



Réf:.....

**Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:**

MASTER

Filière : Electrotechnique

Option : - Commande des systems électriques

Thème

**Identification des Décharges
et Diagnostic des transformateurs de Puissance**

Présenté par : - HAMRAOUI NASSIMA

- BADACHE FAIZA

Devant le jury:

Président : Z. BOUCHAMA

Université de Bordj Bou Arreridj

Examineur 1 : F. AOUABED

Université de Bordj Bou Arreridj

Examineur 1 : A. KHATIR

Université de Bordj Bou Arreridj

Rapporteur : A. REFFAS

Université de Bordj Bou Arreridj

Année Universitaire 2019/2020

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Filière : Electrotechnique

Option : Commande des systèmes électrique

Mémoire de Fin d'Etudes
En vue de l'obtention du diplôme:

MASTER

Thème

**Identification des Décharges et Diagnostic des transformateurs
de Puissance**

Dirigé par :A. REFFAS

Présenté par :

– HAMRAOUI NASSIMA

– BADACHE FAIZA

**Avis favorable du Président du Jury
Z. BOUCHAMA**

Année Universitaire 2019/2020

Dédicace

Je dédie ce travail

A mes chers parents,

A mon mari,

A toute la famille Hamraoui et Amzali.

.....Hamraoui NASSIMA.....

Je dédie ce travail

A mes chers parents,

A mon mari,

A toute la famille Badache, Sassi et Beztout.

.....Badache FAIZA.....

Remerciement

Louange à Allah le Tout Puissant Qui m'a accordé la foi, le courage et la patience pour mener ce travail.

Je tiens à remercier monsieur Reffas Abderrahim pour nous avoir accordé sa confiance, et je lui souhaite un prompt rétablissement .

Je tiens également à remercier toute l'équipe pédagogique de BBA, notre encadreur et toutes les personnes qui nous avons aidé pour compléter ce mémoire.

Je ne peux oublier d'adresser mes sincères remerciements aussi à mon mari Haroune Zebiri pour son soutiens et encouragement, et toute ma famille, et plus particulièrement mes parents Seddik.H et D.Amzali , pour m'avoir soutenue et aidée tout au long de mes études.

Hamraoui Nassima

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de ma formation et qui m'ont aidé à rédiger cette lettre.

Tout d'abord, je tiens à remercier monsieur Abderrahim Reffas, Nous souhaitons que Dieu le guérisse bientôt.

Je tiens également à remercier toute l'équipe pédagogique de BBA. Je tiens à exprimer ma gratitude aux personnes suivantes pour leur aide dans la réalisation de ce mémoire : Bouchama Ziad et Ghazali Fateh, Ils ont eu un grand soutien dans l'élaboration de ce mémoire.

Je remercie mes chers parents, khoudir B et Samira B, qui ont toujours été à mes côtés. Je remercie mes sœurs et mes frères pour leurs encouragements.

Je remercie mon mari Nordin S. de m'avoir encouragé. Je remercie mes amies Fatima D, Suhaila A et Nassima H, qui ont toujours été à mes côtés. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

Enfin, je remercie Dieu, le Tout Miséricordieux, le Tout Miséricordieux de m'avoir aidé à réaliser tout cela objectifs jusqu'à présent et je lui demande de me donner patience, direction, piété et suffisant.

Badache Faiza

Résumé

Le transformateur de puissance est l'élément le plus critique dans le Système de transport d'électricité. Sa fiabilité n'affecte pas uniquement la disponibilité en énergie électrique, mais aussi conduit à des pénalités technico-économiques, très lourdes en conséquences (techniques, financières, commerciales, environnementales) ; d'où la nécessité de détecter et d'identifier dès les premiers stades les défauts latents pour une éventuelle action préventive. L'analyse des gaz dissous (AGD, en anglais Dissolved Gases Analysis) est l'une des techniques les plus efficaces pour surveiller l'état des transformateurs. Elle permet à travers la nature et la concentration des gaz d'identifier l'existence du défaut latent ou le mode de défaillance touchant le transformateur par un simple prélèvement. Les quantités d'informations, leur complexité, l'existence simultanée de plusieurs défauts, l'absence d'équations qui les régissent, imposent le recours à des systèmes plus performants de diagnostic tels que les techniques d'intelligences artificielles (réseaux de neurones RNA, systèmes experts, systèmes flous, techniques bayésiennes,).

Dans ce travail, nous présentons une étude menée dans le but de la surveillance des transformateurs en service par la détection et l'identification des défauts en se basant sur les techniques d'AGD utilisées dans les normes (IEEE; ICE;...) et une technique moderne (RNA) qui nous avons développé via des programmes utilisant le MATLAB.

Mot clés : Transformateur de puissance, analyse de gaz dissous (AGD), réseaux de neurone (RNA).

