,27 * X^6 + 29,87 * X^5 + 19,09 * X^4 + 24,57 * X^3 + 16,23 * X^2 + 16,03 * X$$

La figure III.5 représente une comparaison entre l'indice de traction obtenu par la régression (model) en fonction de degré de polymérisation et l'indice de traction expérimental.

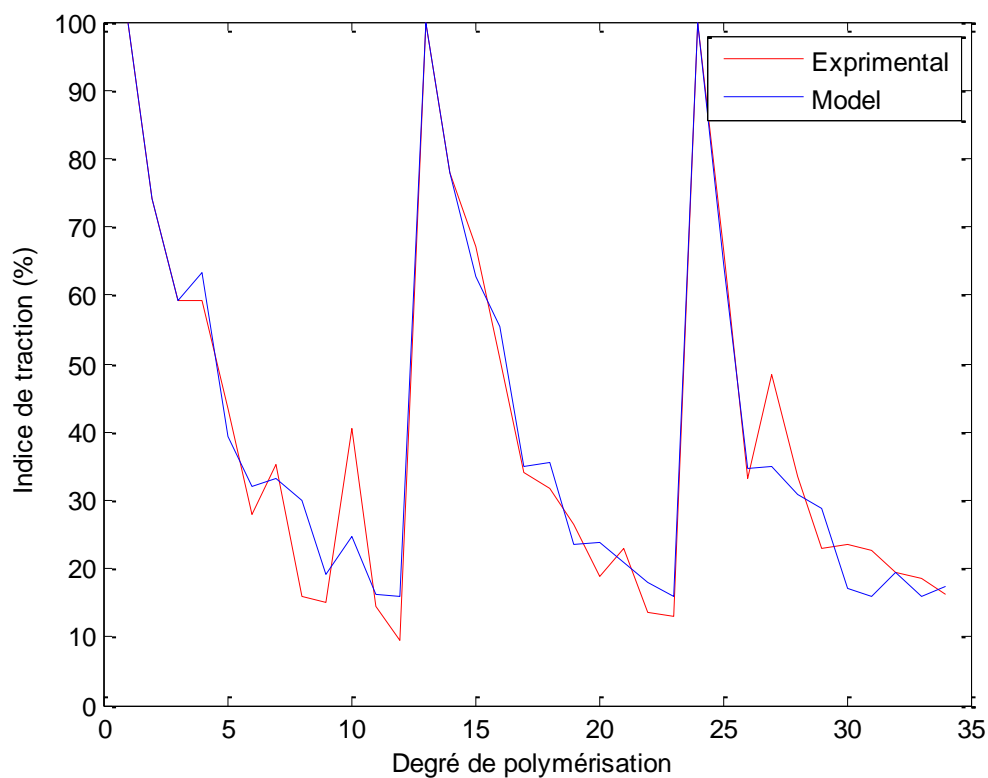


Figure III.5 : Courbe de régression.

Les meilleurs résultats obtenus pour la modélisation et la prédiction de l'indice de traction (T_{idx}) sont décrits dans le tableau III.7

Tableau III.7 : Résultats de modélisation et prédiction de Tidx

Tidx expérimental (%)	Tidx de simulation (%)	Erreurs relatives absolues (%)
100	99,99	0,01
74,2	74,20	0,00
59,15	59,19	0,08
59,07	63,32	7,20
43,51	39,46	9,30
28	32,15	14,82
35,09	33,27	5,19
16	29,87	86,70
14,93	19,09	27,88
40,49	24,57	39,33
14,41	16,23	12,63
9,36	16,03	71,28
100	99,99	0,01
77,89	77,89	0,00
66,96	62,72	6,33
50,86	55,38	8,89
34	34,90	2,63
31,7	35,42	11,74
26,59	23,50	11,62
18,76	23,94	27,63
23,02	20,84	9,49
13,68	18,00	31,57
13,11	16,00	22,08
100	99,99	0,01
66,61	64,36	3,37
33,21	34,77	4,70
48,27	34,85	27,81
33,62	30,98	7,84
22,83	28,95	26,79
23,5	17,25	26,60
22,68	15,94	29,72
19,57	19,55	0,10
18,66	15,96	14,49
16,13	17,27	7,05

