

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université -Ain-Temouchent- Belhadj Bouchaib
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique



Projet de fin d'études
Pour l'obtention du diplôme de Master en :
Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commandes Electriques
Thème

*Diagnostics de l'état des transformateurs de puissance
par l'application de l'apprentissage automatique*

Présenté Par :

- 1) Mr. PONA Daouda
- 2) Mr. TRAORE Mamadou

Devant le jury composé de :

Dr MESSAFEUR Radjaa	MAB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Président
Dr ADJOUJ Labiba	MAB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Examineur
Dr BOUDJELLA Fatima Zohra	MAB	UAT.B.B (Ain Temouchent)	Encadrant

Année universitaire 2023/2024

REMERCIEMENT

Nous remercions ALLAH le tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail. Même si parfois les mots semblent fades à côté de la profondeur des sentiments, il faut pourtant les concrétiser en remerciements, pour honorer tous ceux qui nous ont aidés à franchir ce pas vers l'avenir.

Nous aimerions profiter de cette occasion pour remercier, Dr BOUDJELLA Fatima Zhora, pour son inspiration et sa direction continue tout au long de notre travail. Ses conseils nous ont aidés tout au long de la recherche et de l'écriture de ce mémoire. Pour sa disponibilité et sa présence à tous mes séminaires.

Nous remercions également les jurys qui nous ont honorés en acceptant de juger et d'enrichir ce modeste travail.

Nos remerciements sont destinés aussi à nos familles, et tous nos amis pour leur aide et leur soutien.

Dédicace

Je dédie ce travail

A ma famille, ma mère Sidibé Coumba et mon père Traore Adama qui m'ont toujours soutenu tout au long de mon parcours vous avez ma reconnaissance éternelle chère parents.

Aussi mon frère Traore Abdoulaye et ma sœur Traore Bintou merci pour le soutien !

Pour finir ce travail est aussi dédié a mes très chers amis qui ont toujours été présent pour moi, ils sont nombreux mais plus précisément Salimata Omar Toure et Dembélé Mamadou, Merci pour tout !

Traore Mamadou

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A ma source de bonheur :

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur bonté, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout long de mes études.

Puisse DIEU prolonge leur vie dans le bonheur.

A mes frères et à mes sœurs pour leur soutien de près ou de loin.

A toute ma famille pour tout soutien.

A tous mes amis (es).

A tous les professeurs qui m'ont accompagné.

PONA DAOU DA

Table des matières

Induction générale	1
Chapitre 01 : Généralités sur les Transformateurs de puissance.....	3
1.1 Introduction.....	4
1.1.2 Définition.....	5
1.2 Classification.....	6
1.3 Principe de fonctionnement du transformateur.....	6
1.3.1 Symbole électrique	7
1.4. La constitution d'un transformateur de puissance	8
1.4.1 Circuit magnétique	8
A) Type cuirassé	9
1. Les enroulements.....	9
2. Avantages et inconvénients du transformateur cuirassé.....	10
B) Type à colonnes.....	10
1. Les enroulements	11
2. Limitations des transformateurs à colonnes.....	11
1.4.2 Circuit électrique	11
a. Bobinage concentrique simple.....	12
b. Bobinage concentrique double	12
c. Bobinage à galette.....	12
1.4.3 La cuve.....	13
1.4.4 Groupe de couplage.....	13
a) Couplage étoile-étoile.....	14
a) Couplage étoile-étoile.....	14
c) Couplage étoile-zigzag.....	15
1.5 Système d'isolation d'un transformateur de puissance.....	15
1.5.1 L'isolation liquide (L'huile)	15

Tableau des matières

a) Isolation liquide conventionnelle.....	16
b) Isolation liquide haute température	16
c) Choix d'une huile pour une application spécifique.....	17
1.5.2 L'isolation solide (Papier et carton).....	17
✓ Le papier Kraft.....	18
1.5.3 Le système de refroidissement du transformateur	18
✓ Eléments de refroidissement.....	19
1.6 Phénomènes de Vieillissement.....	20
1.6.1 Dégradation de l'huile minérale isolante.....	20
1.6.2 La dégradation du papier isolante.....	21
1.6.3 Vieillissement du complexe huile/ papier.....	21
1.7 Conclusion.....	22
Chapitre 02 : méthodes de diagnostic des défaillances des transformateurs de puissance.....	23
2.1 Introduction.....	24
2.2 Définition.....	25
• Défaut.....	25
• Défaillance.....	25
• Diagnostic.....	25
2.3. Importance du diagnostic de transformateur de puissance et Identification et cause des défauts naissants.....	25
2.3.1 Défaillances d'origine interne.	26
2.3.2 Défaillances d'origine externe.....	26
2.3.3. Contraintes.....	26
2.3.4 Dégradations des isolants.....	27
2.3.5 Durée de vie d'un transformateur	28
2.4 Technique de diagnostic et évaluation de l'état d'un transformateur de puissance	28
2.4.1 Les Techniques traditionnelles.....	29

2.4.2 Analyses physico-chimiques de l'huile isolante (APC)	29
➤ Qualité de l'huile	29
❖ Couleur et apparence.....	29
❖ Acidité.....	30
❖ Tension de claquage ou (rigidité diélectrique).....	31
❖ La viscosité	31
❖ Teneur en eau.....	32
2.4.3 L'Analyse des gaz (AGD).....	32
✓ Technique des rapports	32
✓ Représentations graphiques (méthode de Duval).....	32
A. Gaz de défaut.....	33
B. Procédure d'analyse des gaz dissous dans l'huile	34
✓ Echantillonnage de l'huile	34
✓ Extraction des gaz de l'huile	35
✓ Analyse des gaz extraits de l'huile.....	35
C. Méthodes d'interprétation d'analyse des gaz dissous.....	35
✓ Méthode de Roger	35
✓ Méthode de la CEI.....	37
✓ Triangle de Duval.....	39
2.5 Les Techniques modernes.....	40
2.6 L'intégration de l'intelligence artificielle.....	40
2.7 Conclusion	40
Chapitre 03 : méthodes de diagnostic des défauts basées sur l'Intelligence artificielle.....	42
3.1 Introduction.....	43
3.2 L'Intelligence artificielle et composants	43
a) Intelligence artificielle	43
b) Le système expert (SE)	44
c) La logique floue (LF)	45
d) Les réseaux neurones artificiels (RNA)	46

Tableau des matières

3.3 Apprentissage automatique.....	46
3.3.1 Définitions.....	46
3.3.2 Différence entre l'Intelligence Artificielle et Le Machine Learning	47
3.3.3 Processus d'apprentissage automatique	47
3.3.4 Sélection des données	48
3.3.5 Prétraitement.....	48
a. Normalisation des données.....	48
b. Standardisation des données.....	49
3.3.6 Réduction de dimensionnalité	49
3.3.7 Application des algorithmes de Machine Learning	50
✓ Déploiement du modèle sélectionné.....	50
3.4 Classification des méthodes d'apprentissage automatique.....	50
3.4.1 Apprentissage Supervisé	51
3.4.2 Apprentissage Non-Supervisé.....	53
3.4.3 Apprentissage par renforcement.....	53
3.5 Conclusion.....	54
Chapitre 04 : Simulation et Comparaison des Algorithmes de Machine pour la classification des états du TRs de puissance.....	55
4.1 Introduction.....	56
4.2 Définition de espace de travail « MATLAB ».....	56
4.3 Aperçu des matériels et méthodes.....	56
4.3.1 Description des données utilisées	56
4.3.2 Prétraitement des données.....	58
4.3.3 Les algorithmes de classification.....	60
a. K-Nearest Neighbors (kNN).....	61
b. Support Vector Machine (SVM).....	61

c. Réseaux de Neurones.....	62
d. Naïve Bayes.....	63
e. Méthode "ensemble trees".....	63
f. Bagging.....	63
g. Boosting.....	64
4.3.4 Critères de mesure de performances.....	64
a) Aire sous la courbe (ASC).....	64
b) Précision.....	65
4.4 Expériences et discussion des résultats.....	65
4.4.1 validation des résultat	69
• Ensemble (bagged trees).....	69
4.5 MATLAB App Designer.....	70
4.5.1 Définition de «MATLAB App Designer ».....	70
4.5.2 En termes de méthodes de diagnostic.....	73
a. Diagnostic par CEI.....	73
b. Diagnostic par le triangle Duval.....	75
4.6 Conclusion	76
Conclusion générale.....	78
Bibliographie	
Résumé	

Liste des figures

Chapitre 01 : généralités sur les transformateurs de puissance

Figure 1.1 : Position des transformateurs sur le réseau d'énergie électrique.....	4
Figure 1.2 : Un transformateur de puissance dans un poste électrique.....	6
Figure 1.3 : Schéma de principe d'un transformateur.....	7
Figure 1.4 : symboles électrique des différents types de transformateur.....	7
Figure 1.5 : Transformateur à Cuve à Radiateur	8
Figure 1.6: Transformateur triphasé type cuirassé.....	9
Figure 1.7 : Les enroulements dans le transformateur.....	10
Figure 1.8 : Transformateur triphasé type colonne.....	11
Figure 1.9 : Le flux dans le circuit électrique.....	12
Figure 1.10 : Bobinage en galette.....	13
Figure 1.11-a : Couplage Yy0.....	14
Figure 1.11-b : Diagramme vectoriel.....	14
Figure 1.12-a : Couplage Dy11.....	14
Figure 1.12-b : Diagramme vectoriel	14
Figure 1.13-a : Couplage Yz11.....	15
Figure 1.13-b : Diagramme vectoriel.....	15
Figure 1.14: Papier d'isolation.....	18
Figure 1.15: carton pré-comprimé.....	18
Figure 1.16: Structure élémentaire d'une cellulose.....	18
Figure 1.17: aéroréfrigérant.....	20
Figure 1.18: radiateur.	20
Figure 1.19: Les différents processus de dégradation de la cellulose.....	21
Figure 1.20: Schéma simplifié de la dégradation de l'isolation en fonction de différentes contraintes.....	22

Chapitre 02 : méthodes de diagnostic des défaillances des transformateurs de puissance

Figure 2.1 : Image d'un transformateur HTA/BT.....24

Figure 2.2 : Interaction entre les différentes contraintes dans le système d'isolation du transformateur [Fof2006, Jan2011].....27

Figure 2.3 : exemple de la méthode APC.....29

Figure 2.4 : Acidité soluble dans le vieillissement.....31

Figure 2.5 : exemple d'une seringue en verre.....34

Figure 2.6 : Triangle de Duval et différentes zones de défauts.....39

Chapitre 03 : Méthodes de diagnostic des défauts basées sur L'Intelligence Artificielle

Figure 3.1: Présentation d'un système d'intelligence artificielle.....44

Figure 3.2 : Les 3 étapes essentielles d'apprentissage automatique (Machine Learning).....47

Figure 3.3 : Processus d'apprentissage du "Machine Learning"47

Figure 3.4 : Catégories d'apprentissage automatique.....51

Figure 3.5 : Classification dans l'apprentissage supervisé.....52

Figure 3.6 : Régression dans l'apprentissage supervisé.....52

Figure 3.7 : La différence entre apprentissage supervisé et non-supervisé.....53

Figure 3.8 : Apprentissage par renforcement.....54

Chapitre 04 : Simulation et Comparaison des Algorithmes de Machine pour la classification des états du TRs de puissance

Figure 4.1 : Résumé statistique des données de détection de défaut.....57

Figure 4.2 : Dispersion des données brutes.....58

Figure 4.3 : Dispersion des données de détection de défaut après transformation (logarithme).....59

Figure 4.4 : Dispersion des données de détection de défaut après transformation (Max-Min).....59

Figure 4.5 : Dispersion des données de détection de défaut après transformation (Pourcentage).....60

Figure 4.6 : K-Nearest Neighbors.....61

Figure 4.7 : Support Vector Machine.....62

Figure 4.8: Réseaux de Neurones.....	62
Figure 4.9: Naïve Bayes.....	63
Figure 4.10 : Méthode "ensemble trees”.....	63
Figure 4.11 : Précision et ASC moyenne de différents modèles pour la détection de défauts par rapport à chaque algorithme de classification	67
Figure 4.12 : Précision et ASC moyenne de différents modèles pour la détection des défauts par rapport à chaque technique de prétraitement des données	68
Figure 4.13 : courbe montrant les valeurs AUC des défauts.....	69
Figure 4.14 : histogramme des 31 données brutes.....	70
Figure 4.15 : Interface utilisateur de MATLAB V : R2021b.....	71
Figure 4.16 : Interface utilisateur de MATLAB App Designer.....	71
Figure 4.17 : Comment utiliser le MATLAB App designer	72
Figure 4.18 : Espace de programmation.....	72
Figure 4.19 : Créer une application packagée à partager avec d’autres utilisateurs.....	73
Figure 4.20 : Diagnostic par la méthode CEI.....	75
Figure 4.21 : Diagnostic selon la méthode de Duval.....	76

Liste des tableaux

Tableau 1.1: Choix du liquide isolant pour différents types de transformateurs.....	17
Tableau 1.2: Les différents types de refroidissement.....	19
Tableau 2.1: Interprétation principale des Gaz dissouts dans l'huile.....	33
Tableau 2.2: Rapports, Intervalles et Codes de Rogers.....	36
Tableau 2.3: Codes et défauts selon la méthode de Rogers.....	37
Tableau 2.4: Limites admissibles pour chaque gaz selon CEI	38
Tableau 2.5: Code des rapports de gaz relatif à la méthode CEI.....	38
Tableau 2.6: Interprétation de différentes zones du triangle de Duval.....	39
Tableau 4.1 : Forme et répartition des données.....	57
Tableau 4.2 : Performance des classificateurs pour la détection des défauts	66
Tableau 4.3 : Résultats de validation du modèle ensemble.....	70
Tableau 4.4 : Codes des rapports de gaz relatifs à la méthode.....	74
Tableau 4.5 : Interprétation de différentes zones du triangle de Duval.....	74

Abréviations et Acronymes

AGD: Analyse des Gaz Dissous (Dissolved Gas-in oil Analysis).

AI: Intelligence Artificiel.

CEI: Commission électrotechnique internationale (International electrotechnical commission).

NA: Refroidissement naturel à l'air.

AF: Refroidissement à air forcé avec ventilateurs.

ONAN: Le refroidissement naturel à l'huile avec air naturel.

ANAF: Le refroidissement naturel avec de l'huile et de l'air forcé avec des ventilateurs.

OFAF: Le refroidissement à l'huile forcé par une pompe, et l'air forcé avec des ventilateurs.

OFWF: Refroidissement par huile sous forcé avec une pompe et refroidi par eau forcé avec une autre pompe.

C6H10O5: Cellulose.

CH4: Méthane.

C2H6: Ethane.

C2H4: Ethylène.

C2H2: Acétylène.

CO: Monoxyde de Carbone.

CO₂: Dioxyde de Carbone.

DP: Décharge Partielle.

H₂: Hydrogène.

H₂O : Eau.

D1 : Décharge électrique à faible énergie.

D2 : Décharge électrique à haute énergie.

Abréviations et Acronymes

T1 : Défaut thermique, température faible en dessous 300°C.

T2 : Défaut thermique, température moyenne (300°C, 700°C).

T3 : Défaut thermique, température au-dessus de 700°C.

DT : Indéterminé défaut thermique ou décharge électrique.

IEEE : Institut d'ingénieur d'électricité et électronique (Institute of Electrical and Electronic Engineers).

LF : Logique floue.

PPM : Concentration exprimée en partie par million. Une ppm (volume/volume) de gaz implique que 1mm³ de ce gaz est dissous dans 1 litre d'huile isolante à une pression de 1 atmosphère (101.3 kilo pascal).

RNA : Réseaux de neurone artificiel (Artificial Neural Network).

SE : Système expert.

TR : Transformateur.

APC : Analyse physico-chimique.

ASTM: Société américaine pour les essais et les matériaux (American Society for Testing and Materials).

CG : Chromatographie en phase gazeuse.

RMV : Mesure de tension et de rétablissement.

PDC : Courant de polarisation et de dépolarisation.

ML: Apprentissage automatique (Machine Learning).

SVR : Prise en charge de la régression vectorielle (Support Vector Regression).

KMC :(K-Means Clustering).

CEGB : Carte électrogène électrique centrale (central electrical generating board).

N1 : nombre de spire primaire.

N2 : nombre de spire secondaire.

Symbole Y : Couplage étoile.

Abréviations et Acronymes

Symbole D : Couplage triangle.

Symbole Z : Couplage zigzag.

INTRODUCTION
GENERALE

Introduction Générale

Les transformateurs électriques jouent un rôle crucial dans la conversion de l'énergie et leur efficacité dépend largement de la qualité de l'énergie fournie. Pour prolonger leur durée de vie et réduire les risques de défaillance, il est essentiel d'adopter des mesures de gestion et de maintenance appropriées, regroupées sous le terme de "diagnostic de transformateur".[1]

Les transformateurs de puissance sont des éléments vitaux au sein des réseaux électriques, centrales de production, postes de distribution, usines, et systèmes de transport comme les trains et tramways. Leur défaillance peut provoquer des effets en cascade sur l'ensemble du système. Par conséquent, ils doivent non seulement fonctionner de manière fiable tout au long de leur durée de vie, mais aussi supporter des surcharges extrêmes pour garantir la continuité du service. Ces exigences nécessitent un dimensionnement précis et optimal pour assurer leur fiabilité et répondre aux standards stricts de qualité. [2]

Pour atteindre cet objectif, les ingénieurs doivent évaluer régulièrement l'état des transformateurs en service et prendre des décisions informées sur leur fonctionnement, protection, maintenance, remise à neuf ou remplacement. Ce processus global est ce que nous désignons par "diagnostic des transformateurs de puissance".[3]

Le diagnostic implique la détection de changements anormaux dans le comportement ou l'état d'un transformateur et l'identification des causes sous-jacentes. Ce processus peut se dérouler pendant l'exploitation du transformateur, pour garantir la sécurité et la continuité du service, ainsi que pour enregistrer des événements utiles pour la maintenance curative ou le retour d'expérience. Alternativement, le diagnostic peut être effectué pendant les périodes d'arrêt, afin d'évaluer le degré de vieillissement de certains composants (comme l'huile et le papier isolant) et de décider des actions de maintenance préventive ou curative nécessaires.

Cette étude se concentre sur le diagnostic des transformateurs de puissance à l'aide de techniques d'apprentissage automatique. L'analyse de l'huile et des gaz dissous, augmentée par l'IA, est une méthode efficace pour surveiller l'état des transformateurs. Elle permet d'identifier les défauts latents ou les modes de défaillance par un simple prélèvement.

Notre mémoire est structurée en quatre chapitres :

1. **Chapitre 1** : Présentation générale des transformateurs de puissance, incluant leur principe de fonctionnement et les différents composants.

2. **Chapitre 2** : Description des défaillances possibles des transformateurs et des méthodes de diagnostic pour les détecter.

3. **Chapitre 3** : Introduction au diagnostic des transformateurs par l'intelligence artificielle, avec une explication du processus d'apprentissage automatique et de ses classifications.

4. **Chapitre 4** : Simulation des données collectées à l'aide de MATLAB et analyse des résultats obtenus.

Enfin, ce travail se conclut par une conclusion générale récapitulant les principales découvertes et implications de notre étude.

Chapitre 01

Généralités sur les

Transformateurs de puissance

1.1 Introduction

Le transformateur est un élément important du réseau électrique car il permet de modifier la tension en certains points, favorisant le transport de l'énergie électrique. Ainsi, le transformateur élévateur, à la sortie des centrales électriques, élève la tension de 20kV à la tension de transport de 400kV ou 800kV. L'autotransformateur d'interconnexion abaisse la tension de transport successivement de 400kV à 220kV. Le transformateur de distribution ou transformateur terminal permet de procurer l'énergie aux consommateurs finaux : ménages, industries ou services publics.

Les transformateurs de puissance sont considérés comme des investissements capitaux dans les infrastructures d'un pays. Ils représentent le « cœur » de tout réseau de transport et de distribution d'énergie électrique

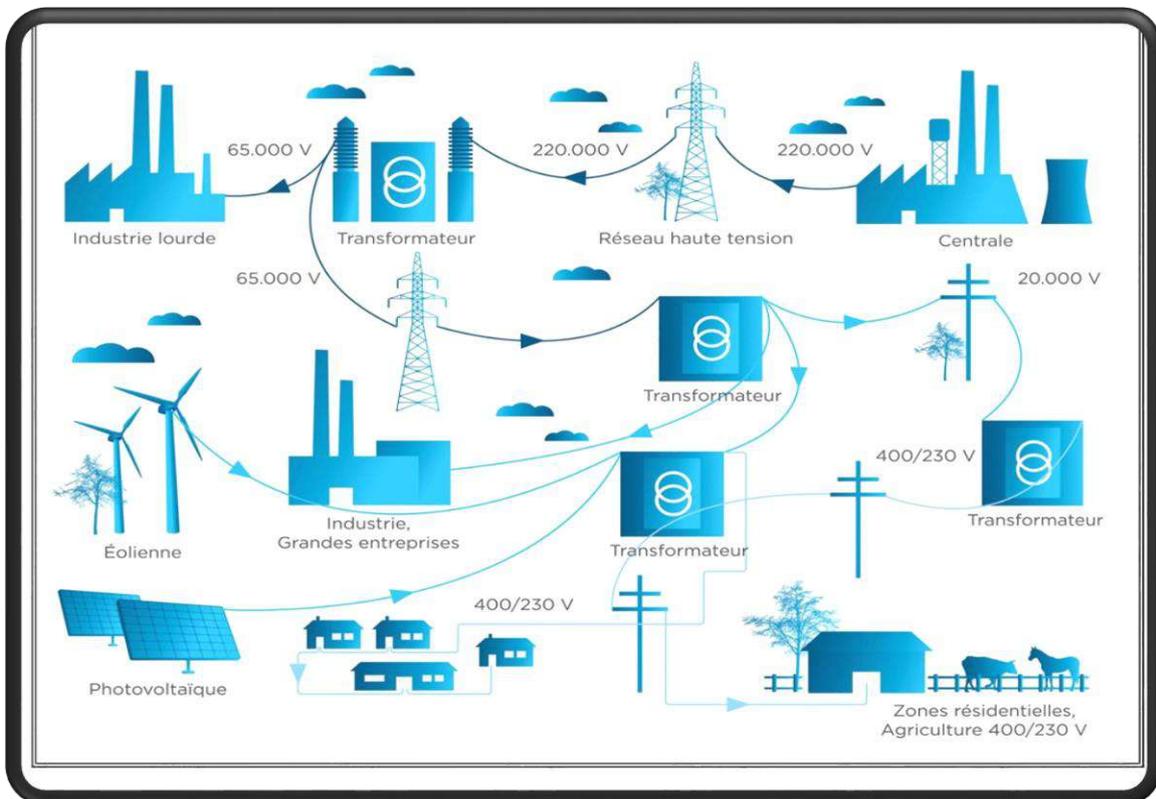


Figure 1.1 : Position des transformateurs sur le réseau d'énergie électrique [1].

La figure (1-1) illustre la position stratégique des transformateurs de puissance dans un réseau de transport et de distribution d'énergie électrique. Pour un poste de transformation donné, ces équipements représentent près de 60% du capital d'investissement. Il est donc essentiel qu'ils fonctionnent correctement et ce pendant plusieurs années.

Un transformateur de puissance est un composant électrique haute-tension essentiel dans l'exploitation des réseaux électriques. Sa définition selon la commission électrotechnique internationale (CEI) est la suivante : « Appareil statique à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, transforme un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et courant de valeurs généralement différentes, à la même fréquence, dans le but de transmettre de la puissance électrique ». Il peut être monophasé ou triphasé et recevoir divers couplages : étoile, triangle et zigzag.

Dans ce chapitre on donne un bref aperçu sur le transformateur, ses types et composants, et on se concentre sur le système d'isolation, car la durée de vie du transformateur dépend fortement de l'état de son isolation et la plupart des tests d'évaluation de l'état y sont effectués. [2].

1.1.2 Définition

Le transformateur est une machine électrique statique destinée à transformer une tension (courant) alternative en une autre tension (courant) alternative de même fréquence, et d'amplitudes généralement différentes afin de l'adapter aux différents besoins d'utilisation [3]. Comme on peut l'appeler convertisseur statique à induction qui comporte deux ou plusieurs enroulements fixes, inductivement couplés et destiné à la conversion, par l'intermédiaire de l'induction électromagnétique, des paramètres (tension, intensité de courant, fréquence, nombre de phases) de l'énergie électrique à courant alternatif.

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

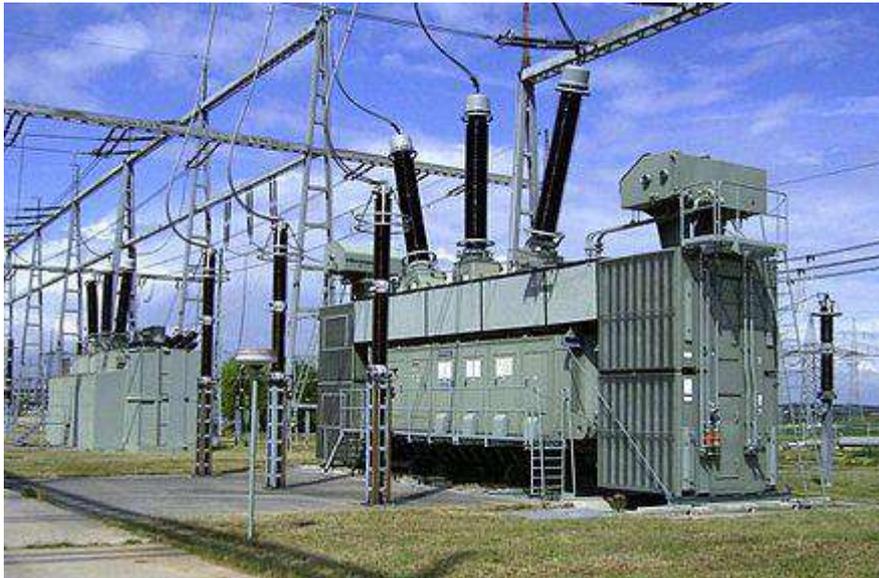


Figure 1-2 : Un transformateur de puissance dans un poste électrique

1.2 Classification

On peut classer les transformateurs de puissance selon plusieurs aspects. Ces aspects sont indépendants les uns des autres [4]

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

1.3 Principe de fonctionnement du transformateur

En vertu de la loi de Faraday, lorsqu'un flux d'induction magnétique variable Φ circule dans le circuit magnétique, il induit dans chacun des enroulements une force électromotrice

proportionnelle dans le temps aux taux de changement ($d\phi/dt$) et au nombre de spire que comporte cet enroulement.

Lorsque le primaire est alimenté par une source alternative, il circule dans le circuit magnétique un flux également alternatif dont l'amplitude dépend du nombre de spires du primaire et de la tension appliquée. Ce flux induit dans l'enroulement secondaire une tension proportionnelle au nombre de spires du secondaire. La fermeture du secondaire sur une charge provoque la circulation du courant secondaire.

Le noyau magnétique fournit un chemin de canalisation de flux magnétique tel que montré par la figure (1.3).