ملخص

يعد محول الطاقة أهم عنصر في نظام نقل الطاقة. لا تؤثر موثوقيتها على توفر الطاقة الكهربائية فحسب ، بل تؤدي أيضاً إلى عقوبات فنية واقتصادية ، والتي لها عواقب وخيمة للغاية (تقنية ، مالية ، تجارية ، بيئية)؛ ومن هنا تأتي الحاجة إلى اكتشاف وتحديد العيوب الكامنة في وقت مبكر لاتخاذ إجراءات وقائية محتملة. يعد تحليل الغازات المذابة من أكثر التقنيات فعالية في مراقبة حالة المحولات. يجعل من الممكن عبور طبيعة وتركيز الغازات وتحديد وجود الخطأ الكامن أو وضع الفشل الذي يؤثر على المحول عن طريق أخذ عينات بسيطة. تتطلب كميات من المعلومات ، وتعقيدها ، والوجود المتزامن لعدة أخطاء ، وغياب المعادلات التي تحكمها ، استخدام أنظمة تشخيص أكثر كفاءة مثل تقنيات الذكاء الاصطناعي (الشبكات العصبية، خبراء الأنظمة ، الأنظمة الضبابية ...) في هذا العمل ، نقدم دراسة في مجال مراقبة الأخطاء أثناء الخدمة من خلال اكتشاف وتحديد الأعطال بناءً على تقنيات AGD لمستخدمة في المعايير (IEEE ؛ ICE ؛ ...) وتقنية حديثة (RNA) التي قمنا بتطويرها من خلال البرامج التي تستخدم MATLAB.

كلمات مفتاحية : محول الطاقة ، تحليل الغازات المذابة AGD ، الشبكات العصبية RNA

SOMMAIRE

| | |
|--|----|
| Introduction générale | 1 |
| Chapitre 01 : Les Huiles Des Transformateurs | 3 |
| 1.1 Introduction : | 4 |
| 1.2 Rôles des huiles isolantes dans un transformateur : | 4 |
| 1.2.1 Fonction isolation | 4 |
| 1.2.2 Fonction de transfert de chaleur..... | 5 |
| 1.2.3 Autres fonctions | 5 |
| 1.3 Présentation des huiles isolantes..... | 5 |
| 1.3.1 Les huiles minérales | 5 |
| 1.3.1.a Huiles Paraffiniques | 6 |
| 1.3.1.b Huiles Naphténique | 6 |
| 1.3.1.c Huiles aromatiques | 7 |
| 1.3.2 Les huiles de synthèse | 7 |
| 1.3.2.a Les huiles Esters | 8 |
| 1.3.2.b Huiles silicones | 8 |
| 1.3.2.c Les hydrocarbures halogénés (Liquides ininflammables) | 9 |
| 1.3.3 Les huiles végétales | 10 |
| 1.4 Conclusion | 12 |
| Chapitre 02 : Revue sur le diagnostic des transformateurs de puissance | 13 |
| 2.1 Introduction: | 14 |
| 2.2 Importance du diagnostic de transformateur de puissance et identification des défauts naissants: | 14 |
| 2.2.1 Défaillance du transformateur de puissance: | 15 |
| 2.2.1.1 Dégradation des isolants: | 15 |
| 2.2.1.2 Calcul du vieillissement: | 16 |
| 2.2.2 L'isolation dans les transformateurs de puissance: | 17 |
| 2.2.2.1 Isolation Cellulosique: | 17 |
| 2.2.2.2 Isolation liquide:..... | 17 |
| 2.2.3 Mécanismes de génération des gaz : | 17 |
| 2.2.3.1 Décomposition de l'huile :..... | 17 |
| 2.2.3.2 Décomposition de l'isolation cellulosique : | 18 |
| 2.3 Introduction a l'Analyses des Gaz Dissous (AGD) comme outil de diagnostic : | 19 |

| | |
|--|-----------|
| 2.3.1 Historique de AGD:..... | 19 |
| 2.3.2 Théorie de l'évolution de gaz : | 20 |
| 2.3.3 Interprétation et analyse des gaz dissous : | 22 |
| 2.3.3.1 Défauts thermiques : | 22 |
| 2.3.3.2 Défauts électriques : | 23 |
| 2.3.4 Différentes méthodes d'analyse des gaz dissous :..... | 23 |
| 2.3.4.1 Technique des rapports : | 23 |
| 2.3.4.2 Représentations graphiques (méthode de Duval): | 24 |
| 2.3.4.3 Méthode des gaz-clés : | 24 |
| 2.3.4.4 Autres méthodes d'interprétation : | 24 |
| a) Méthode du Nomogramme De Church: | 24 |
| b) Méthodes Schliesinger : | 24 |
| 2.4 Conclusions: | 25 |
| Chapitre 03 : Méthodes de diagnostic des défauts basées sur L'Intelligence Artificielle | 26 |
| 3.1 Introduction : | 27 |
| 3.2 Les réseaux de neurones : | 27 |
| 3.2.1 Architecture d'un réseau neurone : | 28 |
| 3.2.2 Fonctions d'activations : | 29 |
| 3.2.3 L'apprentissage : | 30 |
| 3.2.4 Domaines d'application des réseaux de neurones artificiels :..... | 30 |
| 3.3 Logique floue : | 31 |
| 3.3.1 Structure et fonctionnement d'un système d'inférence flou (SIF) | 32 |
| 3.4 Systèmes experts : | 32 |
| 3.4.1 Structure et fonctionnement d'un système expert : | 32 |
| 3.4.2 Domaines d'application : | 33 |
| 3.5 Systèmes hybrides : | 34 |
| 3.6 Conclusion : | 34 |
| Conclusion générale | 35 |
| REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES..... | 36 |

Introduction générale

Le transformateur de puissance est le composant le plus important d'un système de transmission d'électricité. Leur indisponibilité affecte non seulement la disponibilité de l'énergie électrique, mais entraîne également des pénalités techniques et économiques, et des conséquences très graves (techniques, financières, commerciales, environnementales) ; D'où la nécessité d'une détection et d'une identification précoces des défauts sous-jacents pour une éventuelle action préventive. Par conséquent, afin d'éviter ces défauts, nous utilisons des huiles dans le but de trouver un milieu qui transporte la chaleur des bobines et du fer vers le corps du transformateur externe afin qu'elle s'échappe d'abord dans l'air extérieur, et d'augmenter l'isolement entre les fichiers.