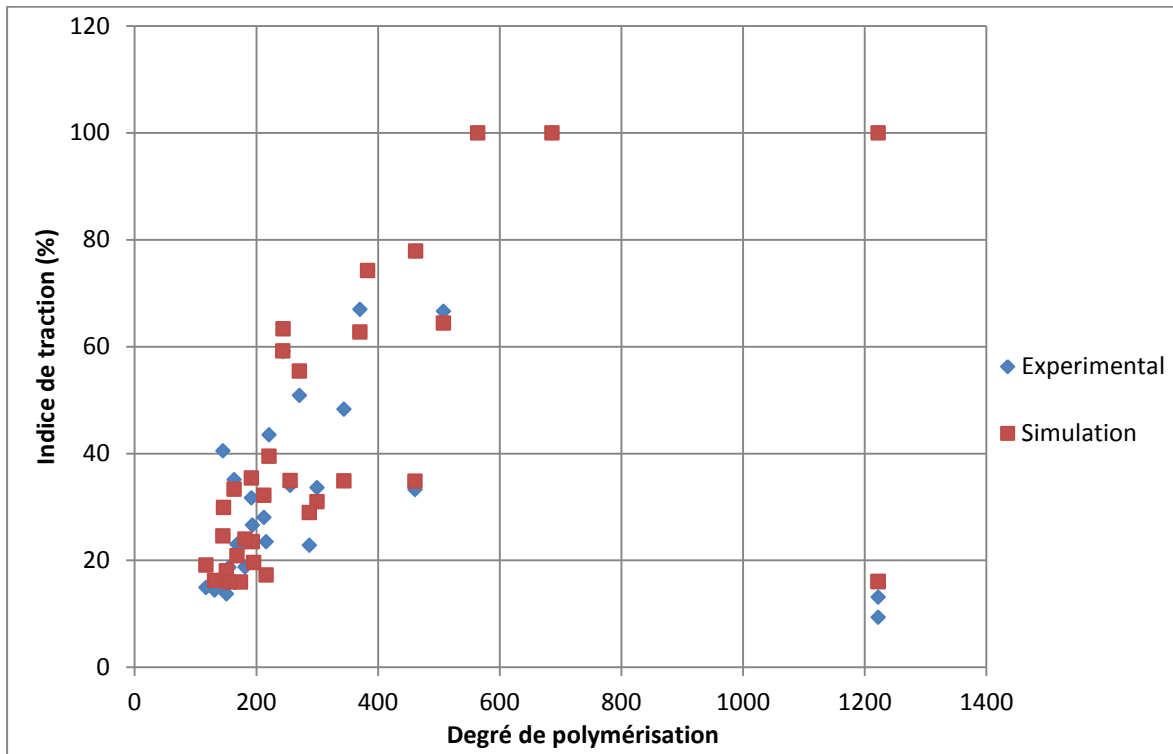


Figure III.6 : Prédiction de l'indice de traction.

III.3.3 Analyse et discussion

Les résultats obtenus ainsi que la valeur de l'erreur : **16,32** qui très faible avec la valeur de coefficient de corrélation de l'ordre **0,9782**, nous a permis de confirmer que ce modèle est acceptable et exploitable.

III.3.4 Diagnostic de l'indice de Traction

La dégradation des propriétés mécaniques de papier a été évaluée en utilisant l'indice de traction (Tidx).

Nous avons exploité les résultats de simulation pour tracer l'évolution de Tidx.