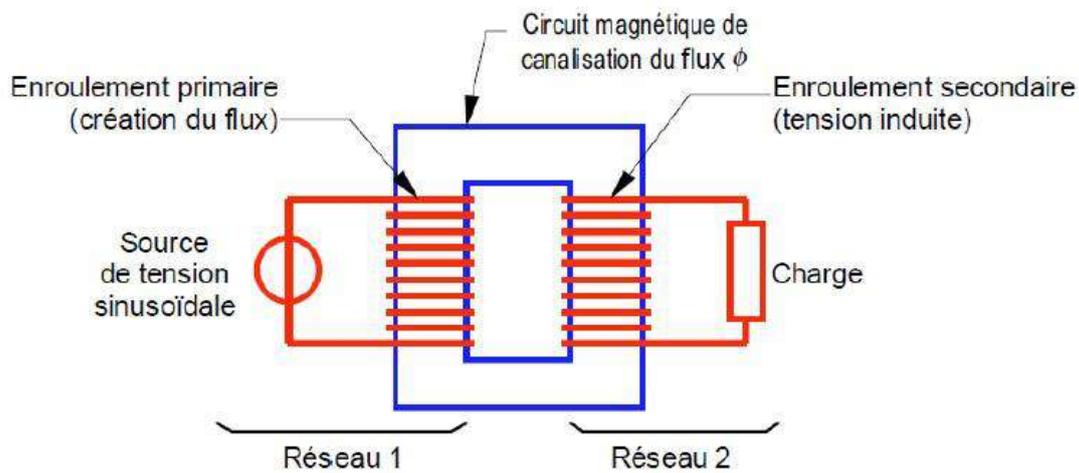


Figure 1.3 : Schéma de principe d'un transformateur. [6]

1.3.1 Symbole électrique

On trouve deux symboles. Sur celui de la figure (I-4). Les trois barres verticales symbolisent le noyau magnétique qui permet à l'énergie magnétique de passer du bobinage primaire au bobinage secondaire, comme sur le schéma ci-dessous

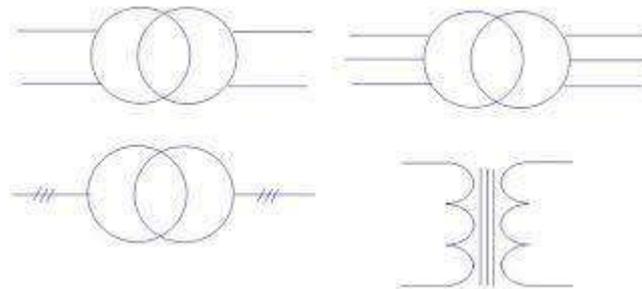


Figure 1.4 : symboles électrique des différents types de transformateur.

1.4 La constitution d'un transformateur de puissance

Le transformateur de puissance figure 1-5, se compose essentiellement d'un circuit magnétique et circuit électrique.

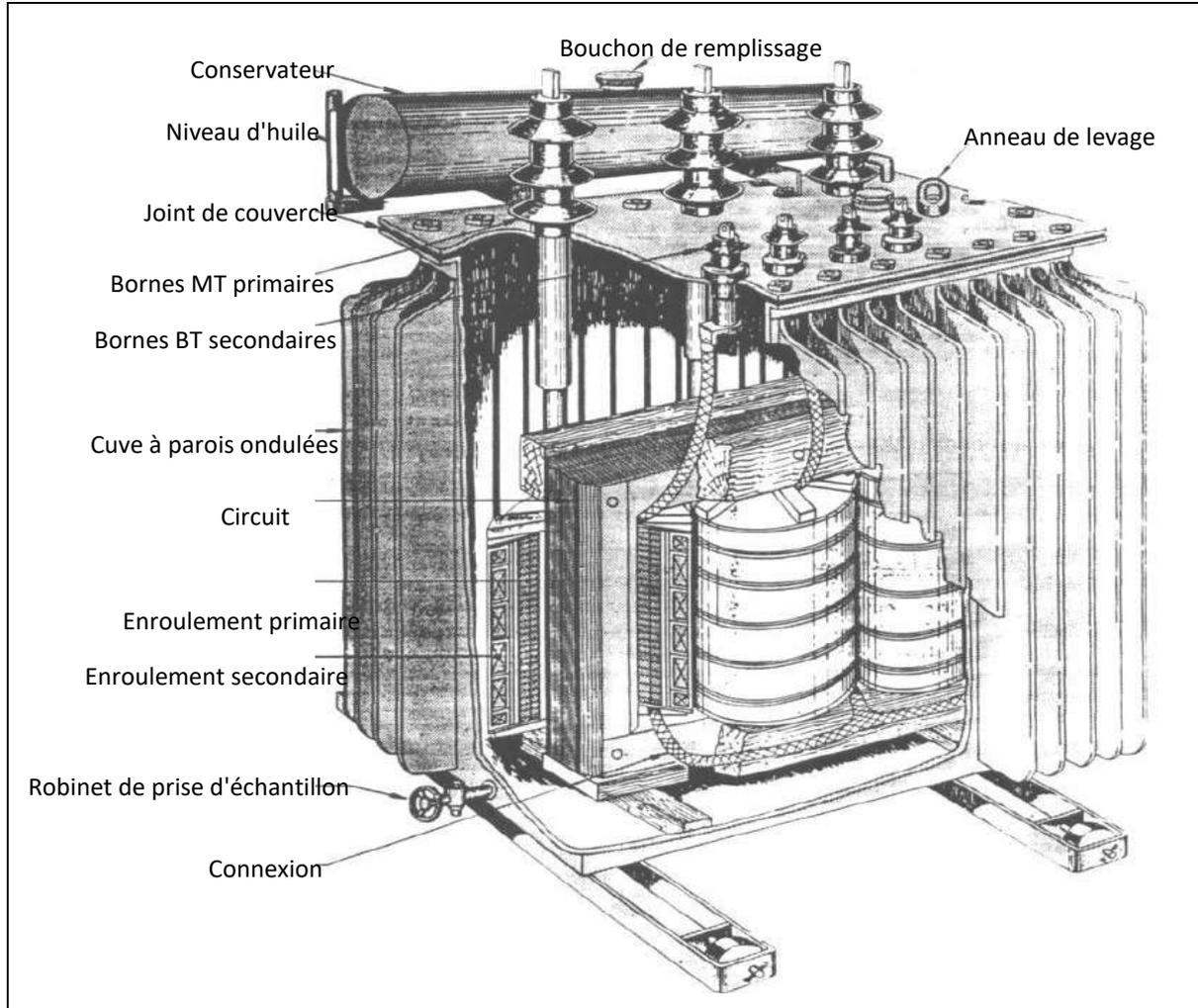


Figure 1.5 : Transformateur à Cuve à Radiateur.

1.4.1 Circuit magnétique

Le noyau est composé d'un empilage de tôles ferromagnétiques haute perméabilité et à cristaux orientés, isolées électriquement entre elles. Il doit être conçu de façon à réduire les pertes par courant de Foucault et par hystérésis qui se produisent lors de la variation périodique du flux magnétique. On parvient à résoudre ce problème en prenant des mesures à savoir [7] [8] :

- Emploi d'acier magnétiquement doux ayant une petite surface du cycle d'hystérésis et de faible perte par hystérésis ;

- Emploi d'aciers spéciaux présentant, grâce à des additifs, une résistivité élevée ;
- Emploi de tôles dont l'épaisseur est choisie tel que les courants de Foucault soient pratiquement sans effet.

Suivant la forme du circuit magnétique, on distingue deux dispositions principales qui sont :

A) Type cuirassé

Pour ce type de transformateur, le circuit magnétique entoure complètement l'enroulement des deux cotés. la cuve assure le serrage de l'ensemble et le transformateur ainsi constitué est alors assuré d'une excellente rigidité mécanique associée à une grande compacité. Ces transformateurs sont utilisés principalement au sein des réseaux de transport et de répartition, ou les surtensions transitoires sont fréquentes. Pour cela des écrans sont utilisés afin de réduire les contraintes liées aux champs électriques dans les bobinages.

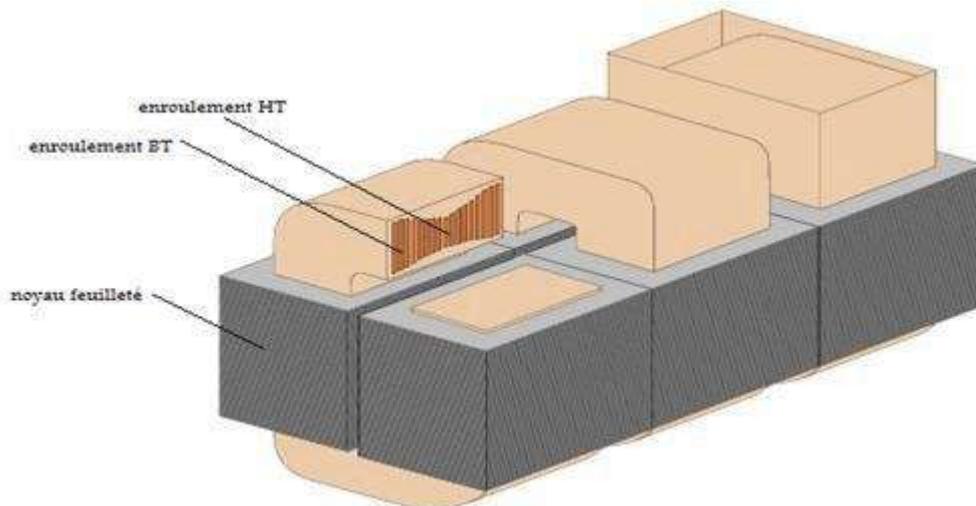


Figure 1-6 : Transformateur triphasé type cuirassé.

1. Les enroulements

Dans ce type de construction la bobine qui est en fait un grand spirale rectangulaire très plate (appelle communément « galette »), contient un certain nombre de spires, chaque spire étant elle-même constituée d'une ou de plusieurs couches de conducteurs.

Les galettes sont alternées entre la haute et la basse tension afin de diminuer les fuites magnétiques et le gradient de tension. En outre, cette topologie offre l'avantage d'engendrer des forces en oppositions entre chaque galette lors de court-circuit.



Figure 1.7 : Les enroulements dans le transformateur.

2. Avantages et inconvénients du transformateur cuirassé

Le transformateur cuirassé possède un circuit magnétique plus court, ce qui permet d'avoir un courant à vide relatif plus faible et ses enroulements sont plus simples car le nombre de spires est moins grand vu que la section du noyau dans un transformateur cuirassé peut être plus grande que dans le transformateur à colonnes. Mais il présente aussi certains inconvénients : ses enroulements sont moins accessibles à l'agent refroidissant, l'examen et la réparation sont plus difficiles et demande d'avantage de matériaux isolants pour la haute tension.

B) Type à colonnes

Le transformateur à colonnes est constitué de deux enroulements concentriques par phase. Ces enroulements sont montés sur le noyau ferromagnétique qui se referme à ses extrémités via des culasses afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique.

Dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique de manière à maximiser le couplage tout en minimisant le volume des conducteurs [9], [10]. Cette disposition plus simple que la précédente est utilisée pour les transformateurs à haute tension et les grandes puissances.

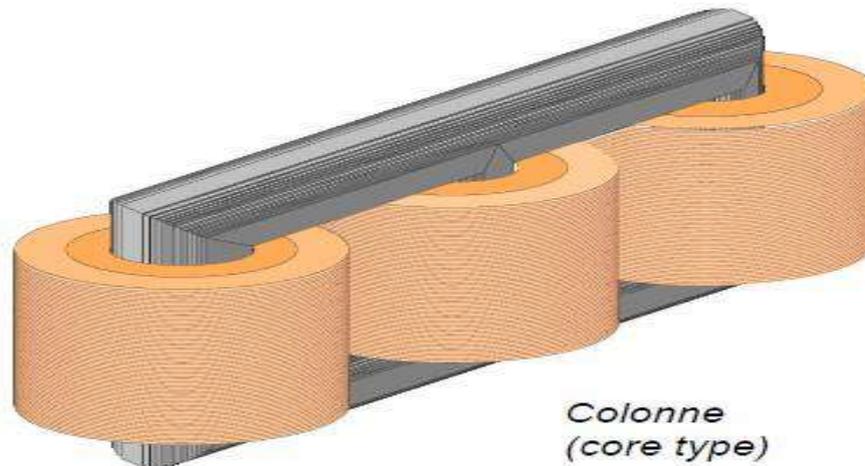


Figure 1.8 : Transformateur triphasé type colonne.

Les enroulements peuvent être disposés sur un circuit magnétique comportant trois colonnes ou noyaux, ce type de circuit magnétique est dit à flux forcé.

Si le déséquilibre est important, on utilise les transformateurs à quatre ou cinq colonnes, dont trois sont bobinées, les autres servent au retour des flux. [10]

1. Les enroulements

Les enroulements sont constitués de spires dont le nombre est différent pour les enroulements de haute et basse tension respectivement primaire/secondaire. Les spires sont-elles mêmes subdivisées en plusieurs brins mis en parallèle. Les conducteurs formant les enroulements sont en cuivre ou en aluminium pour les puissances plus importantes. [11]

2. Limitations des transformateurs à colonnes

Le circuit magnétique des transformateurs à colonnes est grand en volume que celui d'un type cuirassé. Par conséquent, le nombre de spires et le rapport volumique entre les matériaux conducteurs et ferromagnétiques sont importants. Par ailleurs ce type de construction qui a fait ses preuves pour des puissances relativement faibles (environ jusqu'à 30 kVA), présente quelque difficultés pour des fortes puissances (plus de 100 kVA) et des tensions plus élevées. Pour des tensions supérieures à 220 KV, certains constructeurs ont abandonné la construction du transformateur à colonne au profit de la structure cuirassé.

1.4.2 Circuit électrique

Pour les transformateurs de basse tension et faible puissance, les enroulements primaire et secondaire sont constitués par des bobines en file de cuivre émaillé, chaque couche étant isolée

de la suivante par du papier. Pour les appareils à haute tension et grande puissance, les bobines, quelque fois fractionnées en galettes, sont constituées par du fil rond ou méplat isolé au carton imprégné et séparées par des isolants tels que fibre, mica, etc... [10].

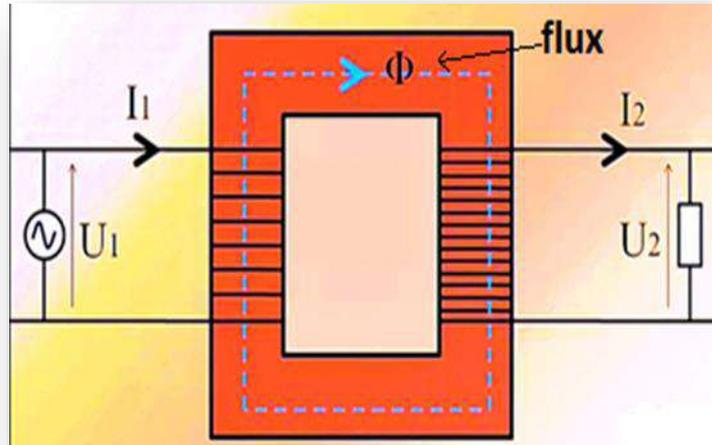


Figure 1.9 : Le flux dans le circuit électrique.

On distingue trois dispositions principales des bobines sur les noyaux:

a. Bobinage concentrique simple

Le bobinage basse tension est enroulé sur le noyau et après isolement est recouvert par le bobinage haute tension.

b. Bobinage concentrique double

La moitié du bobinage basse tension est enroulée sur le noyau et isolée, puis on enroule le bobinage haut tension et on isole et enfin, on termine par la deuxième moitié du bobinage basse tension. Autrement dit, le bobinage haut tension est en sandwich entre les deux moitiés basses tensions.

c. Bobinage à galette

Les bobinages hauts et bas sont fractionnés et constitués par des couronnes ou galettes qui sont enfilées alternativement sur les noyaux.

Parfois pour les transformateurs à forte intensité, les bobinages sont calés à l'aide de ressorts permettant de légers déplacements dans le cas de fortes actions électrodynamiques.

En distribution, les transformateurs sont à bobinage concentrique simple.

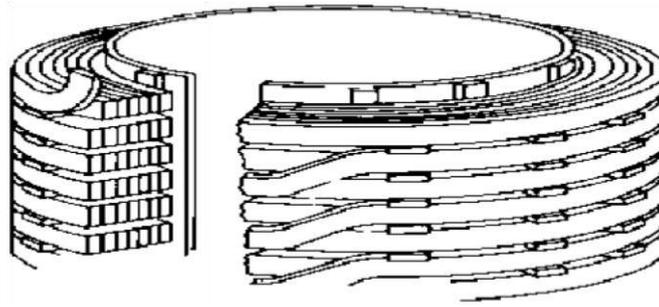


Figure 1.10 : Bobinage en galette.

1.4.3 La cuve

La constitution de la cuve du transformateur est liée aux calculs thermiques du transformateur.

Elle a pour rôles :

- Réservoir d'huile
- Assurer la résistance au court-circuit (pour les transformateurs Cuirassé uniquement).
- Maintenir à l'intérieur de la cuve la majorité du flux de fuite produit par le courant dans les enroulements. [12]

Elle sert à la protection de la partie active du transformateur. Elle est ajourée pour permettre la circulation naturelle de l'air autour du transformateur [13].

1.4.4 Groupe de couplage

Le groupe de couplage désigne l'association des couplages des enroulements choisis pour la haute tension et pour la basse tension. L'enroulement haute tension d'un transformateur triphasé de nombre de spires N_1 peut être connecté en étoile (symbole Y) ou en triangle (symbole D). L'enroulement basse tension avec un nombre de spires N_2 peut être connecté en étoile (symbole Y). En triangle (symbole D) ou en zigzag (symbole Z). Les systèmes des tensions du primaire et du secondaire d'un transformateur triphasé sont en générale déphasés avec un angle θ . Comme cette angle est multiple de $\pi/6$, on définit l'indice horaire par :

$$I = \theta * \left(\frac{\pi}{6}\right).$$

Trois couplages sont particulièrement utilisés en pratique : ce sont les couplages normalisés

Yy 0, Dy11, Yz 11

a) Couplage étoile-étoile

Pour le couplage étoile-étoile, les tensions aux bornes des bobines du primaire et du secondaire de la même colonne sont des tensions simples. Ce qui permet de construire le diagramme vectoriel.

Le rapport de transformation est $m=N_2/N_1$

Le déphasage θ de basse tension par rapport à la haute tension est nul, ce qui donne un indice horaire $I=0$.

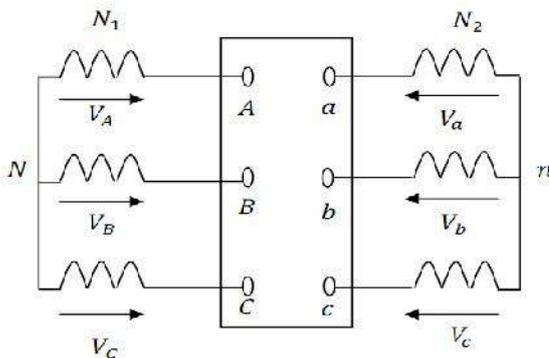


Figure. 1.11-a: Couplage Yy0

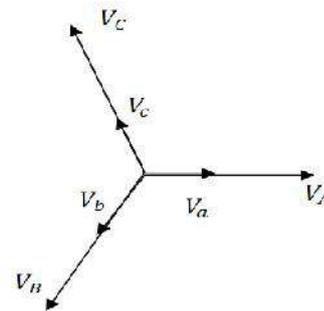


Figure. 1.11-b: Diagramme vectoriel

b) Couplage triangle-étoile

Pour le couplage triangle, la tension aux bornes d'une phase du primaire est une tension composée, alors que la tension aux bornes de la phase correspondante du secondaire est une tension simple. Le rapport de transformation est $m=\sqrt{3}*(N_2/N_1)$. Le déphasage θ entre les tensions du primaire et le secondaire est de $(-\pi/6)$, ce qui veut dire l'indice horaire est $I = 11$.

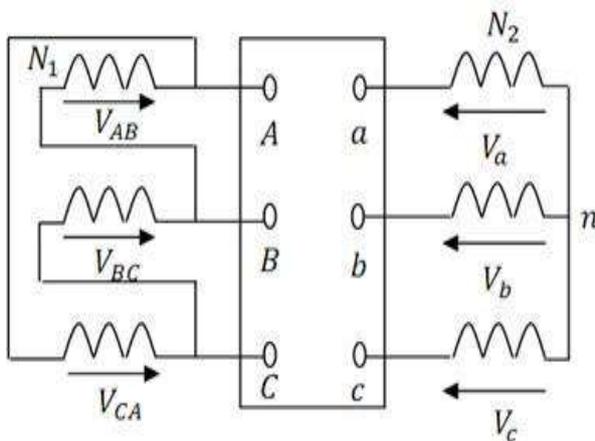


Figure. 1.12-a: Couplage Dy11

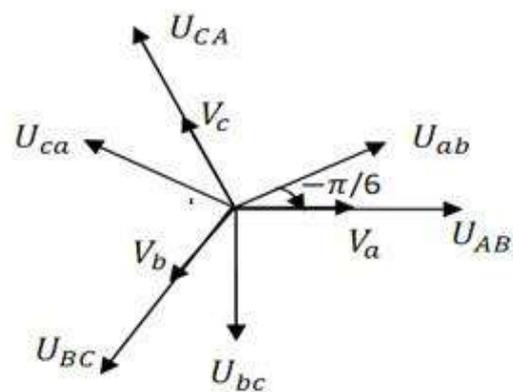


Figure. 1.12-b: Diagramme vectoriel

c) Couplage étoile-zigzag

Pour le couplage étoile zigzag, la tension aux bornes d'une phase du primaire est une tension simple, alors qu'une tension aux bornes d'une phase du secondaire est la somme des deux tensions aux bornes de demi bobines ce qui permet de construire le diagramme vectoriel. Le rapport de transformation est $m = \sqrt{3} * (N_2/N_1)$.

Le déphasage θ entre les tensions est de $(-\pi/6)$, en choisissant la première détermination position positif de l'angle, ce qui veut dire l'indice horaire est I=11. [23]

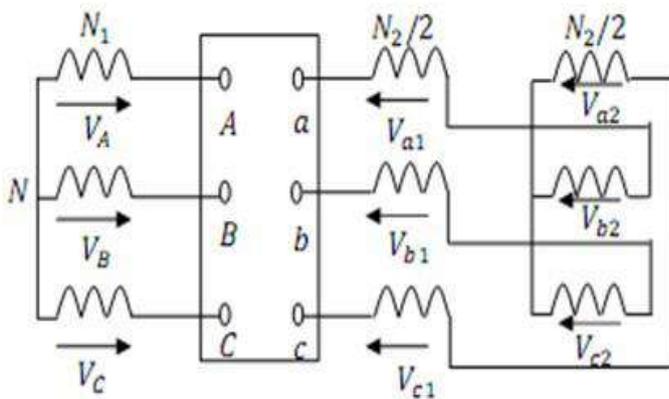


Figure : 1.13-a: Couplage Yz11

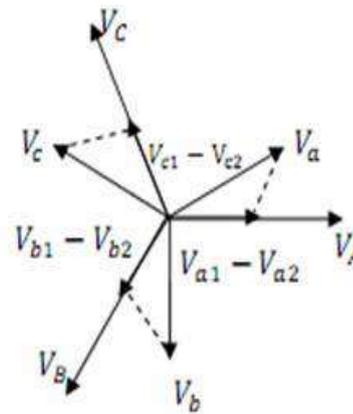


Figure : 1.13-b: Diagramme vectoriel

1.5 Système d'isolation d'un transformateur de puissance

Le système d'isolation sert à isoler les parties actives du transformateur (bobinage, circuit magnétique, etc.) et à assurer la fonction de refroidissement. Il est constitué d'une partie solide et d'une partie liquide (huile). [14]

1.5.1 L'isolation liquide (L'huile)

L'huile a trois principales fonctions :

- Assurer l'évacuation de la chaleur produite par les pertes au niveau des enroulements, du circuit magnétique et des isolants, vers les dispositifs de refroidissement (radiateurs externes);
- Ralentir l'oxydation (la dégradation) de l'isolation solide ;
- Isoler électriquement.

À ces trois principales fonctions, il faut ajouter la fonction de résistance à l'incendie. On distingue deux types d'isolation liquide :

a) Isolation liquide conventionnelle : les huiles minérales

Les huiles minérales sont obtenues à partir du raffinage du pétrole brut, elles sont utilisées comme isolants dans les équipements électriques depuis plus d'un siècle. Les transformateurs de puissance sont traditionnellement remplis d'huiles minérales spécifiques. Les principales caractéristiques requises pour l'huile minérale sont :

- Une faible viscosité et un bon point d'écoulement pour assurer sa circulation ;
- Un point éclair élevé ;
- Une bonne stabilité chimique vis-à-vis des phénomènes d'oxydation ;
- Une rigidité diélectrique élevée.

b) Isolation liquide haute température : Huiles synthétiques et végétales**• Les Huiles synthétiques :**

Elles remplacent les huiles minérales, en particulier lorsqu'il est question d'améliorer la résistance au feu (point de feu élevé) ou lorsque l'on cherche une meilleure stabilité thermique. Il existe quatre principaux types de liquides synthétiques :

- Les hydrocarbures aromatiques ;
- Les hydrocarbures aliphatiques ;
- Les esters synthétiques ou esters organiques (esters de pentaérythritol, les phtalates) ;
- Les silicones.

Les Huiles synthétiques sont aussi appelées liquides ininflammables (liquides qui ont un point d'éclair minimum au-dessus de 300 °C). En raison de ce degré élevé de résistance à l'inflammation, ils sont utilisés dans les transformateurs situés dans les zones urbaines (c'est-à-dire là où la sécurité des personnes et des biens pourrait être compromise par le feu).

• Les huiles végétales ou esters naturels :

Les huiles végétales ont fait partie des premiers liquides isolants utilisés pour la fabrication d'appareils électriques [15]. Leur composition chimique est celle d'un triester provenant principalement de triglycérides. Elles sont peu toxiques et possèdent une excellente biodégradabilité. Elles ont une faible résistance à l'oxydation et à l'hydrolyse. Elles sont déjà utilisées dans les transformateurs de distribution et des études sont en cours en vue de leur utilisation dans les transformateurs de grande puissance. Selon A. Darwin [16], un

transformateur de moyenne puissance a été installé au Royaume-Uni (132 kV, 90 MVA) et une réactance shunt a été installée au Brésil (242 kV, 22 MVAR), tous deux contenant de l'huile végétale.

c) Choix d'une huile pour une application spécifique

Le choix d'une huile se fait en prenant en compte le compromis « caractéristiques techniques et coût ». Comparativement aux huiles minérales, les huiles à point de feu élevé ou huiles alternatives (huiles synthétiques, huiles végétales) présentent des meilleures propriétés chimiques et thermiques, mais coûtent 4 à 5 fois plus chères. Toute fois le choix d'un liquide pour une application donnée doit assurer la fiabilité du fonctionnement des équipements ainsi que la sécurité des opérateurs. Le tableau (1.1) présente les différents types d'huiles pour différents types de transformateurs. [17]

Tableau 1.1 : Choix du liquide isolant pour différents types de transformateurs.