Durant une défaillance ou un défaut, les intégrités mécanique, diélectrique et thermique du transformateur sont souvent affectées, et diminuent à des valeurs inférieures, par rapport celles de leurs tenues normales. Les défauts latents peuvent évoluer dans le temps et provoquer une perforation d'isolement par de différentes causes telles que les courants de défaut (courant de court – circuit, courant d'enclenchement,) et les surtensions électriques (transitoire, manoeuvre, ou de foudre) . L'évaluation de l'état du transformateur est souvent réalisée à travers les diagnostics effectués. Le vecteur principal de l'évaluation de la condition du transformateur est généralement apportée par l'analyse de son huile où la majorité des informations recueillies sont données et exploitées pour des actions de maintenance. La décomposition de l'huile selon les différents défauts et leurs intensités conduit à la formation des gaz qui peuvent être exploités pour le diagnostic.

L'analyse des gaz dissous (AGD, en anglais Dissolved Gases Analysis DGA) est l'une des techniques les plus efficaces pour surveiller l'état des transformateurs. Elle permet, à travers la nature et la concentration des gaz, d'identifier l'existence du défaut latent ou le mode de défaillance touchant le transformateur par un simple prélèvement. Les quantités d'informations, leur complexité, l'existence simultanée de plusieurs défauts, l'absence d'équations qui les régissent, imposent le recours à des systèmes plus performants de diagnostic tels que les techniques d'intelligences artificielles (réseaux de neurones ANN, systèmes experts, systèmes flous, techniques bayésiennes,).

Dans le présent travail, fruit d'une étroite collaboration avec Sonelgaz-GRTE de SETIF, nous présentons une étude menée dans le but de surveiller les transformateurs en service par la détection et l'identification des défauts en se basant sur les techniques d'AGD utilisées dans les normes (IEEE; ICE;...) et une technique moderne (RNA) que nous avons développé.

Le premier chapitre présente d'une manière générale les différents types d'huiles isolantes utilisées dans l'appareillage électrique et plus particulièrement dans les transformateurs de puissance et leurs différentes propriétés. Nous présentons aussi les avantages et les inconvénients de ces huiles .

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des mécanismes de claquage dans les isolants liquides, ainsi qu'au phénomène de décharges surfaciques et les streamers . Les lois statistiques utilisées pour l'étude de la tension de claquage y sont également présentées.

Dans le troisième chapitre nous présentons une revue élargie sur les méthodes de diagnostic par l'application de l'intelligence artificielle est exposée. Notre choix est porté sur les RNA où une application a été développée dans ce but.

Les résultats obtenus sont exposés dans le quatrième chapitre avec les comparaisons faites avec le logiciel DELTA X dans un but de validation.

Chapitre 01 : Les Huiles Des Transformateurs

1.1 Introduction :

Les huiles isolantes sont utilisées en électrotechnique comme imprégnant d'isolations cellulosiques ou comme produit de remplissage de matériels électriques très divers. Leur rôle principal est d'éliminer l'air et les autres gaz de façon à améliorer la tenue diélectrique de l'isolation, la rigidité diélectrique des liquides étant nettement supérieure à celle des gaz. Cependant, dans beaucoup d'applications, elles servent à la fois à améliorer les propriétés diélectriques et à évacuer la chaleur générée dans les bobinages. [1] Des propriétés physico-chimiques satisfaisantes, une bonne compatibilité avec les isolants solides et un faible coût font de l'huile minérale le diélectrique adéquat pour les transformateurs électriques. [2]

En raison de la nécessité de faire fonctionner des transformateurs de distribution dans des endroits où on exige de garantir des normes de sécurité incendie, des liquides isolants à base de polychlorobiphényle (PCB) ont été introduits au début des années 1930. Jusqu'aux années 1960, ils ne soulevaient pas de préoccupations environnementales. Cependant, depuis les années 1970, le public critique de plus en plus l'utilisation d'huiles de transformateurs à base de PCB. Après l'interdiction d'utiliser les PCB, le milieu de l'industrie électrique a développé de nouveaux produits tels que les huiles silicones ou les huiles esters synthétiques. Poussés par le désir d'un liquide isolant ininflammable et respectueux à l'environnement, les chercheurs et les ingénieurs ont étudié d'innombrables alternatives à l'huile minérale, et des avancées significatives ont été réalisées au cours des quatre dernières décennies. En particulier, les huiles végétales, qui ont attiré le plus d'attention, et des recherches sur les propriétés et les performances des huiles végétales ont été menées dans quelques laboratoires.[3]

1.2 Rôles des huiles isolantes dans un transformateur :

1.2.1 Fonction isolation

Dans la partie active d'un transformateur, l'isolation entre les éléments portés à des potentiels électriques différents est assurée soit [4]:

- Par le diélectrique liquide seul, lorsqu'il s'agit d'une isolation entre deux pièces métalliques nues (plots de commutateur par exemple).
- Par une couche solide (papier ou carton) imprégnée de diélectrique liquide, c'est le cas par exemple de l'isolation entre deux conducteurs voisins d'un même enroulement.
- Par une isolation mixte: combinaison de films de diélectrique liquide et de barrières d'isolants solides, c'est le cas d'une isolation entre deux enroulements concentriques de tensions différentes.[5]

1.2.2 Fonction de transfert de chaleur

Bien que les transformateurs électriques présentent un excellent rendement(99 à 99.9%), ils ne peut échapper pas à la perte d'énergie qui accompagne toute conversion. L'énergie perdue se dissipe sous forme de chaleur. L'évacuation de la chaleur vers l'extérieur nécessite une connaissance de l'élévation maximale des températures des différents éléments du transformateur afin d'assurer un équilibre entre la vitesse de production et d'évacuation de la chaleur. La chaleur à évacuer est véhiculée par circulation naturelle ou forcée de l'huile[2]. Un refroidissement se fait par convection et par conduction thermique, et les principales caractéristiques qui permettent de juger l'aptitude d'une huile à évacuer la chaleur sont la viscosité, la conductivité thermique et la chaleur spécifique.[5]

1.2.3 Autres fonctions

Les huiles peuvent être aussi utilisées pour leur pouvoir extincteur d'arcs électriques (dans les chambres de coupure des commutateurs en charge et de certains disjoncteurs), en raison de leur pouvoir lubrifiant pour les matériels renfermant des pièces en mouvement (sélecteurs de prises, pompes immergées) et dans certains cas pour améliorer la résistance au feu, comme c'est le cas dans les transformateurs de distribution proche de la population. Enfin, elles servent à ralentir l'oxydation directe de l'isolation cellulosique [4].

1.3 Présentation des huiles isolantes

1.3.1 Les huiles minérales

Les huiles minérales sont des huiles d'origine pétrolière[6], sont obtenues par distillation de pétroles sélectionnés, substances naturelles d'origine géologique, débarrassés de matières diverses (gaz légers, sulfure d'hydrogène, eau, etc.). Ce sont des mélanges complexes (plusieurs milliers de molécules différentes) d'hydrocarbures, de composés soufrés, oxygénés, azotés, et de traces de composés organométalliques. On les désigne sous le terme de bruts. Ils sont extraits dans toutes les régions du monde et plusieurs centaines de types différents ont été mis en évidence.[7]

On peut distinguer trois types des huiles minérales , qui sont généralement classées par sa teneur en carbone paraffinique (Cp), en carbone naphtéinique (Cn) et en carbone aromatique (Ca) . Cp et Cn ont une influence prépondérante sur la densité, la viscosité et le comportement à basse température (point d'écoulement, point de trouble). [8]

1.3.1.a Huiles Paraffiniques

Les molécules de ce groupe sont aussi connues sous le nom d'hydrocarbures saturés en chaînes droites ou alcanes, qui peuvent être linéaires (alcanes) ou ramifiées (iso-alcanes) et dont la formule générale est C_nH_{2n+2} . Les molécules paraffiniques ont une stabilité thermique plus faible que les molécules naphthéniques et aromatiques.[9]

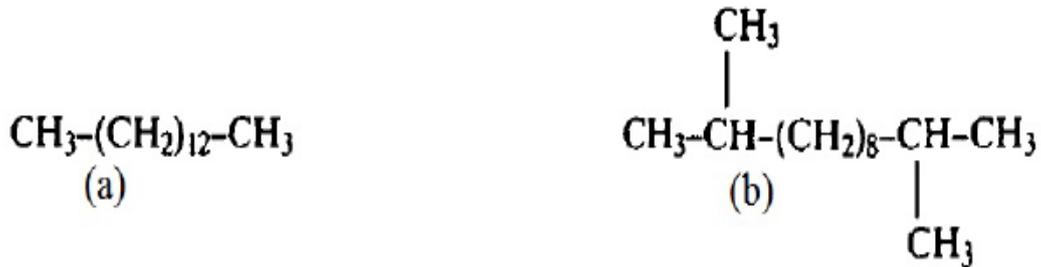


Fig 1.1 : Structures moléculaires d'hydrocarbures paraffiniques (a) : chaîne simple (b) : chaîne ramifiée [10].

1.3.1.b Huiles Naphthénique

Les molécules de ce groupe sont également connues sous le nom d'hydrocarbures saturés cycliques ou cyclo-alcanes. Elles correspondent à des chaînes carbonées fermées de formule générale C_nH_{2n} . Les structures paraffiniques et naphthéniques ont une influence prépondérante sur la densité, la viscosité et le comportement à basse température (point d'écoulement, point de trouble).[9]