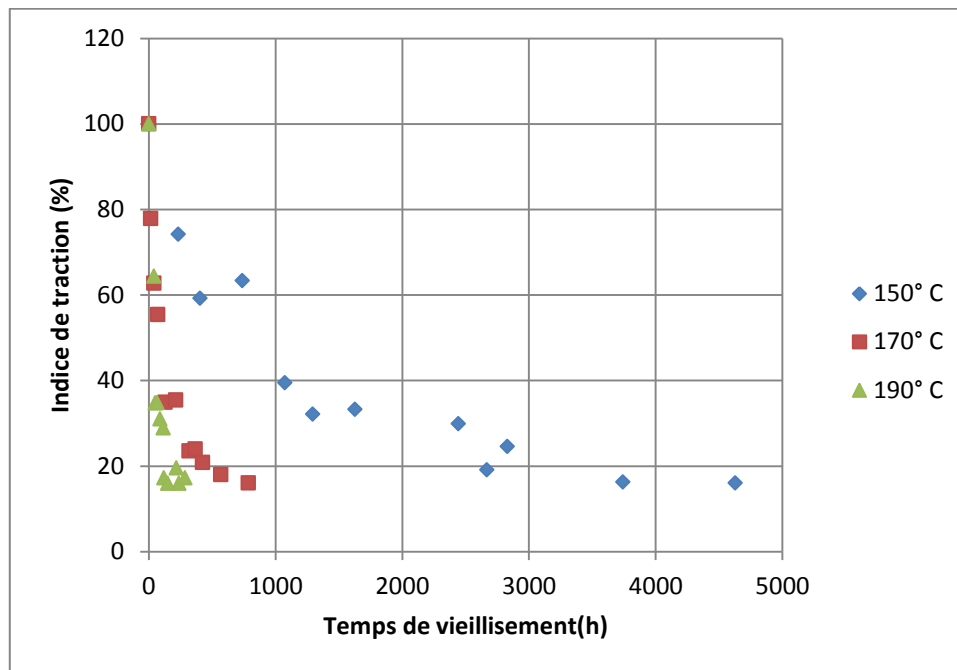


Figure III.7 : Variation de l'indice de traction au cours du vieillissement.

À des températures plus élevées, la dégradation des propriétés mécaniques du papier est plus rapide. Aussi, la température de vieillissement semble avoir un effet sur la dégradation de propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des papiers ont été évaluées pour relier les pourcentages restants de l'indice de traction à leur niveau respectif de dépolymérisation de la cellulose. Les résultats des deux paramètres ont été corrélés dans la Figure III.8

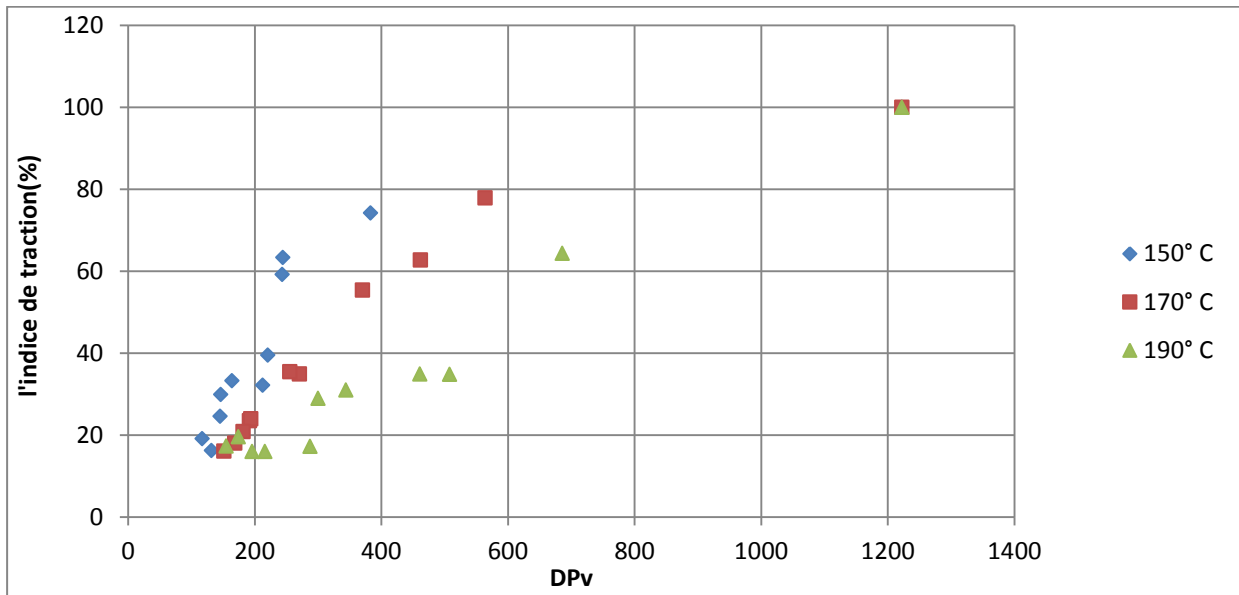


Figure III.8 : Corrélation entre l'indice de traction et le degré de polymérisation.

