



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



## **Université Amar Telidji - Laghouat**

**FACULTE : Technologie**

**DEPARTEMENT : Electrotechnique**

### **MEMOIRE DE MASTER**

**Présenté par : BENYAMMI Belhadj**

**DOMAINE : Sciences et techniques**

**FILIERE : Electrotechnique**

**OPTION : Electrotechnique Industrielle**

### **Thème**

**Modélisation prédictive et diagnostic du diélectrique  
d'un transformateur de puissance**

#### **Jury de soutenance :**

<b>Nom et Prénom</b>	<b>Grade</b>	<b>Qualité</b>
AMEUR Aissa	Professeur	Président
SEGHIER Tahar	Professeur	Examinateur
MAHI Djillali	Professeur	Encadreur
BESSEDIK Sid Ahmed	MCA	Co-Encadreur

**Promotion : Juillet 2021**

## ***Remerciements***

*Je tiens à exprimer mes meilleurs sentiments de gratitude au directeur de mon mémoire, le Professeur **D. MAHI** à l'université Amar Telidji de Laghouat, qui m'a fait l'honneur de diriger et suivre mon travail par sa confiance, sa qualité d'encadrement, son soutien moral et ses conseils précieux. Je tiens à lui exprimer mon respect.*

*Mes plus vifs remerciements sont adressés à Monsieur **S. BESSEDIK**, Maître de Conférences (A) à l'université Amar Telidji de Laghouat, qui m'a suivi à la partie de simulation, et qui s'est toujours montré patient, à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce travail.*

*Je remercie également Monsieur **A. AMEUR**, Professeur à l'université Amar Telidji de Laghouat, d'avoir été président du jury de soutenance.*

*Mes sincères remerciements sont adressés à Monsieur **T. SEGHIER**, Professeur à l'université de Amar Telidji de Laghouat, pour l'honneur qu'il a fait en acceptant de s'associer la commission d'examen et pour l'intérêt qu'il y porté.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à tous mes enseignants durant ma carrière universitaire, pour leurs générosités et leurs conseils dont ils ont su faire preuve malgré leurs multiples responsabilités. Je les remercie vivement.*

*Enfin, j'adresse mes plus sincères remerciements à ma famille, mes proches, mes collègues, mes amis et tous ceux qui ont contribué de prêt ou de loin à l'aboutissement de ce travail, que ce soit par des idées ou par des encouragements.*

*Merci à tous et à toutes.*

## النمذجة التنبؤية وتشخيص العزل الكهربائي في محول الطاقة

### ملخص:

في هذا العمل، قمنا بتطبيق تقنيات الذكاء الاصطناعي من اجل تشخيص العزل الكهربائي لورق الكرافت المشرب في زيت Luminol والمستعمل كعازل صلب في محولات الطاقة.

اثبتت دراسات سابقة وجود علاقة ارتباط قوية بين تحليل مادة السليلوز وفقدان الخصائص الميكانيكية لورق Kraft. بالاعتماد على هذه الدراسات، قمنا بتطوير نموذجين من الشبكات العصبية الاصطناعية (ANN) من نوع perceptron (MLP) multicouches من اجل التنبؤ بمؤشر الشد لهذا النوع من الورق. النموذج الأول يهتم بنمذجة وتنبؤ درجة البلمره (DP<sub>v</sub>) بدلالة ثلاثة عوامل شيخوخة: زمن الشيخوخة، درجة حرارة التشغيل ونسبة تركيز المركب الكيميائي 2-furfural في زيت المحول. بينما النموذج الثاني يهتم بنمذجة وتنبؤ مؤشر الشد (Tidx) بدلالة DP<sub>v</sub>. نتائج المحاكاة كانت مشجعة ومقبولة.

من خلال مقارنة نتائج القياس الحقيقية والنتائج المقدره من خلال النموذجين العصبيين، لاحظنا تكيفا جيدا ودقة عالية للنموذجين مما يؤكد على القدرة التعليمية الكبيرة للشبكات العصبونية الاصطناعية من ناحية واهمية تطبيق الذكاء الاصطناعي في مجال التنبؤ والتشخيص من ناحية أخرى.

يوضح تشخيص ورق الكرافت ان فقدان الخصائص الميكانيكية يعتمد على تحليل مادة السليلوز. هذه الأخيرة تتعرض لشيخوخة متسارعة في زيت المحولات اعتبارا من 170 درجة مئوية.

**كلمات مفتاحية:** محول الطاقة، سلوك العزل الكهربائي، النمذجة، التنبؤ، التشخيص، الذكاء الاصطناعي.

# **Modélisation prédictive et diagnostic du diélectrique d'un transformateur de puissance**

## **Résumé :**

Dans ce travail, nous avons appliqué les techniques de l'intelligence artificielle pour le diagnostic diélectrique du papier Kraft imprégné dans l'huile Luminol et utilisé comme isolant solide dans les transformateurs de puissance.

Des études récentes montrent qu'il existe une forte corrélation entre la dépolymérisation de la cellulose et la perte des propriétés mécaniques du papier Kraft. Sur la base de ces études, nous avons développé deux approches neuronales (ANN) de type perceptron multicouches (MLP) afin de prédire la résistance à la traction de ce type de papier. La première approche consiste à modéliser et prédire le degré de polymérisation ( $DP_v$ ) en fonction de trois paramètres de vieillissement : le temps de vieillissement, la température d'opération et par rapport à la concentration du composé chimique 2-furfural dans l'huile du transformateur. Tandis que la deuxième approche consiste à modéliser et prédire l'indice de traction ( $T_{idx}$ ) en fonction du  $DP_v$ . Les résultats de simulation ont été satisfaisants et acceptables.

En comparant les résultats réels de mesure et les résultats estimés par les deux approches neuronales, nous avons remarqué une bonne adaptation et une précision élevée pour les deux modèles ce qui confirme la grande capacité d'apprentissage des réseaux de neurones artificiels d'une part et l'importance d'appliquer l'intelligence artificielle dans le domaine de prédiction et du diagnostic d'une autre part.

Diagnostic du papier Kraft montre que la perte des propriétés mécaniques dépendue à la dépolymérisation de la cellulose. Cette dernière est soumise à un vieillissement accéléré dans l'huile du transformateur à partir de 170 °C.

***Mots-Clés :** Transformateur de puissance, Comportement diélectrique, Modélisation, Prédiction, Diagnostic, Intelligence artificielle.*

# Predictive modeling and diagnosis of the dielectric of a power transformer

## Abstract:

In this work, we applied the artificial intelligence techniques to diagnose the dielectric of Kraft paper impregnated in Luminol oil and used as a solid insulator in power transformers.

Recent studies show that there is a strong correlation between the depolymerization of cellulose and losing the mechanical properties of Kraft paper. Based on these studies, we have developed two neural approaches (ANN) of the multilayers perceptron (MLP) in order to predict the tensile strength of this type of paper. The first approach consists in modeling and predicting the degree of polymerization ( $DP_v$ ) as a function of three aging parameters: aging time, operating temperature and relative to the concentration of chemical compound 2-furfural in transformer oil. However, the second approach consists in modeling and predicting the tensile index ( $Tidx$ ) as a function of  $DP_v$ . The simulation results were satisfied and acceptable.

By comparing the real measurement results and the results estimated by the two neural approaches, we noticed a good adaptation and a high precision for the two models which confirms the great learning capacity of the artificial neural networks on one side and the importance of applying the artificial intelligence in the field of prediction and diagnosis on the other side.

Diagnosis of Kraft paper shows that the loss of mechanical properties depends of the depolymerization of cellulose. The paper is subjected to an accelerating aging in transformer oil from 170 °C.

**Key words:** *Power transformer, dielectric behavior, Modulization, Prediction, Diagnostic, Artificial intelligence.*

## Table des matières

Résumé	ii
Table des matières	iv
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	x
Liste des abréviations et des symboles	xi
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b>	<b>1</b>

### **CHAPITRE I : PRÉSENTATION GÉNÉRALE DES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE ET LEURS SYSTÈMES D'ISOLATION**

I.1 Introduction	4
I.2 Définition d'un transformateur de puissance	4
I.3 Rôle des transformateurs de puissance dans un réseau électrique	5
I.4 Classification des transformateurs de puissance	5
I.5 Constitution des transformateurs de puissance	6
I.5.1 Partie active	6
I.5.1.1 Circuit magnétique	6
I.5.1.2 Enroulements primaires et secondaires	7
I.5.2 Composants associés	8
I.5.2.1 Bornes de traversée	8
I.5.2.2 Changeur de prises	9
I.5.2.3 Cuve	10
I.5.2.4 Conservateur	10
I.5.2.5 Capteurs divers	10
I.5.3 Système d'isolation	10
I.5.4 Système de refroidissement	11
I.6 Protection des transformateurs de puissance	13
I.7 Types des transformateurs de puissance	13
I.7.1 Transformateurs immergés	13
I.7.2 Transformateurs secs	14

I.7.3 Autotransformateur	15
I.8 Couplage des transformateurs de puissance	15
I.9 Systèmes d'isolation des transformateurs de puissance	16
I.9.1 Isolation liquide	17
I.9.1.1 Principaux types d'isolants liquides	17
I.9.1.1.1 Huiles minérales	17
I.9.1.1.2 Huiles esters synthétiques	19
I.9.1.1.3 Huiles silicones	20
I.9.1.2 Choix d'un liquide isolant pour une application spécifique	20
I.9.1.3 Vieillessement des huiles	21
I.9.2 Isolation solide	22
I.9.2.1 Principaux types d'isolation solide	23
I.9.2.2 Propriétés des papiers isolants	24
I.9.2.2.1 Propriétés diélectriques	24
I.9.2.2.2 Propriétés chimiques	25
I.9.2.2.3 Propriétés mécaniques	26
I.9.2.3 Vieillessement des papiers celluloses	26
I.9.3 Isolation mixte Huile – Papier	27
I.9.3.1 Différentes configurations du système d'isolation des transformateurs	27
I.9.3.2 Vieillessement des complexes huiles – papiers	28
I.10 Conclusion	29

## **CHAPITRE II : GÉNÉRALITÉS SUR LES RÉSEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS**

II.1 Introduction	31
II.2 Réseaux de neurones artificiels (ANN)	31
II.3 Types de réseaux de neurones	32
II.3.1 Réseaux de neurones non bouclés	32
II.3.2 Réseaux de neurones bouclés	33
II.4 Apprentissage des réseaux de neurones	34
II.5 Algorithme de rétropropagation du gradient	35
II.6 Conception d'un réseau de neurones artificiel	36
II.7 Domaines d'application des réseaux de neurones	37

II.8 Avantages des réseaux de neurones	38
II.9 Inconvénients des réseaux de neurones	39
II.10 Limites d'application des réseaux de neurones	39
II.11 Conclusion	40

## **CHAPITRE III : APPLICATION DES RÉSEAUX DE NEURONES ARTIFICIELS DANS LE DIAGNOSTIC DES TRANSFORMATEURS**

III.1 Introduction	42
III.2 Présentation de la base de données utilisée	42
III.3 Déroulement des étapes de la modélisation et la prédiction	45
III.4 Logiciel de simulation	46

### **Partie 1 : Modélisation et prédiction de degré de polymérisation**

III.1.1 Introduction	47
III.1.2 Préparation des entrées/sorties	47
III.1.3 Élaboration de la structure du réseau	47
III.1.4 Résultats de simulation	49
III.1.5 Analyse et discussion des résultats	52

### **Partie 2 : Modélisation et prédiction d'indice de traction**

III.2.1 Introduction	53
III.2.2 Préparation des entrées/sorties	53
III.2.3 Élaboration de la structure du réseau	53
III.2.4 Résultats de simulation	55
III.2.5 Analyse et discussion des résultats	58

### **Partie 3 : Diagnostic du papier isolant du transformateur de puissance**

III.3.1 Introduction	59
III.3.2 Diagnostic de degré de polymérisation	59
III.3.3 Diagnostic d'indice de traction	61

III.5 Conclusion	63
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b>	<b>64</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>66</b>

## Liste des figures

### Chapitre I

<b>Figure I.1</b> : Schéma équivalent monophasé d'un transformateur réel	4
<b>Figure I.2</b> : Circuit magnétique et disposition des enroulements	6
<b>Figure I.3</b> : Différentes configurations du circuit magnétique	7
<b>Figure I.4</b> : Bornes de traversée de 15 à 38 kV isolées dans l'huile	8
<b>Figure I.5</b> : Bornes de traversée 35 kV	8
<b>Figure I.6</b> : Schéma d'un changeur de prises	9
<b>Figure I.7</b> : Constitution d'un transformateur de puissance	12
<b>Figure I.8</b> : Transformateur immergé dans l'huile	14
<b>Figure I.9</b> : Transformateur de type sec	14
<b>Figure I.10</b> : Schéma d'un autotransformateur	15
<b>Figure I.11</b> : Différents types de couplage des transformateurs de puissance	16
<b>Figure I.12</b> : Constitution majoritaire des pétroles	18
<b>Figure I.13</b> : Papier Kraft	22

### Chapitre II

<b>Figure II.1</b> : Structure d'un neurone formel	32
<b>Figure II.2</b> : Architecte du perceptron multicouches	33
<b>Figure II.3</b> : Réseau de neurones bouclé	34

### Chapitre III

#### Partie 1

<b>Figure III.1.1</b> : Structure du réseau ANN_1	47
<b>Figure III.1.2</b> : Régression de l'approche ANN_1	48
<b>Figure III.1.3</b> : Performances de l'approche ANN_1	49
<b>Figure III.1.4</b> : Modélisation de $DP_v$	51
<b>Figure III.1.5</b> : Prédiction de $DP_v$	51

## **Partie 2**

<b>Figure III.2.1</b> : Structure du réseau ANN_2	53
<b>Figure III.2.2</b> : Régression de l'approche ANN_2	54
<b>Figure III.2.3</b> : Performances de l'approche ANN_2	55
<b>Figure III.2.4</b> : Modélisation de Tidx	57
<b>Figure III.2.5</b> : Prédiction de Tidx	57

## **Partie 3**

<b>Figure III.3.1</b> : Corrélation entre le degré de polymérisation de la cellulose et la durée de vie restante du transformateur	60
<b>Figure III.3.2</b> : Évolution de l'indice de traction dans le temps	61
<b>Figure III.3.3</b> : Influence de la température sur la valeur d'indice de traction	62

# Liste des tableaux

## Chapitre I

<b>Tableau I.1</b> : Liste des composants constituant un transformateur de puissance	12
<b>Tableau I.2</b> : Comparaison des paramètres typiques des principaux types des huiles isolantes	21
<b>Tableau I.3</b> : Choix du liquide isolant pour différents types des transformateurs	21
<b>Tableau I.4</b> : Propriétés diélectriques d'un papier isolant neuf non imprégné	24
<b>Tableau I.5</b> : Corrélation entre DP et les forces mécaniques du papier isolant	25
<b>Tableau I.6</b> : Avantages et inconvénients de différentes méthodes de diagnostics du papier	29

## Chapitre III

<b>Tableau III.1</b> : Résultats d'essai de traction à $T = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$	44
<b>Tableau III.2</b> : Résultats d'essai de traction à $T = 170\text{ }^{\circ}\text{C}$	44
<b>Tableau III.3</b> : Résultats d'essai de traction à $T = 190\text{ }^{\circ}\text{C}$	45

### Partie 1

<b>Tableau III.1.1</b> : Résultats de modélisation et prédiction de $DP_v$	50
<b>Tableau III.1.2</b> : Performances obtenues pour la modélisation et la prédiction de $DP_v$	52

### Partie 2

<b>Tableau III.2.1</b> : Résultats de modélisation et prédiction de $T_{idx}$	56
<b>Tableau III.2.2</b> : Performances obtenues pour la modélisation et la prédiction de $T_{idx}$	58

### Partie 3

<b>Tableau III.3.1</b> : Estimation de la durée de vie écoulée et restante du transformateur étudié	60
---	----

## Liste des abréviations et des symboles

<b>CEI</b>	Commission Électrotechnique Internationale
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>ASTM</b>	American Society for Testing and Materials
<b>IREQ</b>	Institut de recherche d'Hydro-Québec
<b>DP</b>	Degré de polymérisation
<b>DGA</b>	Dissolved gas analysis
<b>ANN</b>	Artificial neural network
<b>HT</b>	Haute tension
<b>BT</b>	Basse tension
<b>PCB</b>	Polychlorobiphényles
<b>TUK</b>	Thermally upgraded Kraft
<b>UV</b>	Ultraviolet
<b>DF</b>	Degradation factor
<b>IA</b>	Intelligence artificielle
<b>MLP</b>	Multilayer perceptron
<b>ALVINN</b>	Autonomous land vehicle in a neural network
<b>SI</b>	Système international
<b>DP<sub>v</sub></b>	Degré de polymérisation viscosimétrique moyen
<b>2-FAL</b>	2-furfuraldéhyde
<b>Tidx</b>	Indice de traction
<b>HPLC</b>	Chromatographie en phase liquide à haute performance
<b>Trainlm</b>	Fonction rétropropagation
<b>MSE</b>	Mean-squared error
<b>Tansig</b>	Fonction tangente sigmoïde
<b>Purelin</b>	Fonction linéaire
<b>IT</b>	Indice de traction
<b>FL</b>	Fuzzy logic
<b>GA</b>	Genetic algorithms
<b>PSO</b>	Particles swarm optimization
<b><i>m</i></b>	Rapport de transformation

$E_{20}$	Tension du secondaire à vide
$E_1$	Tension du primaire
$\epsilon_r$	Permittivité relative
$\sigma$	Conductivité électrique
$\tan \delta$	Facteur de dissipation diélectrique
$E$	Rigidité diélectrique
$U_i$	Somme pondérée des entrées du neurone $i$
$w_{ij}$	Poids de la connexion reliant l'entrée $j$ au neurone $i$
$x_i$	Entrée $j$ connectée au neurone $i$
$b_i$	Seuil interne du neurone $i$
$O_i$	Sortie du neurone $i$
$g$	Fonction d'activation de la sortie du neurone $i$
$a$	Fonction d'activation d'un neurone
$E_{abs}$	Erreur de calcul absolue d'un réseau de neurones
$\psi$	Fonction absolue
$Y_k$	Sortie estimée d'un réseau de neurones
$d_k$	Sortie exacte d'un réseau de neurones
$E_{rel}$	Erreur relative de calcul s'exprime en (%)
$J(t)$	Critère de la performance à l'instant $t$
$d_i(t)$	$i^{\text{ème}}$ sortie désirée à l'instant $t$

# **INTRODUCTION GÉNÉRALE**

Le transformateur de puissance joue un rôle indispensable dans les réseaux électriques, c'est l'élément le plus cher et le plus critique. Les pertes majeures d'une mise hors service de cet équipement peuvent conduire à des situations catastrophiques de conséquences : techniques, économiques affectant la stabilité des réseaux électriques, et peuvent aussi conduire à des arrêts de systèmes coûteux, sans compter les coûts associés à la réparation ou à la maintenance. Cela exige des méthodes préventives pour prédire le défaut dès sa naissance et un programme de maintenance approprié pour qu'il fonctionne correctement durant plusieurs d'années.

Les transformateurs de puissance et autres dispositifs électrotechniques, comme les condensateurs et les disjoncteurs de puissance, nécessitent un système d'isolation permet d'isoler les différentes parties internes et d'assurer le transfert de la chaleur. Un système d'isolation peut être : gazeux, solide, liquide ou mixte : gazeux – solide ou liquide – solide. Dans le cas des transformateurs de puissance, l'isolation liquide – solide est la plus répandue.

Les systèmes d'isolation dans les transformateurs de puissance sont soumis à plusieurs contraintes de type : électrique, thermique, chimique, mécanique et environnemental. Ces contraintes sont la première source des défauts internes qui se développent lentement provoquant une dégradation et un vieillissement des isolants.