	Huile minérale	Fluide silicone	Ester synthétique	Huiles végétales (Esters naturels)
Transformateurs de puissance	A	X	B	B
Transformateurs De tractions	A	A	A	X
Transformateurs de distribution	A	A	A	A
Transformateurs d'instrument	A	A	X	X
A=Largement utilisé B=Utilisé moins fréquemment X=Couramment non utilisé				

1.5.2 L'isolation solide (Papier et carton)

Les papiers et les cartons constituent l'isolation solide. Le papier sert à l'isolation des enroulements et le carton sert à l'isolation entre les enroulements, et entre les enroulements et le noyau. Les papiers et cartons sont imprégnés par le diélectrique liquide (huile) afin

d'augmenter leur rigidité diélectrique, donc réduire le risque de décharges partielles. On distingue trois types d'isolation solide :

- Isolation solide conventionnelle : papiers et cartons sont à base de fibres de cellulose.
- Isolation solide haute température : papiers et cartons sont à base de polymères synthétiques (aramide).
- Isolation solide hybride : association des papiers cellulose et aramide [14]

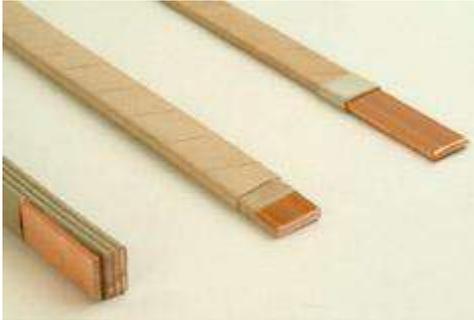


Figure 1.14 : Papier d'isolation.



Figure 1.15 : carton pré-comprimé.

✓ Le papier Kraft

L'isolation des enroulements est réalisée avec de papier à partir de fibres de cellulose extraites de pâte de bois ou de fibres de coton. Son unité est $(C_6H_{10}O_5)$, qui se compose de longues chaînes d'anneaux de glucose reliés par des ponts d'oxygène (Figure 1.16).

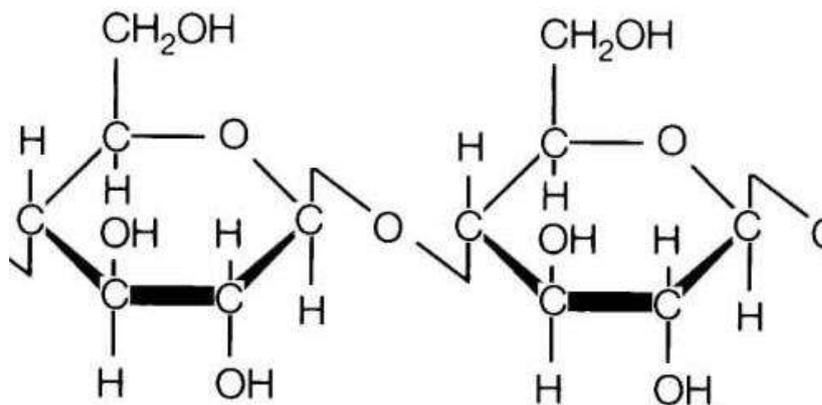


Figure 1.16 : Structure élémentaire d'une cellulose. [22]

1.5.3 Le système de refroidissement du transformateur

Pour dissiper la chaleur et maintenir le transformateur à des températures acceptables. Le mode de refroidissement varie d'un transformateur à un autre selon le niveau de puissance, les exigences et l'utilisation du client.

Le Tableau 1.2 suivant résumé les systèmes de refroidissement utilisé :

Tableau 1.2 : Les différents types de refroidissement.

Type de transformateur	Type de refroidissement
Le type sec	AN → Refroidissement naturel à air. (Figure 1.17)
	AF → Refroidissement à air forcé avec ventilateurs. (Figure 1.18)
Le type d'huile immergée	ONAN → Le refroidissement naturel à l'huile avec air naturel.
	ONAF → Le refroidissement naturel avec de l'huile et de l'air forcé avec des ventilateurs.
	OFAF → Le refroidissement à l'huile forcé par une pompe, et l'air forcé avec des ventilateurs.
	OFAN → Le refroidissement à l'huile forcé par une pompe, et l'air naturel.
	OFWF → Refroidissement par huile sous forcé avec une pompe et refroidi par eau forcé avec une autre pompe.

✓ **Éléments de refroidissement**

Dans les transformateurs de puissance immergés dans l'huile, le refroidissement s'effectue via cette huile circulant en circuit fermé de la partie active, siège des pertes, vers une source froide à laquelle il abandonne des calories. Celle-ci peut être :

- Directement la surface de la cuve pour les petites puissances.
- Des aéroréfrigérants (figure (1-17)) qui sont constitués de nombreux tubes à ailettes ventilés.
- Des radiateurs (figure (1-18)) permettant un échange par convection naturelle avec l'air ambiant.

- Des hydro réfrigérants forçant un échange avec un circuit d'eau séparé. [18]



Figure 1.17 : aéroréfrigérant.



Figure 1.18 : radiateur.

1.6 Phénomènes de Vieillesse

Lorsque le transformateur est neuf et bien conçu, il peut résister aux différentes contraintes (électriques, mécaniques, thermiques et environnementales). En service, le système d'isolation subit une dégradation graduelle qui, avec le temps, peut ne plus être capable de résister aux différentes contraintes.

Le vieillissement se définit par le changement néfaste irréversible d'une ou des propriétés du système isolant, due à la dégradation de ce dernier [19].

1.6.1 Dégradation de l'huile minérale isolante

Lorsqu'on parle de la dégradation de l'huile, on parle souvent du phénomène d'oxydation. L'oxydation de l'huile isolante désigne l'ensemble des réactions chimiques complexes et lentes au cours desquelles les hydrocarbures réagissent avec l'oxygène et l'humidité. L'oxydation de l'huile est une fonction croissante de la température et de la concentration en oxygène. De plus, elle peut être catalysée par certains métaux comme le cuivre, le fer, le plomb, et par l'humidité. D'autres paramètres tels que le champ électrique et la lumière peuvent aussi influencer l'oxydation de l'huile isolante. [20]

1.6.2 La dégradation du papier isolant

La dégradation du papier est un phénomène qui implique l'interaction de plusieurs facteurs dont les plus importants sont la température, l'oxygène et l'eau. La dégradation de la cellulose est causée par la rupture des liaisons β (1-4) glucosidiques des molécules de glucose. En fonction de la cause de dégradation, on distingue trois types de mécanismes [21]:

- la pyrolyse qui entraîne la décomposition de la cellulose, avec production de sucres libres (glucose), d'oxydes de carbone (CO , CO_2), H_2O et H_2 (Figure 1.19 (a));
- l'oxydation qui consiste en l'attaque des anneaux de glucose par l'oxygène; elle provoque une dépolymérisation. Les produits formés sont des carbonyles, des acides et de H_2O comme indiqué sur la Figure (1.19 (b));
- l'hydrolyse qui est la réaction de l'eau avec les ponts oxygène conduisant à la formation de molécules de glucose libre et des sous-produits, (Figure 1.19 (c)).

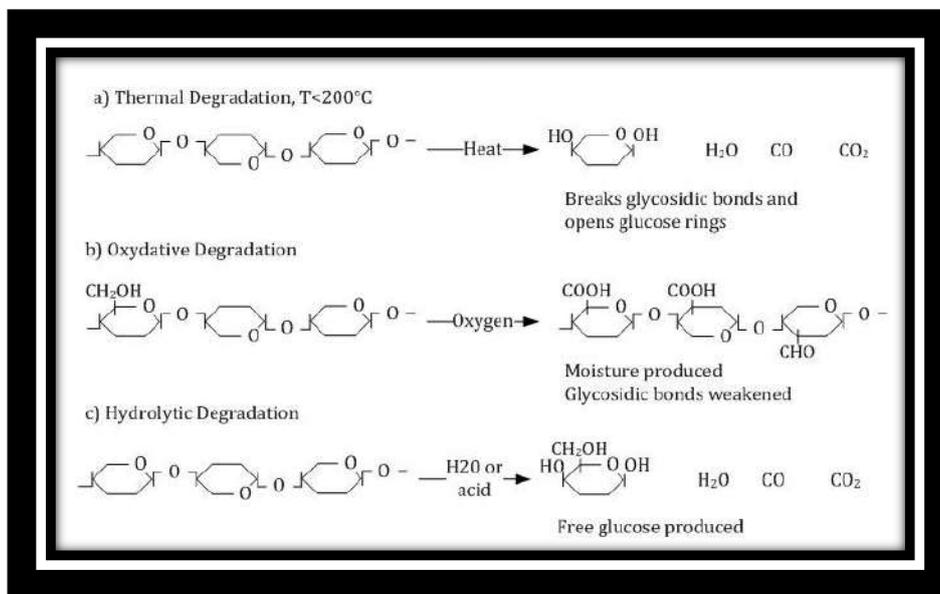


Figure 1.19 : Les différents processus de dégradation de la cellulose. [21].

1.6.3 Vieillessement du complexe huile/ papier

Le complexe isolant huile/papier est utilisé dans le transformateur depuis plus d'un siècle. Malgré le grand progrès dans leur conception au cours des dernières années, le maillon faible des transformateurs reste le système d'isolation. En service, l'isolation du transformateur est soumise aux diverses sollicitations (électriques, environnementales, mécaniques et thermiques), qui se produisent dans les différentes parties de la structure et entraîne sa dégradation. La

Figure (1-20) illustre un schéma simplifié des réactions de l'isolation en fonction des contraintes appliquées.

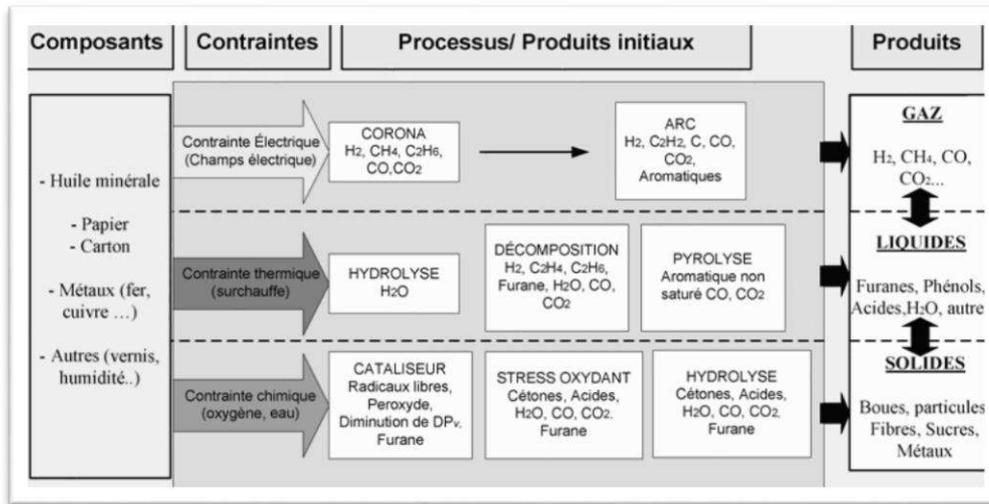


Figure 1.20 : Schéma simplifié de la dégradation de l'isolation en fonction de différentes contraintes.

Sous l'impact d'un champ électrique/thermique suffisamment élevé, les huiles minérales se décomposent en donnant des gaz. Suite à cette action, le gaz formé en grande proportion est l'hydrogène. Certains travaux ont montré qu'en présence de papier imprégné d'huile et l'humidité, l'électrolyse de l'eau pouvait être à l'origine des bulles dans lesquelles les décharges partielles prennent naissance et entraînent la décomposition de l'huile. [20]

1.7 Conclusion

Dans ce chapitre on a donné quelques généralités et notions de base sur le transformateur de puissance. Le transformateur de puissance représente environ 60% du coût global du réseau et est conçu pour fonctionner en toute sécurité entre 25 et 30 ans. Il est classé parmi les composants les plus importants et les plus onéreux du secteur de l'électricité. Le transformateur de puissance est une machine électrique statique qui permet la conversion de l'énergie électrique basé sur la loi de l'induction électromagnétique. Chacun de ses éléments constitutifs à un rôle bien déterminé pour garantir un fonctionnement permanent avec une qualité d'alimentation correcte et un rendement optimal. Dans le chapitre suivant, nous allons évoquer les méthodes de diagnostic des défaillances sur le transformateur de puissance.

Chapitre 02

Méthodes de diagnostic des

défaillances des

transformateurs de puissance

2.1 Introduction

Ce chapitre vise à faciliter le diagnostic des défaillances des transformateurs, étant donné leur importance cruciale dans la chaîne de distribution. Leur indisponibilité peut causer d'énormes dommages, donc il est essentiel de les entretenir régulièrement par des professionnels qualifiés. Bien que les pannes de transformateurs soient relativement rares par rapport aux autres machines en service, leurs coûts de réparation sont élevés. Ainsi, il est primordial d'avoir un diagnostic fiable. Nous aborderons également les défaillances potentielles des transformateurs ainsi que quelques méthodes de détection.

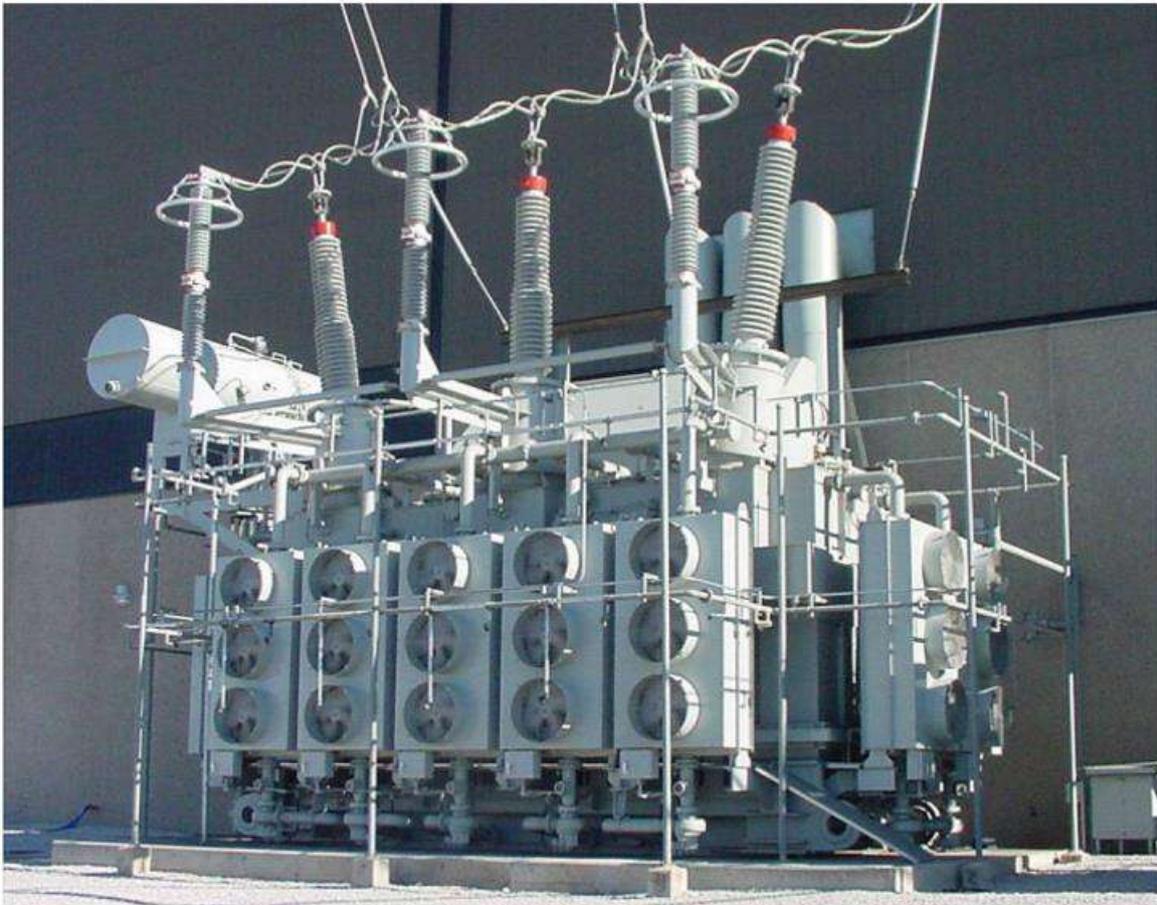


Figure 2.1 : image d'un transformateur HTA/BT

2.2 Définitions

- **Défaut**

Un défaut peut être décrit comme une condition ou une situation qui se dévie de la normale et qui, par sa nature ou son impact, entraîne des dommages à l'équipement concerné, le rendant inopérant.

- **Défaillance**

Une défaillance peut être décrite comme un état où un équipement ou un système ne fonctionne pas comme prévu, entraînant souvent une incapacité totale ou partielle de l'appareil à accomplir sa fonction prévue.

- **Diagnostic**

Le diagnostic peut être considéré comme une branche essentielle de la maintenance qui vise à identifier et à comprendre les problèmes potentiels ou existants au sein d'un système, d'un équipement ou d'un processus. Il repose sur l'analyse approfondie des symptômes, des signaux d'alarme et des données disponibles afin de déterminer la cause fondamentale des dysfonctionnements ou des défaillances. Le processus de diagnostic implique souvent l'utilisation de diverses techniques telles que l'inspection visuelle, les tests fonctionnels, les mesures de performance, les analyses de données, les simulations informatiques et l'expertise humaine.

2.3 Importance du diagnostic de transformateur de puissance et Identification et cause des défauts naissants

Le transformateur de puissance est un élément à investissement lourd dans une installation électrique ; sa fiabilité n'affecte pas seulement la disponibilité d'énergie électrique, mais aussi la fiabilité de tout le système électrique. Par exemple : le défaut d'un transformateur de puissance peut laisser des milliers de maisons sans chaleur et lumière et le défaut en avant-poste d'une source de génération d'électricité peut simplement conduire à l'arrêt de celle-ci. [27]

La défaillance d'un transformateur peut se produire en raison de différentes causes et conditions, on peut définir une défaillance comme étant [24] :

- Une panne au niveau du transformateur suivie d'une indisponibilité forcée de service (dommages d'enroulement, défaut dans le changeur de prises...).

- Un problème nécessitant le débranchement du transformateur pour réparation, ou une maintenance extensive sur site (production excessive du gaz, présence d'humidité...). [24]

Les défaillances peuvent apparaître dans un transformateur de plusieurs façons : électriques, thermiques ou mécaniques, d'origine interne ou externe.

2.3.1 Défaillances d'origine interne

Détérioration de l'isolation, Perte de serrage d'enroulement, Surchauffe, Contamination solide dans l'huile isolante, Décharge partielle, Défauts de conception et de fabrication etc...

2.3.2 Défaillances d'origine externe

Surtensions de manœuvres ou atmosphériques, Surcharge, Surchauffe lors de traitement d'huilé, Echauffement par mauvaise ventilation et dissipation calorifique, La défaillance dans les pompes etc....

Le plus difficile à maîtriser dans les transformateurs de puissance est l'interaction de plusieurs types de contraintes, conduisant pendant une durée limitée ou non, avec des répétitions possibles, à augmenter la dégradation des isolations.

2.3.3 Contraintes

Les contraintes susceptibles d'affecter le bon fonctionnement des équipements électriques sont au nombre de quatre :

- Contraintes électriques (décharges partielles, courts circuits, surtensions de manœuvres ou atmosphériques, etc.) ;
- Contraintes mécaniques (à cause des courts-circuits, régimes transitoires, surcharges, vibrations, etc.) ;
- Contraintes thermiques (effet joules, courant de Foucault, pertes magnétiques et diélectriques, etc.) ;
- Contraintes chimiques (humidité relative, eau, oxygène, etc.).[25]

La figure 2.2 illustre simplement l'interaction entre ces contraintes et le système d'isolation du transformateur de puissance conduisant ainsi à son vieillissement.

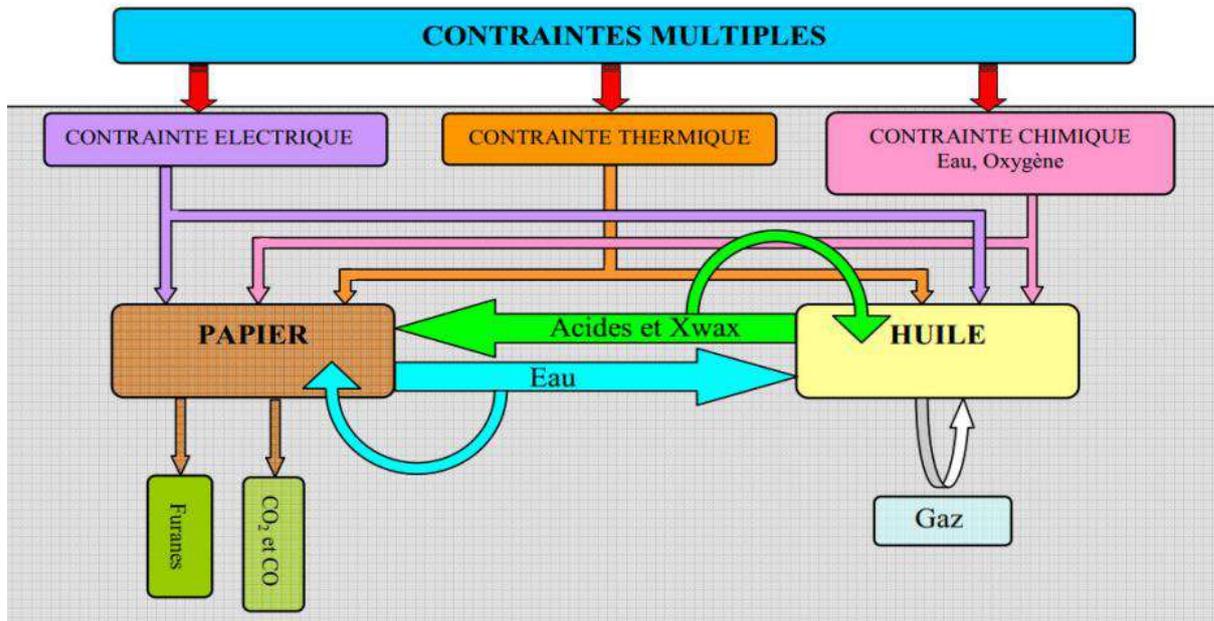


Figure 2.2 : Interaction entre les différentes contraintes dans le système d'isolation du transformateur [Fof2006, Jan2011] [26]

2.3.4 Dégradation des isolants

Le vieillissement des isolants est le résultat d'une détérioration graduelle due à des réactions physico-chimiques affectant la tenue mécanique et diélectrique du système d'isolation. Les principaux agents présents dans les transformateurs, susceptibles à dégrader les isolants (solides et liquides) sont l'oxygène et l'humidité. L'oxygène est présent sous forme dissoute dans le liquide, et l'humidité est remarquée dans le papier (même après séchage). Ces sources de vieillissement sont beaucoup plus présentes dans le cas des transformateurs de puissance, qui sont dit (respirant). [26]

On peut ajouter à cela deux autres facteurs, à savoir la température (pyrolyse) et le champ électrique. De plus, lorsqu'ils entrent en contact avec des matériaux de construction, plus précisément des métaux tels que le cuivre et le fer.

En service, les huiles isolantes subissent des changements irréversibles de leurs propriétés physico-chimiques, résultant d'un ensemble de processus réactionnels qui déterminent la durée de vie des huiles isolantes. [26]

Dans le cas de l'huile minérale, une étude a démontré que le vieillissement observé dans les machines est principalement dû à un mécanisme d'oxydation accéléré par la présence de métaux (cuivre, fer).

2.3.5 Durée de vie d'un transformateur

La durée de vie d'un transformateur dépend beaucoup d'événements exceptionnels, tels que les surtensions, les courts-circuits sur le réseau et les surcharges. En plus, des paramètres de fonctionnement normal, ils représentent autant de grandeurs susceptibles d'influencer le vieillissement des isolants. Le phénomène de vieillissement est complexe et difficile à modéliser. À ce jour, seule l'influence des contraintes thermiques sur l'évolution des propriétés mécaniques et chimiques fait l'objet d'un modèle mathématique. [27]

Le Vieillissement est l'une des causes des défaillances présentes dans les TR à savoir le Vieillissement Physique qui entraîne des modifications uniquement liées à des causes internes du matériau (mobilité moléculaire).

Vieillissement chimique qui provoque une modification des propriétés du matériau sous l'influence de l'environnement. [26]

Dans le vieillissement chimique on a : Le Vieillissement par oxydation, par hydrolyse, photochimique, biochimique et Vieillissement climatique.

2.4 Technique de diagnostic et évaluation de l'état d'un transformateur de puissance

Fondamentalement, ceux-ci peuvent être divisés en des méthodes de diagnostic traditionnelles qui ont été utilisées pendant plusieurs années, des méthodes nouvelles et des méthodes qui sont encore au stade de la recherche [15]. Dans les méthodes traditionnelles, on trouve l'Analyse des Gaz Dissous dans l'huile (AGD), le facteur de dissipation de l'huile, la teneur en eau, les dérivés furaniques, la tension interraciale, l'acidité, la résistance d'enroulement, et la thermographie infrarouge. Les nouvelles méthodes incluent le test de décharges partielles en ligne, la mesure du facteur de puissance en ligne, la spectroscopie diélectrique, la méthode de la tension de recouvrement, l'analyse de réponse fréquentielle, etc. [15]

Cependant, ces méthodes traditionnelles présentent certaines incertitudes sur lesquelles nous ne pouvons pas toujours compter, comme le facteur humain où "l'erreur est humaine", sans oublier la variable de l'incertitude. Par conséquent, la découverte ou l'adoption de nouvelles méthodes est plus que nécessaire.

2.4.1 Les Techniques traditionnelles

Les méthodes chimiques telles que les analyses physico-chimiques de l'huile isolante (APC) et l'analyse des gaz dissous (AGD) sont les techniques traditionnelles largement utilisées. L'analyse d'huile s'inscrit dans le cadre des inspections de routine qui sont effectuées tous les trois/ six /douze mois, dépendant de la taille du transformateurs et leur importance dans le réseau. [24]

2.4.2. Analyses physico-chimiques de l'huile isolante (APC)

Les analyses physico-chimiques de l'huile utiles pour l'évaluation de l'état des transformateurs de puissance portent essentiellement sur les quatre propriétés décrites ci-après. [31]



Figure 2.3 : exemple de la méthode APC

- **Qualité de l'huile**
- ❖ **Couleur et apparence**

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

basée seulement sur l'œil nu est réalisée sur site suivant une autre norme qui est ASTM D 1524-84. La couleur et l'apparence de l'huile combinées avec son odeur donnent des informations rapides et utiles pouvant être obtenues sur site, selon lesquelles une personne expérimentée peut observer immédiatement si quelque chose est anormal. La couleur foncée peut indiquer que l'huile a commencé à se détériorer, qui est également la première étape de formation des dépôts et de boues libres. Dans ce cas-là il est fortement recommandé de changer l'huile. [24]

La couleur de l'huile est exprimée en une valeur numérique (indice de couleur) basée sur une comparaison avec une série de normes de couleur :

Transparent= Neuve

Jaune pâle =Bonne

Jaune Huile =veillée

Jaune vif=État marginal

Ambre =Mauvais état

Marron =État sévère

Marron foncé= État extrême

❖ **ACIDITE**

Il a été remarqué que les niveaux d'acidité sont toujours plus élevés dans l'huile végétale que dans l'huile minérale (Fig.2.25) Dans l'huile minérale, c'est uniquement le processus d'oxydation qui forme des acides alors que dans un ester naturel, l'oxydation et l'hydrolyse conduisent à la formation d'acides. [26]

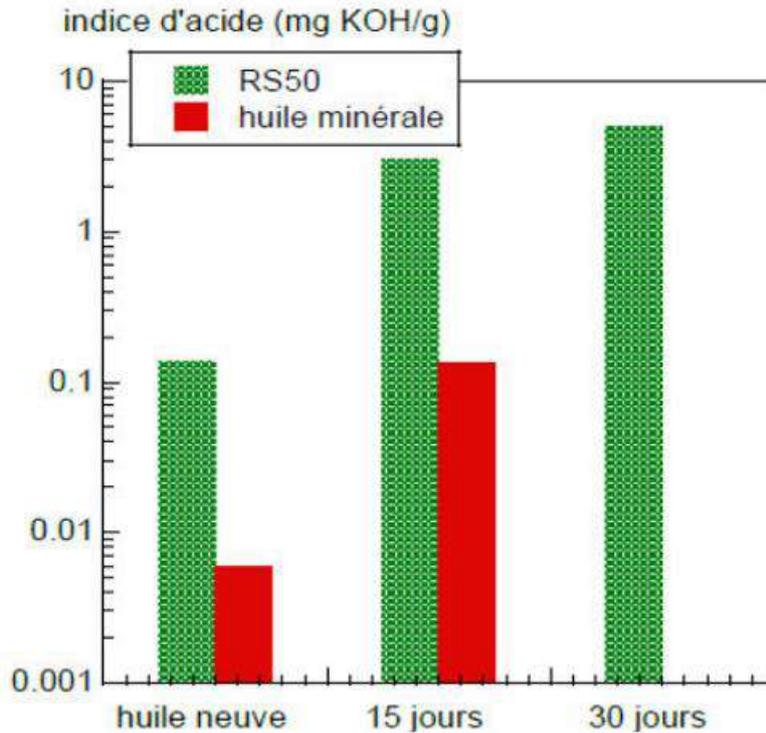


Figure 2.4 : Acidité soluble dans le vieillissement.