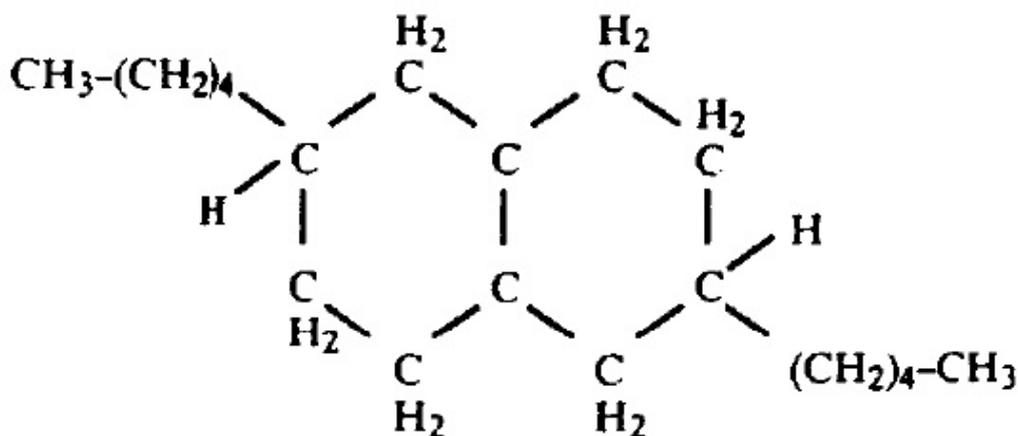


Fig 1. 2 : Structure moléculaire d'hydrocarbure naphénique [10].

1.3.1.c Huiles aromatiques

Ses molécules sont des composés cycliques, aussi appelées hydrocarbures insaturés, de formule générale C_nH_n . Elles sont totalement différentes des molécules paraffiniques et naphéniques, mais jouent un rôle très important dans les propriétés d'une huile minérale. On les trouve sous deux formes: les mono-aromatiques et les poly-aromatiques dont certaines sont considérées comme cancérogènes. Ces composés aromatiques permettent à l'huile d'avoir une bonne résistance à l'oxydation (production de phénols qui détruisent les radicaux), de bonnes propriétés de gassing et une bonne tenue en tension impulsionnelle [18].

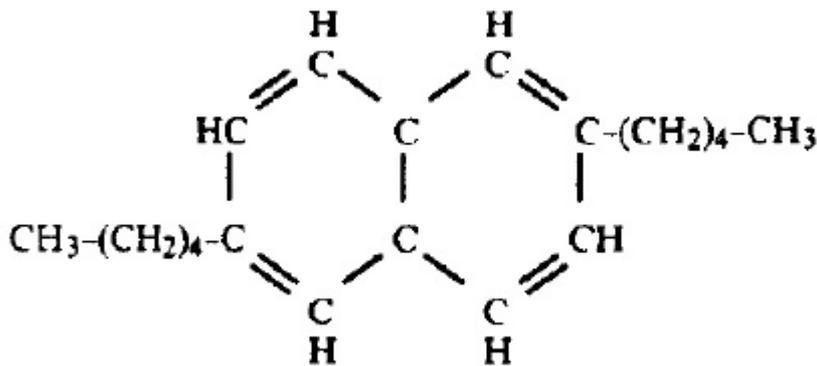


Fig 1. 3 : Structure moléculaire d'hydrocarbure aromatique [10].

1.3. 2 Les huiles de synthèse

Ces huiles sont utilisées chaque fois que des propriétés particulières sont recherchées. C'est notamment le cas lorsqu'il s'agit d'améliorer la résistance au feu des transformateurs se trouvant à proximité de lieux sensibles tels que les aéroports et les hôpitaux (transformateurs de distribution et traction). Ces liquides de synthèse sont tous obtenus à partir des différents procédés chimiques. Il en existe trois types principaux destinés aux transformateurs :

- Les huiles esters de pentaérythritol encore appelées esters synthétiques ou esters organiques ;
- Les hydrocarbures chlorés (halogénés), tel que les PCB ;
- Les huiles silicones.

1.3.2.a Les huiles Esters

Les huiles esters aussi appelées les huiles ester synthétiques ; huiles ester du pentaérythriol ou ester organique, sont une alternative biodégradable aux huiles minérales. Ils ont été développés comme liquides de remplacement des PCB à cause de leur résistance au feu, pour les transformateurs de distribution et les appareillages proches de la population, dans les immeubles, les tunnels, etc. Leur point de feu élevé ($> 300^{\circ}\text{C}$) par rapport aux huiles minérales constitue l'une des caractéristiques principales de ces produits [11]. Elles sont constituées d'ester du pentaérythritol. Elles peuvent absorber beaucoup plus d'eau que l'huile minérale, sans que cela ait d'effet important sur le niveau de la rigidité électrique. Ces propriétés d'absorption de l'eau permettent de préserver le papier et ralentissent son vieillissement. Elles ont une bonne tenue électrique et un point d'éclair deux fois plus élevé que pour les huiles minérales. Elles ont une conductivité supérieure à celle des huiles minérales. Elles sont également plus chères (d'un facteur d'ordre 4) que les huiles minérales et n'ayant été introduite qu'après la guerre, avec la REOLEC 13 (est un ester carboxylique purifié, stabilisé, sans chlore, dont les propriétés physiques et électriques sont très proches de celles de l'huile minérale), on ne dispose que d'un retour d'expérience limité à quelques décennies, moins que pour les huiles minérales [12].