III.3.5 Analyse et discussion

La figure III.8 montre la bonne corrélation entre le degré de polymérisation et la résistance à la traction de papier, ce dernier essentiellement de la dépolymérisation de la cellulose.

L'indice de traction diminue en proportion directe avec le DPv.

Le taux de perte de résistance à la traction dépend à la température avec une énergie d'activation très similaire à celle du degré de polymérisation de la cellulose.

Le degré de polymérisation et la résistance à la traction sont des tests intrusifs qui détruisent l'échantillon testé et diminuent la quantité du matériau laissé dans l'unité, ce qui pourrait être nocif pour l'unité [38].

Conclusion

Dans ce chapitre, le but principal est le diagnostic du comportement diélectrique du papier Kraft. Il est subdivisé en deux phases.

Dans la première phase, nous avons développé un modèle mathématique par régression multi variables du degré de polymérisation intégrant la technique d'optimisation par la technique PSO. Les résultats obtenus sont satisfaisants et acceptables.

Dans la deuxième phase, nous avons modélisé et prédit l'indice de traction par la régression simple. Les travaux menés nous ont permis de tirer les conclusions suivantes:

La comparaison entre les résultats obtenus par RNA et ceux issus de l'approche mathématique optimisée par PSO, montre que les résultats obtenus par cette dernière sont plus performants. L'approche est plus efficace que les RNA et permet d'obtenir un facteur de corrélation plus élevé.

L'influence de la température sur la dépolymérisation des chaînes de cellulose semble être directe. La perte des propriétés mécaniques du papier cellulosique dépend fortement de la dépolymérisation de la cellulose. Cette dernière est soumise à un vieillissement accéléré dans l'huile de transformateur à partir de 170 °C. Ce qui peut entraîner la fin de vie du transformateur de manière beaucoup plus rapide.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Les transformateurs de puissance sont des éléments clés des systèmes électriques. Leurs défaillances sont très coûteuses, principalement à cause de la non-disponibilité du service électrique qu'elles entraînent. L'évaluation rapide et précise de défauts internes des transformateurs est, en conséquence, un facteur clé d'une exploitation efficace et sûre.

La vie d'un transformateur dépend principalement de celle de son système d'isolation, lequel est constitué de l'huile et du papier. Le papier est utilisé pour isoler les enroulements et divers autres composants. Contrairement à l'huile, il ne peut être facilement remplacé. Les propriétés diélectriques et mécaniques sont les principales propriétés que le papier doit préserver pendant la durée de vie des transformateurs de puissance.

L'objectif visé de ce travail est la modélisation prédictive par le modèle de régression linéaire multiple incluant l'algorithme d'optimisation par essais particuliers, et le diagnostic du comportement diélectrique du papier Kraft utilisé comme isolant solide dans les transformateurs de puissance. Nous avons utilisé, pour cela, les données provenant des mesures effectuées sur du papier Kraft imprégné dans l'huile Luminol sous l'influence de trois niveaux de température appliquée (150°C, 170°C et 190°C).

Une revue de littérature consacrée aux méthodes de modélisation a été élaborée. Cette revue nous a aidés dans l'élaboration de notre approche d'analyse. Elle contribue à une meilleure compréhension.

L'élaboration du modèle mathématique consiste en une modélisation du vieillissement par établissement d'un modèle mathématique incluant l'algorithme d'optimisation par essais particuliers (PSO) pour prédire le degré de polymérisation et une régression simple pour la modélisation et la prédiction de l'indice de traction en fonction du temps de vieillissement à différents niveaux de température appliquée.