Le papier cellulosique est utilisé comme isolant solide dans les transformateurs de puissance. La perspective idéale est que les propriétés physiques et chimiques restent inchangées pendant la vie utile des transformateurs. Cependant, ce n'est malheureusement pas le cas sur le terrain ; le papier imprégné d'un fluide isolant, vieillit et perd graduellement certaines de ses propriétés. Les propriétés diélectriques et mécaniques sont les principales propriétés que le papier doit préserver pendant la durée de vie des transformateurs de puissance. Les propriétés diélectriques du papier restent presque intactes pendant les différents stades du vieillissement de la cellulose et ne favorisent pas la défaillance du transformateur. Par contre, les performances mécaniques du papier sont altérées dues à la dépolymérisation de la cellulose, conduisant ainsi à un matériau fragilisé. [1]

Des études expérimentales montrent qu'il existe une corrélation entre le degré de polymérisation (DP) et les propriétés mécaniques mesurées par des essais de traction.

Plusieurs méthodes et techniques pour la surveillance et le diagnostic du comportement diélectrique de papiers isolants des transformateurs de puissance sont utilisées et développées.

Parmi lesquelles, on trouve : mesure de degré de polymérisation (DP), analyse du furane, analyse des gaz dissous dans l'huile (DGA) et méthanol comme un nouvel traceur chimique pour la dégradation des papiers [2].

Au cours de ces dernières années, des techniques de prédiction modernes telles que les réseaux de neurones artificiels (ANN) ont été utilisées dans des applications industrielles, à titre d'exemple : prédiction de vieillissement des papiers cellulose sous l'effet de la température.

L'objectif de notre travail est la modélisation prédictive et le diagnostic du comportement diélectrique du papier Kraft utilisé comme isolant solide dans les transformateurs de puissance à base des techniques de l'intelligence artificielle.

Le manuscrit s'articule autour de trois chapitres :

Le premier chapitre présente de manière générale les transformateurs de puissance et leurs systèmes d'isolation : liquides, solides et mixtes liquides – solides ainsi les propriétés de chaque type.

Le deuxième chapitre introduit les notions fondamentales des réseaux de neurones artificiels, notamment : leur conception, leurs domaines d'application, ainsi leurs avantages et leurs inconvénients.

Le troisième chapitre est consacré à l'application des réseaux de neurones artificiels dans le diagnostic du comportement diélectrique de papier en cellulose utilisé dans les transformateurs de puissance. Pour cela, nous avons subdivisé ce chapitre en trois parties :

- Partie 1 : Modélisation et prédiction de degré de polymérisation en fonction de trois paramètres : le temps de vieillissement, le niveau de la température appliquée et la valeur de 2-FAL ;
- Partie 2 : Modélisation et prédiction de l'indice de traction en fonction du degré de polymérisation ;
- Partie 3 : Diagnostic du papier isolant du transformateur de puissance.

Les résultats obtenus sont présentés et discutés.

Nous terminons notre étude par une conclusion générale qui synthétise les apports théoriques validés expérimentalement, et ouvre de nouvelles perspectives.

**CHAPITRE I : PRÉSENTATION  
GÉNÉRALE DES  
TRANSFORMATEURS DE  
PUISSANCE ET LEURS SYSTÈMES  
D'ISOLATION**

## I.1 Introduction

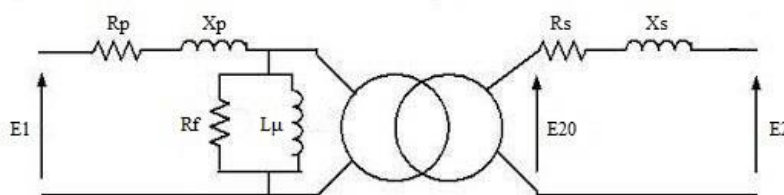
Les transformateurs de puissance jouent un rôle important dans les réseaux électriques, ils assurent la transformation et le transit de puissance. On les retrouve dans différents types d'applications : dans les réseaux de transmission électrique, dans la distribution électrique, dans les usines en amont de fours électriques notamment et dans les trains. Chacun répondant à des contraintes et des usages très différents.

Ces équipements nécessitent un système d'isolation interne qui peut être : gazeux, liquide, solide ou mixte (solide – liquide) et (solide – gazeux), permet d'isoler et protéger les différentes parties interne de ces équipements.

Ce chapitre va introduire les notions nécessaires sur les éléments constitutifs d'un transformateur de puissance en insistant tout particulièrement sur les systèmes d'isolation utilisés en mettant l'accent sur le système d'isolation complexe : liquide – solide.

## I.2 Définition d'un transformateur de puissance

Un transformateur est un élément statique qui transfère de l'énergie électrique entre deux circuits grâce à l'induction électromagnétique. Les deux circuits sont donc séparés électriquement, galvaniquement mais couplés magnétiquement. Un transformateur de puissance peut être : monophasé ou triphasé de divers couplages : étoile, triangle ou zigzag. [3]



**Figure I.1** : Schéma équivalent monophasé d'un transformateur réel [4]

La figure (I.1) représente le schéma équivalent monophasé d'un transformateur réel. Où la résistance et l'inductance primaires sont représentées par  $R_p$  et  $X_p$ , la résistance et l'inductance secondaires sont représentées par  $R_s$  et  $X_s$  respectivement. L'inductance magnétisante est représentée par  $L_\mu$  et les pertes fer sont représentées par  $R_f$ . Ainsi que la tension au primaire et au secondaire est représentée par  $E_1$  et  $E_2$ .  $E_{20}$  représente la tension au secondaire à vide.

### **I.3 Rôle des transformateurs de puissance dans un réseau électrique**

Tous les réseaux électriques sont équipés par des transformateurs de puissance. Ils représentent les organes les plus coûteux et ils sont très importants pour le transport et la distribution de l'énergie électrique [5].

Du côté réseau électrique, le rôle d'un transformateur de puissance est d'assurer un transport de l'énergie électrique sur des longues distances en réduisant de façon significative les pertes d'énergie par élévation de la tension électrique à la sortie des centrales électriques.

Du côté consommateurs, le rôle d'un transformateur de puissance est d'abaisser la tension et d'être ramenée aux valeurs désirées.

Du côté de protection électrique, le transformateur est utilisé pour séparer deux parties d'un réseau électrique de même tension et de même courant. Ce type d'isolation galvanique a pour but d'assurer la protection du réseau électrique contre les perturbations parasites.

Dans le cas où toutes les pertes et les fuites de flux magnétique sont négligées, le rapport de la tension du secondaire à vide sur la tension du primaire détermine totalement le rapport de transformation du transformateur :

$$m = \frac{E_{20}}{E_1} \quad (\text{I.1})$$

- Pour  $m > 1$  : on parle d'un transformateur élévateur de tension ;
- Pour  $m < 1$  : on parle d'un transformateur abaisseur de tension ;
- Pour  $m = 1$  : on parle d'un transformateur d'isolement.

### **I.4 Classification des transformateurs de puissance**

La Commission Electrotechnique Internationale (CEI) classe les transformateurs de puissance immergés dans l'huile en trois catégories en fonction de la puissance apparente [6] :

- **Transformateur de distribution** : ont pour mission de faire l'interface entre l'utilisateur et le réseau de distribution. Leur puissance nominale est de 2500 kVA en triphasé (ou 833 kVA par noyau monophasé) et la haute tension a une valeur nominale qui ne dépassant pas 33 kV ;

- **Transformateur de moyenne puissance :** assurent généralement l'interconnexion entre les réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique, leur puissance est au-delà de 2,5 MVA et ne dépasse pas 100 MVA dans le cas de transformateurs triphasés ;
- **Transformateurs de grande puissance :** sont des unités dont la puissance nominale dépasse 100 MVA en triphasé. Les installations de ce type sont utilisées pour élever la tension à la sortie des générateurs afin d'injecter la puissance dans le réseau de transport de l'énergie électrique.

## **I.5 Constitution des transformateurs de puissance**

Les réseaux électriques sont plus en plus en croissance, ce qui nécessite l'évolution des transformateurs de puissance ; cette évolution touche la conception et la construction de ces équipements. Plusieurs facteurs à prendre en considération lors de la conception d'un transformateur de puissance, notamment : le poids, les dimensions géométriques, l'élimination des pertes de chaleur, la détermination des points chauds locaux résultant des champs magnétiques élevés et autres. [6]

### **I.5.1 Partie active**

#### **I.5.1.1 Circuit magnétique**

Le circuit est composé d'un noyau magnétique constitué de tôles d'acier au silicium à grains orientés. L'empilage et l'assemblage des tôles doivent être réalisés de manière à ce que le transformateur ait les performances possibles pour canaliser le flux magnétique. [7]



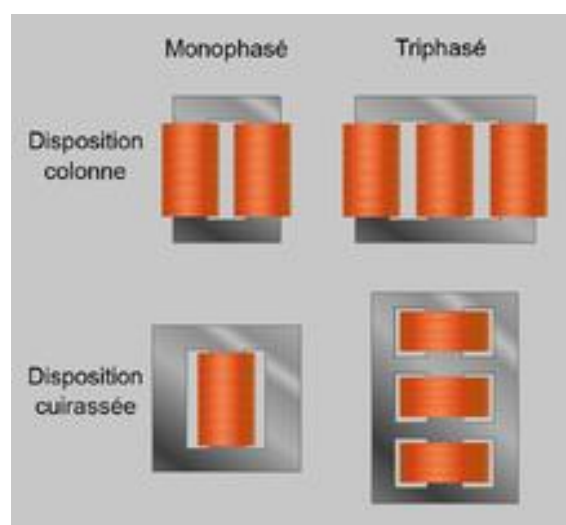
**Figure I.2 :** Circuit magnétique et disposition des enroulements

### I.5.1.2 Enroulements primaires et secondaires

Ce sont les sources du champ magnétique primaire et secondaire et sont montés sur le noyau. Ils peuvent être feuillard, rond, ou méplat de cuivre ou d'aluminium. Les formes de bobinage, les sections et le nombre de spires sont conditionnées par des contraintes à maîtriser en termes électriques, thermiques et mécaniques. Chaque bobine est munie des canaux de refroidissement permettant d'assurer la circulation d'huile et les échanges thermiques. [7]

On distingue deux types de configuration des transformateurs de puissance en fonction de leurs applications, transformateur à colonnes et transformateur cuirassé.

- **Transformateur à colonnes :** les bobines sont empilées autour du noyau. Les enroulements adoptent une forme cylindrique. Les enroulements de haute et basse tension sont enroulés de façon concentrique autour du noyau. Cela garantit un meilleur accouplement magnétique entre les enroulements. La configuration en colonnes est la plus utilisée pour les transformateurs de puissance (figure I.3) [7].
- **Transformateur cuirassé :** le circuit magnétique entoure les enroulements et ils obtiennent une forme quasi rectangulaire. Les enroulements de haute et basse tension sont placés en alternance. Les transformateurs cuirassés ont une endurance supérieure aux forces de courts-circuits et ils sont plus compacts que la configuration à colonnes. La configuration cuirassée est la plus commune pour les transformateurs de distribution électrique [7]. Le modèle de cette configuration est illustré dans la figure (I.3) [8].



**Figure I.3 :** Différentes configurations du circuit magnétique

## **I.5.2 Composants associés**

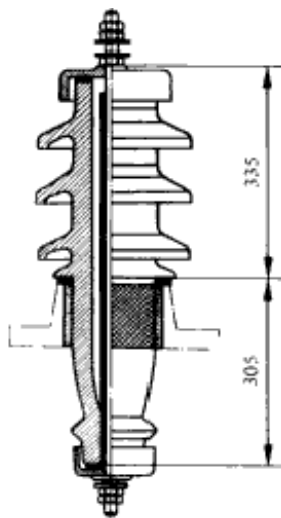
De nombreux composants sont associés au transformateur de puissance, les plus importants sont cités ci-dessous.

### **I.5.2.1 Bornes de traversée**

Les bornes de traversée peuvent être isolées par la porcelaine et du papier imprégné de l'huile ou de la résine époxy. Certaines sont immergées notamment pour les très hautes tensions, d'autres sont sèches. Les traversés assurent le transit de la puissance entre les enroulements et les lignes aériennes sans contact avec le châssis du transformateur.



**Figure I.4 :** Bornes de traversée de 15 à 38 kV isolées dans l'huile



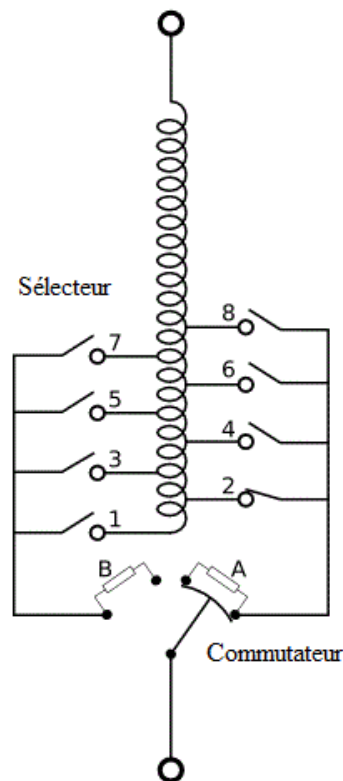
**Figure I.5 :** Bornes de traversée 35 kV

Les traversés peuvent atteindre des tensions de 1200 kV en courant alternatif et de 800 kV en courant continu. Ils sont constitués à l'intérieur d'une structure capacitive et à l'extérieur d'un isolateur afin d'éviter les arcs électriques en surface [9].

### **I.5.2.2 Changeur de prises**

Le changeur de prises permet au transformateur de faire varier son rapport de conservation en jouant sur la valeur de l'inductance de ses enroulements (au primaire ou au secondaire). Cela permet de régler le niveau de la tension du réseau.

Un changeur de prises peut être hors circuit ou en charge, dans le premier cas le courant doit être interrompu avant de changer la prise alors que ce n'est pas nécessaire dans le deuxième cas. Un changeur de prises est constitué de deux parties : le sélecteur et le commutateur (figure I.6). Le sélecteur permet de sélectionner la prise. Il ne peut pas être déplacé que lorsque le courant ne le traverse pas. Le commutateur permet de commuter le changeur de prises d'une prise à une autre sans interrompre le service [10].



**Figure I.6 :** Schéma d'un changeur de prises

### **I.5.2.3 Cuve**

Constituée de tôles d'acier. Elles doivent résister aux forces exercées lors du transport ou d'installation du transformateur. Leur couvercle est amovible et scellé grâce à des boulons ou d'une soudure. Il est incliné d'au moins de 1° afin d'évacuer les eaux de pluie. Afin de garantir l'étanchéité, des joints en caoutchouc synthétique sont installés. Les parois de la cuve sont, selon les modèles, radiantes à ailettes ou rigides équipées de radiateurs amovibles connectées 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 [11].

### **I.5.2.4 Conservateur**

Le conservateur est un réservoir d'huile surplombant le transformateur. La température d'huile n'étant pas constante : elle dépend de la température extérieure et de la charge du transformateur, elle se dilate plus ou moins suivant les circonstances [12].

### **I.5.2.5 Capteurs divers**

Le rôle des capteurs est de donner des informations sur l'état du transformateur. Parmi lesquels on trouve :

- Thermomètres pour la mesure de la température des points chauds ;
- Capteurs de pression du fluide isolant ;
- Capteurs du débit d'huile ;
- Capteurs d'humidité.

Aussi on peut citer les détecteurs de feu et les soupapes de sécurité.

## **I.5.3 Système d'isolation**

Le système d'isolation assure la fonction d'isolation et de transfert de la chaleur. Il 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.5.4 Système de refroidissement**

Le système de refroidissement d'un transformateur a pour but de maintenir la température des enroulements et d'isolant à des niveaux acceptables. Le choix du mode de refroidissement se fait en particulier en fonctions des paramètres suivants [13] :

- Pertes à évacuer ;
- Température ambiante extérieure ;
- Contraintes de bruit ;
- Contraintes dimensionnelles limitant la taille du transformateur ;
- Aspects économiques.

Un système de refroidissement est caractérisé par un code de quatre lettres [13]. La première lettre désigne le fluide de refroidissement interne : « O » pour l'huile minérale, « K » pour les fluides ayant un point de feu > 300 °C, « L » pour les liquides à point de feu non mesurable.

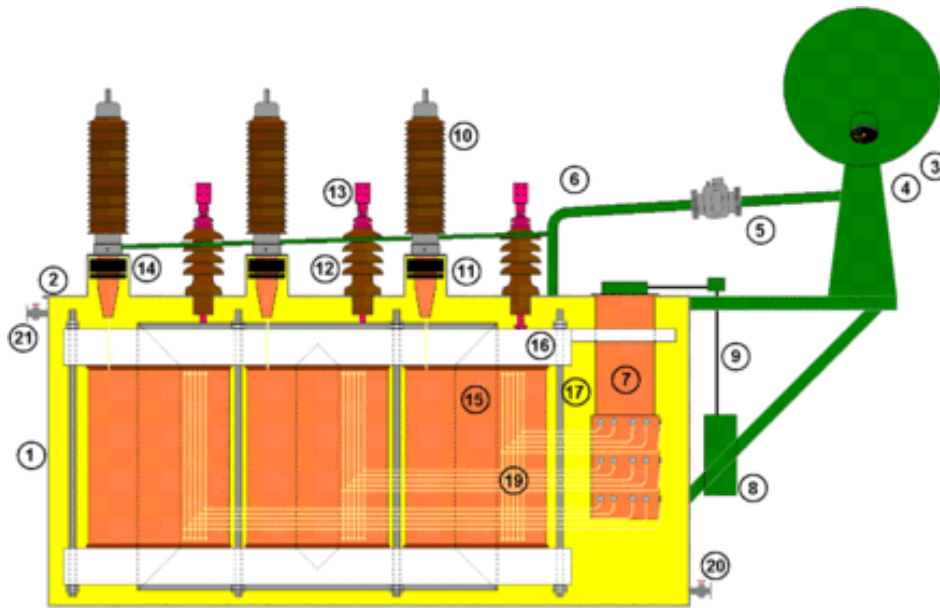
La seconde lettre désigne le mode de circulation du fluide de refroidissement interne : « N » pour naturel, « F » pour forcer (à l'aide d'une pompe, mais l'huile circule librement), « D » pour forcer et dirigé (l'huile est forcée et dirigée à travers les enroulements par des pompes).

La troisième lettre indique le fluide de refroidissement externe : « A » pour air et « W » pour eau [13].

La quatrième lettre désigne le mode de circulation de fluide de refroidissement externe. Où « N » représente le mode de circulation naturel et « F » représente le mode de circulation forcé à l'aide des ventilateurs [13].

Exemple du mode de refroidissement le plus simple est le mode « ONAN ». L'huile transfère la chaleur vers l'extérieur du transformateur et sera refroidie par l'intermédiaire d'un radiateur, ce dernier évacue la chaleur par convection naturelle. [13]

La figure (I.7) illustre les éléments constitutifs du transformateur de puissance [14].



**Figure I.7 :** Constitution d'un transformateur de puissance

**Tableau I.1 :** Liste des composants constituant un transformateur de puissance

1	Cuve
2	Couvercle
3	Conservateur
4	Indicateur de niveau d'huile
5	Relais Bouchholz
6	Tuyau d'huile
7	Changeur de prises
8	Moteur électrique du changeur de prises
9	Transmission mécanique du changeur de prises
10	Traversée pu primaire
11	Dôme avec transformateur de courant à l'intérieur
12	Traversée du secondaire
13	Connexion du secondaire avec l'extérieur
14	Dôme avec transformateur de courant à l'intérieur
15	Enroulements
16	Noyau magnétique
17	Élément mécanique maintenue le noyau magnétique et les ensembles ensemble exerçant une force de compression
18	(Non représenté)
19	Connexion du changeur de prises aux enroulements
20	Robinet d'huile
21	Robinet d'air

## **I.6 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 surfluxages.

Pour 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 [15].

Pour les défauts de courts-circuits, 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 Buchholz sont utilisés dans le cas de transformateurs respirants. Et les détecteurs de gaz et de pression sont utilisés dans le cas des transformateurs hermétiques [15].

Pour 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 [15].

Pour la protection contre les surfluxages, 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 [15].

## **I.7 Types des transformateurs de puissance**

Les transformateurs de puissance sont utilisés pour faire varier le niveau de la tension ou du courant dans un réseau électrique. Ils sont classés suivant plusieurs types, chacun son domaine d'application. On peut les classés suivant leur type d'isolation (sec ou immergée). Ainsi l'autotransformateur qui a une conception spécifique.