❖ Tension de claquage ou (rigidité diélectrique)

La rigidité diélectrique à fréquence industrielle est la valeur maximale du champ électrique que l'on peut appliquer à l'huile sans décharge. Comme la conductivité, la rigidité diélectrique à fréquence industrielle est une caractéristique de conditionnement du liquide mais l'est aussi de sa formulation. Dans l'industrie, elle est maximisée conventionnellement par la tension efficace nécessaire pour provoquer, dans les conditions normalisées, le claquage d'un volume de liquide compris entre deux électrodes dont la forme, distance et nature sont spécifiées, d'où son nom de « tension de claquage » [27]

❖ La viscosité

La viscosité est un paramètre essentiel qui rentre dans le dimensionnement et la conception des systèmes de refroidissement par convection naturelle dans les petits transformateurs auto refroidis ou par écoulement forcé dans les grandes unités (transformateurs de puissance) utilisant des pompes et des radiateurs.[15]

❖ Teneur en eau

Ce paramètre permet de déterminer s'il y a condensation ou infiltration d'eau à l'intérieur du transformateur. Il est très important car la présence d'eau conduit à une diminution de la capacité diélectrique de l'huile. De plus, la présence d'humidité permet également de déterminer la quantité d'eau dans la cellulose, ce qui provoque un vieillissement prématuré de cette dernière. [31]

2.4.3 L'Analyse des gaz (AGD)

Les défaillances du transformateur se classent en deux catégories si on utilise l'AGD pour détecter l'apparition des défauts : les défaillances graves imminentes, qui peuvent se développer en temps très court et que l'AGD ne peut les détecter, et les défaillances qui se développent sur une période de temps prolongée et qui sont donc en principe détectables par l'AGD. Pour interpréter les résultats en utilisant une analyse de tendance [27], on a généralement recours aux méthodes suivantes :

✓ **Technique des rapports**

Cette technique utilise les rapports des quantités mesurées de gaz. La norme CEI 60599 recommande l'utilisation de cinq gaz et de trois rapports. De même, d'autres méthodes recommandent l'utilisation des cinq gaz. Ces gaz sont répertoriés dans l'ordre croissant de leur température de décomposition. Le principal désavantage de cette technique est que l'apparition simultanée de plusieurs défauts risque de créer une certaine ambiguïté dans l'analyse. La technique des rapports présente des avantages certains par rapport aux autres techniques, car les rapports sont indépendants à la fois du volume d'huile et du choix des unités de concentration. Parmi ces méthodes, on trouve : · la méthode CEI 60599, · la Méthode IEEE, · la méthode CEGB/Rogers, · la Méthode de Doernenburg. [27]

✓ **Représentations graphiques (méthode de Duval)**

Les représentations graphiques des rapports de gaz sont pratiques pour suivre visuellement l'évolution des défauts. Cette méthode de diagnostic repose sur le calcul du pourcentage relatif de trois gaz. Chaque coin du triangle représente 100% d'un gaz et 0% des autres gaz. La représentation graphique des trois gaz sur le triangle appelé "Triangle de Duval" dépend de la surface sur laquelle un diagnostic est mené. [27]

TABLEAU 2.1 : Interprétation principale des Gaz dissouts dans l'huile

Gaz détecté	Interprétation
Oxygène O₂	Défaut d'étanchéité du transformateur
Mono et dioxyde de carbone CO et CO₂	Décomposition de la cellulose (Vieillessement ou défaut)
Hydrogène H₂	Décharges électriques (effet couronne, faibles décharges partielles)
Acétylène C₂H₂	Défaut électrique (arc, étincelle)
Ethylène C₂H₄	Défaut thermique (surchauffe locale)
Ethane C₂H₆	Indicateur secondaire d'un défaut thermique
Méthane CH₄	indicateur secondaire d'un arc ou d'une surchauffe importante

La norme CEI 60599 classe les défauts du transformateur détectables par analyse des gaz en 2 catégories : le défaut électrique et le défaut thermique. Ces deux principales catégories peuvent encore être classées en 6 types de défauts de transformateur, en fonction des ampleurs de l'énergie de défaut : [24]

- Décharges partielles (DP)
- Décharge de faible puissance
- Décharge de puissance élevée
- Défauts thermiques avec des températures inférieures à 300 °C
- Défauts thermiques avec des températures entre 300 °C et 700 °C
- Défauts thermiques avec des températures supérieures à 700 °C

A. Gaz de défaut

Ce sont gaz dissous dans l'huile de transformateur suite à une condition électrique, chimique ou thermique conduisant à la formation de gaz. [27]

Pour ces gaz nous avons : Oxygène O_2 ; Mono et dioxyde de carbone CO et CO_2 , Hydrogène H_2 , Acétylène C_2H_2 , Ethylène C_2H_4 , Ethane C_2H_6 , Méthane CH_4 .

B. Procédure d'analyse des gaz dissous dans l'huile

La procédure d'analyse des gaz dissous comporte trois phases successives L'échantillonnage de l'huile, l'extraction des gaz et à la fin leur analyse.

✓ Echantillonnage de l'huile

Il faut prélever et transporter l'échantillon de telle manière que les gaz dissous ne subissent aucune modification, ou bien seulement des modifications que l'on sache évaluer. Dans ce but, il est recommandé d'utiliser des récipients opaques et étanche en verre ou en métal. Mieux encore la méthode de prélèvement par seringue convient quel que soit le mode de transport des échantillons. [31]

Le récipient le plus approprié pour prélever des échantillons pour des analyses de gaz dissous dans l'huile (AGD) et le plus facile à manipuler est la seringue en verre dépoli dont le cylindre et le plongeur ont des tolérances extrêmement serrées figure 2.5. [29]

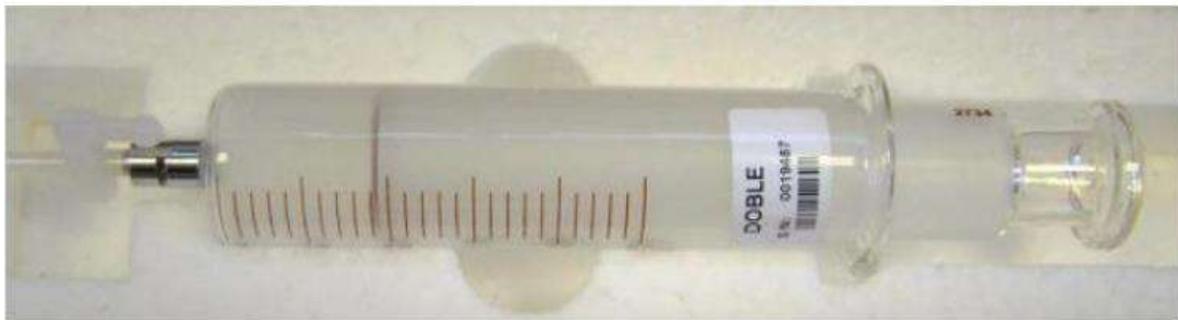


Figure 2.5 : exemple d'une seringue en verre

La sélection des points de prélèvements des échantillons doit faire l'objet d'un soin particulier. Normalement, l'échantillon sera prélevé en un point où il est représentatif de l'ensemble du matériel et en dehors des points où des modifications de composition, peuvent exister, par exemple des échantillons d'huile sont habituellement pris au fond du réservoir, de la soupape de vidange. Cependant, il sera parfois nécessaire et pour des buts spéciaux de prélever délibérément des échantillons là où il n'est pas évident qu'ils soient représentatifs, par exemple quand on essaie de localiser un défaut (au-dessus des radiateurs ou du relais de gaz). [31]

✓ **Extraction des gaz de l'huile**

Pour permettre le diagnostic du transformateur, les gaz doivent être extraits de l'huile. Les normes ASTM D3612 et IEC 60567 détaillent quelques techniques qui peuvent être employées à savoir (Extraction sous vide, Extraction utilisant la méthode headspace), mais aucune d'entre elles n'élimine tout le gaz présent en raison des coefficients de solubilité. Ces coefficients sont une indication de la capacité des gaz à se dissoudre dans l'huile, l'éthane étant facilement dissoluble et donc difficile à éliminer de l'échantillon alors que l'hydrogène est le gaz le moins dissoluble et plus facile à extraire de l'échantillon d'huile. Différents gaz ont différents niveaux de solubilité dans l'huile minérale. Il est important d'identifier correctement les niveaux de gaz produits dans les conditions défectueuses associées avant de procéder à toute analyse de gaz dissous. [24]

✓ **Analyse des gaz extraits de l'huile**

Plusieurs méthodes d'analyse des gaz sont proposées. Cependant, la chromatographie en phase gazeuse (CG) fournit un moyen plus efficace d'analyser ces gaz d'en déterminer les compositions et les concentrations avec une bonne précision. Elle nécessite un appareillage plus élaboré et ne peut donc être utilisée que dans un laboratoire, mais elle fournit une analyse qualitative et quantitative complètes des gaz. [31]

C. Méthodes d'interprétation d'analyse des gaz dissous

Lorsque les différents gaz dans l'échantillon d'huile ont été identifiés et quantifiés, il reste à interpréter le résultat. Que faut-il décider dans le but d'évaluer l'état du transformateur, c'est de savoir si la quantité actuelle des gaz dissous peut être considérée comme anormale ou non. Dans le cas où il y a une production anormale du gaz, on essaye de comprendre l'origine de cet état, c'est-à-dire trouver les causes probables de défauts. Il existe de nombreuses méthodes qui permettent d'interpréter l'excès des gaz produits. Tous les transformateurs en service génèrent des gaz dans une certaine mesure et le problème fondamental avec l'AGD est de pouvoir distinguer entre l'état normal et anormal. [24]

✓ **Méthode de Roger**

En 1974, après qu'une étude détaillée des données des gaz dissous et des défauts associés aux transformateurs, Rogers du CEGB d'Angleterre (Central Electricity Generating Board) a proposé une certaine amélioration des rapports dans des bandes selon leurs valeurs rapportées

dans les tableaux (2.2) et (2.3). Cette méthode utilise les quatre rapports de gaz suivants (rapports raffinés) :

$$R_1 = \frac{\text{Méthane}}{\text{Hydrogene}} = \frac{\text{CH}_4}{\text{H}_2} \quad , \quad R_2 = \frac{\text{Ethane}}{\text{Methane}} = \frac{\text{C}_2 \text{H}_6}{\text{CH}_4}$$

$$R_3 = \frac{\text{Ethylene}}{\text{Ethane}} = \frac{\text{C}_2 \text{H}_4}{\text{C}_2 \text{H}_6} \quad , \quad R_4 = \frac{\text{Acetylene}}{\text{Ethylene}} = \frac{\text{C}_2 \text{H}_2}{\text{C}_2 \text{H}_4}$$

Ces rapports sont exploités pour générer des codes basés sur des limites numériques classées dans des intervalles selon le tableau 2.2. La combinaison de codes, peut être reliée à une interprétation comme il est montré dans le tableau 2.3. [27]

Tableau 2.2 : Rapports, Intervalles et Codes de Rogers.

Rapport de gaz	Intervalles	Codes
CH4/H2	≤0.1	5
	> 0.1 < 1	0
	≥ 1 < 3	1
	≥3	2
C2H6/CH4	<1	0
	≥1	1
C2H4/C2H6	<1	0
	≥ 1 < 3	1
	≥ 3	2
C2H2/C2H4	<0.5	0
	≥ 0.5 < 3	1
	≥ 3	2

Tableau 2.3 : Codes et défauts selon la méthode de Rogers

Code					Interprétation
1	0	0	0	0	Normale
2	5	0	0	0	Décharge partielle (DP) d'une faible énergie
3	1-2	0	0	0	Surchauffement léger < 150°C
4	1-2	1	0	0	Surchauffement léger 150-200°C
5	0	1	0	0	Surchauffement léger 200-300°C
6	0	0	1	0	Surchauffement au conducteur
7	1	0	1	0	Echauffement causé par la circulation de courant dans les enroulements.
8	1	0	2	0	Echauffement causé par la circulation de courant dans le noyau et le réservoir
9	0	0	0	1	Arc d'une faible énergie
10	0	0	1-2	1-2	L'arc d'une grande énergie
11	0	0	2	2	Etincellement continu, Arc
12	5	0	0	1-2	Décharge partielle DP

✓ Méthode de la CEI (commission électrotechnique internationale)

Cette méthode est un guide pour l'interprétation de l'analyse des gaz dans les transformateurs et autres matériels électriques remplis d'huile en service. Elle a été publiée en 1978. Elle utilise le calcul des rapports des concentrations des gaz. Cette méthode d'interprétation utilise la méthode de Rogers sauf que le rapport C_2H_6/CH_4 a été abandonné puisqu'il indique seulement une gamme de défaut thermique limitée. Avant de procéder à diagnostic quelconque, il est nécessaire de s'assurer que les concentrations de gaz mesurées sont significatives. Cela est particulièrement important à des niveaux de concentration de gaz très faible, car les rapports suggérés peuvent entraîner des erreurs d'interprétation. Par conséquent, l'interprétation des obtenus sont si les concentrations de gaz sont supérieures aux

niveaux significatifs. La sensibilité de la technique d'analyse joue également un rôle important dans l'interprétation des résultats. Des informations utiles associées à la vitesse de formation des gaz et à l'évolution de la gravité de défauts et à la prévention de la saturation d'huile est fournie. [31]

Tableau 2.4 : Limites admissibles pour chaque gaz selon CEI

Les gaz dissouts	Limites admissibles en ppm
H₂	60-150
CH₄	40-110
CO	540-900
CO₂	5100-13000
C₂H₄	60-280
C₂H₆	50-90
C₂H₂	3-50

Tableau 2.5 : Code des rapports de gaz relatif à la méthode CEI.

Les Intervalles de codes	les rapports de gaz caractéristiques de défaut		
	C ₂ H ₂ /C ₂ H ₄	CH ₄ /H ₂	C ₂ H ₄ /C ₂ H ₆
<0.1	0	1	0
0.1-1	1	0	0
1-3.	1	2	1
>3	2	2	2

✓ Triangle de Duval

Le triangle de Duval a été développé pour la première fois en 1974. Il utilise seulement trois gaz d'hydrocarbure (CH_4 , C_2H_4 et C_2H_2). Ces trois gaz correspondant aux niveaux croissants de l'énergie nécessaire pour produire des gaz dans les transformateurs en service. La méthode du triangle est indiquée sur la figure (2.6). Les zones de différents défauts mentionnés au-dessous de la figure (2.7) (PD, D1, D2, T1, T2 ou T3), une zone DT intermédiaire a été attribuée au mélange des défauts électriques et thermiques dans le transformateur. [31]

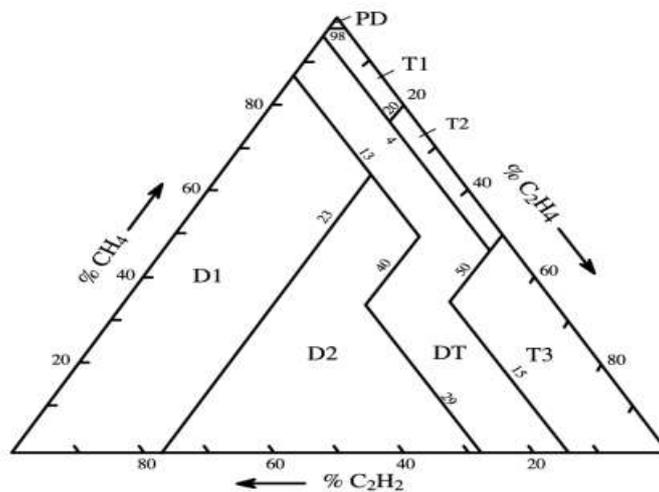


Figure 2.6 : Triangle de Duval et différentes zones de défauts. [24]

Tableau 2.6 : Interprétation de différentes zones du triangle de Duval.

DP	Décharge partielle
T1	Défaut thermique, température faible en dessous de 300°C
T2	Défaut thermique, température moyenne (300°C, 700°C)
T3	Défaut thermique, haute température au-dessus de 700°C
D1	Décharge électrique à faible énergie
D2	Décharge électrique à haute énergie
DT	Indéterminé-défaut thermique ou décharge électrique

Cette méthode permet d'établir un diagnostic ou la combinaison de gaz dissous a un effet minime. Elle n'utilise pas l'Hydrogène, il faut donc s'attendre à ce que cette méthode ait une sensibilité diminuée pour les défauts classés comme 'décharge partielle sur le triangle de Duval. Cette méthode s'est avérée précise et sûre sur beaucoup d'années et gagne maintenant dans la popularité. La manière de son utilisation consiste au calcul de pourcentages de concentration (ppm) des trois gaz CH_4 , C_2H_4 , C_2H_2 par rapport au total ($\text{CH}_4 + \text{C}_2\text{H}_4 + \text{C}_2\text{H}_2$). Ces pourcentages (CH_4 %, C_2H_4 %, C_2H_2 %) seront tracés sur le triangle de Duval, en commençant du côté indiqué pour ce gaz particulier. Les lignes tracées à travers le triangle pour chaque gaz parallèle aux hachures montrées de chaque côté du triangle fournissent seulement un point dans le triangle. [31]

2.5 Techniques Modernes

Il y a quelques outils de diagnostic qui sont relativement nouveaux dans le domaine du diagnostic, et ils n'ont pas encore été totalement introduits dans les compagnies d'électricité. Parmi ces techniques on trouve : Mesure de décharges partielles, la Mesure de réponse diélectrique, la Mesure de la tension de rétablissement (RVM), le Courant de polarisation et de dépolarisation (PDC) etc... [24]

En plus de ces méthodes, nous disposons également de l'intelligence artificielle, un instrument crucial et fiable dans le domaine du diagnostic de nos jours.

2.6 L'intégration de l'intelligence artificielle

Les méthodes de diagnostic des défauts utilisant les concentrations ou les ratios de gaz de défauts reposent sur l'expertise pratique de divers experts plutôt que sur des théories scientifiques quantitatives étayées par des preuves.

Ainsi, la disponibilité de vastes ensembles de données provenant de l'analyse des gaz dissous a incité les chercheurs à élaborer une approche alternative pour interpréter ces données, en se basant sur des techniques d'intelligence artificielle (IA). [35]

2.7 Conclusion

Ce chapitre est dédié à la défaillance dans les transformateurs de puissances, les causes des défaillances ainsi que les méthodes d'identification de celle-ci mais aussi de diagnostic et évaluation de l'état de celui-ci. Des méthodes comme le triangle de Duval la méthode de CEI

et autres .on a parlé aussi sur les techniques modernes qui sont une mini introduction à l'intelligence artificielle.

Dans le prochain chapitre on va entamer le chapitre de l'intelligence artificielle, son interprétation dans les AGD et les outils de cette dernière.

Chapitre 03

Méthodes de diagnostic des
défauts basées sur
L'Intelligence Artificielle

3.1 Introduction

En suivant la lecture des chapitres précédents on remarque l'importance des Méthodes de diagnostic des transformateurs plus précisément la méthode de l'AGD. Une revue de littérature démontre que les méthodes conventionnelles de diagnostic présentent parfois des incohérences qui peuvent conduire à des erreurs fatales et on ne peut négliger la variable de « facteur humaine » vue l'importance des tr dans le réseau électrique on cherchera toujours la méthode la plus efficace dans la prévention et la détection des défauts de ces derniers .sans oublie souvent l'ambiguïté dans l'interprétation des analyses et plusieurs autres fait divers (présence de défauts multiples peut être cachée par le défaut le plus apparent ; Limite de prise de décision)

C'est dans cette optique qu'on sait intéresser a l'intelligence artificiel qui apparait aujourd'hui comme le futur de l'industrie .Son l'utilité n'est plus à présenter ni sa fiabilité. Il nous aide beaucoup ici dans le diagnostic car on a un meilleur moyen de détection de tous les défauts présents et leur nature. Ces techniques incluent dans leur utilisation les systèmes experts (SE), la logique floue (LF), les réseaux neurones artificiels (RNA) et les combinaisons établies parfois entre elles.

Le but est de permettre à des ordinateurs de penser et d'agir comme des êtres humains, pour y parvenir, trois composants sont nécessaires : des systèmes informatiques, des données avec des systèmes de gestion et des algorithmes d'IA avancés (code). Pour se rapprocher le plus possible du comportement humain, l'intelligence artificielle a besoin d'une quantité de données et d'une capacité de traitement élevée. [33]

3.2 L'Intelligence artificielle et composants

- a) Intelligence artificielle
- b) Le système expert (SE)
- c) La logique floue (LF)
- d) Les réseaux neurones artificiels (RNA)

a) Intelligence artificielle

L'intelligence artificielle (IA) est un processus d'imitation de l'intelligence humaine qui repose sur la création et l'application d'algorithmes exécutés dans un environnement informatique dynamique. Son but est de permettre à des ordinateurs de penser et d'agir comme des êtres humains. [38]

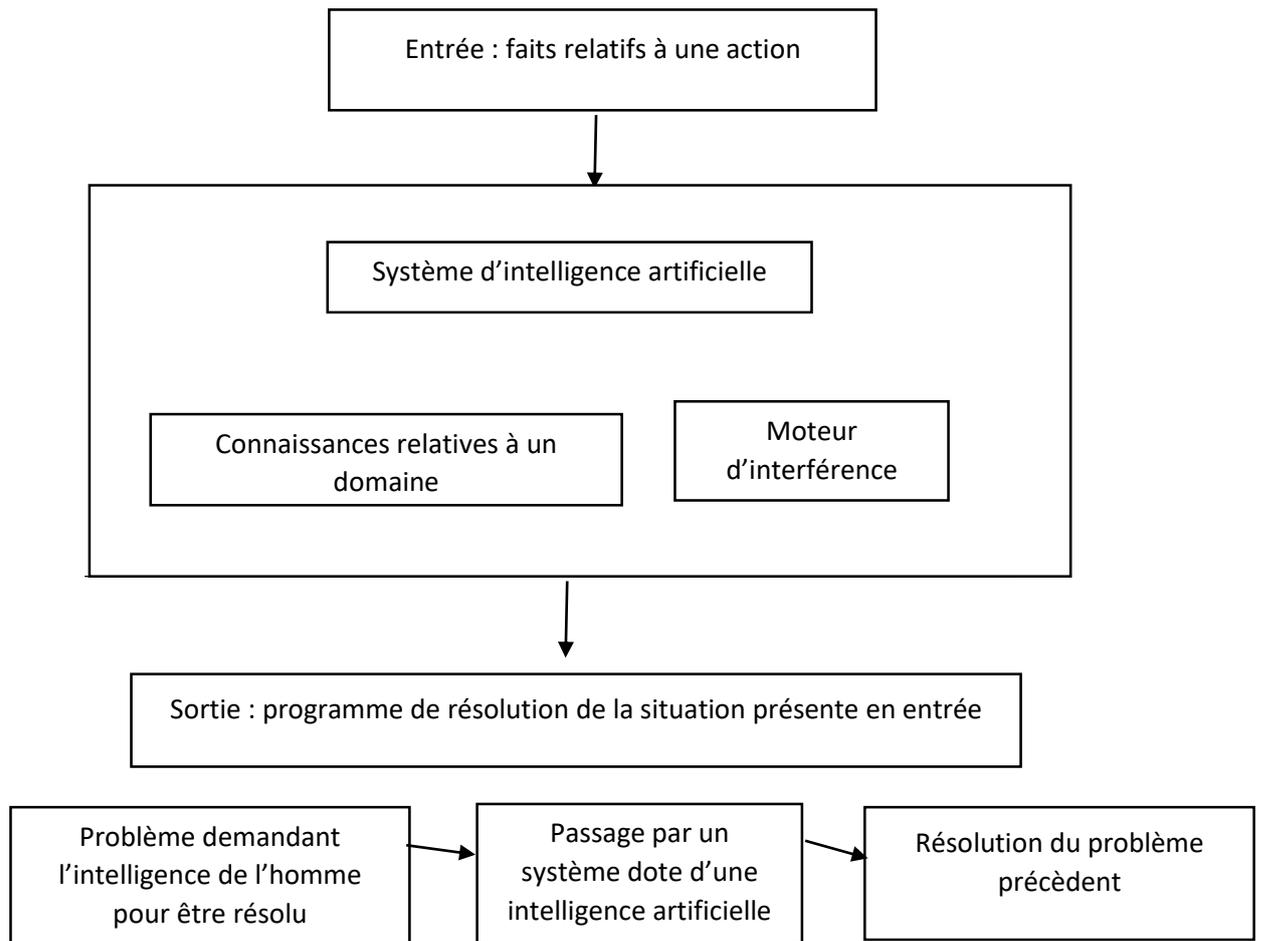


Figure 3.1 : Présentation d'un système d'intelligence artificielle. [38]

b) Le système expert (SE)

Un système expert possède un nombre consistant d'avantages. Le point le plus important à noter est qu'un système expert n'est pas conçu pour remplacer l'ingénieur existant. C'est un outil professionnel qui devrait être utilisé en même temps pour réduire et raccourcir le temps émis pour interprétations et les erreurs de diagnostic.

Mais si on devait le définir on dirait qu'un système expert, est simplement un système lié à l'ordinateur établi par des experts dans un champ particulier pour aider à résoudre des problèmes complexes rapidement et efficacement. Dans le cas du transformateur de puissance, il y a beaucoup de diversités dans les systèmes experts qui utilisent des différentes méthodes pour parvenir à la nature de défaut affectant le transformateur. [27]

Le principe est que les systèmes formalisés sont jusqu'à aujourd'hui basés sur une approche Objets Savoirs (WURTZ, 2008) essentielle, mais qui a aussi ses limites. Ces dernières étant au niveau des travaux relevant de l'expert qui, par son expérience, prendra des décisions que fondamentalement l'informatique ne pourra pas prendre sur :

1. la définition claire du système,
2. la critique de celui-ci. [18]

C) La logique floue (LF)

La logique floue est une description mathématique d'un processus basée sur la théorie des ensembles flous. Cette théorie introduite en 1965 par le professeur Lotfi Zadeh. A cette époque la théorie de la logique floue n'a pas été prise au sérieux. En effet, les ordinateurs, avec leur fonctionnement exact par tout ou rien (1 ou 0), on commence à se répandre sur une grande échelle. Par contre, la logique floue permettait de traiter des variables non exactes dont la valeur peut varier entre 1 et 0. Cette technique associe les notions de (sous-ensemble flou) et de «théorie des possibilités ». Il s'agit d'une approche calquée sur le raisonnement humain plutôt que sur des calculs rigides, pour des problèmes mal définis, l'être humain est irremplaçable. En effet, le mode de raisonnement en logique floue est plus intuitif que la logique classique. Il permet aux concepteurs de mieux appréhender les phénomènes naturels, imprécis et difficilement modélisables en s'appuyant sur la définition de règles et de fonctions d'appartenance à des ensembles dits « ensembles flous » [26].