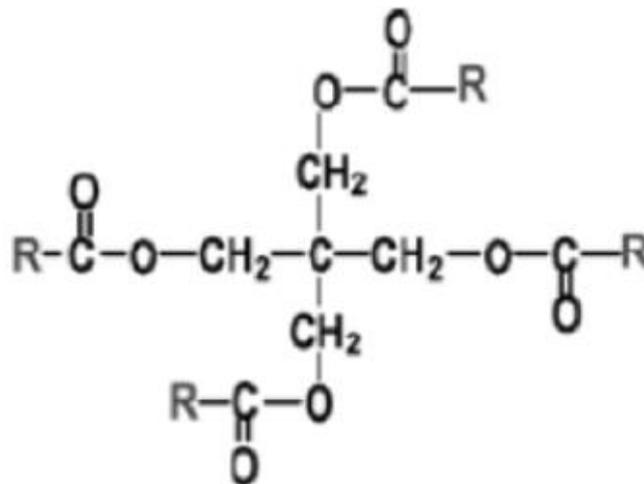


Fig 1.4 : Structure d'une molécule d'ester synthétique [24].

1.3.2.b Huiles silicones

Les huiles silicones ont été proposées comme liquides de remplacement des PCB [13]. Ce sont des composés regroupant Si—O (siloxane) et des radicaux organiques généralement CH_3 et C_6H_5 [14]. Le plus communément utilisé en électrotechnique est le polydiméthylsiloxane (PDMS) dont la structure est représentée sur la figure suivante :

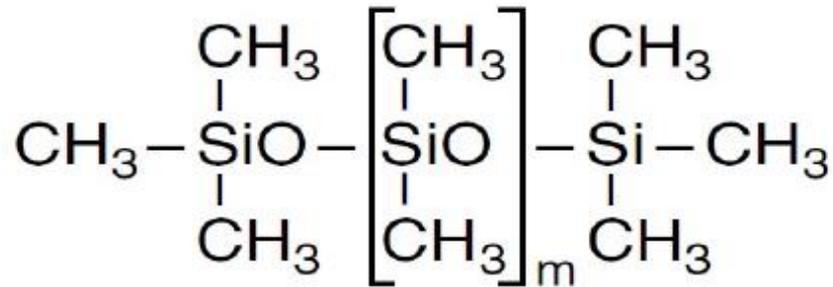


Fig 1. 5 : Structure moléculaire de polydimethylsiloxane (PDMS) [14].

En dessous de 150°C, et en présence d'air, les silicones présentent une bonne résistance à l'oxydation [15], et une faible dépendance de la viscosité vis-à-vis de la température [16]. Le manque de retour d'expérience joue également en leurs défaveurs. Une huile à base de silicone se dilate également plus sous l'effet de la température que l'huile minérale. Elles sont certes inertes, mais difficilement biodégradables [17].

1.3.2.c Les hydrocarbures halogénés (Liquides ininflammables)

Les PCB ont été fabriqués industriellement à partir de 1930. Leur production est arrêtée depuis les années 80. Les PCB sont plus souvent connus en France sous la dénomination de pyralène, Arcelor ou askarel. La stabilité chimique et l'ininflammabilité ont conduit à utiliser ces produits principalement comme diélectriques dans les transformateurs et les condensateurs, fluides caloporteurs ou isolants. Ils ont été largement utilisés comme lubrifiants dans les turbines et les pompes, dans la formation des huiles de coupe pour le traitement du métal, les soudures, les adhésifs, les peintures et les papiers autocopiants sans carbone[18].

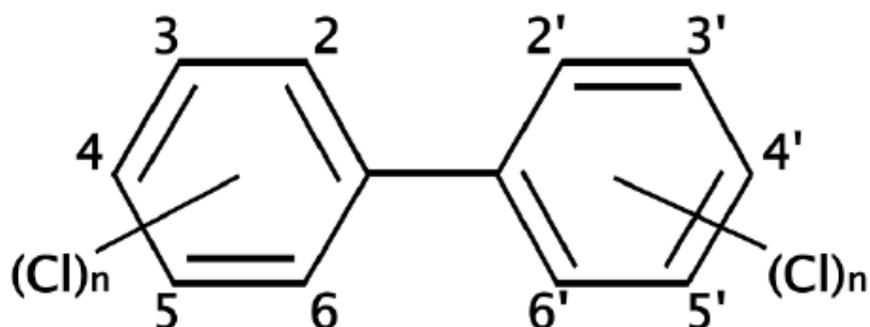


Fig 1.6 : Structure moléculaire de polychlorobiphényle (PCB) [19].

Les PCB étaient utilisés comme isolants en raison de leurs excellentes propriétés [19], leurs stabilités et leurs résistance au feu. Le gaz résultant des décharges partielles ou de passage de l'arc est le HCl. Cela réduit les risques d'incendie et d'explosion [20].

Après que des études ont montré que les PCB sont hautement toxiques, cancérigènes et non biodégradables, et leur persistance même dans les tissus d'être vivants [21], la fabrication est arrêtée en 1985. Cependant, on trouve encore des appareils en contenant.

Les appareils contenant plus de 500ppm sont éliminés, entre 50 et 500ppm sont déclarés légèrement pollués, et inférieurs à 50ppm déclarés comme non pollués [19].