### **I.7.1 Transformateurs immergés**

Représentent la plus grande famille des transformateurs de puissance utilisés dans les réseaux électriques. Ils sont disposés dans un bain d'huile isolante permet d'assure deux fonctions principales : l'isolation et le refroidissement (figure I.8) [16].



**Figure I.8 :** Transformateur immergé dans l'huile

### **I.7.2 Transformateurs secs**

Ce type de transformateur n'a pas une isolation liquide. Ces enroulements primaire et secondaires sont concentrés et enrobés dans une résine époxy (figure I.9). Le transformateur sec nécessite une enveloppe de protection pour l'isolation au monde extérieur et l'évacuation de la chaleur produite par ces enroulements. Il possède des pertes importantes (chaleur) de plus que pour un transformateur immergé. Parmi ces avantages : une meilleure garantie de sécurité contre la pollution et moins de risques aux incendies [16].



**Figure I.9 :** Transformateur de type sec

### I.7.3 Autotransformateur

Ce dispositif offre l'avantage d'un dimensionnement plus faible qu'un transformateur à puissance traversante égale. Sa conception est caractérisée par l'existence d'un point commun aux enroulements primaires et secondaires et qu'il n'y a plus d'isolation galvanique entre ces enroulements [16].

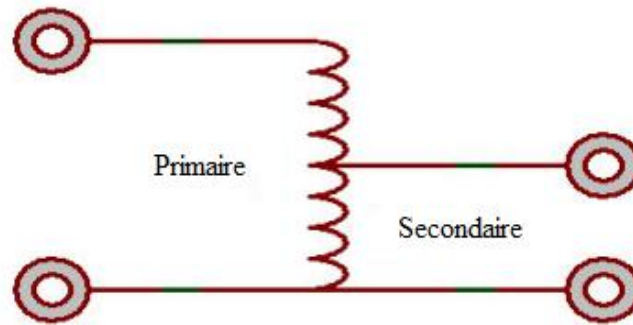


Figure I.10 : Schéma d'un autotransformateur

### 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 [17].

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  $30^\circ$  qui forment ces deux tensions (figure I.11). 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  $V_A$ ,  $V_a$  forment un angle de  $11 \cdot 30^\circ = 330^\circ$  [17].

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

Pour des raisons économiques et de tolérance aux déséquilibres de charges entre phases, les couplages usuels sont Yzn 11 pour 50 kV et Dyn 11 pour 100 à 3150 kVA [17].

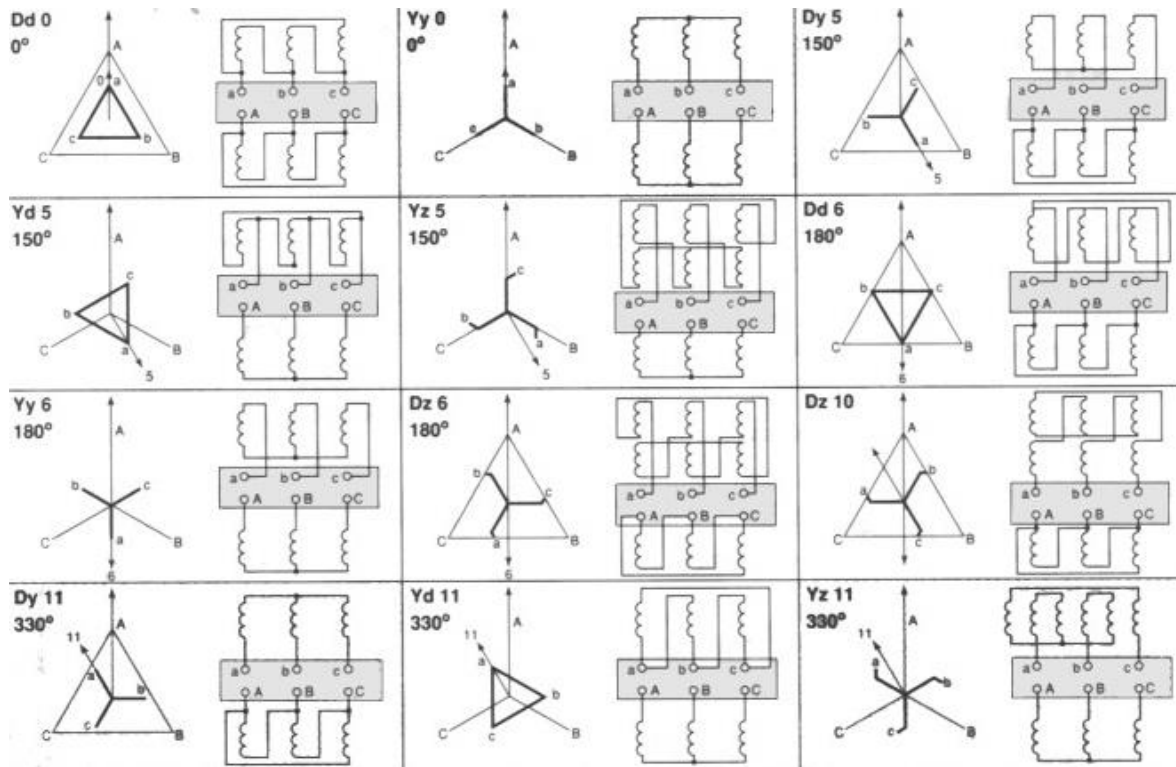


Figure I.11 : Différents types de couplage des transformateurs de puissance

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

Les matériaux isolants utilisés en électrotechnique sont de nombreux. Ils sont classés suivant plusieurs critères, tel que leur état : gazeux, liquide ou solide, leur capacité thermique : améliorée ou non, leur origine : naturelle ou artificielle, etc. Leur fonction principale est d'assurer une meilleure isolation et une forte tenue diélectrique, on parle donc sur le système d'isolation [18].

Avant de présenter les systèmes d'isolation, il est important de définir les mots techniques suivants [18] :

- **Isolant** : un matériau qui a une conductivité électrique suffisamment faible utilisé pour séparer des parties conductrices avec des potentiels différents ;
- **Diélectrique** : matériau dont la propriété électromagnétique fondamentale est d'être polarisé par un champ électrique.

Dans le cas des transformateurs de puissance, l'isolation totale est constituée du papier et d'huile. Le premier sert à l'isolation des enroulements et du noyau et le deuxième sert à l'isolation des parties internes du transformateur.

Dans ce travail, on présente le système d'isolation liquide et solide, et on s'intéresse principalement à l'isolation mixte huile – papier utilisée dans les transformateurs de puissance.

### **I.9.1 Isolation liquide**

En électrotechnique, les liquides ou les fluides sont employés soit comme produits de remplissage des matériels électriques (transformateurs et pompes immergées, à titre d'exemple), soit comme imprégnant d'isolation solide (câbles haute tension, condensateurs, etc.) [18].

Une isolation liquide assure deux fonctions principales [18] :

- **Fonction diélectrique** : élimine l'air et les gaz apparus de façon à améliorer la tenue diélectrique et ralentit l'oxydation directe de l'isolation cellulosique ;
- **Fonction transfert de chaleur** : permet d'éviter la formation des points chauds grâce à une circulation abondante, bien répartie et bien refroidie.

#### **I.9.1.1 Principaux types d'isolants liquides**

Les huiles isolantes sont classées selon leurs origines. Il existe principalement trois types : les huiles végétales ou esters naturels, les huiles minérales (à base des produits pétroliers raffinés, ce sont les plus commun utilisés dans les transformateurs) et les liquides de synthèse (sont les plus utilisées dans les applications électrotechniques) [19] ; ainsi les huiles silicones qui sont utilisés également dans les condensateurs.

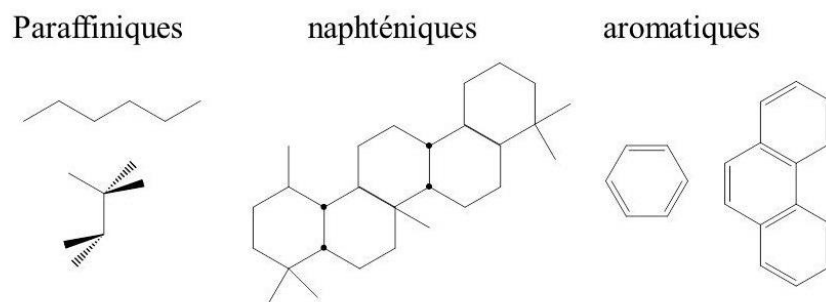
##### **I.9.1.1.1 Huiles minérales**

Les huiles minérales sont obtenues par raffinage de brut de pétrole. Ces pétroles bruts doivent passer par divers stades de raffinage pour donner des huiles isolantes applicables au domaine électrotechnique. La composition des huiles minérales isolantes dépend de la décomposition des pétroles d'origine. Elles contiennent près de 3000 molécules différentes, dont 10 % seulement sont caractérisées [19].

Les huiles minérales sont utilisées dans tous les matériels électriques, elles possèdent de bonnes propriétés diélectriques et de transfert de chaleur, et une bonne compatibilité avec les isolant celluloseux.

On y trouve plusieurs milliers de molécules différentes, essentiellement les hydrocarbures. La structure chimique d'une huile minérale est composée de composés paraffiniques, naphthéniques et aromatiques (figure I.12) [20].

Lors de la fabrication de l'huile minérale, les fabricants rajoutent des additifs à très faible dose. Ceux-ci sont principalement des antioxydants ayant pour effet de réagir directement avec les agents oxydants. Leur rôle est de casser la réaction d'oxydation, en évitant la formation d'acides et de composés polaires dont certains sont susceptibles de dégrader de manière irréversible l'huile minérale. [20]



**Figure I.12 :** Constitution majoritaire des pétroles

Les propriétés des huiles minérales isolantes sont décrites comme suit : [19]

- **La permittivité relative ( $\epsilon_r$ ) :** est une caractéristique intrinsèque d'un matériau. Elle dépend essentiellement de la structure chimique et caractérise la polarité de la molécule. La permittivité relative des huiles minérales est 2,2 à 25 °C. Elle décroît légèrement avec la température et la fréquence du courant ;
- **La conductivité électrique ( $\sigma$ ) :** elle est due à la présence d'impuretés ionisables en très faible concentration. La conductivité augmente et la viscosité d'un liquide devient faible lors des températures élevées. Le vieillissement du liquide isolant conduit à la formation de sous-produits qui contribuent à l'augmentation de la conductivité. Les huiles isolantes ont une conductivité de l'ordre de  $10^{-11}$  à  $10^{-13}$  S.m<sup>-1</sup> ;

- **Le facteur de dissipation diélectrique ( $\tan \delta$ )** : ce facteur est sensible aux contaminants et aux produits de vieillissement. 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 ;
- **La rigidité diélectrique (E)** : mesurée en kV/cm, elle est la valeur maximale que peut atteindre le champ électrique dans un milieu isolant avant d'apparition d'étincelles. Le claquage d'un liquide conduit à la décomposition de ses molécules par rupture des liaisons chimiques entre les atomes. L'apparition d'eau n'affecte pas la rigidité diélectrique d'un liquide tant que la concentration reste inférieure de 50 à 60 % de la saturation. Au-delà, une chute de tension de claquage devient importante.

Ces dernières années, l'industrie électrotechnique a développé de nouveaux produits telles que les huiles synthétiques et les huiles silicones.

#### **I.9.1.1.2 Huiles esters synthétiques**

Les huiles synthétiques sont utilisées lorsque les caractéristiques requises ne sont pas remplies par les huiles végétales ou les huiles minérales et à chaque fois que des caractéristiques particulières sont recherchées. C'est le cas lorsqu'il s'agit d'obtenir une meilleure stabilité thermique et de grandes performances diélectriques des matériels électriques situés dans les zones où la sécurité des personnes et des biens pourrait être compromise par le feu [19].

Les liquides synthétiques sont un peu dans une position intermédiaire entre les polychlorobiphényles (PCB) et les huiles minérales à cause de leur point d'éclair et leur température d'auto-inflammation, les liquides synthétiques appartiennent aux liquides ayant un point d'éclair élevé (minimum au-dessus de 300 °C), ils sont appelés les liquides ininflammables [19].

La famille des liquides synthétiques se divise en quatre types [19] :

- Les hydrocarbures aromatiques ;
- Les hydrocarbures aliphatiques (les polyoléfines) ;
- Les esters synthétiques ou esters organiques : sont des produits fabriqués artificiellement. Ils sont obtenus par synthèse d'un acide et d'un alcool. Les polyesters et les esters complexes sont utilisés dans des conditions extrêmes comme dans le cas des transformateurs de puissance. Il existe aussi les esters naturels à base des huiles

végétales ayant une composition plus simple que les huiles minérales (quelques dizaines de molécules) ;

Ainsi que les silicones qui sont liées à la famille des composés inorganiques.

### **I.9.1.1.3 Huiles silicones**

Les silicones sont des composés inorganiques formés d'une chaîne silicium-oxygène (...-Si-O-Si-O-Si-O-...) sur laquelle des groupes se fixent, sur les atomes de silicium. Le nombre des chaînes de  $(C_2H_6OSi)$  dans les huiles silicones varie de 40 à 50, afin d'obtenir une viscosité acceptable avec une valeur de point de feu supérieure à 330 °C. Elles possèdent de bonnes propriétés contre le vieillissement et l'oxydation. Leur stabilité est liée à l'énergie de la chaîne silicium-oxygène (374 kJ/mol comparée avec 245 kJ/mol pour la chaîne de carbone). L'huile silicone est transparente ; elle est caractérisée par un point d'écoulement très bas comparé à celui des huiles minérales, même si sa viscosité à 20 °C est plus élevée. Les huiles silicones sont également utilisées pour l'imprégnation des condensateurs au film de polypropylène métallisé. [19]

Leur prix est élevé, leur grande viscosité et leur faible stabilité au dégazage limite l'utilisation de ce type d'huile malgré sa grande stabilité à l'oxydation. [19]

### **I.9.1.2 Choix d'un liquide isolant pour une application spécifique**

Le choix d'un liquide isolant pour une application spécifique doit assurer la fiabilité du fonctionnement des équipements ainsi que la sécurité des opérateurs. Dans le cas des transformateurs, il n'est pas possible de tirer avantage des meilleures propriétés diélectriques des huiles synthétiques, et c'est pour cette raison que les huiles minérales sont universellement utilisées pour cette application. Toutefois, lorsque la résistance au feu devient un paramètre dominant, les transformateurs sont imprégnés dans des huiles d'esters synthétiques ou de silicones [19].

Le tableau (I.2) illustre une comparaison entre les différents types d'huiles en fonction des paramètres typiques et le tableau (I.3) illustre le choix du liquide isolant pour différents transformateurs utilisés [19].

**Tableau I.2 :** Comparaison des paramètres typiques des principaux types des huiles isolantes

Propriétés	Huile minérale	Huile silicone	Ester synthétique	Huile végétale	Méthodes d'essais
Tension de claquage (kV)	30 – 85	35 – 60	45 – 70	82 – 97	IEC 60156
Permittivité relative à 25 °C	2,1 – 2,5	2,6 – 2,9	3,0 – 3,5	3,1 – 3,3	IEC 60247
Viscosité (mm <sup>2</sup> .S <sup>-1</sup> )	À 0 °C	<76	81 – 92	43 – 77	ISO 3104
	À 40 °C	3 – 16	35 – 40	14 – 29	
	À 100 °C	2 – 2,5	15 – 17	4 – 6	
Point d'écoulement (°C)	-30 – -60	-50 – -60	-40 – -50	-19 – -33	ISO 3016
Point d'éclair (°C)	100 – 170	300 – 310	250 – 270	315 – 328	ISO 2592 (I)
Point de feu (°C)	110 – 185	340 – 350	300 – 310	350 – 360	
Densité à 20 °C (kg.dm <sup>3</sup> )	0,83 – 0,89	0,96 – 1,10	0,90 – 1,00	0,87 – 0,92	ISO 3675
Chaleur spécifique (j.g <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	1,6 – 2,0	1,5	1,8 – 2,3	1,5 – 2,1	ASTM E 1269
Conductivité thermique (W.m <sup>-1</sup> .K <sup>-1</sup> )	0,11 – 0,16	0,15	0,15	0,16 – 0,17	(DCS)
Coefficient de dilatation (10 <sup>-4</sup> .K <sup>-1</sup> )	7 – 9	10	6,5 – 10	5,5 – 5,9	ASTM D1903

**Tableau I.3 :** Choix du liquide isolant pour différents types des transformateurs

Propriétés	Huile minérale	Huile silicone	Ester synthétique	Ester naturel
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

### I.9.1.3 Vieillessement des huiles

Le vieillissement des huiles isolantes dépend des paramètres suivants [21] :

- **Densité volumique de charges :** la circulation de l'huile utilisé également pour le refroidissement peut engendrer une électrisation par frottement contre les parois. À partir d'une certaine concentration, les charges électriques peuvent provoquer des décharges dans l'huile. Dans les huiles neuves, la concentration de charges ne dépasse pas 150 pC/cm<sup>3</sup>. Sur une huile usagée la concentration peut dépasser 800 pC/cm<sup>3</sup> ;

- **Variation de la densité, de l'acidité ou de la tension superficielle :** cette variation trahisse une contamination de l'huile par des produits d'origine externe ou provenant de réactions chimiques internes ;
- **Apparition de bulles :** peut indiquer une dégradation de l'huile avec formation de sous-produits gazeux, une dégradation des matériaux solides (isolants combinés à l'huile ou enceinte de confinement) ou une pénétration de gaz venant de l'extérieur.

## **I.9.2 Isolation solide**

L'isolation solide utilisée dans les transformateurs est divisée en deux grandes familles, les papiers cellulosiques, tels que : le papier Kraft, le papier Kraft thermiquement amélioré (TUK), le papier Manille ou le coton ; et les papiers synthétiques (aramides) à base de polymères synthétiques destinés à remplacer les papiers cellulosiques, ils sont caractérisés par une meilleure résistance thermique et une faible absorption d'humidité. Le papier de Manille et le coton ont été moins utilisés pour les transformateurs de puissance, en raison de la diminution rapide de leurs propriétés mécaniques au cours du vieillissement [22].



**Figure I.13 : Papier Kraft [23]**

Le papier Kraft consiste 90 % de la cellulose, 6-7 % d'hémicellulose, 3-4 % de la lignine et autres substances minérales. Le papier Kraft bois tendre consiste approximativement 80 % de la cellulose, 12 % d'hémicellulose, 8 % de la lignine et autres substances minérales. Le papier Kraft bois sec contient 40 à 50 % de la cellulose, 10-30 % d'hémicellulose, et environ 20-30 % de la lignine. La cellulose est un polymère linéaire de glucose de molécules, qui sont connectées ensemble via une liaison glycosidique. [2]

### **I.9.2.1 Principaux types d'isolation solide**

Il existe trois types d'isolation solide : isolation solide conventionnelle, isolation solide haute température et isolation solide hybride [24]. Ils sont cités ci-après :

- **Isolation solide conventionnelle** : elle est constituée du papier et du carton qui sont constitués des fibres de cellulose. Les celluloses sont formées de longues chaînes comprenant environ 1200 anneaux de glucose reliés par des ponts d'oxygène, leur nombre par chaîne s'appelle le degré de polymérisation (DP). La présence de ces liaisons confère aux chaînes de cellulose une forme linéaire. Les cartons présents dans les transformateurs de puissance ont plusieurs fonctions, ils sont employés pour maintenir mécaniquement les bobinages et pour matérialiser les canaux de circulation du liquide de refroidissement. La constante diélectrique du papier et du carton est deux fois plus élevée que celle de l'huile, ils seront donc utilisés dans les zones où règne un fort champ électrique pour renforcer l'isolation dans l'huile ;
- **Isolation solide haute température** : Des mesures de température récentes au moyen de fibres optiques ont indiquées que la température au points chauds peut parfois être considérablement supérieure à celle prédite par les études de surveillance. Ceci a engendré des préoccupations en ce qui concerne le taux élevé de vieillissement. Dans ce cas, le papier aramide considéré comme un matériau de haute. Les polyamides aromatiques sont une classe de matériau résistant à la chaleur et présentant de bonnes propriétés mécaniques. On distingue deux types de polyamides : les para-amides et les méta-amides, seuls les méta-amides sont utilisés aux applications de l'isolation électrique. Le méta-aramide le plus utilisé est le Nomex de Dupont de Nemours, développé en 1961, c'est une marque de fibres synthétiques haute performance, il assure une grande isolation électrique même en haute température. Le Nomex ne se dégrade pas même à des températures au-dessus de 370 °C. Il est utilisé dans les conditions extrêmes. Les principales propriétés de ce matériau sont : la résistance à la chaleur et au feu, la haute résistance à l'ultraviolet (UV), la haute résistance chimique, la faible conductivité électrique et la faible contraction thermique ;
- **Isolation solide hybride** : associe les caractéristiques diélectriques des papiers cellulosiques et aramides.