Elément de Base de la logique floue :

-variable linguistique la description d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'un procédé contient en général des qualificatifs flous tels que [31].

- peu, beaucoup, énormément,
- rarement, fréquemment, souvent,
- froid, tiède, chaud,
- Petit, moyen, grand.

- fonctions d'appartenance au lieu d'appartenir à l'ensemble « vrai » ou à l'ensemble « faux » de la logique binaire traditionnelle, la logique floue admet des degrés d'appartenance à un ensemble donné. Le degré d'appartenance à un ensemble flou matérialisé par un nombre

compris entre 0 et 1. Une valeur précise de la fonction d'appartenance liée à une valeur de la variable est notée μ et appelée « facteur d'appartenance ».

- Inférence floue plusieurs valeurs de variables linguistiques sont liées entre elle par des règles permettent de tirer des conclusions

Les règles peuvent alors être exprimées sous forme générale :

- Si condition 1 alors action 1 ou

-Si condition 2 alors action 2 ou

-Si condition n alors action n Les conditions peuvent dépendre de plusieurs variables liées entre elle par des opérateurs OU ou ET. [31]

d) les réseaux neurones artificiels (RNA)

Les réseaux de neurones artificiels constituent une alternative aux systèmes experts pour le traitement des alarmes. Déjà en 1993, l'étude bibliographique faisait état de nombreuses applications concernant la détection de défauts dans le domaine de l'énergie électrique. Leur principal avantage par rapport aux systèmes experts est de pouvoir modéliser des phénomènes complexes de manière implicite lorsque les relations intervenantes entre les différents paramètres d'un processus sont mal connues. [27]

3.3 Apprentissage automatique

3.3.1 Définition

Le Machine Learning « ML » ou en français, apprentissage automatique, aussi appelé « analyse prédictive ».

Le Machine Learning est en effet ce qui donne de la valeur aux données. L'idée de base est de construire un modèle qui permet d'obtenir des prédictions, des diagnostics ou des recommandations à partir d'un jeu de données brutes, duquel les performances peuvent être évaluées en utilisant des méthodes de validation [32].

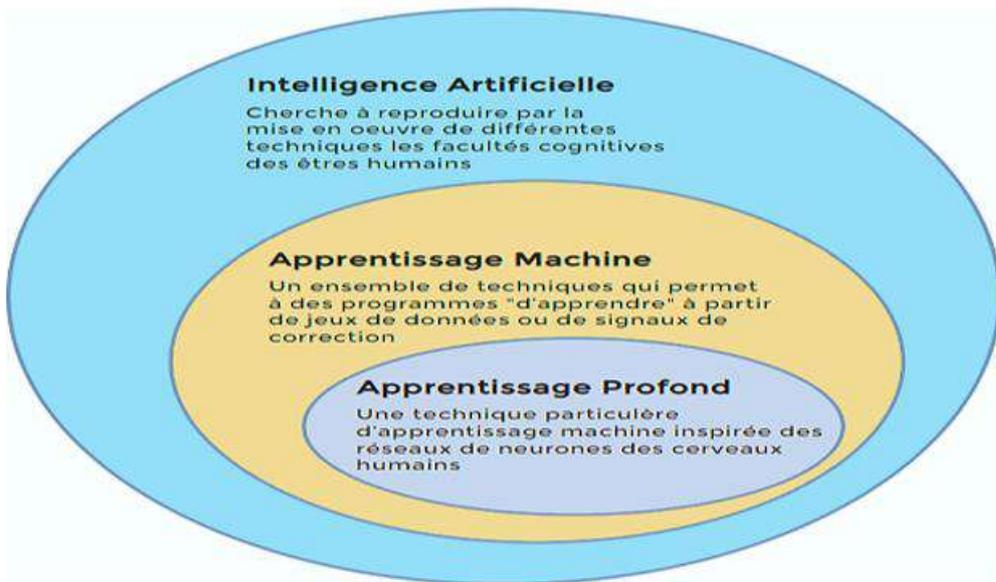


Figure 3.2 : Les 3 étapes essentielles d'apprentissage automatique (Machine Learning). [34]

3.3.2 Différence entre L'Intelligence Artificielle et Le Machine Learning

Si l'intelligence artificielle (IA) est un concept visant à simuler un ou des comportements humains. Et le machine Learning n'est qu'une méthode pour atteindre la création d'une intelligence artificielle. [33]

3.3.3 Processus d'apprentissage automatique

Le mécanisme de l'apprentissage automatique est identique, bien que le système de base utilisé soit pas les mêmes, et voici une représentation de ce qu'il ressemble très souvent:

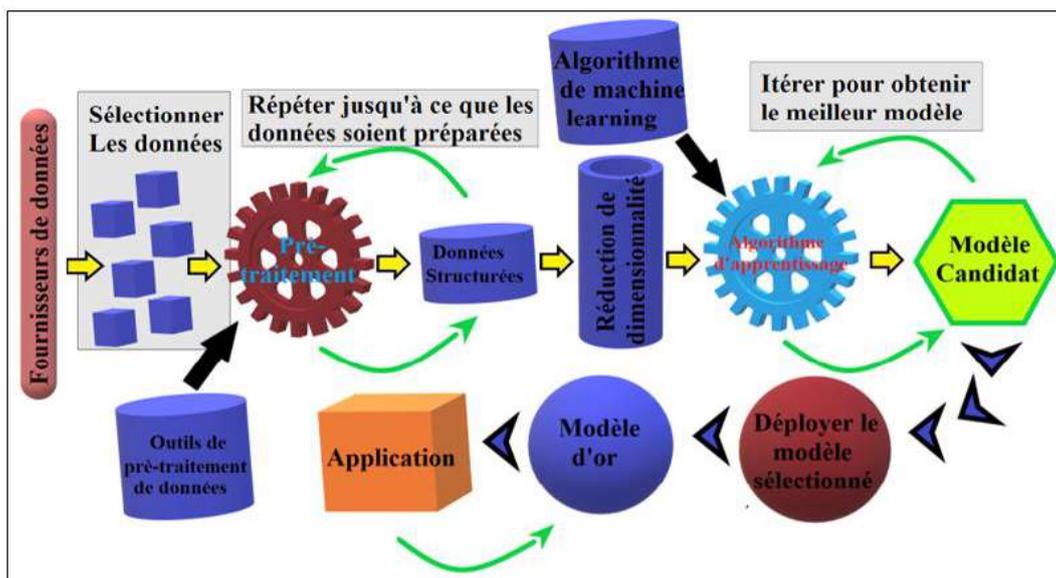


Figure 3.3 : Processus d'apprentissage du "Machine Learning". [24]

Comme le montre la figure ci, l'Apprentissage auto débute avec des données et plus vous avez de données plus le résultat est bon.

Parce que nous vivons à l'ère du « Big Data », l'apprentissage automatique est devenu beaucoup plus populaire ces dernières années. Avoir beaucoup de données à travailler dans de nombreux domaines différents permet aux techniques d'apprentissage automatique d'être appliquées à un ensemble plus large de problèmes. [33]

3.3.4 Sélection des données

Puisque le processus commence avec les données, il est extrêmement important de sélectionner les données appropriées. Déterminer les données les plus pertinentes pour un projet d'apprentissage automatique est une partie fondamentale du processus, et c'est un domaine où les experts du domaine ont généralement beaucoup à offrir. [36]

3.3.5 Prétraitement

Quelles que soient les données que vous choisissiez, elles sont rarement parfaites pour être utilisées directement. Le plus souvent aussi, elles n'ont pas été constituées dans le but d'être analysées par une machine. Au lieu de cela, les projets d'apprentissage automatique traitent généralement ces données brutes avec divers modules de prétraitement. Par exemple, les données brutes peuvent contenir des entrées en double pour certaines observations, avec peut-être des informations contradictoires. Les données brutes peuvent contenir des valeurs nulles, comme un manque d'informations pour certaines variables. Le but du prétraitement est de créer des données structurées. Mais arriver ici n'est généralement pas simple et facile, simplement parce qu'il n'est pas facile de distinguer ce qui est le résultat d'une erreur ou d'une variation non significative d'une observation authentique [13].

a. Normalisation des données

La data normalization ou normalisation des données consiste à transformer les données sans les dénaturer pour améliorer leur efficacité et pour qu'elles correspondent à un ensemble prédéfini et contraint de valeurs. Dans de nombreux cas, les données peuvent avoir des échelles très différentes, c'est-à-dire que certaines variables peuvent avoir des valeurs beaucoup plus grandes ou plus petites que d'autres. Cela peut poser des problèmes pour certaines techniques statistiques ou algorithmes d'apprentissage automatique, car ils peuvent être sensibles à l'échelle des données. La normalisation permet de résoudre ce problème en ajustant les valeurs des variables pour qu'elles se situent dans un intervalle spécifié, souvent entre 0 et 1, ou autour

de la moyenne avec un écart-type donné [37]. Il existe plusieurs méthodes de normalisation des données, mais deux d'entre elles sortent du lot à commencer par :

La méthode de Min-Max Scaling. Elle repose sur le principe d'une mise à l'échelle des valeurs d'une variable afin qu'elles se situent dans un intervalle spécifié, généralement entre 0 et 1

- la méthode logarithmique est une technique qui répond davantage à un impératif de standardisation. Elle transforme les valeurs d'une variable pour qu'elles aient une moyenne de 0 et un écart-type de 1

- la méthode de pourcentage elle est souvent utilisée lorsque vous avez des données qui sont exprimées en pourcentage et que vous souhaitez les ramener à une échelle commune pour les comparer ou les analyser

- D'autres méthodes peuvent également être envisagées dans une optique de normalisation des données, mais elles sont plus marginales. Retenez toutefois la normalisation par décimale (Decimal Scaling) ou la normalisation par vecteur unitaire (Unit Vector Scaling). [37]

b. Standardisation des données

La standardisation transforme les valeurs d'une variable pour qu'elles aient une moyenne de 0 et un écart-type de 1. Contrairement à la normalisation, la standardisation ne fixe pas de plage spécifique pour les valeurs transformées. La standardisation est utile lorsque les variables ont des échelles très différentes, et elle permet de centrer les données autour de zéro et de les mettre à l'échelle par rapport à l'écart-type, ce qui peut faciliter l'interprétation des coefficients dans certains modèles. En fonction de la nature de vos données et des enseignements que vous souhaitez en tirer, il faudra tantôt recourir à la data normalization, tantôt à la data standardization [37].

3.3.6 Réduction de dimensionnalité

Son but est de créer un sous-ensemble optimal de caractéristiques pertinentes selon un critère fixé auparavant. Par conséquent, il permet donc de réduire la dimension de l'espace des exemples et de rendre l'ensemble des données plus représentatif du problème. Cette réduction a un double objectif, le premier consiste à réduire la redondance et le second permet de faciliter les traitements postérieurs (extraction, classification et reconnaissance de formes, réduire l'espace de stockage nécessaire, réduire le temps d'apprentissage et d'utilisation, identifier les facteurs pertinents...) et donc l'interprétation des données. [33]

3.3.7 Application des algorithmes de Machine Learning

Après avoir traité toutes les données. Nous allons résoudre le problème en choisissant la meilleure façon possible. Pour ce faire, une multitude d'algorithmes est disponible dans les produits « Machine Learning » qui peuvent être appliqués individuellement ou combinés aux données structurées pour avoir un modèle candidat et pratique. Dans presque tous les cas, le premier modèle candidat créé n'est pas le meilleur. Au lieu de cela, le data scientist il va tenter plusieurs combinaisons différentes d'algorithmes et de données structurées, en cherchant celui qui produit le meilleur modèle. Où chaque répétition ou tentative est considérée comme une expérience, et des projets typiques exécuteront de nombreuses expériences pendant la recherche du bon modèle [24].

✓ Déploiement du modèle sélectionné

Après avoir identifié un bon modèle, adapté et efficace, il devrait être déployé. Cela permet aux applications d'utiliser l'algorithme implanté par le modèle. C'est une partie importante du processus sans déploiement, tout le travail effectué jusqu'à présent est sans valeur. Et si le déploiement est trop difficile, les personnes qui créent le modèle pourraient ne pas être en mesure de déployer de nouveaux modèles rapidement, ce qui est souvent nécessaire dans notre monde en évolution rapide. Cependant, qu'il est déployé, un modèle implémente un algorithme pour reconnaître les formes. Ce modèle a été dérivé des données. Plutôt que de placer quelques personnes intelligentes dans une pièce et de les laisser inventer un moyen de résoudre un problème, l'apprentissage automatique génère plutôt une solution efficace à partir des données [24].

3.4 Classification des méthodes d'apprentissage automatique

Les scientifiques diffèrent dans la détermination des types d'algorithmes d'apprentissage automatique, mais ils peuvent être divisés en trois catégories en fonction de leur objectif et des données fournies. Les principales catégories sont les suivantes voir la Figure 3.5 : [37]

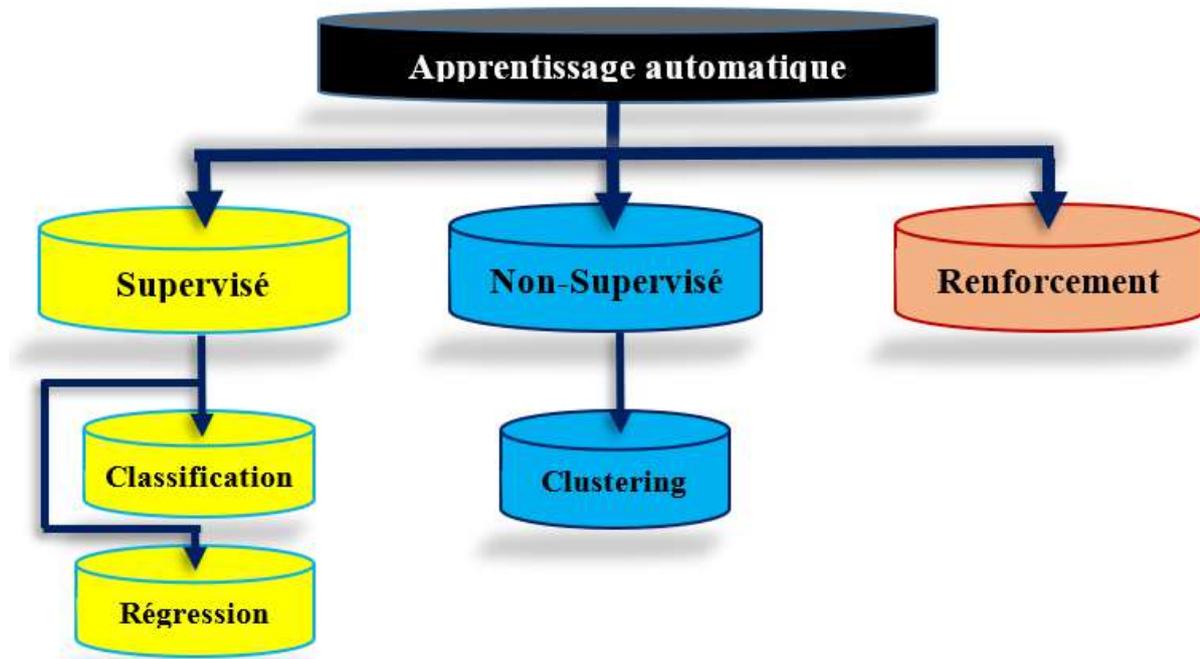


Figure 3.4 : Catégories d'apprentissage automatique. [33]

3.4.1 Apprentissage Supervisé

L'apprentissage supervisé fait référence à une méthode d'entraînement des algorithmes d'apprentissage automatique qui s'appuie sur un jeu de données préexistant (appelé ensemble de données d'apprentissage) pour effectuer des prédictions. Ce jeu de données contient à la fois des données d'entrée et les résultats attendus. L'objectif principal de l'apprentissage supervisé est de développer un modèle capable de prédire correctement les résultats pour de nouvelles données, en se basant sur les informations fournies dans l'ensemble de données d'entraînement. Habituellement, un ensemble distinct de données, appelé ensemble de données de test, est utilisé pour évaluer et valider la performance du modèle ainsi créé.

- Les algorithmes et les applications de la régression dans l'apprentissage supervisé :
 - * Les Algorithmes : Régression linéaire et logistique ; Les arbres de régression ; Les arbres de décision ; SVR (Support Vector regression) ou régression à vecteurs de support.
 - * Les Applications : Prévision ; Prédiction ; Optimisation de processus ; Génération d'insights.
- Il existe deux catégories différentes dans l'apprentissage supervisé : classification et régression.

*Classification : pour les valeurs de réponse catégorique, où les données peuvent être divisées en « classes » spécifiques. [24]

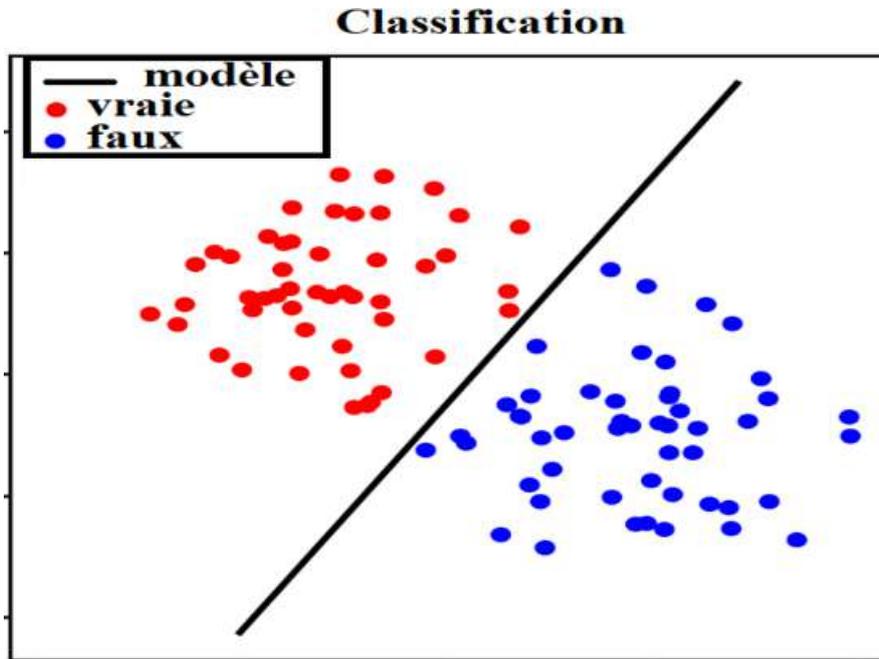


Figure 3.5 : Classification dans l'apprentissage supervisé. [33]

* Régression : pour les valeurs de réponse continue (prédiction de la charge électrique). [24]

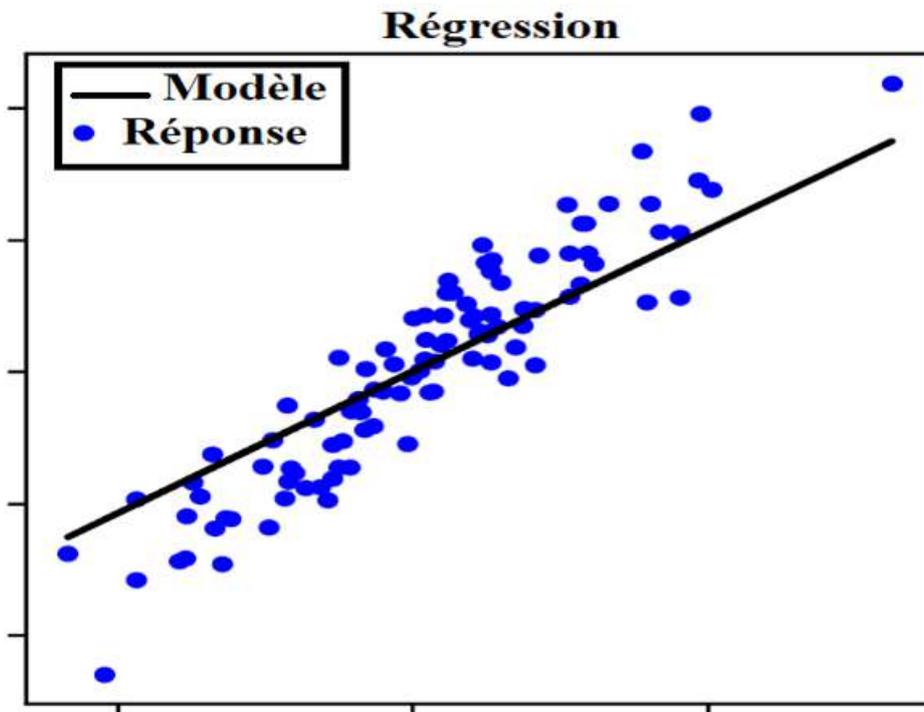


Figure 3.6: Régression dans l'apprentissage supervisé. [33]

3.4.2 Apprentissage Non-Supervisé

L'apprentissage non supervisé est un type d'approche en apprentissage automatique utilisé pour déduire des informations à partir de jeux de données qui ne sont pas accompagnés de réponses catégorisées. La méthode la plus courante en apprentissage non supervisé est le partitionnement de données, également connu sous le nom de "clustering". Cette méthode est utilisée pour explorer les données et identifier des modèles cachés ou des regroupements. Les clusters sont créés en se basant sur une mesure de similarité définie par des métriques telles que la distance euclidienne ou la distance probabiliste.

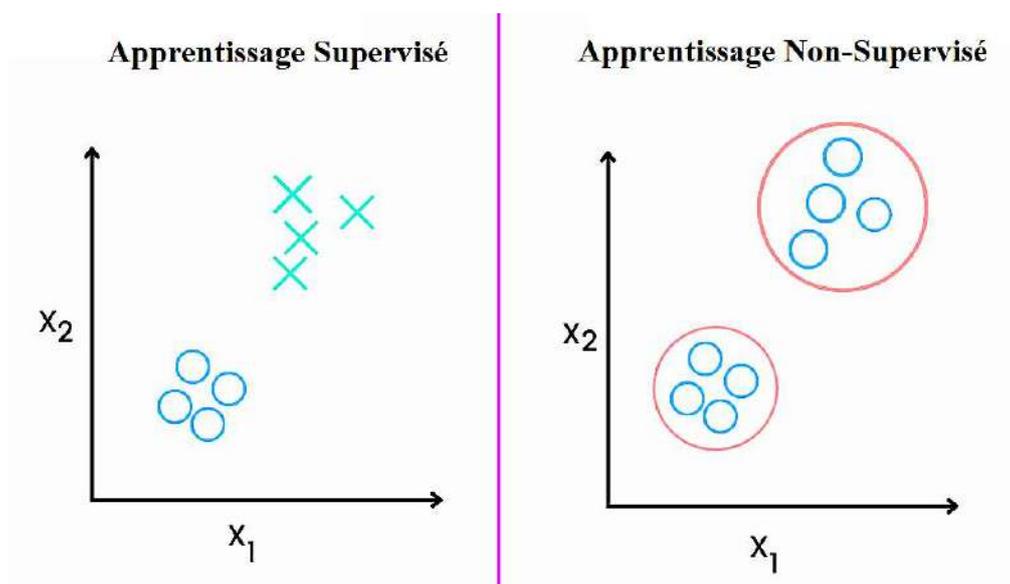


Figure 3.7 : La différence entre apprentissage supervisé et non-supervisé. [33]

*Les algorithmes et les applications dans l'apprentissage non-supervisé :

- Les Algorithmes : KMC (K-Means Clustering) ou K-moyenne ; Classification hiérarchique ; Modèles de distribution ; Analyses de composantes principales ; Analyse en composantes indépendantes.

-Les Applications : Segmentation de clientèle ; Customer segmentation ; Diagnostic.

3.4.3 Apprentissage par renforcement

L'apprentissage par renforcement est utilisé pour résoudre les problèmes de prise de décision (généralement une séquence de décisions), tels que la perception et le mouvement du robot, le joueur d'échecs automatique et la conduite automatique du véhicule. Cette catégorie d'apprentissage ne sera pas discutée plus avant dans cette thèse, et les lecteurs pourraient se référer [24] pour plus de compréhension.

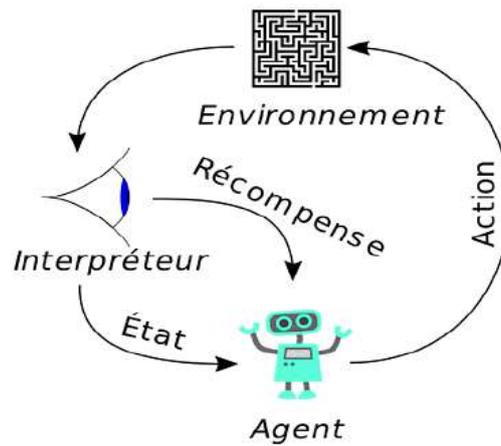


Figure 3.8 : Apprentissage par renforcement. [33]

* Les algorithmes et les applications dans l'apprentissage renforcement :

- Les Algorithmes : Q-Learning ou Q-apprentissage ; SARSA ; Processus décisionnels de Markov.

-Les Applications : Décision en temps réel ; Programmes d'apprentissages ; Acquisition de compétences.

3.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons parlé de l'intelligence artificielle et son utilité dans L'AGD, puis nous avons expliqué en détail l'apprentissage automatique, ses processus et la classification des méthodes d'apprentissage, en gros son fonctionnement nous avons eu a touche beaucoup de point important. Dans le prochain chapitre on va entamer l'interprétation et l'explication des analyses faites sur Matlab.

*Chapitre 04 : Simulation et
Comparaison des
Algorithmes de Machine
pour la classification des
états du TRs de puissance*

4.1. Introduction

À l'heure actuelle, les experts s'appuient fortement sur les programmes et les applications pour effectuer le travail plus rapidement, moins d'efforts et plus de précision et le programme MATLAB est un espace de travail bien connu, en particulier dans la programmation, le calcul et la conception, et nous, à notre tour, l'avons utilisé pour faire la simulation des données avec plusieurs algorithmes dont le but est de diagnostiquer plus rapidement l'état de l'huile de transformateur . Où nous l'expliquerons en détail dans ce chapitre.

4.2 Définition d'espace de travail « MATLAB »

Matlab est un langage de programmation scientifique orienté calcul numérique. Il permet par exemple la manipulation d'algorithmes, l'affichage de graphique ou encore la génération de matrices. Articulé autour du langage de script du même nom, il est doté d'un éditeur permettant d'exécuter des séquences de commandes encapsulées dans des fonctions. Il est conçu pour l'analyse de données, la visualisation de graphiques, la génération de matrice, le développement d'algorithmes ou le développement d'applications. Interopérables avec Python, C/C++, Java et Fortran, il est optimisé pour le calcul en parallèle. Ses principaux domaines d'application sont les sciences, l'ingénierie et l'économie. [40]

4.3 Aperçu des matériels et méthodes

4.3.1 Description des données utilisées

Dans cette étude, nous examinons un ensemble de données composé de 710 cas provenant de diverses sources. Ces données comprennent des enregistrements pratiques de gaz dissous prélevés sur différents transformateurs de puissance, accompagnés de mesures de leur état réel, ainsi que de la catégorie de défaut en cas de dysfonctionnement de l'équipement. Pour garantir la précision de notre analyse, le nombre d'échantillons utilisés pour entraîner les algorithmes de diagnostic varie selon le type de diagnostic. Lorsqu'il s'agit de déterminer l'état de l'équipement, nous avons inclus toutes les données, y compris 216 cas d'état normal et 494 cas défectueux.