A la lumière des résultats obtenus, nous pouvons conclure ce qui suit :

- Les résultats obtenus sont jugés satisfaisants et acceptables. L'approche préconisée et interprétée en termes d'erreur montre une bonne adéquation avec les relevés expérimentaux. Ce qui justifie l'efficacité de cette technique dans le domaine du diagnostic et de la prédiction.

- Nous estimons que le suivi du vieillissement du papier par le modèle de régression optimisé par la méthode d'optimisation PSO est performant et plus efficace que les RNA et permet d'obtenir un facteur de corrélation plus élevé.
- L'effet de la température sur la dépolymérisation de la chaîne cellulosique semble être directe. La dépolymérisation de la cellulose détériore les propriétés mécaniques du papier Kraft. A partir de 170°C, ce dernier est exposé à un vieillissement accéléré dans l'huile. Ce qui peut entraîner la fin de vie du transformateur de manière beaucoup plus rapide.

Ces travaux ouvrent également de nombreuses perspectives. Nous recommandons de poursuivre cette étude par d'autres méthodes d'optimisation telles que les algorithmes génétiques (GA) et autres, ... Le but étant de faire une évaluation comparative afin de choisir la meilleure technique.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] JEAN Sanchez « Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance ». Université de Grenoble, 2011.France.
- [2] BOUDRAA Saliha. Maintenance des transformateurs de puissance par l'analyse de l'huile - Apport de l'intelligence artificielle -. Thèse de doctorat d'université. Batna : Université de Batna2, 2017 p.1.
- [3] Senoussaoui Mohammed El Amine , « Contributions des techniques intelligentes au diagnostic industriel des transformateurs de puissance » thèse de Doctorat Es-Sciences en Electrotechnique, 2019, Université Djillali Liabes, Sidi Belabbes – Algérie
- [4] MADJID Meziani, « Contribution à la modélisation analytico numérique des transformateur de puissance», Université Mouloud Mammri Tizi-ouzou, Algérie, 2011.
- [5] ABB-Group, "Transformer Handbook", Draft. Rev. 02Q, 2004.
- [6] : IEC 60076-1. Transformateurs de puissance - Partie 1 : Généralités, 2000.
- [7] Sitelec. Les transformateurs. [En ligne]. Disponible sur : https://sitelec.org/download_page.php?filename=cours/transformateurs_pms.pdf. (Page consultée le 7 Juin 2021)
- [8] R. P. Bouchard, G. Olivier, Électrotechnique, Presses internationales Polytechnique, 1999.
- [9] A. Schenk, "Surveillance continu des transformateurs de puissance par réseau de neurone", Thèse de Doctorat de l'Ecole Polytechnique Fédéral de Lausanne 2001.
- [10] N. Berger, Liquides isolants en électrotechnique, présentation générale, Techniques de l'Ingénieur , D2 470, France,5-2002.
- [11] R. P. Bouchard, G. Olivier, Électrotechnique, Presses internationales Polytechnique, 1999.
- [12] BOUDRAA Saliha. Maintenance des transformateurs de puissance par l'analyse de l'huile - Apport de l'intelligence artificielle -. Thèse de doctorat d'université. Batna : Université de Batna2, 2017 p.30.
- [13] T.Noda, H. Nakamoto, S.Yokoyama, «Accurate Modeling of Core-Type Distribution Transformers for Electromagnetic Transient Studies”, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 17, No. 4, October 2002.
- [14] Wikipédia. Transformateur de puissance. [En ligne]. Disponible sur : https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur_de_puissance_-_Défauts_et_Protections
- [15] BOUDRAA Saliha. Maintenance des transformateurs de puissance par l'analyse de l'huile - Apport de l'intelligence artificielle -. Thèse de doctorat d'université. Batna : Université de Batna2, 2017 p.33.