## I.9.2.2 Propriétés des papiers isolants

### I.9.2.2.1 Propriétés diélectriques

- **Permittivité relative ( $\epsilon_r$ )** : la permittivité relative ou la constante diélectrique 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 [24] :

$$\epsilon_r = \frac{C_x}{C_0} \quad (\text{I.2})$$

- **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 quadrature avec la tension appliquée. L'écart se mesure à l'aide de l'angle de perte  $\delta$ , caractérisé par le facteur de dissipation diélectrique ( $\tan \delta$ ). Après une simple démonstration, on obtient [24] :

$$\tan \delta = \frac{1}{\omega C_p R_p} \quad (\text{I.3})$$

- **La rigidité diélectrique ( $E$ )** : son unité en système international est (V/m). C'est la valeur maximale du champ électrique que le milieu isolant peut supporter avant le déclenchement d'un arc électrique. La rigidité diélectrique d'un milieu isolant est donnée dans l'équation (I.4), où ( $d$ ) représente l'épaisseur de l'isolant placée entre les électrodes qui permettent d'appliquer la tension de claquage ( $U_c$ ) [24] :

$$E = \frac{U_c}{d} \quad (\text{I.4})$$

**Tableau I.4** : Propriétés diélectriques d'un papier isolant neuf non imprégné [22]

<b>Permittivité relative</b>	1,5 – 3,5
<b>Conductivité électrique (<math>\Omega^{-1} \cdot \text{cm}</math>)</b>	$10^{-15} - 10^{-17}$
<b>Angle de perte ou tangente delta</b>	0,003 – 0,004
<b>Rigidité diélectrique (kV/cm)</b>	90

### I.9.2.2 Propriétés chimiques

- **Dissolution de la cellulose** : la cellulose possède un caractère important par présence de ses nombreux groupements hydroxyles. 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. La plupart des solvants capables de dissoudre la cellulose sont des solutions formant des complexes, les plus connus sont à base d'ions métalliques [24] ;
- **Réactivité de la cellulose** : les groupements réactifs 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 [24] ;
- **Degré de polymérisation (DP)** : le degré de polymérisation est un paramètre très important dans les systèmes d'isolation solide et mixte, il indique le nombre moyen d'unités d'anhydroglucose constituant la molécule. Le degré de polymérisation 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) [24]. Une corrélation entre le degré de polymérisation de la cellulose et les propriétés mécaniques des papiers isolants et l'état du transformateur est représentée sur le tableau (I.5) [2].

**Tableau I.5** : Corrélation entre DP et les forces mécaniques du papier isolant

Valeurs de DP	Forces mécaniques	État de transformateur
1000 – 1500	Excellente (papier neuf)	Bonne isolation
450 – 1000	Constante (opération normale)	Détérioration modérée
250 – 450	Critique (exigence inférieure)	Détérioration importante
200 – 250	Presque à perdre la force	Détérioration cruciale
< 200	Pas de forces (mort)	Critères de la fin de vie

Le facteur de dégradation (DF) de l'isolation est défini par l'équation (I.5), où DP indique le degré de polymérisation vieillis et DP<sub>0</sub> indique le degré de polymérisation d'un papier neuf [21] :

$$DF = 1000 \left( \frac{1}{DP} - \frac{1}{DP_0} \right) \quad (I.5)$$

### **I.9.2.2.3 Propriétés mécaniques**

La résistance mécanique du papier cellulose est une combinaison de différents facteurs : la résistance individuelle des fibres (fibres de cellulose, microfibrilles et fibrilles) et la résistance des liaisons physiques et chimiques entre les fibres de cellulose. [22]

Ces liaisons interfibrilles sont disposées par la lignine restante et l'hémicellulose qui composent le papier. Entre les fibres, de nombreuses microfissures sont formées. En raison du vieillissement, ces microfissures s'élargissent en diminuant les propriétés mécaniques du papier. Sur la base de ces facteurs, la mécanique de la rupture du papier se développe à travers les deux voies suivantes : les liaisons interfibrilles se brisent dans un papier avec une matrice faiblement liée ou les fibres individuelles se brisent dans un papier avec une matrice fortement liée. [22]

### **I.9.2.3 Vieillessement des papiers celluloses**

Différents mécanismes de dégradation interviennent dans la cellulose. Parmi lesquels on trouve [21] :

- **Pyrolyse** : est un mécanisme de décomposition de la cellulose (rupture de liaisons chimiques) sous l'effet de la chaleur, avec production de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>O. Dans le cas de la cellulose, certains mécanismes de pyrolyse sont exothermiques : ils produisent de la chaleur et entretiennent ainsi la pyrolyse elle-même. Par ailleurs, la pyrolyse peut s'accompagner d'une dilatation ou, de contraire, d'une contraction volumique locale. Ces phénomènes entraînent des contraintes mécaniques qui déforment l'isolation et contribuent à en dégrader les caractéristiques diélectriques ;
- **Oxydation** : s'attaque spécialement aux ponts d'oxygène, ce qui dépolymérise la cellulose en produisant divers sous-produits, y compris les mêmes que la pyrolyse ;
- **Hydrolyse** : détruit également les ponts d'oxygènes qui se combinent avec des molécules d'eau, mais sans formation de sous-produits gazeux.

L'état de vieillissement de la cellulose est essentiellement caractérisé par son degré de polymérisation.

### **I.9.3 Isolation mixte Huile – Papier**

L'isolation liquide des organes utilisés en électrotechnique assure la fonction diélectrique, le refroidissement et le transfert de la chaleur. L'isolation solide assure la séparation entre les parties conductrices. La combinaison entre les propriétés de ces deux types d'isolation améliore l'isolation et la protection des équipements. Les matériaux utilisés dans cette combinaison doivent résister aux contraintes électriques, mécaniques, chimiques, et thermiques tout au long la durée de vie de ces équipements. [24]

Dans le cas des transformateurs de puissance, la technique d'une isolation mixte huile – papier est la plus efficace ; l'isolation liquide sert à isoler les parties actives du transformateur et l'isolation solide sert à séparer et supporter les enroulements et le noyau à l'aide du papier (généralement Kraft) ou du carton.

L'isolation mixte huile – papier assure un complexe isolant très efficace. Les caractéristiques électriques des complexes sont obtenues grâce à l'huile et la tenue mécanique du groupe est assurée par le papier. Les phénomènes vibratoires dus aux parties actives du transformateur sont atténués par la présence des cales. On limite ainsi les contraintes subies par le complexe. Dans le but de renforcer la tenue mécanique du papier, celui-ci est disposé en bandes alternées de 75  $\mu\text{m}$  d'épaisseur autour de la barre de cuivre. Le nombre de bandes de papier est généralement compris entre 3 et 12 [24].

Le vieillissement et la durée de vie du système d'isolation mixte dépendent en première classe de la température, ensuite différentes combinaisons de matériaux isolants peuvent être utilisées pour optimiser la construction thermique et économique du transformateur. [24]

L'application de matériaux isolants de différentes classes thermiques conduit à des systèmes d'isolation modernes. Il est donc utile d'adapter la capacité matérielle à la température d'application appropriée afin d'obtenir une valeur optimale en matière d'utilisation de ces matériaux isolants haute température. [24]

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

De nombreux systèmes pourraient être identifiés sur la base de différentes combinaisons multiples de différentes isolations solides avec chaque liquide. Il est toutefois possible de définir, en termes généraux, quatre catégories distinctes [25] :

- **Système à isolation homogène** : ils sont composés de matériaux isolants solides et un liquide isolant de capacité thermique semblable, soit tout conventionnelle soit tout à haute température ;
- **Système à isolation hybride** : utilise comme isolation solide celle haute température pour toute isolation en contact avec des conducteurs chauds, et une isolation liquide conventionnelle ;
- **Système à isolation semi hybride** : utilise un liquide traditionnel et des matériaux de haute température pour l'isolant du conducteur dans les enroulements qui fonctionnent à des températures élevées. Tous les autres matériaux sont à isolation conventionnelle ;
- **Système à isolation mélangée** : dans ce système, l'isolation solide est de haute température de protection contre le chauffage localisé dans des zones spécifiques de certains enroulements, avec une isolation liquide conventionnelle.

### **I.9.3.2 Vieillessement des complexes huiles – papiers**

Dans les isolations complexes huiles – papiers, le vieillissement du papier et celui de l'huile s'aggravent mutuellement. Ainsi, la vitesse de vieillissement du papier dans l'huile est 10 fois plus rapide que dans un liquide diélectrique chloré qui n'est pas sujet à l'oxydation [21].

Or, le degré de polymérisation, et donc le facteur de dégradation, ne peuvent pas être mesurés directement dans un système d'isolation mis en service. En revanche, il a été montré que, dans une isolation mixte huile – papier, le facteur de dégradation de la cellulose est corrélé à la concentration de furfural ( $C_4H_4O$ ). [21]

La concentration de furfural passe de 0.1 ppm (particules par million) à 100 ppm en une quinzaine d'années, à 70 °C. Ce processus est fortement dépendant de la température : à 105 °C, la même concentration de furfural est obtenue au bout de 3 ans déjà. [21]

Un autre indicateur de l'état de papier est la teneur de l'huile en particules solides, provenant de l'érosion de la cellulose. Une concentration de plus de 10000 particules par  $cm^3$  avec des diamètres compris entre 2 et 5  $\mu m$ , indique une dégradation préoccupante de l'isolation. [21]

L'analyse de gaz dissous (DGA) dans l'huile permet de poser un diagnostic sur le type de défauts qui se produisent dans le système [21].

Les techniques de diagnostic de l'isolation solide des transformateurs de puissance sont diverses, chacune son domaine et ses limites d'application. Le tableau (I.6) résume les avantages et les inconvénients de chaque méthode de diagnostic du papier [2].

**Tableau I.6 :** Avantages et inconvénients de différentes méthodes de diagnostics du papier

<b>Méthode</b>	<b>Avantages</b>	<b>Inconvénients</b>
<b>CO/CO<sub>2</sub></b>	Mesurée facilement par l'analyse DGA et peut être utilisé dans autres analyses	Possible de résulter de l'huile à des températures normales due à un long terme d'oxydation ou due à une fuite atmosphérique
<b>DP</b>	Précision très élevée lors de la mesure de la qualité de la cellulose et les forces mécaniques du papier	Non appliquée au transformateur mis en service et au transformateur à souffle ouvert
<b>Furane</b>	Niveau de furane est corrélé au DP et les forces mécaniques du papier et peut être mesuré par l'analyse de l'huile	Mauvaise détection pour le papier thermiquement amélioré et l'huile végétale ; et elle dépendue au matériau construire le papier
<b>MeOH</b>	Une corrélation linéaire entre MeOH et DP dès le début	Reste en recherche et pas complètement maturée

## **I.10 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons voulu réaliser un survol sur les notions importantes des transformateurs de puissance. Un rappel succinct est, aussi, consacré aux différents systèmes d'isolation utilisés dans ces dispositifs. Nous avons également étudié les effets combinés des contraintes électriques et thermiques sur le complexe papier – huile. Cet arrangement est considéré comme un système d'isolation très efficace grâce aux propriétés diélectriques élevées des huiles isolantes et la forte tenue mécanique des papiers isolants. La configuration des systèmes d'isolation est multiple suivant la température et les propriétés diélectriques des matériaux utilisés.

Il faut cependant faire remarquer que de nouveaux matériaux synthétiques liquides (esters synthétiques) et solides (pyramides) sont apparus afin d'assurer la stabilité thermique des matériels électriques. Bien qu'il ait tendance à diminuer, leur prix reste encore élevé.

**CHAPITRE II : GÉNÉRALITÉS SUR  
LES RÉSEAUX DE NEURONES  
ARTIFICIELS**

## II.1 Introduction

L'intelligence artificielle (IA) est une technique d'estimation et de prédiction utilisée dans diverses applications, par exemple : la robotique et la météo. Elle est caractérisée par plusieurs méthodes, notamment : la logique floue, les réseaux de neurones artificiels et les réseaux neuro-flous. Chacune a son domaine d'application et ses limites d'utilisation.

Ce chapitre va présenter une synthèse bibliographique sur les réseaux de neurones artificiels (ANN), le principe de fonctionnement de cette structure neuronal, leurs différents domaines d'application, ses limites, ses avantages et ses inconvénients.

## II.2 Réseaux de neurones artificiels (ANN)

Le concept des réseaux de neurones artificiels fut inventé en 1943 par deux chercheurs de l'université de Chicago : le neuro-physicien Warren McCulloch et le mathématicien Walter Pitts. Un article a été publié en 2019 dans le journal « Brain Theory », dit que les deux chercheurs présentent leur théorie selon laquelle l'activation de neurones est l'unité de base de l'activation cérébrale [26].

Un réseau de neurones est un système informatique qui a des caractéristiques semblables aux réseaux de neurones biologiques. Il est constitué de plusieurs unités (neurones) organisées sous forme de niveaux différents appelés couches du réseau. Les neurones appartenant à la même couche possèdent les mêmes caractéristiques et utilisent les mêmes types de fonction d'activation. Entre deux couches voisines, les connexions se font par l'intermédiaire de poids qui jouent le rôle des synapses (figure II.1). L'information est portée par la valeur de ses poids. La structure du réseau de neurones ne sert qu'à traiter l'information et l'acheminer vers la sortie. La topologie d'un réseau de neurones est la manière dont les neurones sont connectés [27].

La somme pondérée des entrées du neurone est représentée par  $U_i$ , elle est donnée par :

$$U_i = \sum_j w_{ij}x_j + b_i \quad (\text{II.1})$$

Où :

$w_{ij}$  désigne le poids de la connexion reliant l'entrée  $j$  au neurone.

$x_j$  représente l'entrée  $j$  connectée au neurone  $i$ .  $b_i$  représente le seuil interne du neurone.

$O_i = g(U_i)$  est la sortie du neurone  $i$  et  $g$  sa fonction d'activation.

La fonction d'activation de chaque neurone détermine ses propres caractéristiques. Par conséquent, le type du neurone est caractérisé par sa fonction d'activation. Les fonctions d'activation sont généralement continues et croissantes. Les fonctions les plus utilisées sont la fonction linéaire (équation II.2) et la fonction sigmoïde (équation II.3) [27].

$$a = n \quad (\text{II.2})$$

$$a = \frac{1}{1 + \exp^{-n}} \quad (\text{II.3})$$

Avec  $a$  est l'entrée de la fonction de transfert et  $n$  sa sortie.

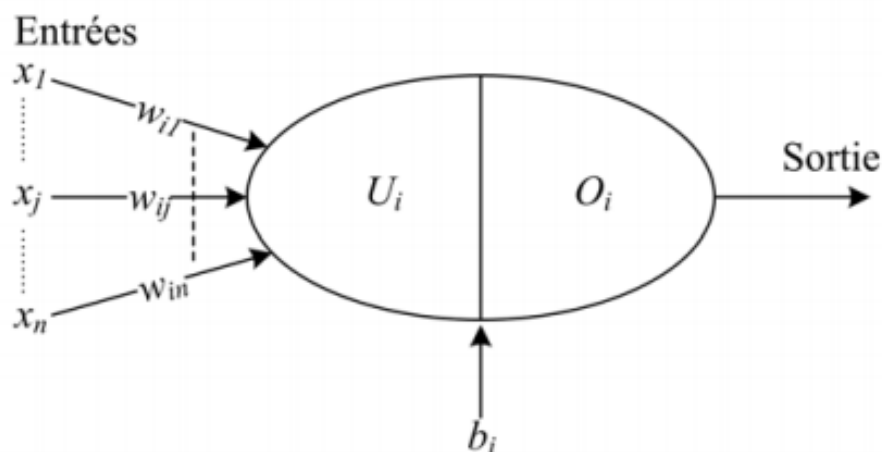


Figure II.1 : Structure d'un neurone formel

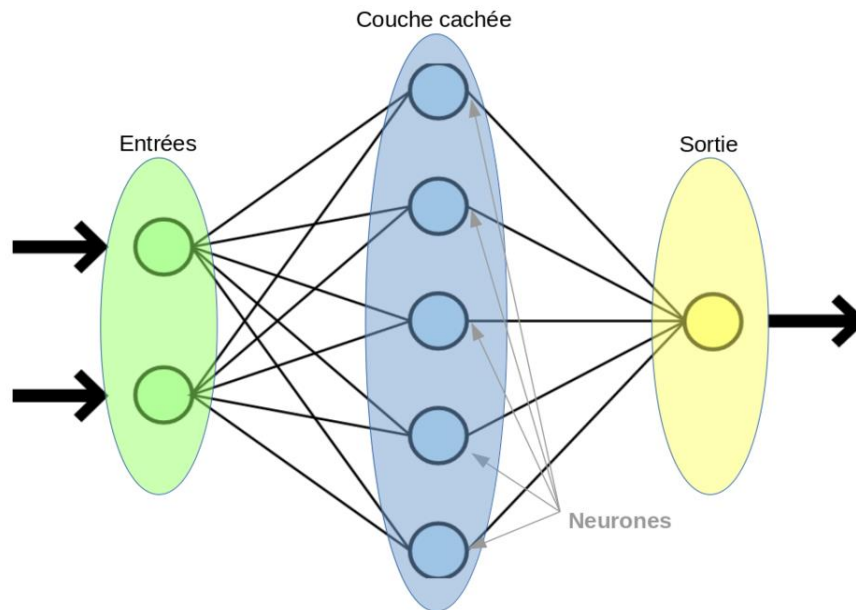
### II.3 Types de réseaux de neurones

On classe les réseaux de neurones selon leur structure en deux grandes classes : réseaux de neurones non bouclés et réseaux de neurones bouclés.

#### II.3.1 Réseaux de neurones non bouclés

La structure de ce type est dite feed-forward, la propagation de l'information se fait en un seul sens, de l'entrée vers la sortie. Les neurones de la même couche peuvent se connecter

uniquement avec les neurones de la couche suivante. L'architecture la plus utilisée est le perceptron multicouches (MLP) [27].



**Figure II.2 :** Architecture du perceptron multicouches

La figure (II.2) représente un modèle d'un perceptron multicouches constitué de trois couches : une couche d'entrée, une couche cachée et une couche de sortie. La première couche représente la couche d'entrée. Tandis que la couche cachée représente le cœur du réseau, cette couche est caractérisée par des fonctions d'activation de type sigmoïde. La couche de la sortie regroupe tous les neurones, dont les fonctions d'activation dans cette couche sont généralement de type linéaire [28].

### II.3.2 Réseaux de neurones bouclés

Un réseau dynamique ou récurrent possède la même structure qu'un réseau multicouche muni de rétroactions. Les connexions rétroactives peuvent exister entre tous les neurones du réseau sans distinction ou seulement entre certains neurones (les neurones de la même couche ou les neurones de la couche d'entrée et les neurones de la couche de sortie, à titre d'exemple) [27]. La figure (II.3) montre un Perceptron multicouches qui utilise un vecteur d'entrée contenant les copies des activations de la couche de sortie du réseau [29].