Pour distinguer les types de défauts, tels que thermiques (218 cas) ou électriques (276 cas). Le tableau 4.1 présente la configuration des données utilisées dans notre étude, ainsi que la répartition du nombre de cas pour chaque scénario étudié.

Tableau 4.1 : Forme et répartition des données.

N°	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	Etat	N ^{br}	Défaut	N ^{br}
1	1084	188	769	166	8	A	494	E	276
2	24,3	15,76	6,4	5	29,8	A			
3	3090	5020	2540	38000	323	A			
4	144	1672	143	669	3394	A			
5	6	2990	67	26076	29990	A			
6	290	1560	8	820	231	A			
7	200	50	30	200	50	N	216	N	216
8	3	6	1	3	8	N			
9	20	30	2	4	25	N			

Pour bien comprendre nos données, un bref résumé statistique est illustré dans la figure (4.1)

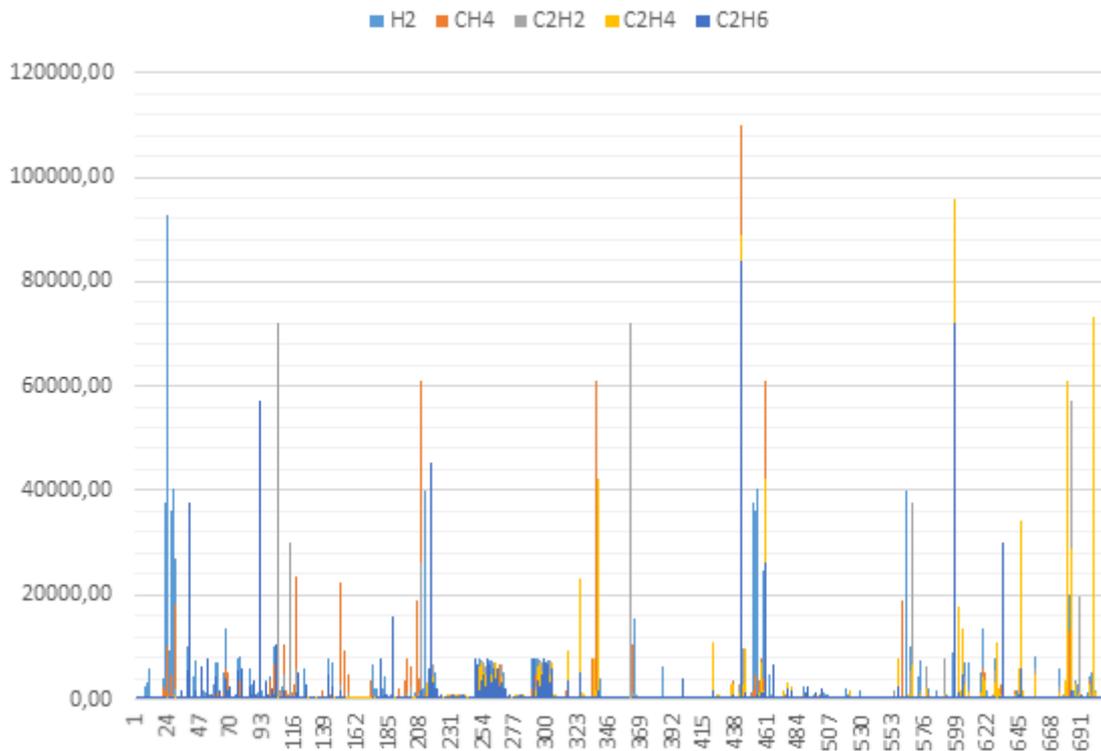


Figure 4.1 : Résumé statistique des données de détection de défaut.

D'après la figure 4.1 nous observons que les valeurs des données de l'état « Normal, N » ne dépasse pas les 500 ppm et la majorité se concentre sur 100 ppm avec une faible dispersion.

Par contre dans le cas de l'état de défaut « A » les valeurs peuvent atteindre les 120000 ppm dont la plupart se regroupent autour de 2000 et 1000 ppm.

4.3.2 Prétraitement des données

La préparation des données revêt une importance cruciale pour garantir le succès de toute démarche d'exploration de données. Les données de l'AGD (Analyse des Gaz Dissous) sont sujettes à des lacunes, des chevauchements et des incohérences, tout comme tout autre type de données, en raison de la diversité des sources et/ou des conditions de collecte. Dans le domaine de l'analyse de données, diverses stratégies peuvent être adoptées pour résoudre ces problèmes. La transformation des données, une technique couramment employée à cet effet, convertit les données brutes, mesurées par des fonctions mathématiques simples, en unités logarithmiques, standardisées, ou en pourcentage, tel que réalisé dans cette étude ou par d'autres méthodes de transformation. Dans cette étude, la transformation des données a été mise en œuvre non seulement pour pallier les valeurs aberrantes et les problèmes de chevauchement des données, mais également pour extraire des informations supplémentaires et identifier des corrélations entre différentes variables. Les figures présentent les données à l'état brut et des exemples de données transformées selon diverses méthodes de prétraitements.

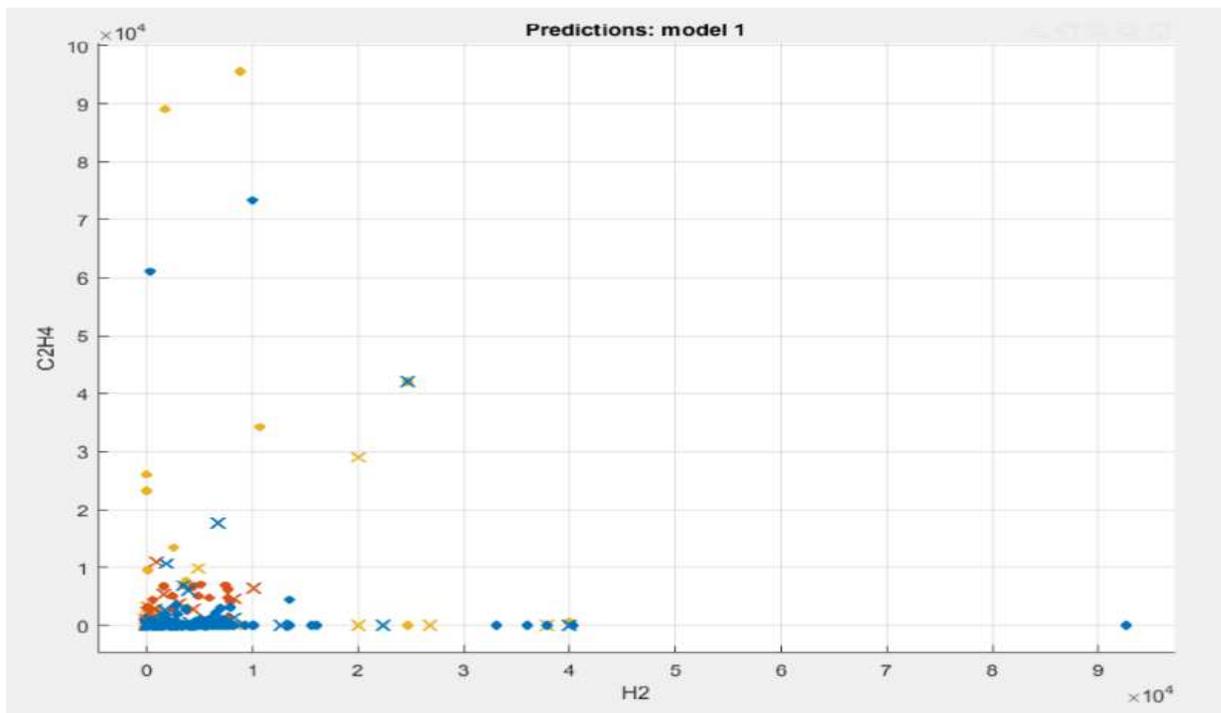


Figure 4.2 : Dispersion des données brutes.

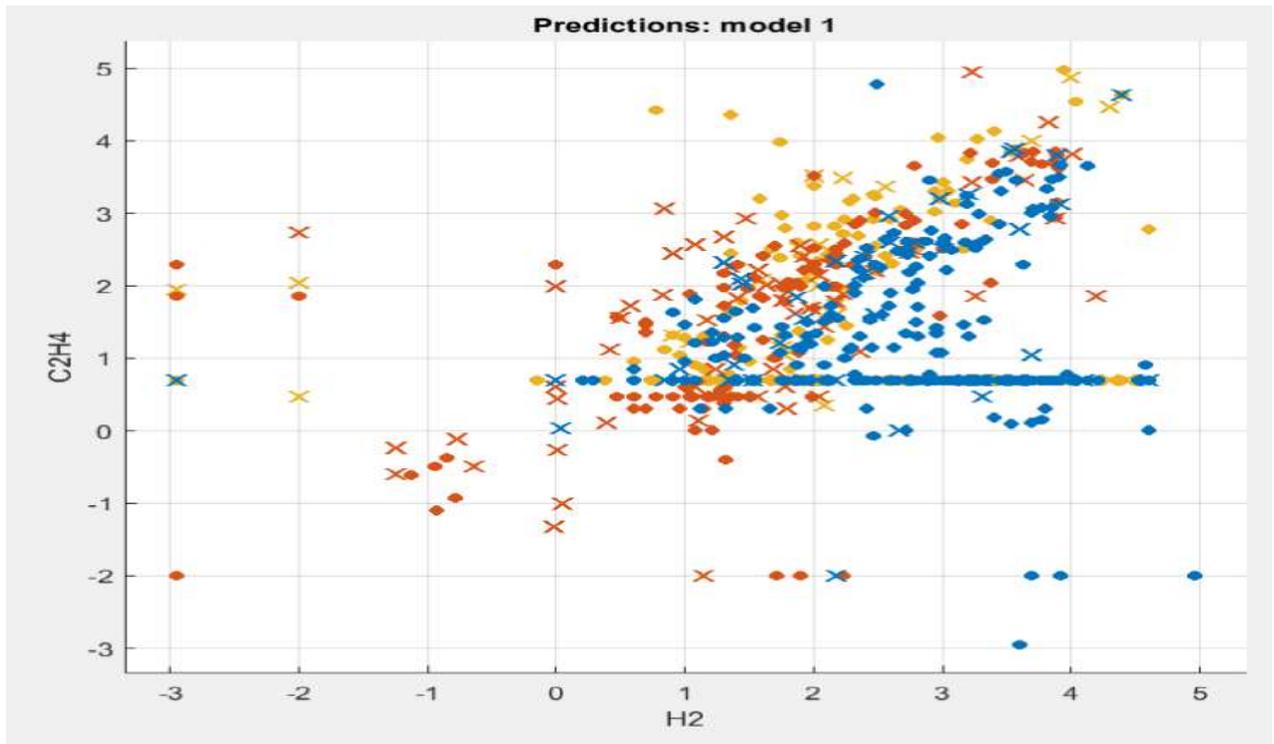


Figure 4.3 : Dispersion des données de détection de défaut après transformation (logarithme)

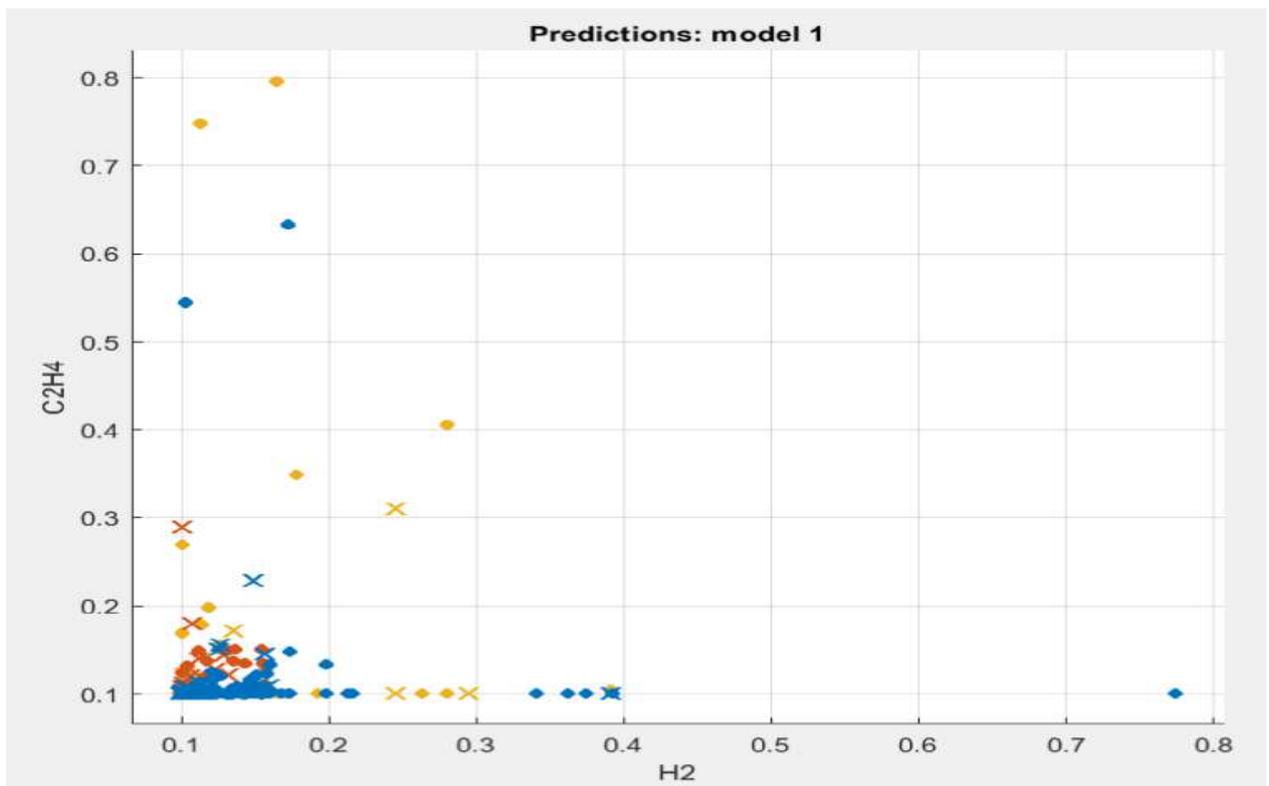
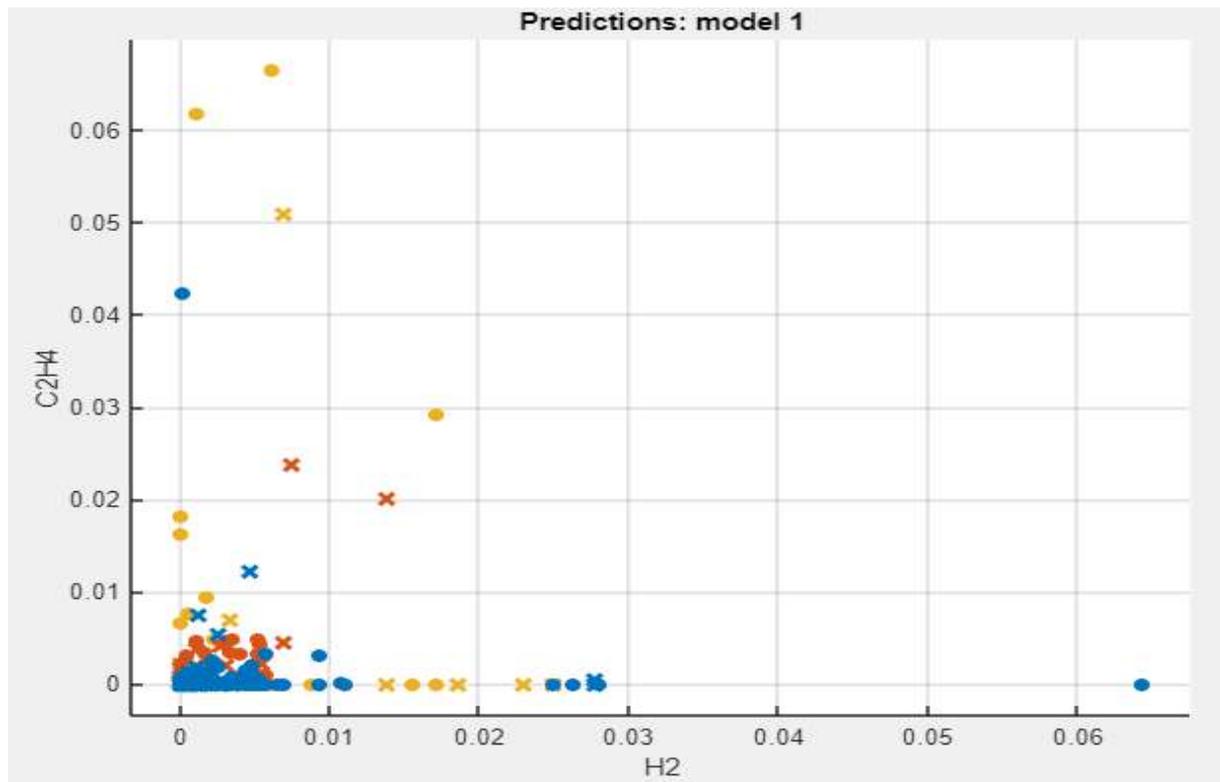


Figure 4.4 : Dispersion des données de détection de défaut après transformation (Max-Min)



Données en Pourcentage

Figure 4.5 : Dispersion des données de détection de défaut après transformation (Pourcentage).

D'après les figures 4.2 - 4.5, nous pouvons voir que les données brutes sont parfois chevauchantes, superposées et condensées dans des espaces très limités comparés avec ses valeurs très étendues, ce qui rend difficile la visualisation et l'analyse. L'application des techniques de transformation aide à distinguer clairement entre les classes différentes à l'œil nu et permet aussi d'observer l'axe ou la direction de dispersion de chaque classe dans le diagramme de dispersion.

4.3.3 Algorithmes de classification

Nous avons plusieurs algorithmes de classification parmi lesquels nous pouvons choisir. Par conséquent, une mauvaise décision peut être prise si un classificateur inapproprié est sélectionné. Comme la présente étude ne se focalise pas sur une seule approche, mais sur une étude comparative de nombreux algorithmes d'apprentissage automatique, cinq algorithmes (kNN, SVM, réseau de neurones, ensemble et Naive Bayes) ont été sélectionnés.

Voici les définitions des méthodes de classification et d'apprentissage machine : kNN, SVM, réseaux de neurones, méthodes d'ensemble, et Naive Bayes :

a. K-Nearest Neighbors (kNN)

Le k-Nearest Neighbors est une méthode d'apprentissage supervisé utilisée pour la classification. Elle classe une observation en fonction des classes des k observations les plus proches dans l'espace des caractéristiques.

Utilise des métriques de distance (comme la distance euclidienne) pour trouver les voisins les plus proches.

- **Étapes :**

1. Calculer la distance entre l'observation à classer et toutes les observations du jeu de données d'entraînement.

2. Identifier les k plus proches voisins.

3. Attribuer la classe la plus fréquente parmi ces voisins (ou moyenne des valeurs pour la régression).

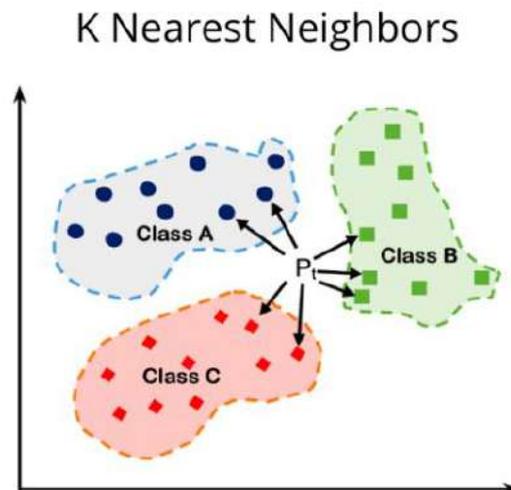


Figure 4. 6 : K-Nearest Neighbors

b. Support Vector Machine (SVM)

La Support Vector Machine est une méthode d'apprentissage supervisé utilisée pour la classification. Elle trouve l'hyperplan qui maximise la marge de séparation entre les différentes classes dans l'espace des caractéristiques.

- **Caractéristiques :**

- Hyperplan : Surface de décision qui sépare les classes

- Marges maximales: Distance maximale entre l'hyperplan et les points de données les plus proches de chaque classe (appelés vecteurs de support).

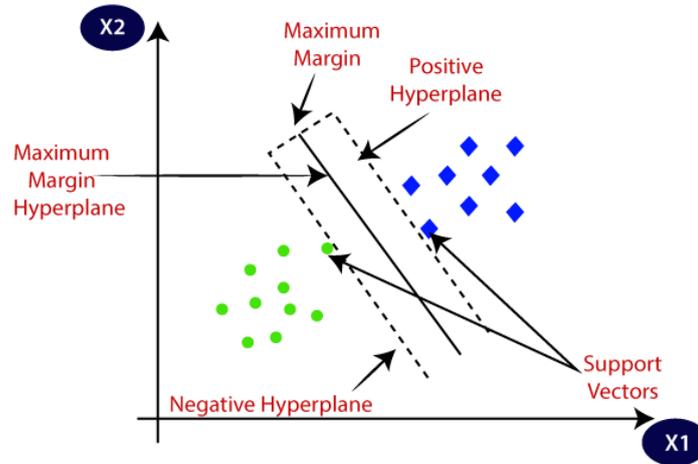


Figure 4.7 : Support Vector Machine

c. Réseaux de Neurones

Les réseaux de neurones sont des modèles d'apprentissage inspirés du fonctionnement des neurones biologiques. Ils sont composés de couches de neurones artificiels (unités) connectés entre eux. Les réseaux de neurones sont utilisés pour des tâches de classification, régression, reconnaissance de motifs, etc.

Caractéristiques :

- Couches : Une couche d'entrée, une ou plusieurs couches cachées, et une couche de sortie.
- Poids et biais : Les connexions entre les neurones sont associées à des poids et chaque neurone a un biais.
- Fonctions d'activation : Appliquées à la sortie de chaque neurone pour introduire la non-linéarité (ReLU, sigmoid, tanh).

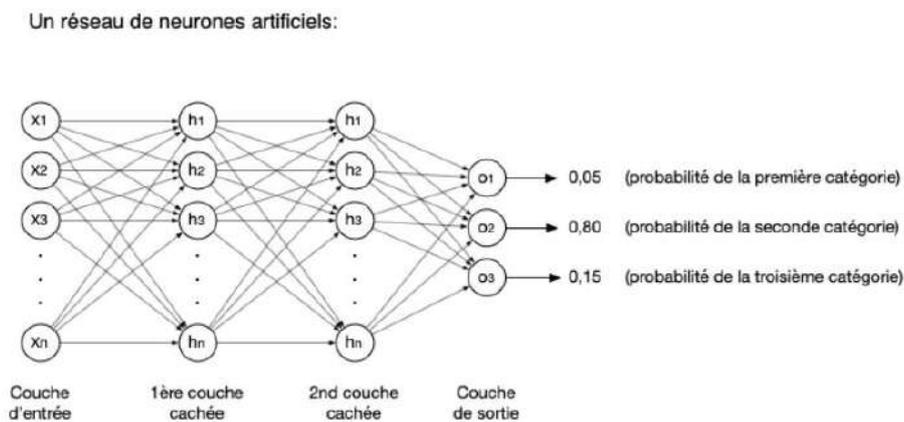


Figure 4.8 : Réseaux de Neurones

d. Naïve Bayes

Naïve Bayes est une méthode d'apprentissage supervisé basée sur le théorème de Bayes. Elle suppose l'indépendance des caractéristiques conditionnellement à la classe. Elle calcule la probabilité d'appartenance à chaque classe et choisit la classe avec la probabilité maximale.

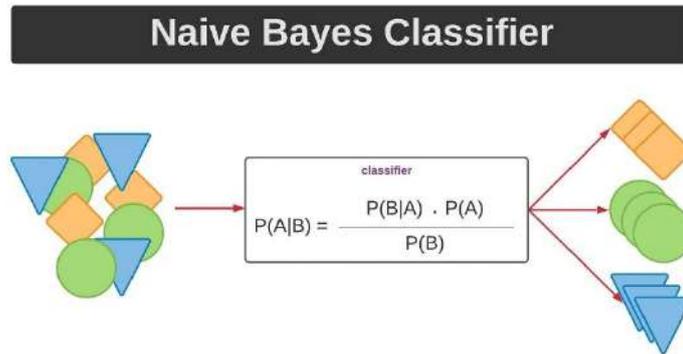


Figure 4.9 : Naïve Bayes

e. Méthode "ensemble trees"

La méthode "ensemble trees" dans MATLAB est une technique d'intelligence artificielle utilisée pour la classification et la régression. Elle repose sur l'idée d'utiliser plusieurs modèles (arbres de décision) pour obtenir des prédictions plus robustes et précises que celles obtenues par un seul modèle.

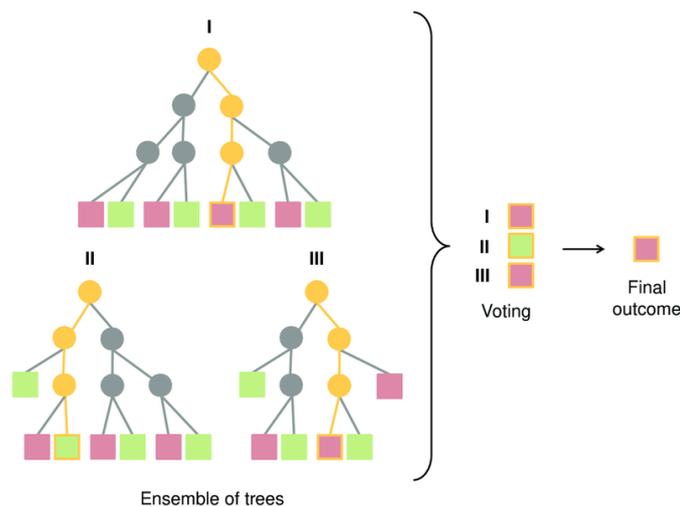


Figure 4.10 : Méthode "ensemble trees"

f. Bagging

Le bagging est une méthode d'agrégation qui améliore la stabilité et la précision des modèles d'apprentissage machine. Elle fonctionne en entraînant plusieurs modèles de manière

indépendante sur des sous-échantillons aléatoires du jeu de données d'origine et en combinant leurs prédictions.

g. Boosting

Le boosting est une méthode d'ensemble qui améliore la performance des modèles en les entraînant séquentiellement, chaque nouveau modèle tentant de corriger les erreurs des modèles précédents. Les observations mal classées sont pondérées plus fortement pour les modèles ultérieurs.