1.3.3 Les huiles végétales

Les huiles végétales aussi appelées esters naturels (par opposition aux esters synthétiques ou organiques), ont été les premières huiles isolantes utilisées pour l'appareillage électrique. Les huiles esters végétales sont obtenues par estérification d'un tri-alcool simple, avec trois acides gras. Ces acides sont mono-carboxyliques (de formule R-COO-H), à chaîne linéaire non branchée comprenant un nombre pair d'atomes de carbone (entre 8 et 24). Ils peuvent être saturés ou insaturés et parfois hydroxylés. Les triglycérides sont obtenus par trituration (broyage et pression) des graines [22]. La réaction d'estérification d'une huile végétale est la suivante (Figure 1.7) :

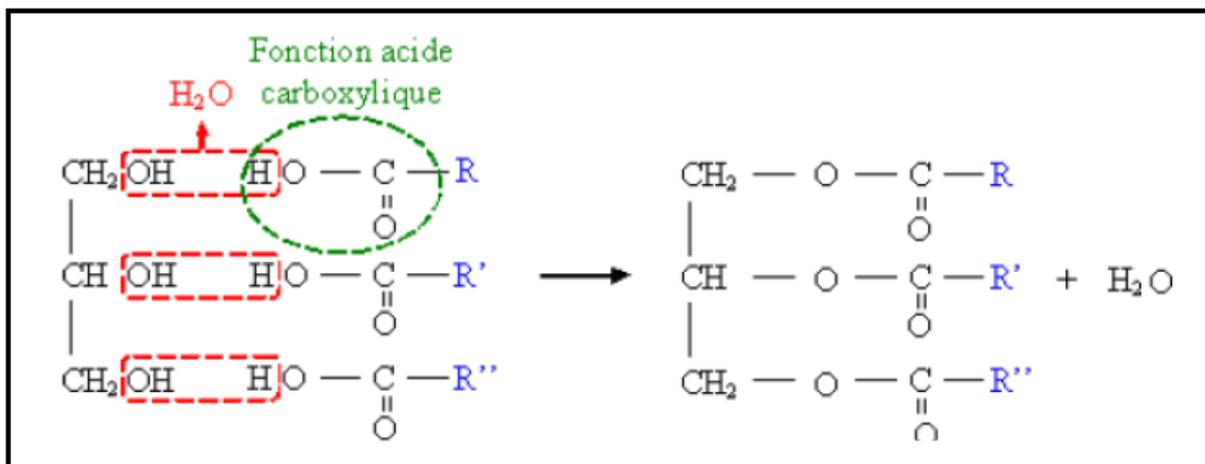


Fig 1.7 : Structure chimique d'une huile végétale, aussi appelé triester (triglycérides); R, R' et R'' représentent la partie hydrogène et carbone des acides gras. sont les chaînes d'acides gras du même ou de différents types [23].

Le coût d'exploitation (coût initial et coût d'entretien) est élevé par rapport à l'huile minérale, mais un tel inconvénient est surmonté par des facteurs comme : la biodégradabilité et le point d'éclair. Dans ce

Chapitre 01 : Les Huiles Des Transformateurs

qui suit, nous allons essayer de résumer les principaux avantages et inconvénients des huiles végétales en les comparant avec les huiles minérales.[24]

Tableau 1. 1: Propriétés des fluides isolants pour transformateurs [25].

| Propriétés des fluides isolants pour transformateurs : Valeurs typiques/limites | | | |
|---|--------------------------------|-------------------------------------|------------------|
| | Huile végétale | Huile minérale | Huiles silicone |
| Apparence | <i>Jaune clair^a</i> | Jaune clair | Sans couleur |
| Gravité spécifique à 25 | 0.91-0.92 | 0.89 | 0.96 |
| Viscosité cinématique,cst | | | |
| 0C | 170-250 | 2200 | 95 |
| 25C | 55-75 | 300 | 50 |
| 40C | 33-45 | 125 | 38 |
| 100C | 8-10 | 13 | 16 |
| Point d'écoulement, C | -15 to -25 | -20 max | -50 max |
| Point d'éclair C | 25 | 40-45 | 25 |
| Point de feu C | 310-325 | 275 min | 300 min |
| (teneur en eau, ppm huile sèche) | 50-100 | 10 – 25 ^b | 50 |
| (Stabilité de l'eau 25C) | 1200 | 60 | 200 |
| Propriétés thermique | | | |
| Capacité calorifique, cal/g.C | 0.50-0.57 | 0.488 | 0.363 |
| Conductivité thermique, W/m.K | 0.17 ^a | 0.13 | 0.15 |
| Coefficient de dilatation thermique,/C | 0.0007 | 0.00073 | 0.00104 |
| Propriétés chimiques | | | |
| Type | Ester | Hydrocarbure | Organo-silicone |
| Acidité mg KOH/g | 0.06 ^a | 0.01 | 0.01 |
| Stabilité à l'oxydation- ASTM 2440 | <i>Passe^a</i> | <i>Passe</i> | <i>Passe</i> |
| Propriétés électriques | | | |
| Constante diélectrique à 25C | 3.1 | 2.2 | 2.71 |
| Résistivité volumique à 25C,Ohm.cm | 10 ¹⁴ | 10 ¹⁴ – 10 ¹⁵ | 10 ¹⁴ |
| Tension de claquage kV | | | |
| ASTM 1816,2mm | 74 ^a | 60 | - |
| Sous tension impulsionnelle(pointe négative),kV | 116 ^a | 145 | 136 |
| %Facteur de dissipation | | | |
| 25C | 0.25 ^a | 0.05 max | -0.01 |
| 100C | 1.00 ^a | 0.3 max | - |
| Tendance au gazage-ASTM D 2300 | -50 ^a | -10 to +20 | N/A |
| Biodégradabilité | | | |
| CEC-L-33 21 jours | 97-99 | 30 | Très bas |
| Remarque : a :HuileBIOTEMP b :Varie selon de classement du transformateur | | | |