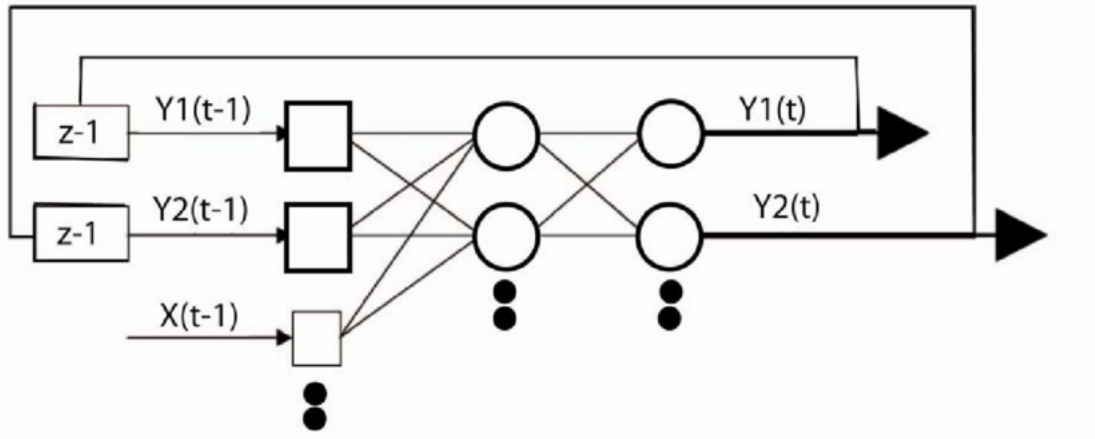


Figure II.3 : Réseau de neurones bouclé

## II.4 Apprentissage des réseaux de neurones

L'apprentissage des réseaux de neurones formels consiste à calculer les paramètres de telle manière que les sorties du réseau de neurones soient, pour les exemples utilisés pour l'apprentissage, aussi proches que possible des sorties « désirées », qui peuvent être le code de la classe à laquelle appartient la forme que l'on veut approcher ou la sortie souhaitée du processus à commander.

Les techniques d'apprentissage des réseaux de neurones formels sont des algorithmes d'optimisation : ils cherchent à optimiser l'écart entre les réponses réelles du réseau et les réponses désirées, en modifiant les paramètres par étapes (itérations) successives. La sortie du réseau de neurones s'adapte de mieux en mieux aux données à mesurer que l'apprentissage se déroule. Mais l'erreur commise par le réseau de neurones en fin de l'apprentissage n'est pas nulle [30].

Il existe trois types d'apprentissage [27] :

- **Apprentissage supervisé** : dans ce type d'apprentissage, un superviseur doit fournir une valeur ou un vecteur de sortie (appelé cible ou sortie désirée), que le réseau de neurones doit associer à un vecteur d'entrée. L'apprentissage consiste dans ce cas à ajuster les paramètres du réseau afin de minimiser l'erreur entre la sortie désirée et la sortie réelle du réseau. La fonction qui détermine l'écart entre les sorties désirées et celles fournies par le réseau est appelée « Fonction objective ». Cette dernière constitue le critère à minimiser en agissant sur les poids synaptiques (équation II.4) [31] ;

- **Apprentissage semi-supervisé ou apprentissage par renforcement** : ce mode d'apprentissage suppose qu'un comportement de référence n'est pas possible, mais il est possible d'obtenir des indications qualitatives (vrai, faux, etc.) sur les performances du réseau ;
- **Apprentissage non supervisé** : dans ce cas, les données ne contiennent pas d'informations sur l'état de la sortie. Pas de superviseur. La tâche du réseau consiste, par exemple dans ce cas, à créer des regroupements de données selon des propriétés communes (classification).

La fonction qui détermine l'erreur absolue entre la sortie désirée et la réponse du réseau de neurones est donnée comme suit : [31]

$$E_{abs} = \psi(Y_k - d_k) \quad (\text{II.4})$$

Où :

$\psi$  représente la fonction absolue.

$Y_k$  représente la sortie estimée du réseau.

$d_k$  représente la sortie désirée (valeur exacte).

Tandis que l'erreur relative entre la sortie désirée et celle estimée par le réseau de neurones est exprimée par la formule suivante :

$$E_{rel} (\%) = \left( \frac{(d_k - Y_k)}{d_k} \right) * 100 \quad (\text{II.5})$$

Où :

$d_k$  est la sortie désirée du réseau.

$Y_k$  est la réponse du réseau.

## II.5 Algorithme de rétropropagation du gradient

L'algorithme de rétropropagation du gradient est l'un des algorithmes supervisés les plus utilisés pour l'apprentissage des réseaux de neurones. C'est d'ailleurs à sa découverte au

début des années 1980 que l'on dit le renouveau l'intérêt pour les réseaux de neurones. L'objectif de cet algorithme est de modifier les poids du réseau dans le sens contraire du gradient du critère de la performance afin d'optimiser les valeurs de la sortie du réseau aux celles désirées et aussi de minimiser l'erreur de calcul [27].

Si on suppose que l'apprentissage se fait à chaque présentation d'un couple entrée/sortie de l'ensemble d'apprentissage. Le critère de la performance à minimiser sera donc exprimé par [27] :

$$J(t) = 0,5 \sum_{i=1}^{N_L} (O_i^L(t) - d_i(t))^2 \quad (\text{II.6})$$

Avec :

$J(t)$  est la valeur du critère de la performance à l'instant  $t$ .

$d_i(t)$  est la  $i^{\text{ème}}$  sortie désirée à l'instant  $t$ .

## II.6 Conception d'un réseau de neurones artificiel

La conception d'un réseau neuronal est l'une des étapes les plus essentielles pour qu'il fonctionne correctement. Cette conception est basée sur les règles suivants [27] :

- **Détermination des entrées/sorties du réseau :** la détermination des entrées et des sorties d'un réseau neuronal doit prendre en considération deux points essentiels : premièrement, la représentation des entrées doit être la plus compacte possible, tout en conservant la même quantité d'information et en gardant à l'esprit que les différentes entrées doivent être indépendantes. Deuxièmement, toutes les informations présentées dans les entrées doivent être pertinentes pour la grandeur que 'on cherche à modéliser : donc, elles doivent avoir une influence réelle sur la valeur de la sortie ;
- **Choix et préparation des échantillons :** il faut déterminer les grandeurs qui ont une influence significative sur le phénomène que l'on cherche à modéliser. La façon dont se présente l'échantillon conditionne le type du réseau, le nombre de cellules d'entrée, le nombre de cellule de sortie et la façon dont il faudra mener l'apprentissage, les tests et la validation. Pour une application quelconque sur un réseau neuronal, il est important

de disposer au moins deux bases de données, une pour l'apprentissage, et l'autre pour tester et valider ses performances ;

- **Élaboration de la structure du réseau :** la structure globale d'un réseau de neurones dépend du type du réseau : perceptron multicouches, réseau de Hopfield, réseau à décalage temporel, etc. Si on prend, à titre d'exemple, le réseau perceptron multicouches, il est nécessaire de bien choisir le nombre de couches cachées et le nombre de neurones cachés dans cette couche. Pour un nombre de couches cachées adéquat, le réseau offre de fortes possibilités d'adaptation. Et pour le nombre de neurones cachés, il est important de définir précisément le nombre de neurones cachés afin d'obtenir une approximation satisfaisante ;
- **Phase d'apprentissage :** elle consiste à calculer les pondérations optimales des différentes liaisons, en utilisant un échantillon. La méthode la plus efficace est la méthode de rétropropagation du gradient, qui est généralement plus économe et plus efficace que les autres méthodes, en termes de nombres d'opérations à effectuer pour optimiser le gradient ;
- **Phase du test et de validation de la performance :** le test s'effectue pour vérifier la performance et la qualité de la prévision du réseau neuronal. Dans quelques cas et lors de l'apprentissage, la validation devient importante ; une validation stricte du modèle développé se traduit par une proportion importante de prédictions exactes sur l'ensemble de la validation.

## II.7 Domaines d'application des réseaux de neurones

En particulier, les réseaux de neurones artificiels sont bien adaptés à la reconnaissance de formes pour identifier et classer des objets ou des signaux dans les systèmes de la parole, de la vision et du contrôle. Ils peuvent être utilisés pour la prédiction et la modélisation des séries chronologiques [32].

Les réseaux de neurones peuvent être aussi utilisés pour la reconnaissance faciale, la prédiction de la météo, la détection du cancer sur les imageries médicales, ou encore les analyses prédictives en entreprises. Ils sont aussi utilisés pour entraîner les chatbots, les algorithmes de traitement naturel du langage, ou encore pour découvrir de nouveaux médicaments. De façon générale, les réseaux de neurones artificiels excellent pour la reconnaissance de pattern, le traitement des signaux complexes et la prédiction [26].

À titre d'exemple, pour la modélisation des phénomènes statiques et dans le domaine des relations structure-activité, il est possible de prédire la solubilité dans l'eau, le point d'ébullition, le coefficient de partage eau-octanol, ou toute autre propriété caractérisée par un nombre, en fonction de descripteurs tels que la masse moléculaire, le moment dipolaire, la charge portée par les divers atomes, le volume de la molécule, etc. Certains de ces descripteurs sont mesurables, d'autres sont calculés par des méthodes semi-empiriques. Comme il existe d'autres exemples d'application de cette approche : prédiction des propriétés pharmacologiques de molécules, prédiction des propriétés mécaniques ou optiques des matériaux, etc. [33].

Un autre exemple sur l'application des réseaux de neurones artificiels dans la commande des véhicules autonomes (ou la conduite automatique des véhicules). Le projet « ALVINN » (*Autonomous Land Vehicle In a Neural Network*) qui a appris de conduire une automobile autonome à partir d'image vidéo de la route enregistrée lors de la conduite du véhicule par un utilisateur humain. L'architecture de ce réseau est constituée de trois couches de rétropropagation conçus pour la tâche de suivre la route [34]. Après la phase d'apprentissage, ce réseau de neurones artificiels a pu conduire précisément l'automobile sur plusieurs kilomètres sans quitter la route [35].

## II.8 Avantages des réseaux de neurones

Les réseaux de neurones artificiels offrent plusieurs avantages, parmi lesquels on peut mentionner [35] :

- Simplicité d'utilisation ;
- Capacité de représenter n'importe quelle fonction : simple ou complexe, linéaire ou non linéaire, etc. ;
- Leur capacité d'apprendre automatiquement permet de résoudre des problèmes sans l'implémentation des règles complexes, tout en limitant la tolérance des erreurs.

Grâce à leur capacité d'apprentissage, les réseaux de neurones sont adaptés pour les applications la prédiction et le diagnostic, notamment : la modélisation et l'estimation des fonctions non linéaires, la fusion de données, la généralisation et la reconstruction des propriétés [35].

## II.9 Inconvénients des réseaux de neurones

Il est vrai que les réseaux de neurones artificiels sont caractérisés par leur rapidité et leur efficacité de traitement des grands corpus. Au contraire, ils ont des inconvénients qu'on peut résumer dans les points ci-dessous [27] :

- La lenteur d'apprentissage ;
- Les résultats obtenus ne sont pas interprétables vis-à-vis le réseau généré par ce type d'algorithme est considéré comme une boîte noire, c'est-à-dire l'utilisateur n'a aucune information explicite sur le fonctionnement interne. En cas d'erreurs, il est impossible de déterminer la cause de l'erreur ;
- La convergence des résultats est incertaine.

## II.10 Limites d'application des réseaux de neurones

Les réseaux de neurones artificiels sont largement utilisés dans des applications de modélisation et de prédiction grâce à leur grande capacité d'apprentissage en profondeur. Cette propriété peut poser un problème limite les applications de ces réseaux.

Lors de la récente conférence, François Chollet, chercheur en intelligence artificielle chez Google et célèbre inventeur de la bibliothèque d'apprentissage en profondeur largement utilisée « Keras », il a souligné que l'apprentissage en profondeur est simplement une reconnaissance de formes plus puissante que les méthodes statistiques et d'apprentissage automatique précédentes : [36]

« Le problème le plus important pour l'intelligence artificielle aujourd'hui est l'abstraction et le raisonnement. »

Chollet a ajouté que les réseaux de perceptron supervisé et les algorithmes d'apprentissage semi-supervisé demandent une large base de données et ne font qu'une simple reconnaissance de formes, ce qui les rend invalides pour la planification :

« Les algorithmes actuels de perceptron supervisé et d'apprentissage par renforcement nécessitent beaucoup de données, sont terrible pour la planification et ne font qu'une simple reconnaissance de formes. »

Chollet a comparé l'apprentissage des humains par l'apprentissage des réseaux de neurones artificiels. Les humains apprennent de peu d'exemples et peuvent planifier à très long terme. Par contre, les réseaux de perceptron supervisés et les algorithmes d'apprentissage semi-supervisés apprennent d'une grande quantité de base de données et ne peuvent plus planifier de façon satisfaisante :

« Humains apprennent de très peu d'exemples et peuvent faire une planification à très long terme et sont capables de former des modèles abstraits d'une situation et de manipuler ces modèles pour parvenir à une généralisation extrême. »

Mais les comportements humains simples sont laborieux à enseigner à un algorithme d'apprentissage en profondeur. Prenant à titre d'exemple la tâche de ne pas être heurté par une voiture lorsque on marche sur la route. Si on suit l'itinéraire d'apprentissage supervisé, on aura besoin d'énormes ensembles de données de situations de voiture avec des actions clairement étiquetées à apprendre telles que « arrêter » ou « marcher ». Ensuite, on doit former un réseau de neurones artificiels pour apprendre le mappage entre la situation et l'action appropriée [36].

En général, les réseaux de neurones artificiels et les algorithmes d'apprentissage sont de plus en plus en évolution et en développement pour plus d'exactitude avec un minimum de données.

## II.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les notions de base concernant les réseaux de neurones artificiels et leur conception interne, et les types d'apprentissage, ainsi les avantages et les inconvénients de cette méthode.

Grâce à leur grande capacité d'apprentissage en profondeur, de nombreux domaines d'application de cette technique sont prouvés. On les trouve dans les applications du diagnostic et de la prédiction, notamment : le diagnostic de l'état des isolants solides dans les transformateurs de puissance. Le majeur inconvénient de cette technique est qu'elle nécessite une large base de données pour l'apprentissage, ce qui limite son domaine d'applications.

Le prochain chapitre, va présenter l'application des réseaux de neurones artificiels de type MLP dans le diagnostic du comportement diélectrique du papier Kraft utilisé comme isolant solide dans les transformateurs de puissance.

**CHAPITRE III : APPLICATION DES  
RÉSEAUX DE NEURONES  
ARTIFICIELS DANS LE  
DIAGNOSTIC DES  
TRANSFORMATEURS**

### **III.1 Introduction**

L'objectif visé de ce chapitre est le diagnostic du comportement diélectrique du papier diélectrique utilisé dans les transformateurs de puissance. Le corps de ce chapitre sera subdivisé en trois parties :

- Partie 1 : Modélisation et prédiction de degré de polymérisation ( $DP_v$ ) en fonction de trois paramètres : temps de vieillissement, température appliquée et par rapport au composant furanique 2-FAL ;
- Partie 2 : Modélisation et prédiction de l'indice de traction ( $T_{idx}$ ) en fonction du degré de polymérisation développé dans la 1<sup>ière</sup> partie ;
- Partie 3 : Diagnostic du papier isolant d'un transformateur de puissance.

La base de données provient des mesures effectuées sur un papier Kraft imprégné dans l'huile Luminol sous l'influence de différents niveaux de température appliquée (150 °C, 170 °C et 190 °C). [37]

L'ensemble de données utilisé pour le développement et le test des deux architectures neuronales se compose de 34 vecteurs : 20 vecteurs (60%) pour l'apprentissage et 14 vecteurs (40%) pour le test de la performance.

### **III.2 Présentation de la base de données utilisée**

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

Dans notre étude, nous intéressons sur le papier Kraft imprégné dans l'huile minérale Luminol. Les résultats expérimentaux sont décrits dans les tableaux (III.1, III.2 et III.3) respectivement. Les étapes suivies pour l'acquisition des résultats sont décrites dans ce qui suit [37] :

Les cellules de vieillissement sont utilisées pour simuler l'environnement d'un transformateur de puissance. À l'intérieur de chaque cellule sont placés les principaux matériaux d'expérience : un porte-échantillon en cuivre, du papier et du fluide isolant. Les essais sont réalisés dans des cellules en aciers inoxydables scellées sous atmosphère ambiante.

Avant que le papier et le fluide être introduits dans les cellules de vieillissement, ils ont été conditionnés à l'équilibre à l'air sec et à une humidité relative de 0,9 % RH à l'intérieur d'une boîte à gants double à 20,8 °C. Les supports avec les bandes de papier ont été placés dans l'antichambre de la boîte à gants double, sous vide et à 40 °C pendant 48 heures. Ce procédé de séchage permet de réduire l'humidité relative originale du papier de plus de 1 % RH à moins de 0,5 % RH. Les échantillons de papier ont été ensuite déplacés de l'antichambre vers la boîte à gants. Après, ils ont été conditionnés jusqu'à ce qu'ils atteignent la valeur nominale de 0,9 % d'humidité relative pendant au moins une semaine. La teneur finale en eau absolue a été mesurée par titrage coulométrique de Karl Fisher avant le début des expériences de vieillissement selon la norme ASTM D3277.

Ensuite, les cellules de vieillissement en aciers inoxydables ont été placées à l'intérieur d'un four à air forcé (Salvis Lab, type TC-100).

Le composé 2-furfuraldéhyde (2-FAL) dans le fluide isolant a été analysé par chromatographie en phase liquide à haute performance (HPLC) basée sur une méthode développée à l'IREQ et la norme ASTM D5837. Cette méthode nécessite des aliquotes d'huile de 2 ml qui sont directement injectés dans le HPLC.

La mesure de l'indice de traction se fait selon deux approches différentes en fonction de la distance entre les mâchoires de l'appareil de traction. Ce sont : « wide span » et « short span ». L'indice de traction « wide span » mesure les propriétés mécaniques du papier et tant que matériau homogène tandis que le « short span » est sur la résistance à la traction des fibres de cellulose de papier. L'essai de traction a été réalisé en utilisant la norme ASTM D828. Pour le « wide span », un échantillon est de 0,05 d'épaisseur, de 25,4 mm de largeur, de 50 mm de longueur de spécimen effective et une vitesse de séparation transversale pendant l'essai a été réglée à 7 mm/min.

Après avoir terminé l'essai de traction, les morceaux d'échantillons de papier cassés ont été recueillis. Avec les morceaux de papier, le degré de polymérisation viscosimétrique moyen ( $DP_v$ ) est mesuré après le broyage des échantillons. La procédure de mesure est basée sur la norme ASTM D4243. Deux mesures par point de vieillissement ont été effectuées pour obtenir une valeur moyenne. Les résultats des essais sont présentés dans les tableaux suivants :

**Tableau III.1 : Résultats d'essai de traction 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 : Résultats d'essai de traction 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	18,76
	424	0,00	181,61	23,02
	568	0,00	168,4	13,68
	784	0,00	151,18	13,11

**Tableau III.3** : Résultats d'essai de traction à  $T = 190\text{ }^{\circ}\text{C}$

Température ( $^{\circ}\text{C}$ )	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	2936,0	220,83	33,62
	112	0,00	212,40	22,83
	118	13079,00	163,88	23,50
	148	13483,00	146,10	22,68
	216	27345,00	117,14	19,57
	236	1984,00	145,27	18,66
	285	18747,00	131,53	16,13

### III.3 Déroulement des étapes de la modélisation et la prédiction

La modélisation et la prédiction a pour le but de diagnostiquer le comportement diélectrique du papier cellulosique en dégradation dans un transformateur de puissance. Pour cela, nous avons divisé le plan de travail en deux parties :

La première partie est consacré à la modélisation et la prédiction du degré de polymérisation du papier Kraft imprégné dans l'huile Luminol en fonction du temps, de la température et de la valeur de 2-FAL.

Les résultats obtenus dans cette partie seront utilisés dans la deuxième partie afin de modéliser et prédire la résistance à la traction de ce papier.

Pour les deux premières parties de travail, nous avons utilisé deux réseaux de neurones artificiels (ANN) de type perceptron multicouches (MLP).

La mise en œuvre de deux réseaux neuronaux nécessite l'activation des étapes suivantes :

- Étape 1 : détermination des entrées/sorties pour chaque réseau ;
- Étape 2 : élaboration de la structure interne et les paramètres de configuration : type du réseau, fonction de transfert, nombre de neurones dans la couche cachée, etc. ;

- Étape 3 : activation des poids. Dans notre cas, ils ont attribué par défaut dans une plage de variation située entre 0 et 1 ;
- Étape 4 : apprentissage des réseaux ANN. L'apprentissage se fait par des algorithmes de rétropropagation afin de minimiser l'erreur entre la sortie désirée et la sortie calculée. Nous avons choisi la fonction « Trainlm » comme fonction d'apprentissage et la fonction « MSE » comme fonction de performance ;
- Étape 5 : test de la performance.