4.3.4 Critères de mesure de performances

Les mesures d'évaluation sont utilisées pour évaluer la performance des classificateurs. Deux estimateurs de performance ont été sélectionnés pour comparer les résultats expérimentaux. La sensibilité ou rappel est l'aire sous la courbe (ASC) ROC (Receiver Operating Characteristic). La précision indique le pourcentage de prédictions exactes sur le nombre total de prédictions - 50% impliquent une prédiction aléatoire et 100% impliquent une prédiction parfaite [39].

a) Aire sous la courbe (ASC)

L'Aire Sous la Courbe (ASC), souvent appelée AUC pour "Area Under the Curve" en anglais, est une métrique utilisée pour évaluer la performance des modèles de classification binaire. Plus spécifiquement, elle mesure la surface sous la courbe ROC (Receiver Operating Characteristic), qui trace le taux de vrais positifs contre le taux de faux positifs à différents seuils de classification. La valeur de l'ASC varie entre 0 et 1.

- Une ASC de 0,5 indique une performance aléatoire, comparable à celle d'un classificateur au hasard.
- Une ASC de 1 indique une performance parfaite, où le modèle classe correctement toutes les instances positives et négatives.
- Une ASC inférieure à 0,5 suggère que le modèle performe moins bien que le hasard.

L'ASC est particulièrement utile dans les situations où les classes sont déséquilibrées, car elle donne une évaluation globale de la performance du modèle sans être biaisée par un seuil de classification spécifique.

b) Précision

La précision est une métrique utilisée pour évaluer la performance des modèles de classification. Elle mesure la proportion des instances correctement identifiées comme positives parmi toutes celles prédites comme positives.

$$\text{Précision} = \frac{\text{Vrais Positifs (VP)}}{\text{Vrais Positifs (VP)} + \text{Faux Positifs (FP)}}$$

- Vrais Positifs (VP) : Nombre d'instances positives correctement classées par le modèle.
- Faux Positifs (FP) : Nombre d'instances négatives incorrectement classées comme positives par le modèle.
- La précision varie entre 0 et 1.
- Une précision de 1 (ou 100%) signifie que toutes les prédictions positives sont correctes.

4.4 Expériences et discussion des résultats

Dans cette partie, cinq algorithmes d'apprentissage automatique, à savoir le k-plus proche voisin, le support vector machine, le réseau bayésien, la méthode ensembliste et neural network, sous leur forme de base ou améliorée vont être testés pour un ensemble de données de 710 échantillons.

Le tableau 4.2 affiche la précision (Préc) et l'aire sous la courbe ROC (ASC) en utilisant la méthode de validation croisée de 30 partitions pour chaque algorithme, mis en œuvre sur le logiciel MATLAB.

Les résultats du tableau 4.2 en ce qui concerne Acc et ASC sont résumés aux figures 4.11 et 4.12. La figure 4.11 montre la moyenne des performances pour chaque algorithme, et la figure 4.12 représente la moyenne des performances pour chaque méthode de prétraitement.

Tableau 4.2 : Performance des classificateurs pour la détection des défauts

Algorithme	Technique de prétraitement								
	Données brutes		Logarithmique (log)		Max-min		Pourcentages (%)		
	Préc(%)	ASC	Préc (%)	ASC	Préc (%)	ASC	Préc (%)	ASC	
K-NN	Base	76	0.82	80.2	0.81	79.1	0.90	78.4	0.90
	Boosté	78.7	0.92	81.5	0.87	80.5	0.91	80.5	0.91
	Baggé	74	0.78	80.4	0.81	81.3	0.90	80	0.91
SVM	Base	55.6	0.74	80.5	0.95	56.5	0.86	57.5	0.80
	Boosté	71.3	0.86	80.8	0.91	72.2	0.88	72.9	0.87
	Baggé	75.4	0.85	80.8	0.90	74.5	0.90	72.1	0.85
NN	Base	74.3	0.82	79.9	0.90	76	0.89	76.3	0.86
	Boosté	77.4	0.89	82.8	0.91	76.4	0.88	76.6	0.88
	Baggé	75.4	0.85	80.8	0.90	76.5	0.90	76.9	0.89
Ensemble	Base	83.5	0.94	82.2	0.91	85.7	0.94	82.2	0.92
	Boosté	85.5	0.95	84.2	0.94	86	0.95	85.2	0.95
	Baggé	79.7	0.87	85.8	0.95	85.7	0.90	84.1	0.95
NB	Base	52.4	0.71	61.7	0.77	53.5	0.73	54.9	0.74
	Boosté	55.6	0.79	61.7	0.77	57.1	0.79	59.9	0.79
	Baggé	56.4	0.80	63.5	0.82	54.6	0.75	60	0.80

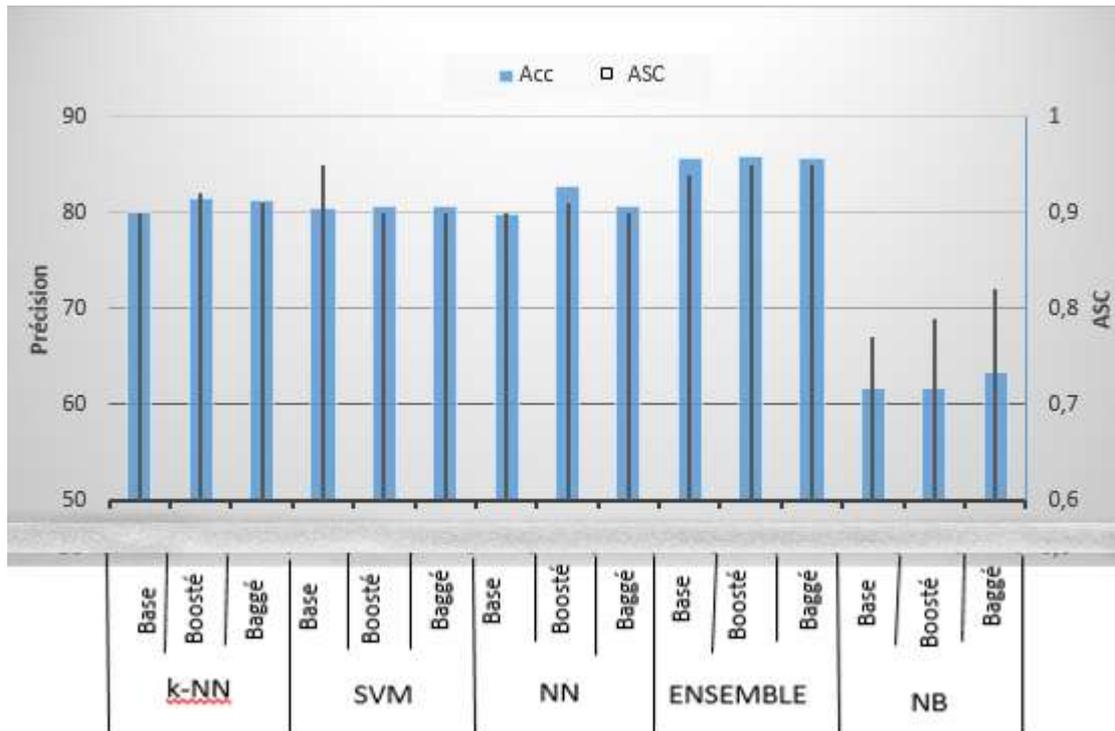


Figure 4.11 : Précision et ASC moyenne de différents modèles pour la détection de défauts par rapport à chaque algorithme de classification.

Selon la figure 4.11 et le tableau 4.2, l'algorithme d'ensemble présente la plus grande fiabilité pour détecter les défauts en termes de précision et d'ASC, notamment lorsqu'il est boosté ou bagged. En termes de performance de précision, il est suivi par le réseau neuronal (NN) boosté, le k-plus proche voisin (k-NN), la machine à vecteurs de support (SVM) et l'algorithme Naïve Bayes (NB), ce dernier affichant un faible pourcentage de détection des défauts. De plus, il est évident que les méthodes d'ensemble comme le Boosting ou le Bagging surpassent les versions de base des algorithmes. On remarque également une augmentation de la précision dans presque tous les cas lorsque l'approche de Bagging est utilisée.

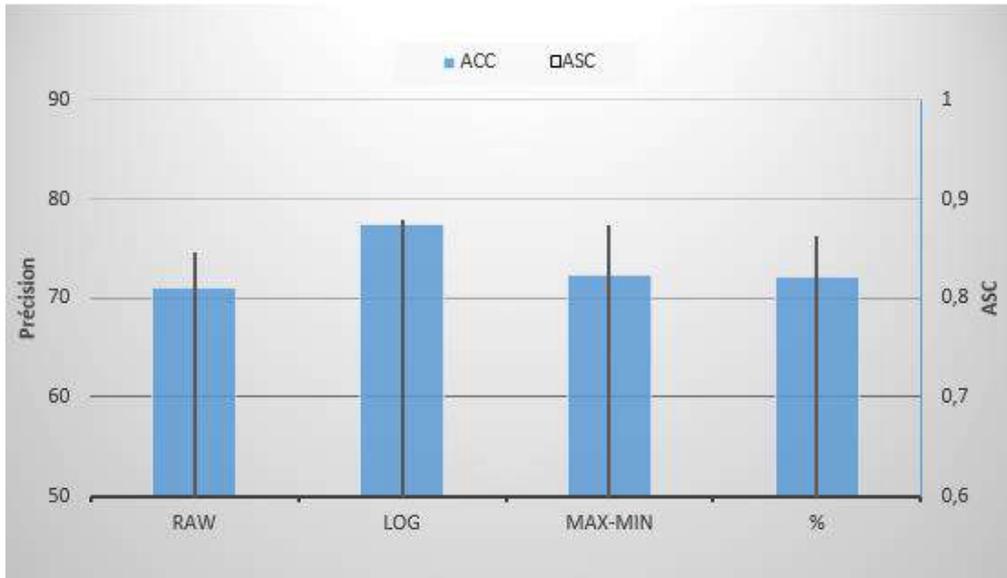


Figure 4.12 : Précision et ASC moyenne de différents modèles pour la détection des défauts par rapport à chaque technique de prétraitement des données.

En ce qui concerne les méthodes de prétraitement des données, la figure 4.12 montre que la transformation logarithmique est la plus efficace en termes de précision et d'ASC. En revanche, lorsque les données sont normalisées à l'aide de l'échelle Max-min, les modèles produisent généralement des résultats insatisfaisants. De plus, l'utilisation des données sous forme de pourcentage n'a aucun impact sur la performance des classificateurs par rapport aux données brutes.

Pour les algorithmes, le tableau 4.2 révèle que la méthode ensembliste boosté, baggé et le kNN baggé donnent de meilleures performances en termes de précision (86%, 85.8% et 81.3%) et d'ASC (0.95, 0.95 et 0.90) que le réseau Bayésien de base, SVM de base avec des données en pourcentage et le NN de base avec des données brutes et Max-min. Pour mieux évaluer les performances d'un algorithme, il est nécessaire de considérer plusieurs paramètres, tels que la précision et l'ASC, afin d'évaluer efficacement son efficacité. En effet, des valeurs élevées de précision ne signifient pas nécessairement que cet algorithme donne de bons résultats dans tous les cas, et il en va de même pour l'ASC. Ce problème apparaît particulièrement lorsque les classes de l'ensemble de données sont déséquilibrées (de 710, 494 sont défectueuses et 216 sont en bon état « 276 Electrique, 218 Thermique, 216 Normal »), donc un autre estimateur de performance tel que la valeur AUC est requise.

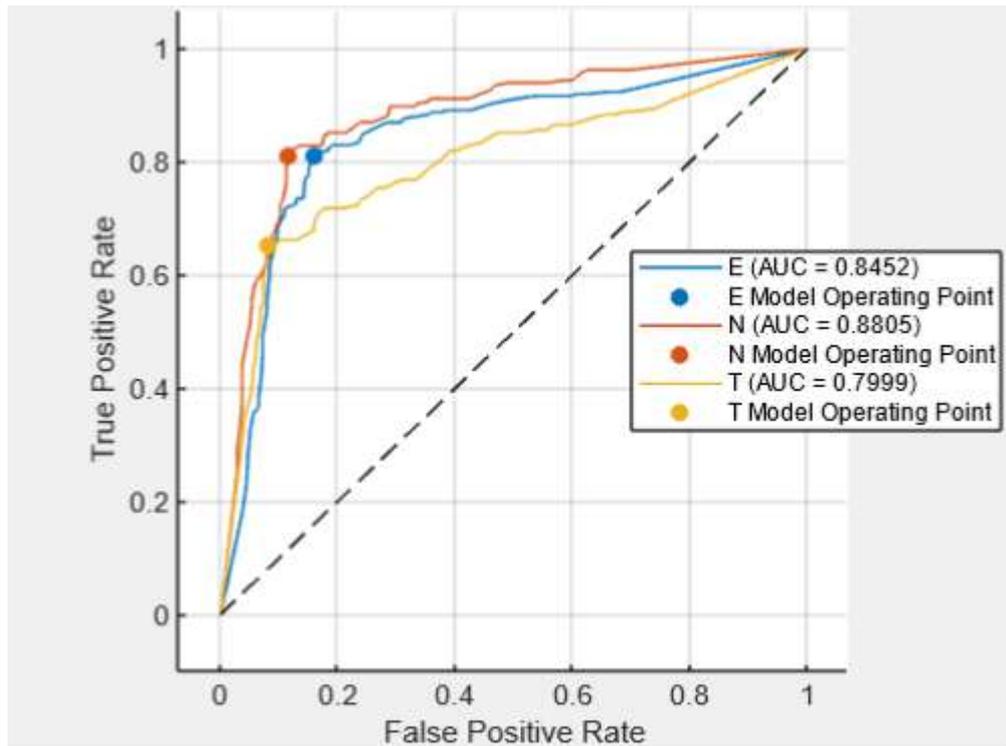


Figure 4.13 : courbe montrant les valeurs AUC des défauts.

4.4.1 Validations des Résultat

- **Ensemble (bagged trees)**

Après optimisation du modèle Ensemble (bagged trees), nous utilisons 31 jeux de données supplémentaires (figure 4.14) comprenant différents types de défauts de transformateur pour évaluer davantage ses performances. Avant d'être considéré comme prêt à l'emploi, le modèle d'interprétation doit atteindre une précision d'au moins 80 % dans la classification des différents types de défauts de transformateur. Si cette exigence n'est pas remplie, le modèle est ajusté et le processus d'apprentissage est répété jusqu'à ce que la précision de la prédiction atteigne 80 %. Le modèle proposé parvient à classer correctement les 31 cas de transformateur, la méthode se caractérise par sa fiabilité en termes de détection de défauts, en termes de précision globale et de macro-moyenne. Le modèle développé a atteint une précision de 100% dans la classification des types de défauts de transformateur.

Pour clarifier la forme et la répartition des données utilisées, la figure (Figure 4.14) résume l'histogramme.

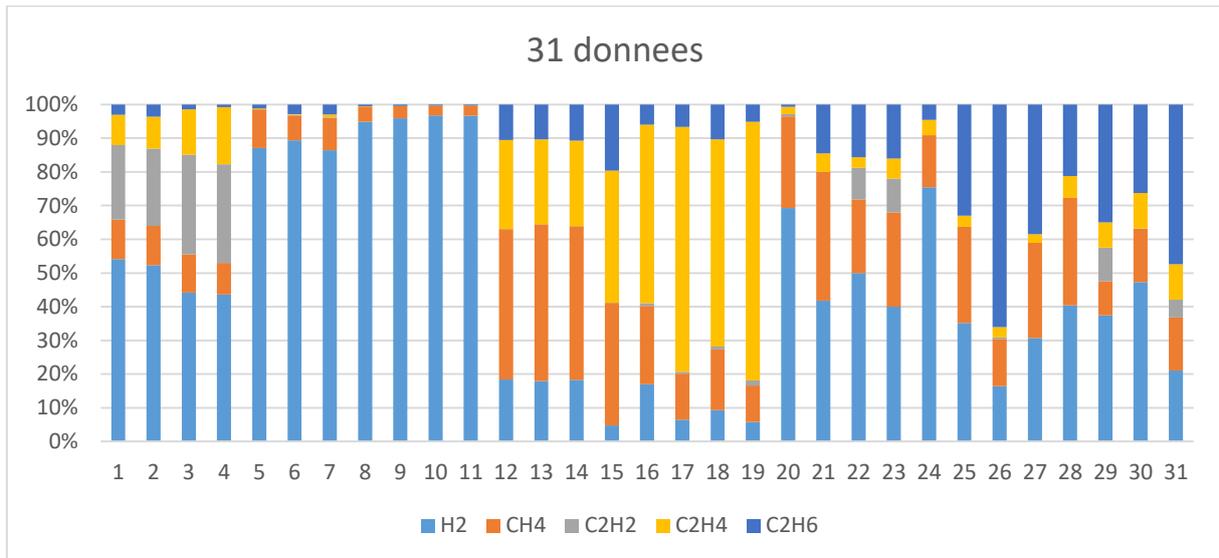


Figure 4.14 : histogramme des 31 données brutes.

Tableau 4.3 : Résultats de validation du modèle ensemble

	E (prédit)	N (prédit)	T (prédit)
E (réel)	11	0	0
N (réel)	0	12	0
T (réel)	0	0	8

4.5 MATLAB App Designer

4.5.1 Définition de «MATLAB App Designer »

Le concepteur d'applications vous permet de créer des applications de qualité professionnelle sans avoir besoin d'un développeur de logiciels. En utilisant la fonctionnalité de glisser-déposer des composants visuels dans le canevas pour concevoir le design, il offre une interface graphique utilisateur (GUI) intuitive et un éditeur intégré pour programmer rapidement le comportement des applications. Partagez vos applications spécifiques à l'utilisateur via MATLAB Drive™ ou créez des applications autonomes pour le web ou le bureau avec MATLAB Compiler™ et Simulink Compiler™. [33]

Nous utilisons la version R2021b et nous allons présenter l'interface utilisateur de cette version, ainsi que certains raccourcis disponibles dans le programme, illustrés dans les figures (Figure 4.15), (Figure 4.16), (Figure 4.17), (Figure 4.18) et (Figure 4.19).

La figure 4.15 représenté l’interface première de plateforme Matlab R 2021b.

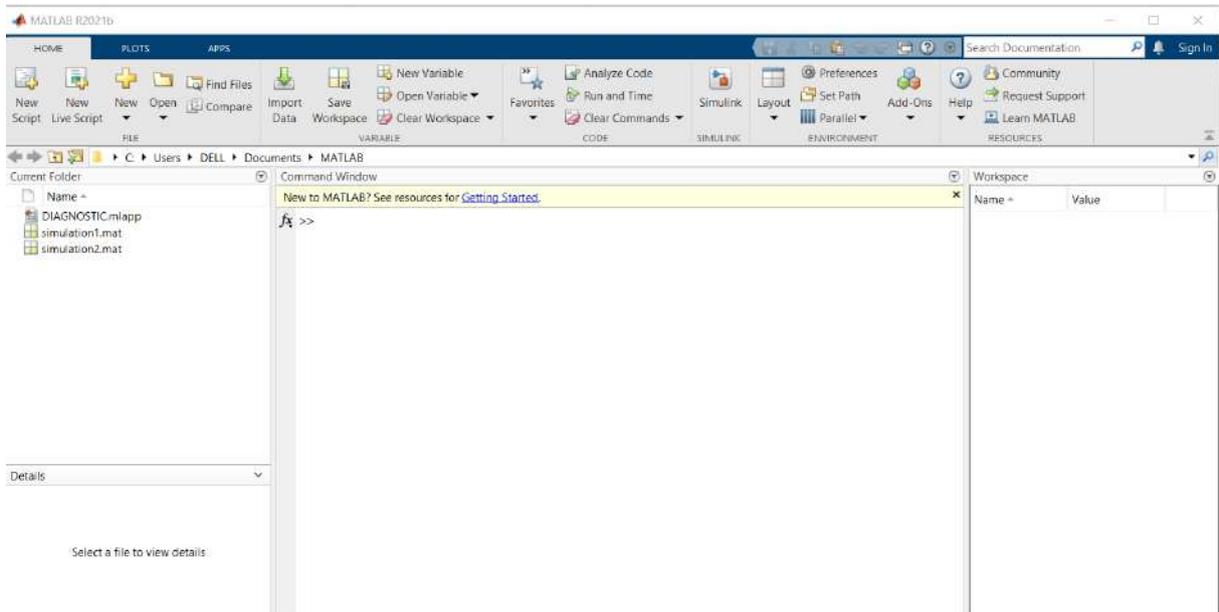


Figure 4. 15 : Interface utilisateur de MATLAB V : R2021b.

La Figure 4.16 représenté l’espace de travail ou l’interface de Matlab App designer. Cette interface contient des modèles prêts à l'utilisation ainsi qu'un espace vide pour les nouveaux travaux.

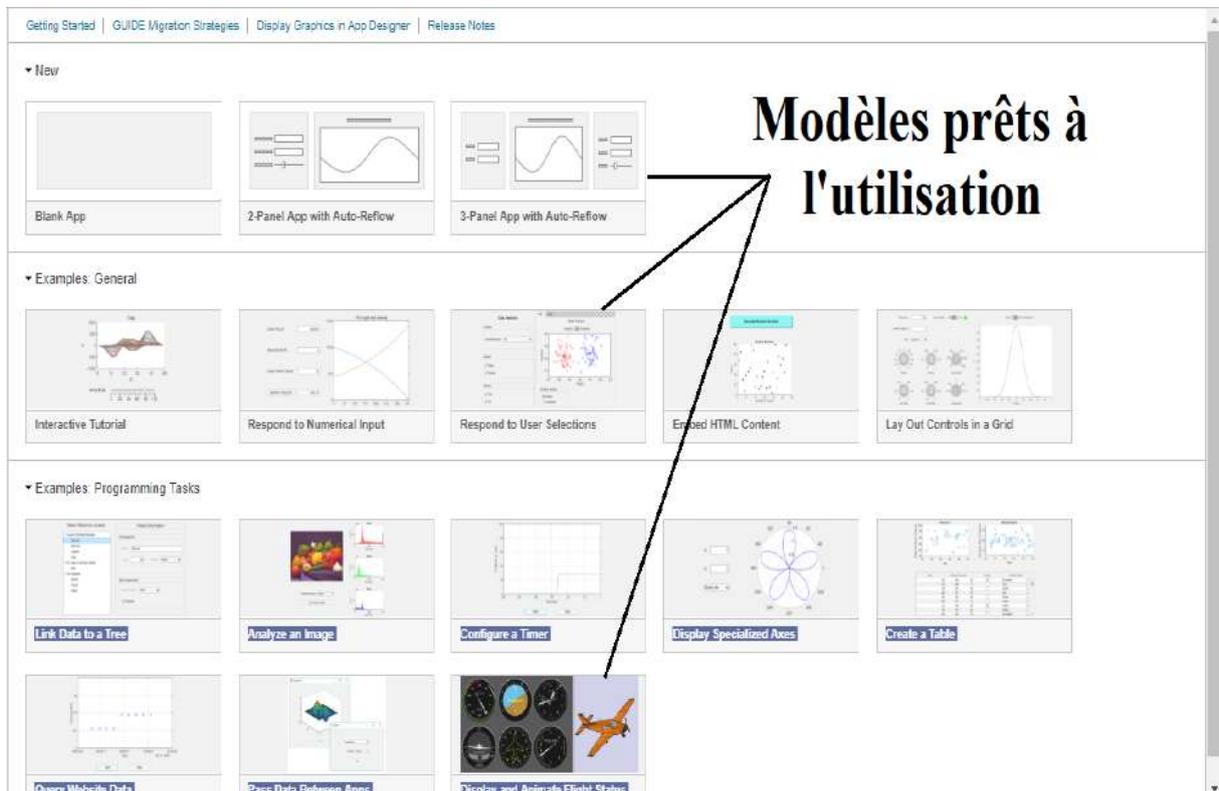


Figure 4.16 : Interface utilisateur de MATLAB App Designer.

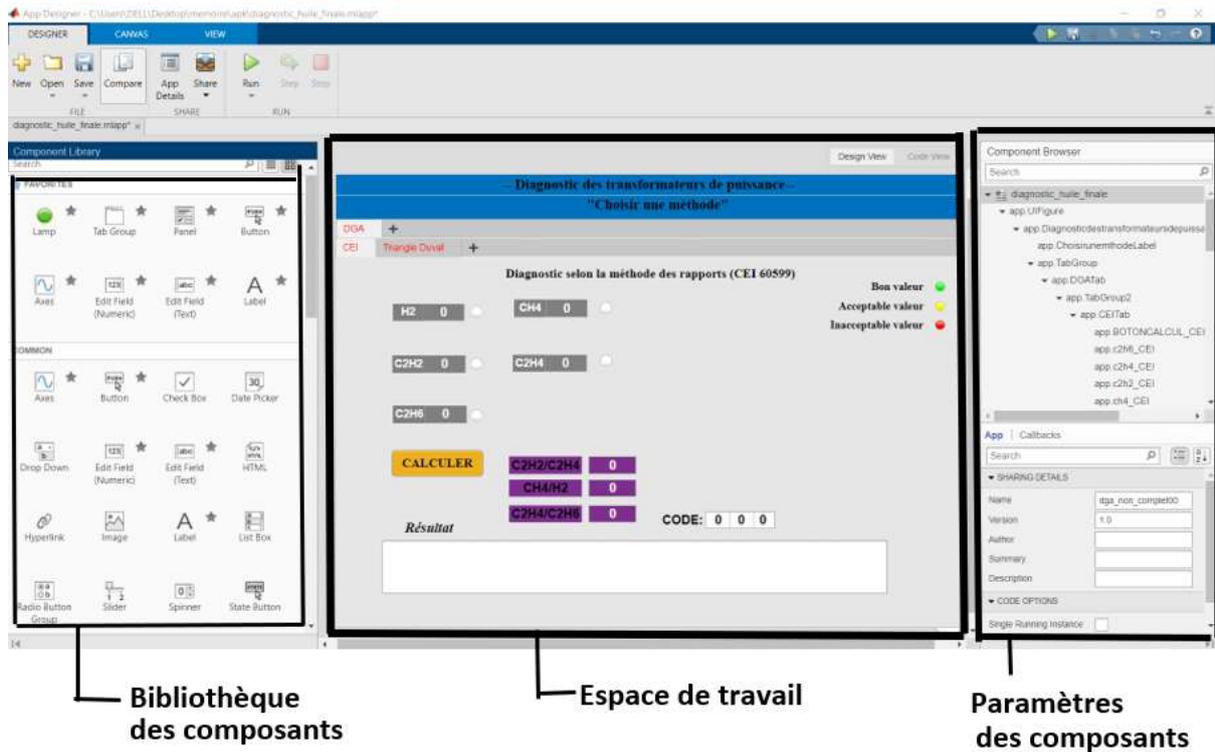


Figure 4.17 : Comment utiliser le MATLAB App designer

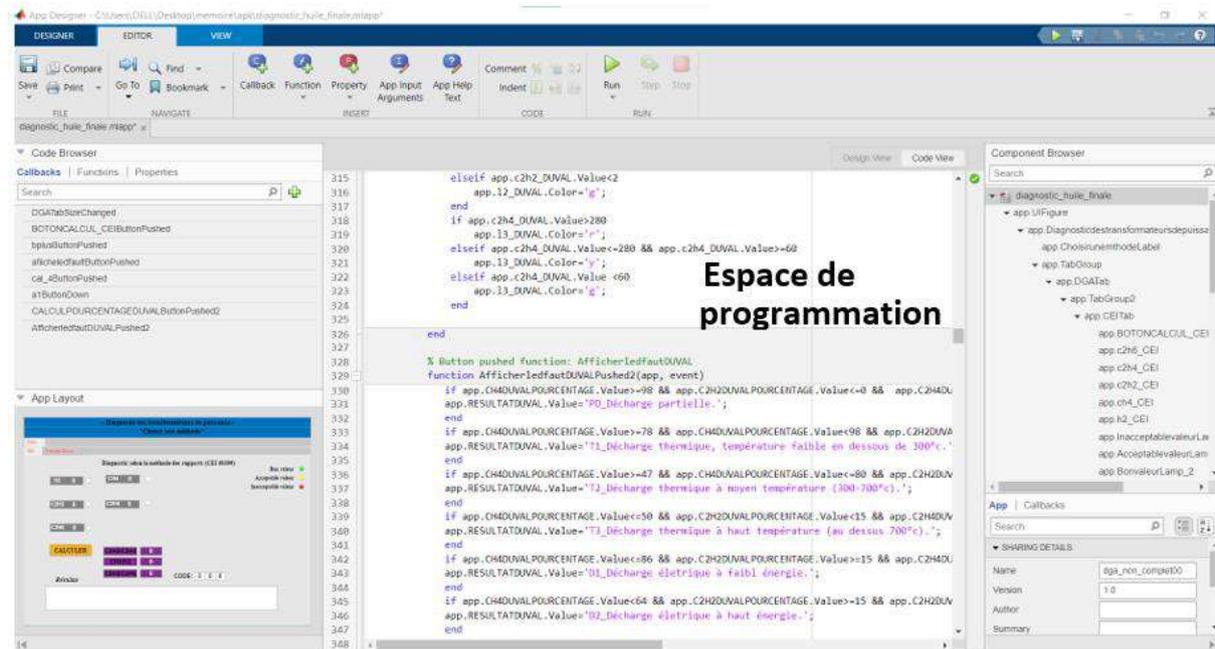


Figure 4.18 : Espace de programmation.