- [16] BOUDRAA Saliha. Maintenance des transformateurs de puissance par l'analyse de l'huile - Apport de l'intelligence artificielle -. Thèse de doctorat d'université. Batna : Université de Batna2, 2017 p.32
- [17] BOUDRAA Saliha. Maintenance des transformateurs de puissance par l'analyse de l'huile - Apport de l'intelligence artificielle -. Thèse de doctorat d'université. Batna : Université de Batna2, 2017 p.35
- [18] BOUDRAA Saliha. Maintenance des transformateurs de puissance par l'analyse de l'huile - Apport de l'intelligence artificielle -. Thèse de doctorat d'université. Batna : Université de Batna2, 2017 p.33
- [19] IEC 60076-1. Transformateurs de puissance - Partie 1 : Généralités, 2000
- [20] : T.Noda, H. Nakamoto, S.Yokoyama, «Accurate Modeling of Core-Type Distribution Transformers for Electromagnetic Transient Studies», IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 17, No. 4, October 2002
- [21] L. Juan, Velásquez Contreras, A. Miguel Sanz-Bobi, Samuel Galceran, Hyder Docarmo, "Comprehensive Asset Management Approach: Application to Power Transformers", International Congress on Electricity Distribution CIDEL, Argentine, 2010.
- [22] IEEE 62 Guide for Diagnostic Field Testing of Electric Power Apparatus - Part 1: Oil Filled Power Transformers, Regulators, and Reactors, 1995
- [23] Abdelghafour Bouaicha, "Application de techniques modernes au diagnostic des transformateurs de puissance", Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi/Canada, 2015.
- [24] Facilities Instructions, Standards, and Techniques (FIST) Volume 3-30, Transformer diagnostic, 2000, Bureau of Reclamation, available at www.usbr.gov, select Programs, Power, Reports and Data, Power Documents
- [25] A. Schenk, "Surveillance continu des transformateurs de puissance par réseau de neurone", Thèse de Doctorat de l'Ecole Polytechnique Fédéral de Lausanne 2001.
- [26] Abdelghafour Bouaicha, "Application de techniques modernes au diagnostic des transformateurs de puissance", Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi/Canada, 2015.
- [27] A. K. Jonscher, "Universal Dielectric Response", IEEE Electrical Insulation Magazine, Volume: 6, Issue: 2, pp. 16-22, Mar/Apr 1990.
- [28] B. Hochard. Le transformateur de puissance. Technique et documentation (Lavoisier), Paris, 1988.
- [29] https://fr.abcdef.wiki/wiki/Polynomial_regression
- [30] Kennedy J. and Eberhart R. Particle Swarm Optimization, In Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, vol. 4, 1995.

- [31] 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.
- [32] L. Benameur, “ Contribution à l’optimisation complexe par des techniques de swarm intelligence ”. Thèse de doctorat, Faculté des Sciences de Rabat, 13 mai 2010.
- [33] A. Toumi, “ Restauration adaptative d’image par les methodes intelligentes”. Thèse de doctorat, Université de Biskra, 5 février 2013.
- [34] Kennedy J. & Eberhart R.C., Swarm Intelligence, Morgan Kaufman Publishers, Academic Press, 2001.
- [35] A. Eldor, “ Perfectionnement des algorithmes d’Optimisation par Essaim Particulaire. Applications en segmentation d’images et en électronique”. Thèse de doctorat, Université de Paris EST, 15 décembre 2012.
- [36] HAMDI Ahmed. Contribution au diagnostic des transformateurs à isolation mixte utilisant les techniques modernes. Thèse de doctorat d'université. Laghouat : Université Amar Telidji, 2020, p. 199.
- [37] Réf : [NILLY Didier, « Le diagnostic d'état des transformateurs de puissance » , mémoire , CONSERVATOIRE NATIONAL DES ARTS ET METIERS PROVENCE – Alpes– Côte D’Azur , France , Soutenu le 12 janvier 2017]
- [38] ARROYO FERNÁNDEZ Oscar Henry, « Étude des corrélations entre les propriétés mécaniques des papiers et les traceurs chimiques issus de son vieillissement pour surveiller l’état de l’isolation solide des transformateurs de puissance ». Thèse de Doctorat d'Université. Québec : Université du Québec à Chicoutimi, 2017]
- [39] KANUMURI Deepak, SHRAMA Veena et RAHI O. P. Analysing using various approaches for residual life estimation of power transformers. 2019, 11, 2, p. 396-397.
- [40] BENYAMMI Belhadj. Modélisation prédictive et diagnostic du diélectrique d’un transformateur de puissance. Mémoire de master. Laghouat : Université Amar Telidji,2021.