Il est important de mentionner ici que les configurations doivent être modifiées jusqu'à l'obtention d'une erreur faible lors d'apprentissage.

Dans ce qui suit, nous avons présenté les meilleures structures neuronales adaptées pour la modélisation et la prédiction après plusieurs configurations.

### **III.4 Logiciel de simulation**

Les modèles ANNs proposés ont été développés sous l'environnement MATLAB. Ils ont été entraînés pour prédire la résistance à la traction du papier Kraft imprégné dans l'huile Luminol en fonction du degré de polymérisation. Ce dernier a été aussi modélisé en fonction de trois paramètres : temps de vieillissement, température appliquée et 2-FAL utilisant une autre structure neuronale.

## Partie 1 : Modélisation et prédiction de degré de polymérisation

### III.1.1 Introduction

Le degré de polymérisation (DP) indique le nombre moyen d'unités d'anhydroglucose constituant la molécule ; il est de l'ordre 1000 et 1500 ppm pour un papier Kraft neuf. La technique de DP permet de mesurer la longueur de la chaîne cellulosique par la valeur moyenne de DP basée sur la viscosité ( $DP_v$ ) [2, 24].

Ce paramètre est soumis à plusieurs facteurs de dégradation. Dans cette partie, nous avons développé un modèle neuronal de type MLP permettant de calculer le degré de polymérisation en fonction de trois paramètres : temps de vieillissement, température et 2-furfuraldéhyde (2-FAL).

### III.1.2 Préparation des entrées/sorties

Nous avons utilisé la base de données précédentes ; nous avons choisi 14 points d'ordre pair pour le test et les points restants (20 points) pour l'apprentissage de ce réseau (choix du bas vers le haut de la base de données utilisée).

### III.1.3 Élaboration de la structure du réseau

Le réseau de neurones élaboré dans cette partie comporte trois entrées (temps, température et 2-FAL) dans la couche d'entrée, sept neurones dans la couche cachée et une sortie ( $DP_v$ ) dans la couche de sortie. La structure de ce réseau est illustrée dans la figure (III.1.1).

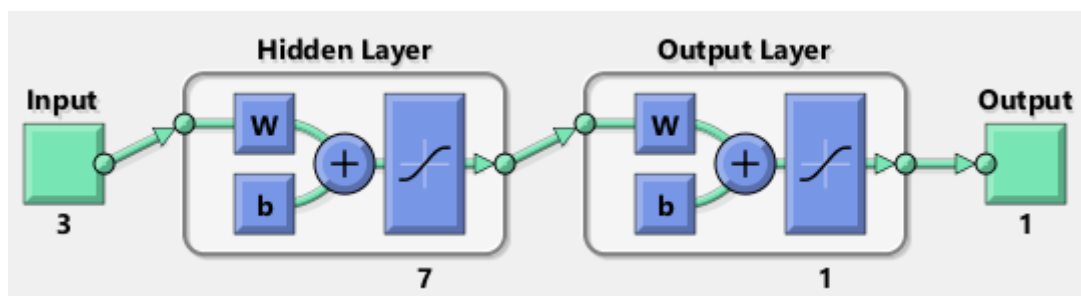


Figure III.1.1 : Structure du réseau ANN\_1

Pour la mise en œuvre de cette structure neuronale, nous avons adopté les paramètres suivants :

- Type du réseau : perceptron multicouches (MLP) ;
- Fonction d'apprentissage : rétropropagation, *Levenberg-Marquardt backpropagation (Trainlm)* ;
- Nombre de couches : 3 couches ;
- Nombre de neurones dans les couches : 3 neurones pour la couche d'entrée, 7 neurones pour la couche cachée et 1 neurone pour la couche de sortie ;
- Fonctions d'activation : tangente sigmoïde (*Tansig*) pour la couche cachée et linéaire (*Purelin*) pour la couche de sortie ;
- Nombre d'itération : 170 itérations.

La régression et les meilleures performances de cette structure neuronale sont illustrées dans les figures (III.1.2) et (III.1.3) ci-dessous.

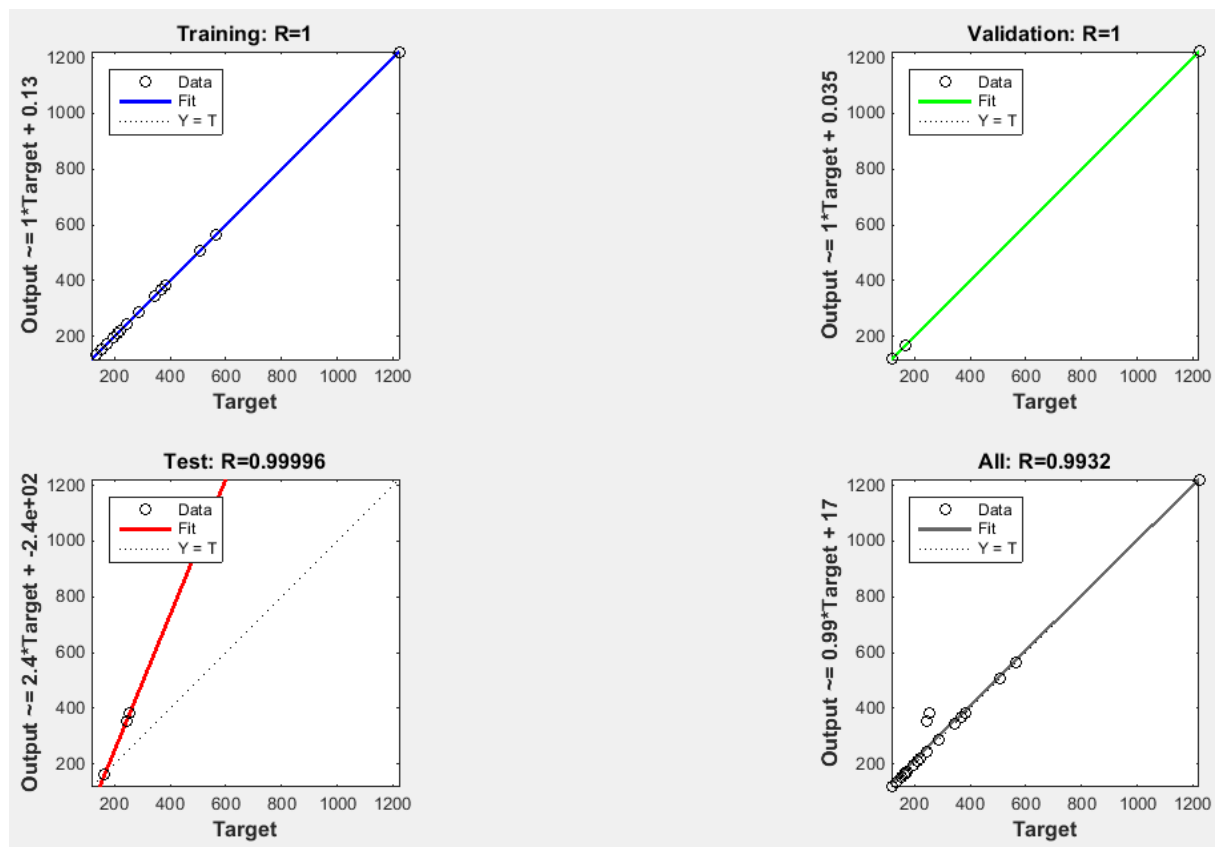


Figure III.1.2 : Régression de l'approche ANN\_1

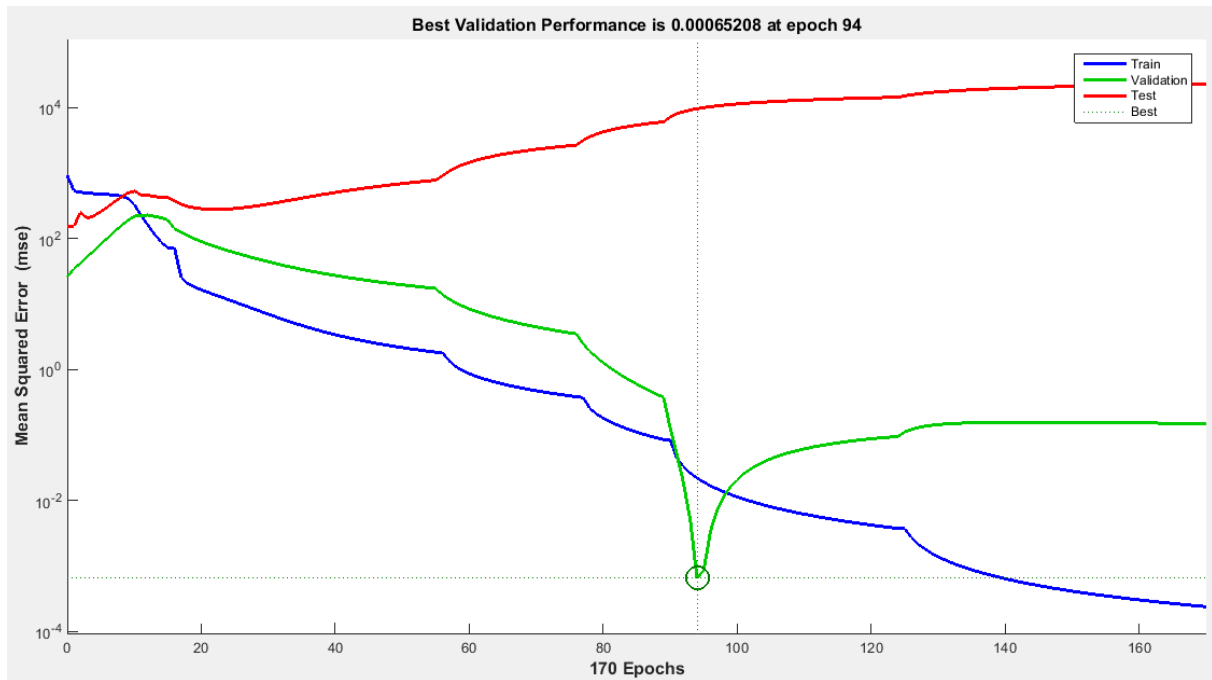


Figure III.1.3 : Performances de l'approche ANN\_1

Les performances remarquées dans les figures (III.1.2) et (III.1.3) indiquent une bonne adaptation aux valeurs désirées. Donc, nous pouvons considérer que ce réseau est bien structuré.

### III.1.4 Résultats de simulation

Le réseau neuronal utilisé a pour but de réaliser une fonction non linéaire. L'apprentissage du réseau est nécessaire pour élaborer cette fonction. Pour cette raison, nous avons utilisé l'apprentissage supervisé ; il se fait par des algorithmes de calcul afin d'adapter les poids pour minimiser l'erreur relative.

Les meilleurs résultats obtenus pour la modélisation et la prédiction de degré de polymérisation ( $DP_v$ ) sont décrits dans le tableau (III.1.1) et la représentation graphique de ces résultats est illustrée dans les figures (III.1.4) et (III.1.5) respectivement.

**Tableau III.1.1** : Résultats de modélisation et prédiction de  $DP_v$

Phases	$DP_v$ expérimental (ppm)	$DP_v$ de simulation (ppm)	Erreurs relatives absolues (%)
<b>Modélisation</b>	1222,47	1124,30	8,03
	383,08	482,95	26,07
	243,54	234,64	3,66
	244,37	389,31	59,31
	220,83	151,7	31,30
	212,40	176,47	16,92
	163,88	119,35	27,17
	117,14	117,95	0,70
	131,53	118,01	10,28
	564,23	563,80	0,08
	370,26	353,12	4,63
	255,74	271,18	6,04
	193,67	228,07	17,76
	168,40	137,27	18,48
	1222,47	1222,50	0,00
	507,93	531,03	4,55
	343,96	299,20	13,01
	287,53	299,01	3,99
	173,96	153,43	11,80
	155,04	117,10	24,47
<b>Prédiction</b>	146,10	118,87	18,64
	145,27	120,53	17,03
	1222,47	1222,5	0,00
	461,88	291,24	36,95
	270,85	286,5	5,80
	192,01	245,00	27,60
	181,61	201,81	11,12
	151,18	117,11	22,54
	686,06	1222,50	78,19
	460,96	299,20	35,09
	300,05	299,18	0,29
	216,11	249,46	15,43
	195,98	118,02	39,78
151,81	117,10	22,86	

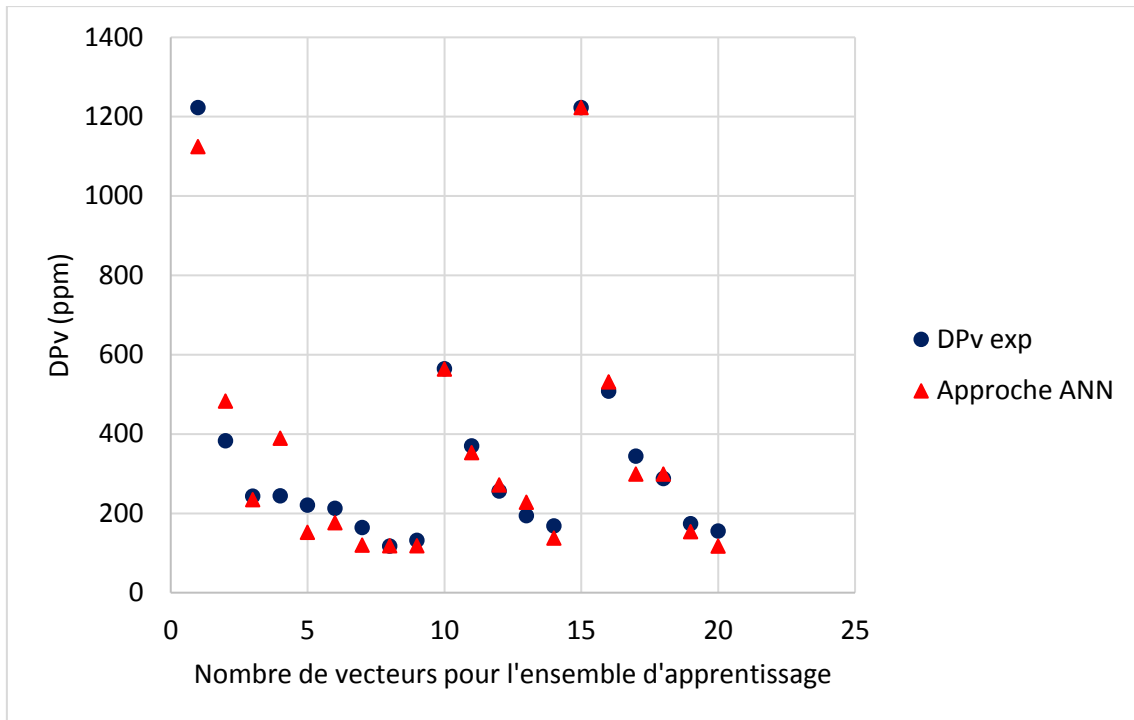


Figure III.1.4 : Modélisation de DP<sub>v</sub>

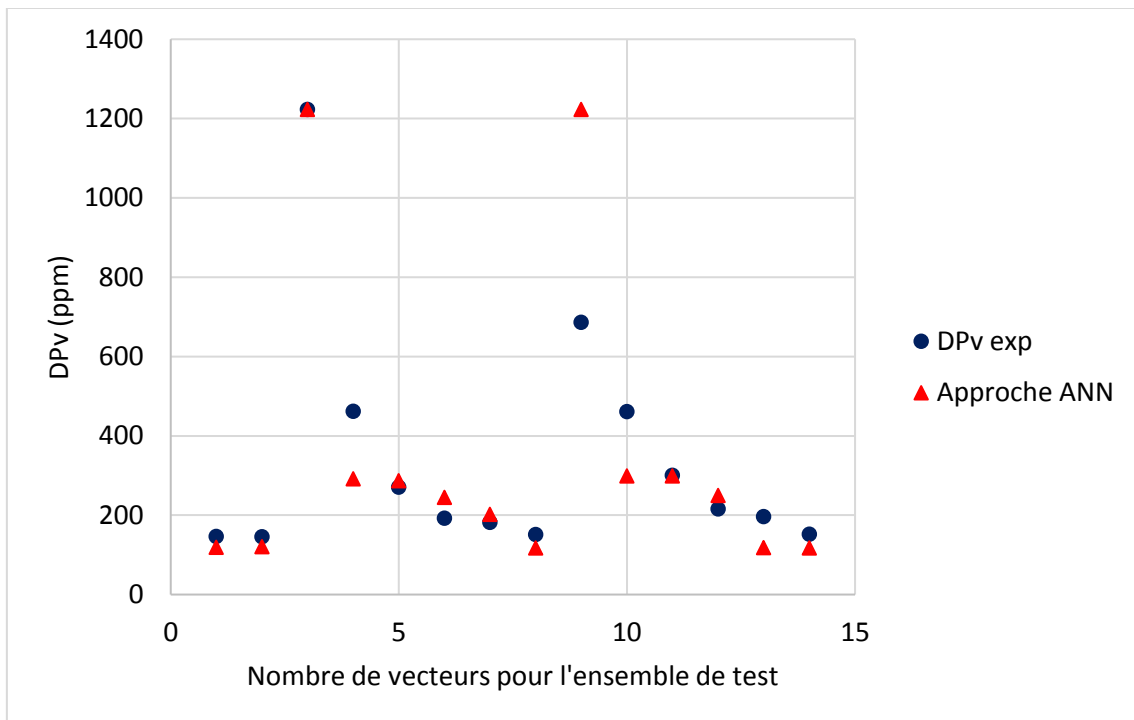


Figure III.1.5 : Prédiction de DP<sub>v</sub>

Les performances de l'approche neuronale utilisée pour la modélisation et la prédiction du DP<sub>v</sub> sont résumées dans le tableau (III.1.2).

**Tableau III.1.2 :** Performances obtenues pour la modélisation et la prédiction de  $DP_v$

Phases	Erreurs relatives absolues (%)			Coefficient de corrélation
	Min	Moy	Max	
Modélisation	0	14,41	59,31	0,9854
Prédiction	0	23,66	78,19	0,9052

### **III.1.5 Analyse et discussion des résultats**

Les meilleures performances obtenues pour la modélisation et la prédiction montrent une bonne précision aux valeurs expérimentales. Dans la phase de test de la performance, la valeur absolue de l'erreur relative moyenne est de l'ordre de 23,66 et la corrélation entre les valeurs désirées et celles estimées par l'approche neuronale est de l'ordre de 0,9052.

D'après les résultats obtenus dans cette partie, nous remarquons que l'erreur relative est faible par contre le coefficient de corrélation est élevé. En effet, ces résultats seront retenus pour l'estimation de l'indice de traction. Nous revenons sur ce point dans la partie suivante.

## Partie 2 : Modélisation et prédiction d'indice de traction

### III.2.1 Introduction

L'indice de traction ( $T_{idx}$ ) ou la résistance à la traction est la contrainte de traction mécanique maximale avec laquelle une éprouvette peut être chargée. Lorsque la résistance à la traction est dépassée, le matériau défaille. Elle est mesurée en ( $N/mm^2$ ) [38].

Cette partie est consacrée à la modélisation et la prédiction de l'indice de traction du papier Kraft en fonction de degré de polymérisation développé dans la première partie.

### III.2.2 Préparation des entrées/sorties

Les résultats de  $DP_v$  obtenus dans la première partie seront donc utilisés comme paramètres d'entrée dans cette partie. Nous avons utilisé les résultats de modélisation de  $DP_v$  (20 vecteurs) pour la modélisation de  $T_{idx}$  et les résultats de prédiction de  $DP_v$  (14 vecteurs) pour la prédiction de  $T_{idx}$ .

### III.2.3 Élaboration de la structure du réseau

Le réseau de neurones élaboré dans cette partie comporte une entrée ( $DP_v$ ) dans la couche d'entrée, cinq neurones dans la couche cachée et une sortie ( $T_{idx}$ ) dans la couche de sortie. La structure de ce réseau est illustrée dans la figure (III.2.1).