Une fois la conception et la programmation de l'application terminées, celle-ci est exportée pour fonctionner sans avoir besoin de Matlab.

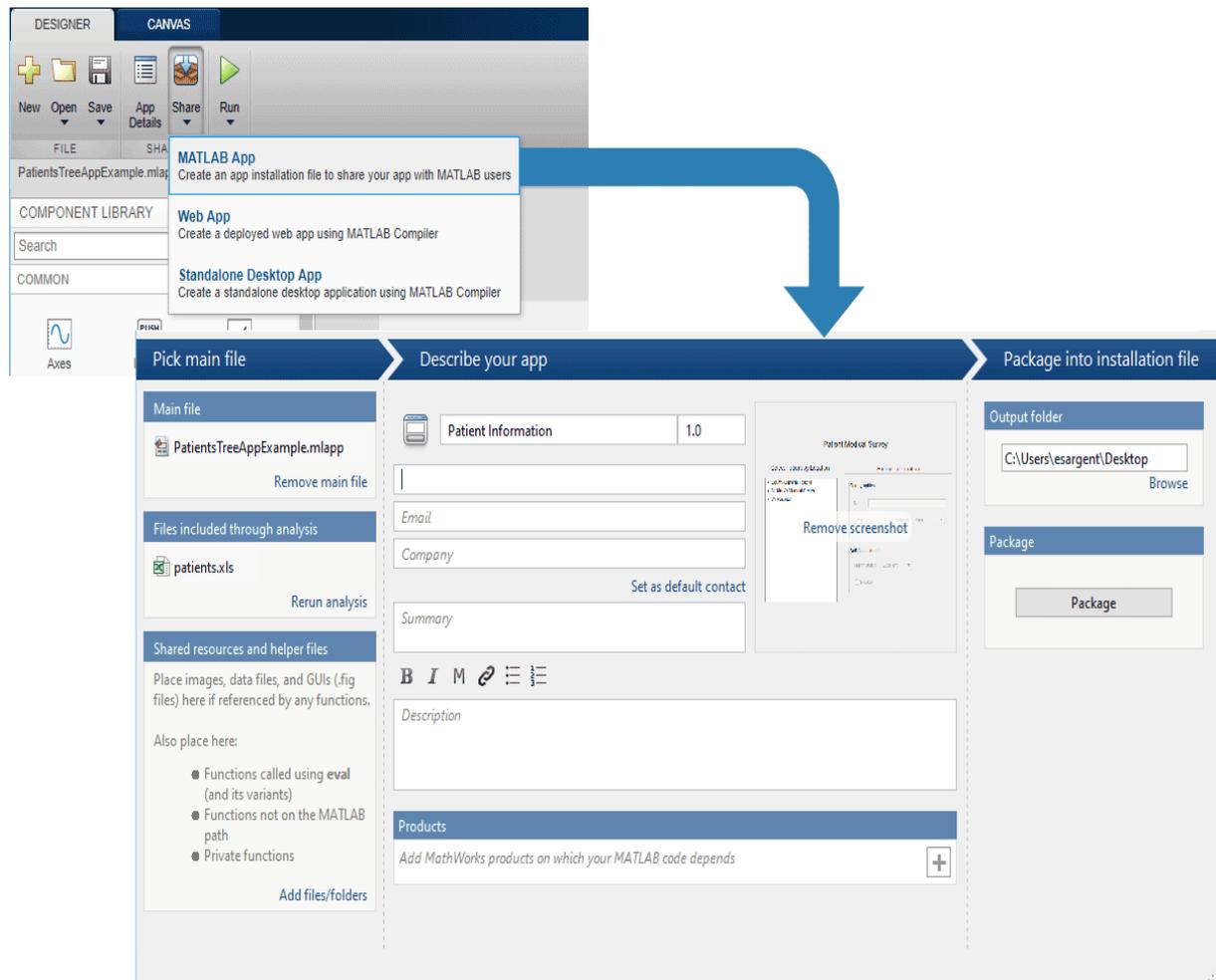


Figure 4.19 : Créer une application packagée à partager avec d'autres utilisateurs.

4.5.2 En termes de méthodes de diagnostic

Pour diagnostiquer l'état de l'huile de transformateur, nous avons utilisé des méthodes de diagnostic basées sur des normes internationales, à savoir CEI, le triangle de Duval et elles sont toutes basées sur l'analyse du gaz dissous.

4.5.2.1 Diagnostic par CEI

Pour le processus de diagnostic par la norme CEI_60599, nous avons besoin de cinq gaz (H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6), puis nous calculons les proportions suivantes : C_2H_2/C_2H_4 , CH_4/H_2 et C_2H_4/C_2H_6 . Ensuite, nous classons le résultat selon les tableaux (4.4 et 4.5) suivants par les équations conditionnelles (If, Elseif, else) [33] :

Tableau 4.4 : Codes des rapports de gaz relatifs à la méthode.

Les intervalles pour les codes	Les rapports des gaz Caractéristiques de Défaut		
	$\frac{C2H2}{C2H4}$	$\frac{CH4}{H2}$	$\frac{C2H2}{C2H6}$
<0.1	0	1	0
0.1-1	1	0	0
1-3	1	2	1
>3	2	2	2

Tableau 4.5 : Types de défauts relatifs à la méthode.

N°	Type défaut			
1	Pas de défaut.	0	0	0
2	DP avec faible énergie.	0	1	0
3	DP avec grande énergie.	1	1	0
4	Décharge électrique avec faible énergie.	1 ou 2	0	1 ou 2
5	Décharge électrique avec grande énergie.	1	0	2
6	Surchauffement avec température <150°.	0	0	1
7	Surchauffement avec température 150°<T<300°.	0	2	0
8	Surchauffement avec température 300°<T<700°.	0	2	1
9	Surchauffement avec température T>700°.	0	2	2

➤ Par exemple, en trouve les données d'analyse des gaz dissous suivantes :

H2	CH4	C2H2	C2H4	C2H6
90	28	32	31	8

Après avoir essayé les données dans l'application, nous obtenons ce résultat (Figure 4.20) :

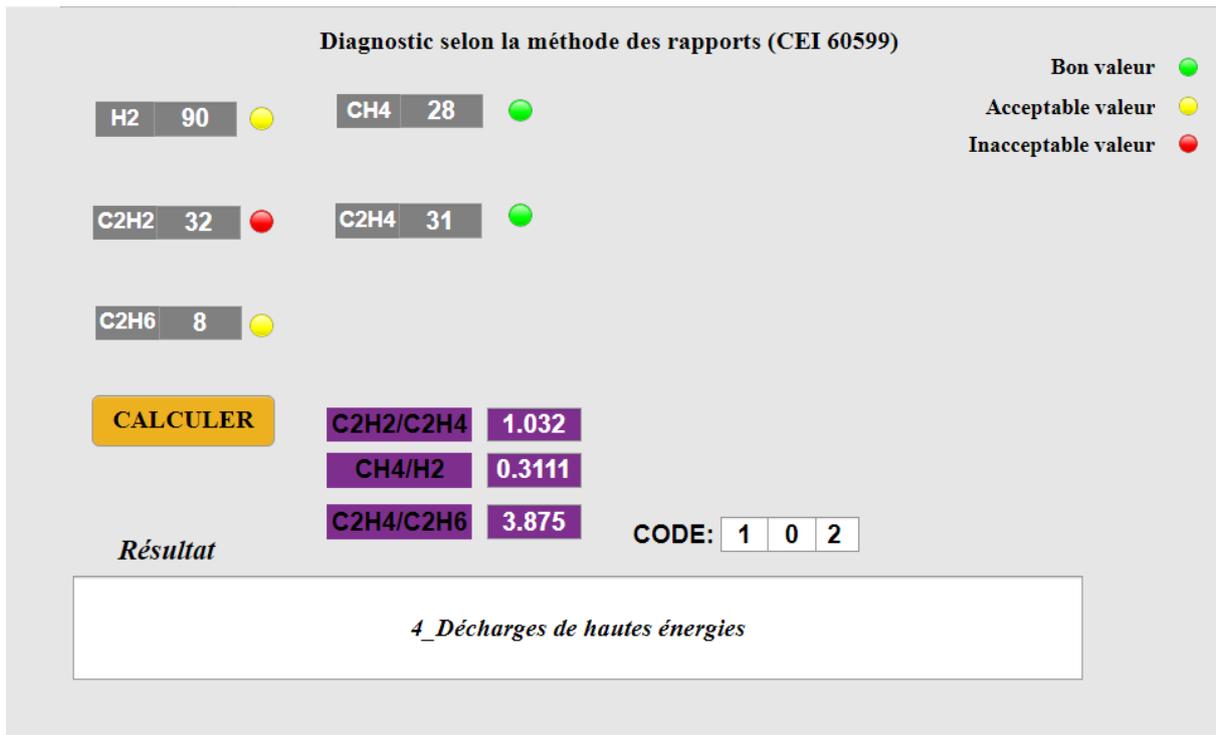


Figure 4.20 : Diagnostic par la méthode CEI.

4.5.2.2 Diagnostic par le triangle Duval

Pour le processus de diagnostic par triangle du Duval, nous avons besoin de trois gaz (CH₄, C₂H₂, C₂H₄), puis nous calculons le pourcentage de chaque gaz et nous l'appliquons au triangle. En écrivant des équations pour convertir le mouvement de trois axes (CH₄%, C₂H₄% et C₂H₂%) en deux axes X et Y avec des équations conditionnelles (If, Elseif, Else). [33]

- Par exemple, en trouve les données d'analyse des gaz dissous suivantes :

CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
28	31	32

Après avoir essayé les données dans l'application, nous obtenons ce résultat (Figure 4.21) :

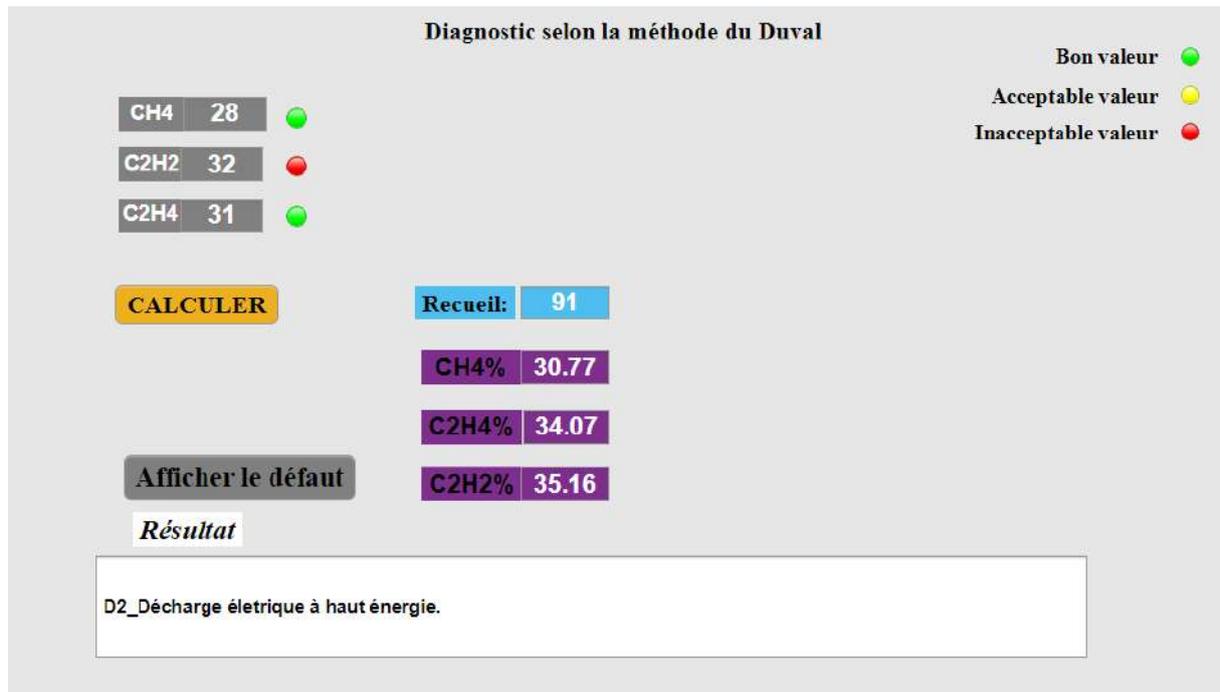


Figure 4.21 : Diagnostic selon la méthode de Duval.

4.6 Conclusion

Le quatrième chapitre de cette étude se concentre sur l'utilisation de MATLAB pour le diagnostic de l'état de l'huile de transformateur à travers des techniques de simulation de données. MATLAB, un outil puissant pour le calcul numérique et la programmation, a été utilisé pour analyser les données d'analyse des gaz dissous (AGD) provenant de différents transformateurs de puissance.

Dans ce chapitre, MATLAB a été exploité pour traiter et analyser un ensemble de données comprenant 710 cas de gaz dissous, en se concentrant sur la détection et le diagnostic des défauts dans les transformateurs de puissance.

Le prétraitement des données est crucial pour garantir des analyses précises. Les techniques de transformation des données, telles que la conversion logarithmique et la normalisation, ont été utilisées pour améliorer la qualité des données et faciliter leur interprétation.

Cinq algorithmes de classification (kNN, SVM, réseau de neurones, méthodes ensemblistes et Naive Bayes) ont été comparés pour leur efficacité à diagnostiquer les défauts des transformateurs. Les résultats montrent que les méthodes ensemblistes, particulièrement

lorsqu'elles sont boostées ou baggées, offrent les meilleures performances en termes de précision et d'aire sous la courbe ROC (ASC).

Les résultats indiquent que les transformations logarithmiques des données améliorent significativement la performance des algorithmes. De plus, les méthodes ensemblistes surpassent les autres algorithmes, démontrant leur robustesse et leur fiabilité pour ce type d'analyse.

Le chapitre se termine par une présentation de MATLAB App Designer, un outil permettant de créer des applications interactives pour le diagnostic de l'état de l'huile de transformateur. Des exemples d'interfaces utilisateur et de résultats de diagnostic selon les méthodes CEI et le triangle de Duval sont également présentés, illustrant l'applicabilité pratique de MATLAB pour ces tâches.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le transformateur de puissance est un élément essentiel dans les réseaux de transport et de distribution d'énergie électrique. Son fonctionnement sûr et efficace repose sur une évaluation précise et régulière de son état. Parmi les diverses techniques disponibles, l'analyse de l'huile isolante se distingue par sa simplicité et son efficacité. Cette méthode ne nécessite qu'un simple prélèvement sans interruption du service et offre des informations précieuses sur les conditions internes du transformateur, révélant des dysfonctionnements thermiques, électriques ou combinés.

Les transformateurs remplis d'huile sont exposés à des contraintes électriques et thermiques qui peuvent dégrader les matériaux isolants, entraînant la libération de produits de décomposition gazeux. L'analyse des gaz dissous dans l'huile (AGD) est une technique avancée qui permet d'identifier et de localiser ces défauts en mesurant les types et les quantités de gaz dissous. Cependant, pour qu'un diagnostic par AGD soit fiable, les gaz mesurés doivent refléter précisément l'état réel du transformateur et leur interprétation doit être correcte.

Ce travail s'inscrit dans ce contexte, visant à améliorer l'interprétation des résultats de l'AGD soit par les techniques d'intelligence artificielle, soit par des méthodes traditionnelles basées sur des critères universels tels que : le triangle de Duval, CEI.

Ces méthodes permettent de diagnostiquer l'état de l'adaptateur secteur lorsqu'il est en service sans perturber le réseau électrique, et sans exposer l'expert au risque d'électrocution, ni provoquer des défauts supplémentaires, en plus de profiter également du temps et du coût de diagnostic.

Il y a des points clés qui ont été atteints grâce à cette recherche et sont les suivants :

Les méthodes basées sur l'intelligence artificielle enregistrent une supériorité notable sur Méthodes traditionnelles.

L'apprentissage automatique des algorithmes est influencé par la quantité de données, leur ordre, les différences de classification et la convergence des états de classification (leur similitude).

Les algorithmes basés sur l'apprentissage automatique varient en pourcentage d'apprentissage et en précision pour prédire correctement l'état de l'huile. Par exemple : l'algorithme des

Conclusion générale

ensembles a obtenu de bons résultats en termes de précision de prédiction par rapport à d'autres algorithmes.

La recherche dans l'intégration de l'intelligence artificielle pour l'évaluation de l'état des équipements électriques offre de nombreuses perspectives prometteuses. Voici quelques recommandations pour des travaux futurs :

- Classer la qualité des huiles de transformateurs en appliquant l'apprentissage automatique aux analyses physico-chimiques traditionnelles et aux données modernes comme la spectrophotométrie UV/Visible et la turbidité, en comparant ces techniques en termes de performance.

En conclusion, l'intégration de l'intelligence artificielle dans le diagnostic des transformateurs de puissance permet d'améliorer considérablement la fiabilité et l'efficacité des évaluations, offrant des perspectives de recherche et d'application étendues pour l'avenir.

BIBLIOGRAPHIE

BIBLIOGRAPHIE

- [1] : Les infrastructures réseau d'électricités, creos-Luxembourg, site web : (jobs.encevo.eu) consulte 20/02/2024.
- [2] : W. H. Bartley. « Analysis of Transformer Failures » (article, 05 octobre 2012).
- [3]: BOURGEOIS.A, mémoire « Etude du phénomène d'électrification par écoulement sur les cartons des transformateurs de puissance», Institut national polytechnique de Grenoble, Février 2007.
- [4] : R. P. Bouchard, G. Olivier, «Électrotechnique », Presses internationales Polytechnique, 1999.
- [5] : A. SCHENK, « Surveillance continu des transformateurs de puissance par réseau de neurone », Thèse de Doctorat de l'Ecole Polytechnique Fédéral de Lausanne 2001.
- [6] : MEZIANI Madjid_ingénieur d'état en électrotechnique « contribution à la modélisation analytico-numérique des transformateur de puissance », mémoire magister, 18/12/2011.consulte 23/022024 (site web : dspace.ummtto.dz)
- [7] : IVANOV.S, « Machines électriques », volume II, Edition Mir Moscou, 1980.consulté le 28/02/2024 (site web : mirtitle.org).
- [8] : MERLET.R, « Technologie d'électricité générale et professionnelle », édition Dunod paris, 1969. Consulté 05/03/2024 (site web : ulyse.univ-lorraine.fr)
- [9]: MARTIN.J,HEATHCOTE,C ENG,FIEEEE, «The J and P Transformer book ,A Partial Technology of Power transformer», Twelfth edition Newnes,1998.

[10]: LEFEVRE.A, «Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs », thèse de mémoire Ecole Polytechnique de Nantes, 2006.

[11] : Anthony Lefèvre « Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs applications l'étude de l'échauffement sur charges non linéaire » Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes Année 2006.

[12]: MUFIDZADA N.A, OTMANE-CHRIF T, « Etude de l'influence du Noyau sur les Surtensions Impulsionnelles dans les Enroulements du Transformateur », mémoire, page1-23, 2009.

[13]: T. Noda, H. Nakamoto, S.Yokoyama, "Accurate Modeling of Core-Type Distribution Transformers for Electromagnetic Transient Studies", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 17, No. 4, October 2002.

[14:] A. Halonet, Université de Lyon, Eau, Claire, Aramid Fibers, année 2001. Consulté le 07/03/2024 (site web : theses.hal.science)

[15]: J. S. N'CHO, « Développement de nouvelles méthodes de diagnostic et de régénération des huiles pour transformateurs de puissance », thèse de mémoire de Ecole Centrale de Lyon, 2011.

[16]: C. Perrier, « Etude des huiles et des mélanges à base d'huile minérale pour les transformateurs de puissance », Ecole Centrale de Lyon, 2005.

[17]: A. Darwin, C. Perrier, and P. Folliot, «The use of natural ester fluids in transformers», Proceedings of MATPOST conference, Lyon (France), Paper 0036, November 15-16, 2007.

[18]: Jean SANCHEZ, Spécialité : « aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance », thèse de doctorat Grenoble -France, 21 juin 2011.

[19] : S. Alain, "Surveillance continue des transformateurs de puissance par réseaux de neurones auto-organisés," Thèse de doctorat, Faculté des sciences et

techniques de l'ingénieur, École polytechnique fédérale de Lausanne Lausanne, Suisse, 2001.

[20] : D. Shiba, Etude du vieillissement de l'isolation papier-huile dans les transformateurs de puissance. Influence des inhibiteurs d'oxydation, livre 1995.

[21] : J. Unsworth and F. Mitchell, "Degradation of electrical insulating paper monitored with high performance liquid chromatography," Electrical Insulation, IEEE Transactions on, vol. 25, no. 4, pp. 737-746, 1990.

[22]: Anthony Lefèvre « Contribution à la modélisation électrique, électromagnétique et thermique des transformateurs applications l'étude de l'échauffement sur charges non linéaire » Thèse de Doctorat de Université de Nantes Année 2006.

[23] : P. BOUCHARD et G. OLIVIER « Electrotechnique » Edition de l'école polytechnique de MONTREAL, 1995.

[24] : Senoussaoui Mohammed El Amine ; THESE DOCTORA EN ELECTROTECHNIQUE « Contributions des techniques intelligentes au diagnostic industriel des transformateurs de puissance », UNIVERSITE DJILLALI LIABBES DE SIDI BEL ABBES, 16/01/1/2019.

[25] : HAMRAOUI NASSIMA - BADACHE FAIZA « Identification des Décharges et Diagnostic des transformateurs de Puissance », thèse de mémoire de Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi Bordj Bou Arréridj, année 2020.

[26] : BOUDRAA Saliha « Maintenance des transformateurs de puissance par l'analyse de l'huile - Apport de l'Intelligence artificielle », THESE DE DOCTORAT EN SCIENCES EN ELECTROTECHNIQUE, UNIVERSITE BATNA, année 2021.

[27] BOUCHAOUI LAHCENE, thèse de mémoire « DIAGNOSTIC DES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE PAR LA METHODE D'ANALYSE

DES GAS DISSOUS: APPLICATION DES RESEAUX DE NEURONES » ;
UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF. Année 2010.

[29] Amel NAIT DJOUDI, thèse de mémoire, « Caractérisation de l'huile pour transformateurs en service », UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, année 2014.

[31] Abdelkebir Amir et Saadi Nassim « Application de la Logique Floue pour le Diagnostic des Transformateurs de Puissance par Analyse des Gaz dissous », mémoire, UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES, année 2020.

[32] Axel de Goursac, article « Le machine learning », Envol Vers le Prédicatif, Directeur des Opérations et Chief Data Scientist de Myriad, 2016. Consulté 28/03/2024 (site web : myriad-data.com).

[33] ALIAOUI HOUARI, BENLEBNA KARIM, mémoire « Conception d'une application bureau pour le diagnostic des transformateurs de puissance » ; UNIVERSITE MUSTAPHA STAMBOULI DE MASCARA, année 2023.

[34] : Praedict_IA, Qu'est-ce que l'apprentissage automatique (Machine Learning). Consulte 05/04/2024 (site web : preadictia.com).

[35] : M. Brahami, thèse de mémoire, « Techniques innovantes de diagnostic des transformateurs de puissance », école supérieure des sciences appliquées Tlemcen, année 2018

[36] Antoine Cornuéjols, Laurent Miclet, Apprentissage artificiel : Concepts et algorithmes, 2-ème éd., Eyrolles. 2003.

[37]:<https://zeenea.com/fr/quest-ce-que-la-normalisation-des-donnees>.
Consulter le 27/04/2024.

[38] : <https://www.netapp.com/fr/artificial-intelligence>. Consulter le 27/04/2024

[39]: P. Mirowski, Y. Lecun, « Stastical Machine Learning and Disolved Gaz Analysis: A Review », IEEE Transaction on Power Delieve. Vol. 27, No 4, pp 1791-1799, 2012.

[40]: Antoine Crochet-Damais, « Matlab : tout savoir sur le langage de calcul numérique », JDN, sur le site JDN, 21/10/2022, (consulté le : 30/04/2024), [\(Link\)](#)

Résumé

Le transformateur de puissance opère selon les principes de Faraday, facilitant le transfert d'énergie sur de vastes distances. Son entretien et son diagnostic revêtent une grande importance pour la stabilité du réseau électrique. Dans cette étude, le diagnostic des transformateurs a été abordé en utilisant des méthodes d'analyse de l'huile, notamment l'analyse des gaz dissous. Deux approches d'analyse ont été employées : la méthode traditionnelle conformément aux normes internationales telles que la CEI, et l'utilisation de l'intelligence artificielle. Cette dernière repose sur l'apprentissage automatique d'algorithmes, qui s'est avéré efficace dans la prédiction de l'état de l'huile.

Mots clés : Transformateur – diagnostics - gaz dissous - intelligence artificielle.

Abstract

The power transformer operates on Faraday's principles, facilitating the transfer of energy over long distances. Its maintenance and diagnosis are crucial for the stability of the electrical grid. In this study, transformer diagnostics were approached using oil analysis methods, including dissolved gas analysis. Two analytical approaches were employed: the traditional method adhering to international standards such as CEI, and the use of artificial intelligence. The latter relies on machine learning algorithms, which have proven effective in predicting oil condition.

Keywords : Transformer - diagnostics - dissolved gases - Artificial intelligence.

ملخص

يعمل محول الطاقة وفقاً لمبادئ فاراداي، مما يسهل نقل الطاقة على مسافات بعيدة. يكتسي صيانته وتشخيصه أهمية كبيرة لاستقرار الشبكة الكهربائية. في هذه الدراسة، تم التطرق إلى تشخيص المحولات باستخدام أساليب تحليل الزيت، بما في ذلك تحليل الغازات المذابة. تم استخدام نهجين للتحليل: الطريقة التقليدية وفقاً للمعايير الدولية مثل CEI، واستخدام الذكاء الاصطناعي. يعتمد الأخير على تعلم الآلة للخوارزميات، والتي ثبتت فعاليتها في توقع حالة الزيت.

الكلمات الرئيسية: محول - تشخيص - غازات مذابة - ذكاء اصطناعي