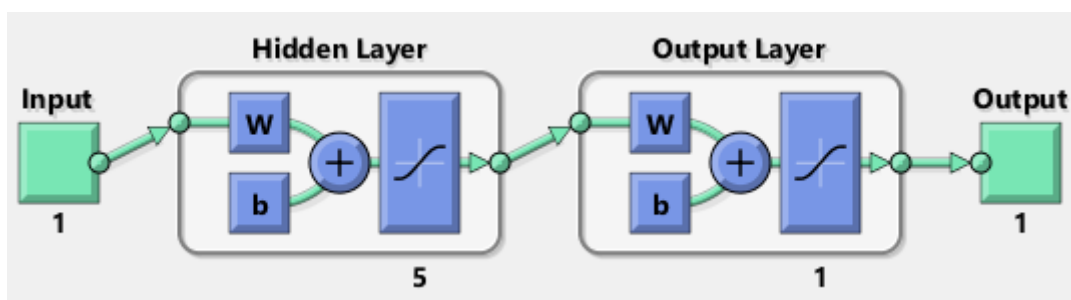


Figure III.2.1 : Structure du réseau ANN\_2

Cette structure neuronale a été adoptée par les configurations suivantes :

- Type du réseau : perceptron multicouches (MLP) ;

- Fonction d'apprentissage : rétropropagation, *Levenberg-Marquardt backpropagation (Trainlm)* ;
- Nombre de couches : 3 couches ;
- Nombre de neurones dans les couches : 1 neurone pour la couche d'entrée, 5 neurones pour la couche cachée et 1 neurones pour la couche de sortie ;
- Fonctions d'activation : tangente sigmoïde (*Tansig*) pour la couche cachée et linéaire (*Purelin*) pour la couche de sortie ;
- Nombre d'itérations : 18 itérations.

La régression et les meilleures performances de cette structure neuronale sont illustrées dans les figures (III.2.2) et (III.2.3).

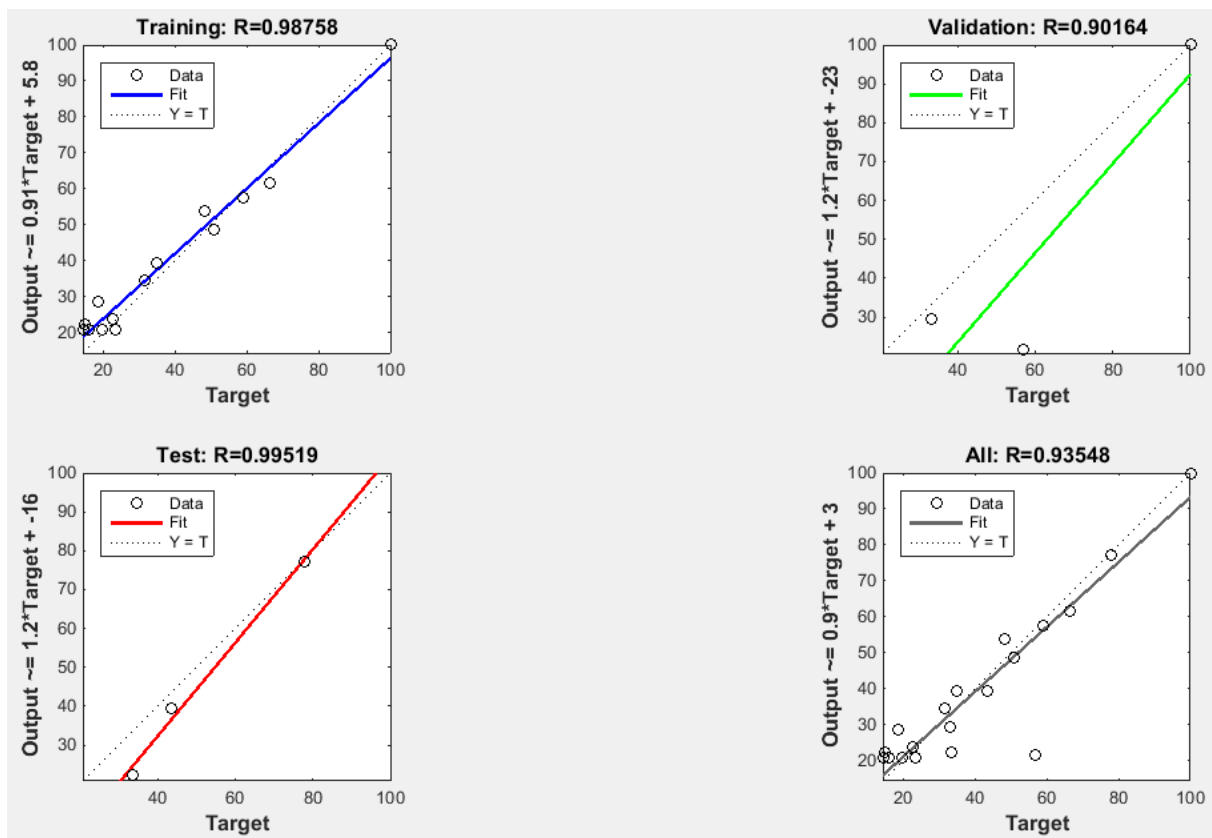


Figure III.2.2 : Régression de l'approche ANN\_2

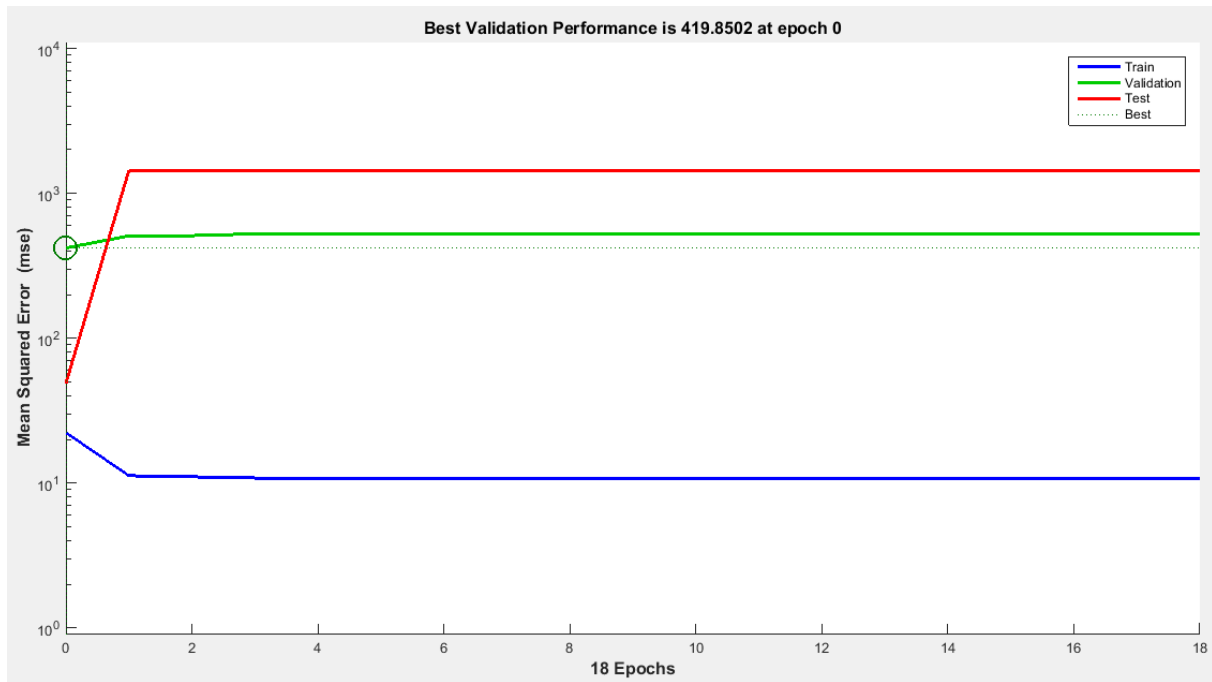


Figure III.2.3 : Performances de l'approche ANN\_2

Les performances remarquées dans les figures (III.2.2) et (III.2.3) indiquent une bonne adaptation aux valeurs désirées. Donc, nous pouvons considérer que ce réseau est bien structuré.

### III.2.4 Résultats de simulation

L'apprentissage supervisé dans cette partie consiste à entraîner le réseau neuronal d'une manière que l'erreur relative dans la phase de test devienne plus faible en variant les paramètres du réseau tels que : la fonction d'activation, le nombre de neurones dans la couche cachée, le nombre d'itérations, etc.

Les meilleurs résultats obtenus pour la modélisation et la prédiction de l'indice de traction (Tidx) sont décrits dans le tableau (III.2.1) et la représentation graphique de ces résultats est illustrée dans les figures (III.2.4) et (III.2.5) respectivement.

**Tableau III.2.1 : Résultats de modélisation et prédiction de Tidx**

Phases	Tidx expérimental (%)	Tidx de simulation (%)	Erreurs relatives absolues (%)
<b>Modélisation</b>	100,00	98,17	1,83
	66,61	61,03	8,39
	33,21	19,33	41,81
	48,27	58,60	21,41
	33,62	33,61	0,03
	22,83	14,41	36,88
	23,50	24,00	2,15
	19,57	18,40	5,99
	16,13	18,55	15,03
	77,89	77,89	0,00
	50,86	55,22	8,59
	31,70	32,53	2,62
	18,76	17,78	5,21
	56,80	56,57	0,40
	100,00	100,00	0,00
	59,15	61,31	3,65
	43,51	43,10	0,95
	35,09	43,03	22,64
	14,93	14,40	3,52
14,41	16,71	15,99	
<b>Prédiction</b>	22,68	21,51	5,15
	18,66	33,96	82,00
	100,00	100,00	0,00
	66,96	40,33	39,76
	34,00	38,58	13,49
	26,59	22,43	15,64
	23,02	14,77	35,84
	13,11	16,72	27,52
	74,20	100,00	34,77
	59,07	43,10	27,04
	28,00	43,09	53,87
	16,00	23,98	49,86
	40,49	18,57	54,14
9,36	16,71	78,46	

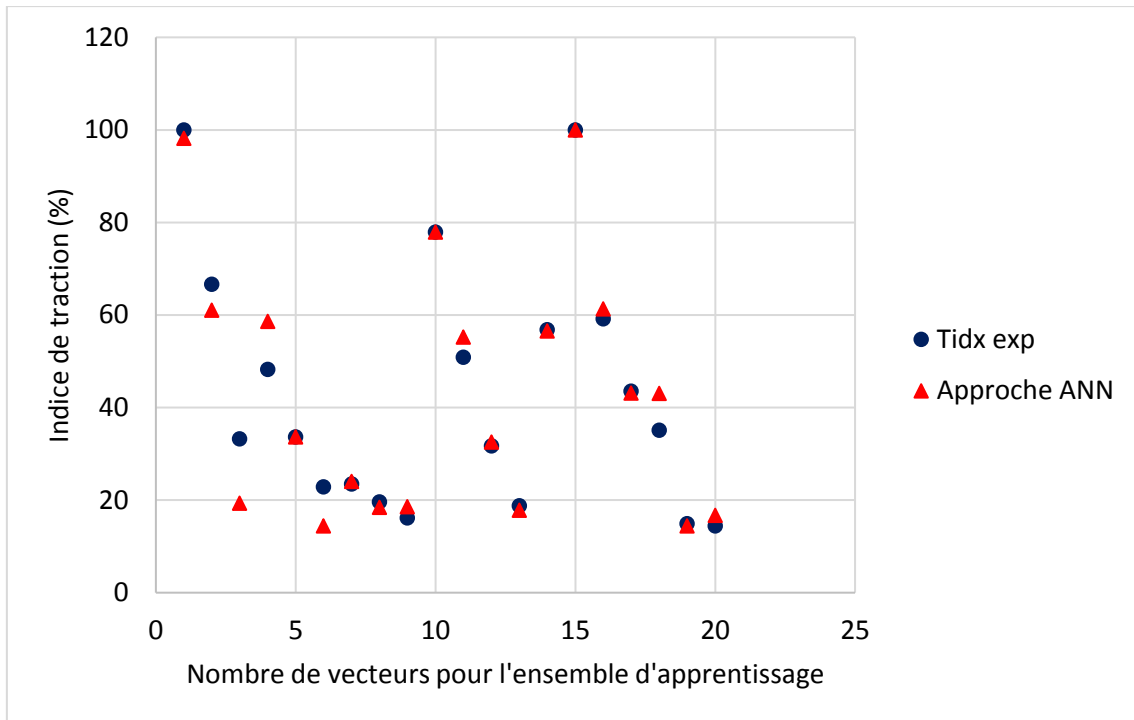


Figure III.2.4 : Modélisation de Tidx

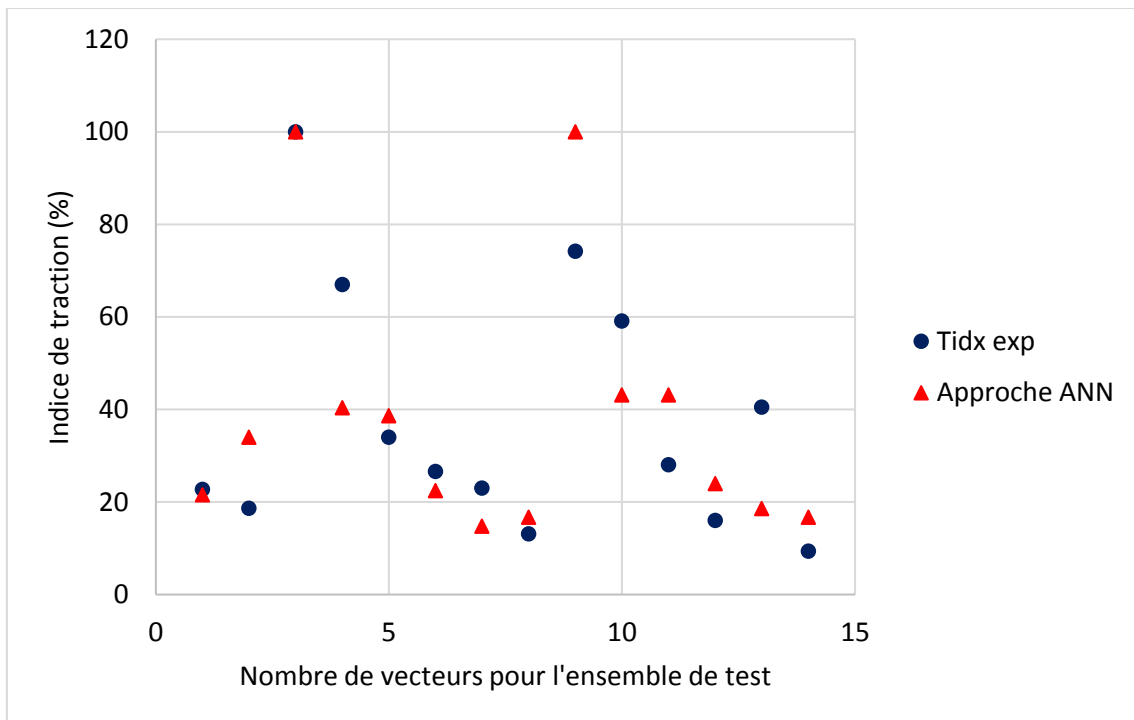


Figure III.2.5 : Prédiction de Tidx

Les performances de l'approche neuronale utilisée pour la modélisation et la prédiction de Tidx sont résumées dans le tableau (III.2.2).

**Tableau III.2.2 :** Performances obtenues pour la modélisation et la prédiction de Tidx

Phases	Erreurs relatives absolues (%)			Coefficient de corrélation
	Min	Moy	Max	
Modélisation	0	9,85	41,81	0,9818
Prédiction	0	36,97	82	0,8585

### **III.2.5 Analyse et discussion des résultats**

Les résultats obtenus démontrent l'efficacité du modèle neuronal élaboré reproduit un indice de traction (Tidx) avec une erreur relative moyenne absolue de 36,97 et une valeur de coefficient de corrélation de l'ordre 0,8585.

Le modèle neuronal est capable de déterminer l'indice de traction (Tidx) à partir des mesures de degré de polymérisation (DP<sub>v</sub>).

## **Partie 3 : Diagnostic du papier isolant du transformateur de puissance**

### **III.3.1 Introduction**

La mise en service des transformateurs de puissance dépendue à leur qualité d'isolation. La durée de vie d'un transformateur de puissance est environ 25 et 40 ans pour une exploitation adéquate suivant les conditions d'utilisation nominales et suivant l'échéancier de la maintenance effectuée. Elle peut atteindre jusqu'à 60 ans dans quelques cas [1].

Différents facteurs de vieillissement peuvent réduire la durée de vie des transformateurs de puissance. Les tests de diagnostic permettant de détecter ces facteurs dès le début et de déterminer l'état de fonctionnement afin d'assurer la fiabilité de cet équipement [39].

Dans cette partie, nous avons exploité la base de données et les résultats de simulation pour diagnostiquer le comportement diélectrique du papier Kraft utilisé pour l'isolation solide des transformateurs de puissance.

### **III.3.2 Diagnostic de degré de polymérisation**

La dégradation du papier Kraft dans les transformateurs de puissance peut être détectée par la mesure de DP. La durée de vie écoulée et la durée de vie restante d'un transformateur de puissance est calculé par les deux formules de Pradhan et al. Où les valeurs de DP varient de 1200 ppm à 1000 ppm et 200 ppm pour un papier détérioré. [40]

L'équation (III.1) exprime la vie écoulée d'un transformateur en années et l'équation (III.2) exprime la vie restante en pourcentage [40].

$$\text{Durée de vie écoulée (années)} = 20,5 * \ln\left(\frac{1100}{DP}\right) \quad (\text{III.3.1})$$

$$\text{Durée de vie restante (\%)} = 100 * \left[ \frac{(DP - 200)}{(1200 - 200)} \right] \quad (\text{III.3.2})$$

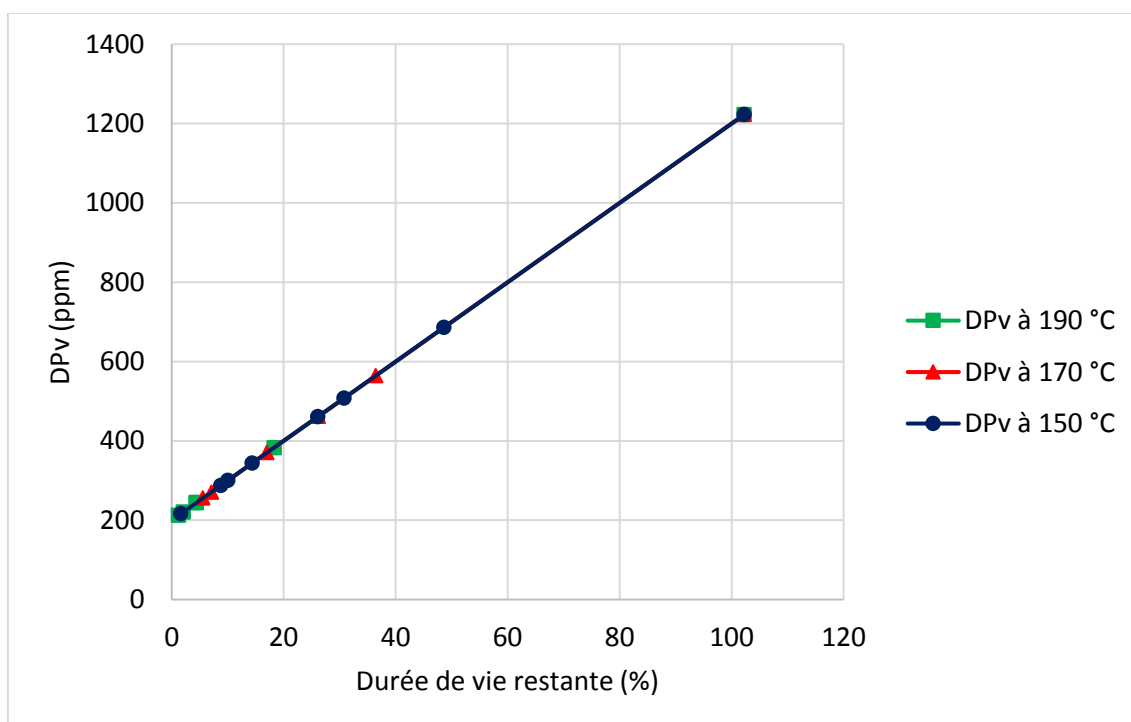
L'estimation de la durée de vie moyenne d'un transformateur de puissance est 35 années [40]. L'application des deux équations (III.3.1) et (III.3.2) aux résultats de la base de données utilisée

dans notre étude permettant de calculer les durées de vie écoulée et restante du transformateur de puissance étudié. Les résultats obtenus sont indiqués dans le tableau (III.3.1) suivant :

**Tableau III.3.1** : Estimation de la durée de vie écoulée et restante du transformateur étudié

Température (°C)	150	170	190
Valeur moyenne du DP <sub>v</sub> (ppm)	391,82	366,57	293,69
Durée d'opération du transformateur (années)	35	35	35
Durée de vie écoulée (%)	80,82	83,34	90,63
Durée de vie écoulée (années)	21,16	22,53	27,07
Durée de vie restante (%)	19,18	16,66	9,37
Durée de vie restante (années)	13,84	12,47	7,93

La figure (III.3.1) représente les variations de DP<sub>v</sub> en fonction de la durée de vie restante du transformateur de puissance utilisé pour les trois niveaux de température (150, 170 et 190 °C).



**Figure III.3.1** : Corrélation entre le degré de polymérisation de la cellulose et la durée de vie restante du transformateur

À 150 °C et plus de 4600 heures, le DP<sub>v</sub> atteint une faible valeur (151,8 ppm) et la durée de vie écoulée du transformateur est 80,82 %. Nous remarquons que ces deux facteurs : température et temps, provoquent une dégradation rapide du DP<sub>v</sub> et donc le vieillissement de la cellulose.

À 170 °C, nous avons remarqué que le  $DP_v$  atteint une faible valeur (151,2 ppm) en 785 heures et la durée de vie écoulée du transformateur est 83,34 %. Dans ce cas, le vieillissement est plus rapide que celui remarqué à 150 °C. Donc, nous pouvons constater que le papier Kraft commence à un vieillissement accéléré.

À 190 °C, nous avons remarqué que le  $DP_v$  atteint une valeur très faible (131,5 ppm) à moins de 285 heures. Ce qui indique les critères de la fin de vie de ce transformateur. À cette température, le papier est subi à un vieillissement accéléré très rapide.

### III.3.3 Diagnostic d'indice de traction

Nous avons remarqué dans la deuxième partie de ce chapitre une forte corrélation entre le  $DP_v$  et l'indice de traction du papier Kraft. Pour un papier neuf, le  $DP_v$  est environ 1000 et 1500 ppm et le  $Tidx$  est 100%. Après une certaine durée de vie sous des contraintes électriques et thermiques inappropriées, ils se dégradent proportionnellement jusqu'à des valeurs critiques. Ce qui indique la perte de traction et donc la détérioration du papier.

Autres paramètres de vieillissement importants influent sur le  $Tidx$ . Ce sont : la température et le temps. L'influence de ces deux paramètres sur le  $Tidx$  est illustrée dans la figure (III.3.2).

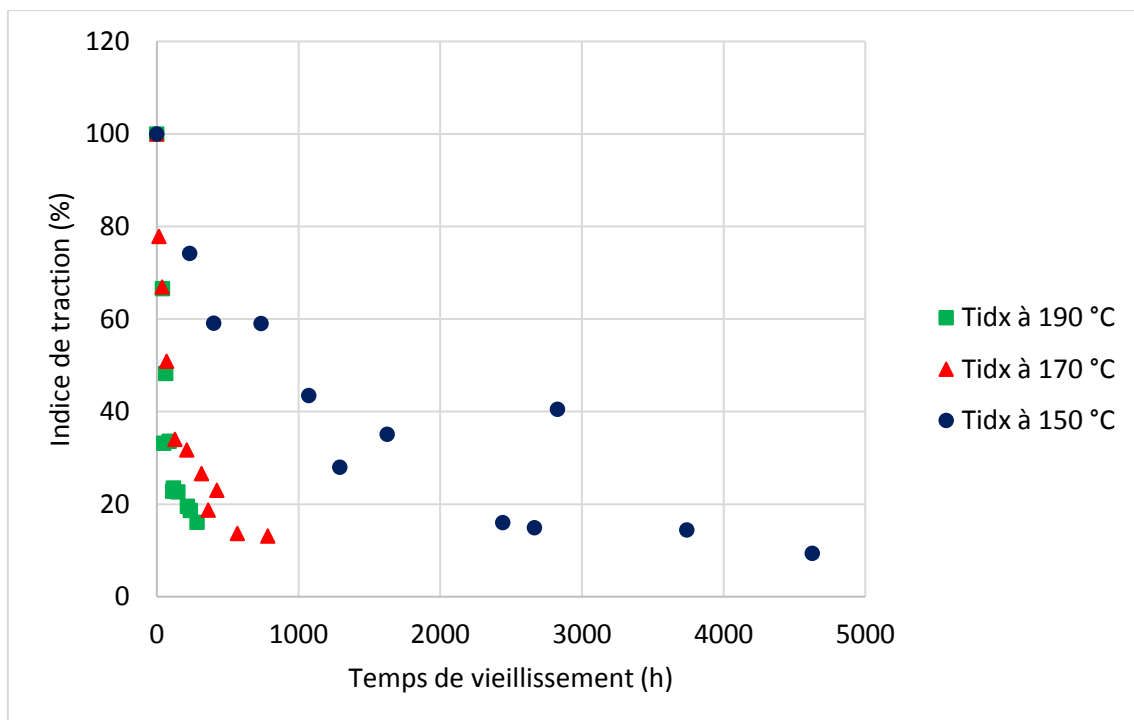
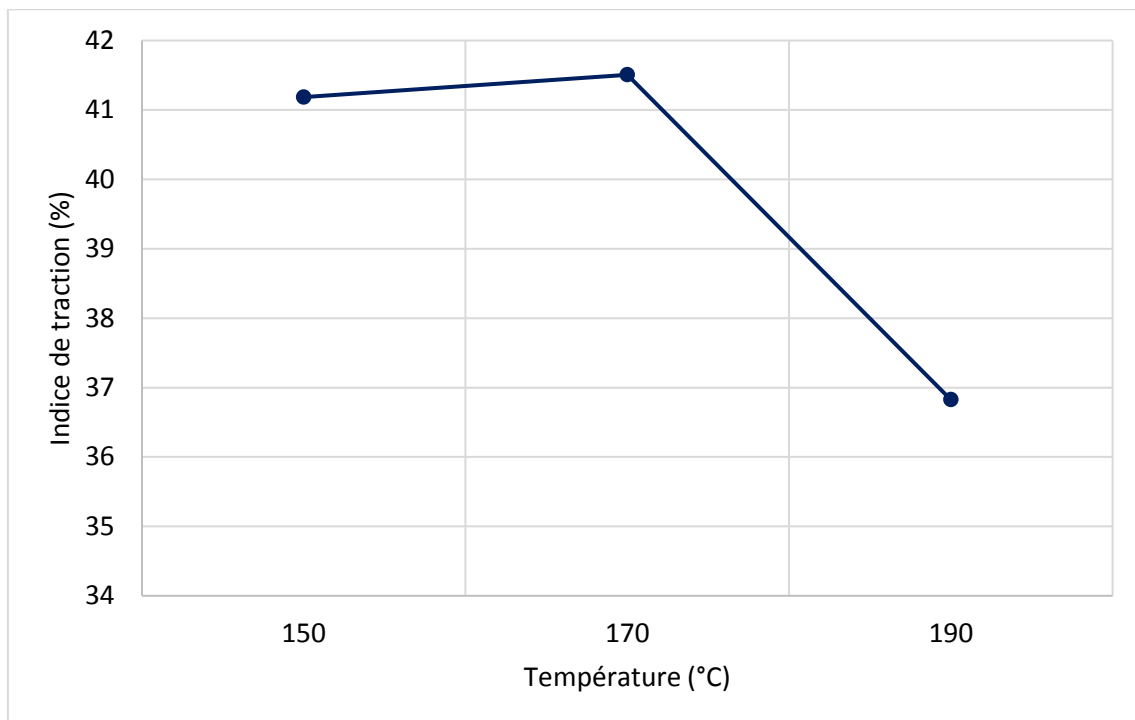


Figure III.3.2 : Évolution de l'indice de traction dans le temps

D'après la figure précédente, nous avons remarqué que le Tidx se dégrade rapidement avec le temps pour les trois niveaux de température avec différentes vitesses. Plus la température est élevée, plus la vitesse de dégradation est élevée. Il commence à un vieillissement accéléré à partir de 170 °C.

Pour plus comprendre l'influence de la température sur la perte des propriétés mécaniques du papier isolant, la figure (III.3.3) représente la dégradation de l'indice de traction (Tidx) en fonction de la température d'opération.



**Figure III.3.3 :** Influence de la température sur la valeur d'indice de traction

Sachant que le Tidx dans un papier neuf est 100 %. À 150 °C, la valeur moyenne du Tidx atteint 41,19 %. Une dégradation constante a été observée entre 150 °C et 170 °C (prenant en considération l'erreur de mesure). Ce qui indique l'influence de la température sur le vieillissement de la cellulose.

Entre les températures 170 °C et 190 °C, le Tidx, nous constatons une dégradation accélérée avec une pente de 0,24. Ce qui confirme la forte corrélation entre l'augmentation de la température et la perte des propriétés mécaniques du papier Kraft.

### **III.5 Conclusion**

Ce chapitre a pour but de diagnostiquer le comportement diélectrique du papier Kraft. Pour cela, nous avons développé deux approches neuronales : la première est développée pour la modélisation de  $DP_v$  et la deuxième est développée pour la prédiction de la résistance à la traction d'un papier Kraft imprégné dans l'huile Luminol.

Dans la première partie, nous avons modélisé et prédit le degré de polymérisation ( $DP_v$ ) en fonction de trois paramètres : le temps de vieillissement, la température appliquée et par rapport à la concentration du 2-furfuraldéhyde (2-FAL) utilisant pour cela un réseau MLP. Nous avons obtenu des résultats satisfaisants et acceptables.

Dans la deuxième partie, nous avons développé une nouvelle approche neuronale de type MLP et nous avons utilisé les résultats obtenus dans la première partie comme paramètres d'entrée afin de modéliser et prédire l'indice de traction ( $Tidx$ ). Cette approche ANN nous a permis de prédire la résistance à la traction en fonction du degré de polymérisation. Une forte corrélation entre ces deux paramètres de vieillissement a été montrée.

Nous constatons aussi que la perte des propriétés mécaniques du papier cellulosique dépendue fortement à la dépolymérisation de la cellulose. Cette dernière est soumise à un vieillissement accéléré dans l'huile de transformateur à partir de 170 °C.

# **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 et une exploitation efficace et sûre.

La vie d'un transformateur de puissance dépendue principalement 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 et le diagnostic diélectrique du papier Kraft utilisé comme isolant solide dans les transformateurs de puissance. Pour cela, nous avons utilisé les données provenant des mesures effectuées sur un papier Kraft imprégné dans l'huile Luminol sous l'influence de trois niveaux de température appliquées (150 °C, 170 °C et 190 °C).

Sur la base de la corrélation entre la dépolymérisation de la cellulose et la dégradation des propriétés mécaniques du papier Kraft, nous avons retenu l'hypothèse que les trois paramètres : temps, température et concentration du composé chimique 2-furfuraldéhyde, pourrait contribuer à la dépolymérisation de la cellulose dans l'huile du transformateur.

Nous avons élaboré deux techniques intelligentes à base des réseaux de neurones artificiels de type perceptron multicouches (MLP) ; la première consiste à modéliser et prédire le degré de polymérisation ( $DP_v$ ) en fonction de trois paramètres : temps, température et 2-FAL. Tandis que la deuxième, consiste à modéliser et prédire la résistance à la traction ( $T_{idx}$ ) en fonction du  $DP_v$ . Les résultats obtenus ont été jugés satisfaisants et acceptables. L'approche préconisée et interprétée montre une bonne adéquation avec les relevés expérimentaux. Ce qui justifie l'efficacité de cette technique dans la modélisation et la prédiction.

Ces travaux ouvrent également de nombreuses perspectives. Nous recommandons de poursuivre cette étude par d'autres techniques de l'intelligence artificielle telles que la logique floue (FL), les réseaux hybrides neuro-flous ou des méthodes d'optimisation telles que les algorithmes génétiques (GA) et les algorithmes d'essaims de particules (PSO). Le but étant de faire une évaluation comparative.

# **BIBLIOGRAPHIE**

- [1] 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, p. 3.
- [2] ABU BAKAR Norazhar, ABU-SIADA A et ISLAM S. A review on chemical diagnosis techniques for transformer paper insulation degradation. [En ligne]. Disponible sur : <https://ieeexplore.ieee.org/document/6725476>. (Page consultée le 31 Mai 2021)
- [3] Wikipédia. Transformateur de puissance. [En ligne]. Disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur\\_de\\_puissance](https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur_de_puissance). (Page consultée le 27 Mai 2021)
- [4] MANSOUR Amari. Le transformateur monophasé [en ligne]. Travaux dirigés. Nabeul : Institut supérieur des études technologiques, 2014. Disponible sur : <http://www.isetn.rnu.tn/archives/fr/images/documents/cours/tdelectronique2.pdf>. (Consultée le 12 Juillet 2021)
- [5] 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. 14.
- [6] 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. 11.
- [7] Energieplus-lesite. Transformateurs. [En ligne]. Disponible sur : <https://energieplus-lesite.be/wp-content/uploads/2019/03/transformateurtriphase.gif>. (Page consultée le 28 Mai 2021)
- [8] Wikipédia. Transformateur de puissance. [En ligne]. Disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur\\_de\\_puissance#Construction\\_interne](https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur_de_puissance#Construction_interne). (Page consultée le 27 Mai 2021)
- [9] Wikipédia. Traversée isolée. [En ligne]. Disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Traversée\\_isolée](https://fr.wikipedia.org/wiki/Traversée_isolée). (Page consultée le 8 Juin 2021)
- [10] Wikipédia. Changeur de prises. [En ligne]. Disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Changeur\\_de\\_prises](https://fr.wikipedia.org/wiki/Changeur_de_prises). (Page consultée le 8 Juin 2021)

- [11] Wikipédia. Transformateur de puissance. [En ligne]. Disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur\\_de\\_puissance#Cuve](https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur_de_puissance#Cuve). (Page consultée le 29 Mai 2021).
- [12] Wikipédia. Transformateur de puissance. [En ligne]. Disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur\\_de\\_puissance#Conservateur](https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur_de_puissance#Conservateur). (Page consultée le 8 Juin 2021)
- [13] Wikipédia. Transformateur de puissance. [En ligne]. Disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur\\_de\\_puissance#Le\\_système\\_de\\_refroidissement](https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur_de_puissance#Le_système_de_refroidissement). (Page consultée le 27 Mai 2021)
- [14] Wikipédia. Transformateur de puissance. [En ligne]. Disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur\\_de\\_puissance#Composants\\_associés\\_au\\_transformateur\\_de\\_puissance](https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur_de_puissance#Composants_associés_au_transformateur_de_puissance). (Page consultée le 27 Mai 2021)
- [15] Wikipédia. Transformateur de puissance. [En ligne]. Disponible sur : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur\\_de\\_puissance#Défauts\\_et\\_Protections](https://fr.wikipedia.org/wiki/Transformateur_de_puissance#Défauts_et_Protections). (Page consultée le 9 Juin 2021)
- [16] ABDELKEBIR Amir et SAADI Nassim. Application de la logique floue pour le diagnostic des transformateurs de puissance par analyse des gaz dissous. Mémoire de master. Boumerdes : Université M'Hamed Bougara, 2017, p. 9-10.
- [17] Sitelec. Les transformateurs. [En ligne]. Disponible sur : [https://sitelec.org/download\\_page.php?filename=cours/transformateurs\\_pms.pdf](https://sitelec.org/download_page.php?filename=cours/transformateurs_pms.pdf). (Page consultée le 7 Juin 2021)
- [18] 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. 20.
- [19] 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. 16-30.
- [20] TALEB Yousra. Raffinage du pétrole. Les combustibles fossiles : formation et pyrolyse du kérogène. [En ligne]. Disponible sur : <https://slideplayer.fr/slide/11801521/>. (Page consultée le 29 Mai 2021)
- [21] Surprises. Les annexes. [En ligne]. Disponible sur : <http://www.surprises.ch/HT/A-HAUTE-TENSION.html>. (Page consultée le 1 Juin 2021)

- [22] 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, p. 17-33.
- [23] Antalis. Le papier kraft, la solution pour le calage de vos produits. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.antalis.fr/accueil/foire-aux-questions/produits/papier-kraft.html>. (Page consultée le 31 Mai 2021)
- [24] 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. 30-37.
- [25] 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. 39.
- [26] BASTIEN L. Réseau de neurones artificiels : qu'est-ce que c'est et à quoi ça sert ?. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.lebigdata.fr/reseau-de-neurones-artificiels-definition>. (Page consultée le 4 Juin 2021)
- [27] BESSEDIK Sid Ahmed. Contournement des isolateurs pollués [en ligne]. Thèse de doctorat d'université. Oran : Université Mohamed Boudiaf, 2015. Disponible sur : [https://www.univ-usto.dz/images/coursenligne/These\\_Doctorat\\_Bessedik.pdf](https://www.univ-usto.dz/images/coursenligne/These_Doctorat_Bessedik.pdf). (Consultée le 4 Juin 2021)
- [28] DEJASMIN Julien. Histoire du deep learning. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.natural-solutions.eu/blog/histoire-du-deep-learning>. (Page consultée le 5 Juin 2021)
- [29] BAOUCHE Rafik. Prédiction des paramètres physiques des couches pétrolifères par analyse des réseaux de neurones et analyse faciologique [en ligne]. Thèse de doctorat d'université. Boumerdes : Université M'Hamed Bougara, 2020. Disponible sur : [https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/tel-01150323/file/These\\_Baouche.pdf](https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/tel-01150323/file/These_Baouche.pdf). (Consultée le 5 Juin 2021)
- [30] DREYFUS Gérard. Réseaux de neurones. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/reseaux-de-neurones-formels/5-l-apprentissage-des-reseaux-de-neurones-formels/>. (Page consultée le 5 Juin 2021)

- [31] BOUDRAA Saliha. Analyse des gaz dessous dans les huiles des transformateurs en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle. Mémoire de magister. Batna : Université de Batna, 2005, p. 34.
- [32] Mathworks. Réseau de neurones. [En ligne]. Disponible sur : <https://fr.mathworks.com/discovery/neural-network.html>. (Page consultée le 6 Juin 2021)
- [33] DREYFUS Gérard. Réseaux de neurones. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.universalis.fr/encyclopedie/reseaux-de-neurones-formels/6-quelques-exemples-d-applications-des-reseaux-de-neurones/>. (Page consultée le 7 Juin 2021)
- [34] POMERLEAU Dean A. ALVINN : An autonomous land vehicle in a neural network [en ligne]. Thèse d'ingénieur d'université. Pittsburgh : Université de Carnegie Mellon, 1988. Disponible sur : <https://papers.nips.cc/paper/1988/file/812b4ba287f5ee0bc9d43bbf5bbe87fb-Paper.pdf>. (Consultée le 7 Juin 2021)
- [35] BESSISSA Lakhdar. Prédiction et diagnostic des propriétés des câbles de haute tension sous vieillissement thermique en utilisant les techniques de l'intelligence artificielle. Thèse de doctorat d'université. Laghouat : Université Amar Telidji, 2014, p. 35-44.
- [36] YAO Mariya. Understanding the limits of deep learning. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.topbots.com/understanding-limits-deep-learning-artificial-intelligence/>. (Page consultée le 12 Juin 2021)
- [37] 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, p. 65-75.
- [38] Zwick Roell. Résistance à la traction. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.zwickroell.com/fr/secteurs-dactivite/test-de-materiau-essai-de-materiau/essai-de-traction/resistance-a-la-traction/>. (Page consultée le 16 Juin 2021)
- [39] Omicron. Diagnostic des transformateurs de puissance. [En ligne]. Disponible sur : <https://www.omicronenergy.com/fr/applications/diagnostics-des-transformateurs-de-puissance/>. (Page consultée le 27 Juin 2021)
- [40] 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.