1.4 Conclusion

Le chapitre présent est consacré à la différenciation entre les principales propriétés des différentes huiles. Les huiles minérales offrent le meilleur compromis prix/performance et un haut niveau de compatibilité avec les autres matériaux utilisés dans les transformateurs. Ses inconvénients sont sa faible résistance au feu et sa faible biodégradabilité. Quant aux huiles silicones, elles ont une très bonne stabilité à l'oxydation mais ne sont pas biodégradables. La majorité des caractéristiques de performance des esters naturels sont très supérieures à celles de l'huile minérale classique, y compris la sécurité incendie, la compatibilité des matériaux, les caractéristiques électriques et thermiques et une réduction significative du taux de vieillissement de l'isolation solide. La différence de prix représente le plus grand inconvénient des transformateurs remplis avec les esters naturels (10% à 15% de plus que l'huile minérale classique). Cependant, ce fluide offre une valeur de cycle de vie significative pour les utilisateurs, avec les autres avantages et performances qui aideraient à justifier et à compenser ces coûts d'achat. Les esters naturels qui sont facilement biodégradables ont une faible tenue à l'oxydation, pour cela, ils doivent être utilisés dans des transformateurs scellés.

Chapitre 02 : Revue sur le diagnostic des transformateurs de puissance

2.1 Introduction:

Le transformateur de puissance a un rôle très important dans les installations électriques, c'est le composant le plus critique et le plus cher des éléments du transport de l'énergie électrique.

Un transformateur défaillant conduit à des situations parfois très lourdes en conséquences : techniques, financières, commerciales, environnementales. D'où la nécessité de détecter et d'identifier le défaut dès sa naissance. Du moment que le prix du transformateur est trop élevé à supporter, un prélèvement simple de l'huile peut procurer généralement plus d'assurance lors de son exploitation, en donnant des informations précieuses sur son état et sa condition qui empêche sûrement des pannes souvent coûteuses liées à une interruption prolongée dans l'alimentation électrique; il serait préférable donc de suivre l'évolution et les tendances tirées des informations apportées par l'analyse effectuées sur son huile.

2.2 Importance du diagnostic de transformateur de puissance et identification 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.

Sous l'environnement dérégulé des systèmes électriques dans le monde et les conditions dégagées de cela, chaque entreprise d'électricité essaye de gérer son patrimoine avec plus d'intelligence en se basant sur la maintenance conditionnelle et proactive pour limiter les avaries sur le réseau et éviter des pénalités économiques causées par les indisponibilités des équipements du système électrique. Une défaillance du transformateur de puissance peut conduire à des pertes directes et indirectes qui dépassent largement le prix de celui-ci [26].

Le diagnostic du transformateur via l'analyse de l'huile qui s'inscrit dans la philosophie de la maintenance conditionnelle, est un outil de surveillance préventive très efficace pour prédire l'état et les défauts naissants qui peuvent parvenir durant son exploitation.

2.2.1 Défaillance du transformateur de puissance:

Les conséquences des défauts latents à l'intérieur du transformateur de puissance sont souvent remarquables, qui peuvent diminuer à la fois ses tenues : diélectriques, thermiques et mécaniques à des valeurs inadmissibles, au dessous des contraintes appliquées. Ceci peut progresser à un point où l'isolation ne peut résister face à ces surcharges provoquées par le courant de défaut ou de surtension (court circuit, vibrations, surcharges, décharges partielles, foudre..). Ainsi, le diagnostic de ces défauts est étroitement lié à l'évaluation de l'état d'isolation solide et liquide [27].

2.2.1.1 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. La détérioration du papier enrobant les spires des enroulements sont normalement touchés par la pyrolyse, l'oxydation et l'hydrolyse qui se produit dans les matériaux [28].

Par ailleurs, elles sont accélérées par toute augmentation de la température, de l'oxygène et du taux d'humidité. La dégradation chimique des papiers et des cartons se manifeste par l'affaiblissement des propriétés mécaniques de la cellulose. Cependant, bien que les pertes diélectriques tendent à augmenter, cependant, la rigidité diélectrique du papier n'est pas touchée de manière significative par ces détériorations. L'huile isolante est également altérée par la détérioration chimique. Elle s'oxyde, ce qui forme des composés acides et des boues. Ceux-ci réduisent la rigidité diélectrique et affectent la capacité d'évacuation de chaleur du transformateur. Un certain nombre de facteurs, avec leur combinaison, accélèrent souvent ces détériorations, notamment :

- La chaleur;
- La présence des forces mécaniques;
- L'application d'une tension;
- La contamination.

Les vibrations, les efforts électrodynamiques causés par les courts-circuits et les courants d'appel, les chocs au cours du transport ainsi que les efforts résultant des variations des différents matériaux sont les principales contraintes mécaniques qui altèrent le papier et le carton. Si celles-ci sont suffisamment fortes, elles détruiront les matériaux isolants et entraîneront une défaillance diélectrique. En outre, les efforts de compression entraînent le tassement des isolants solides et par conséquent une prise de jeu de l'ensemble de l'assemblage et du serrage. Ceci rendra le transformateur plus vulnérable en cas de court-circuit. Les contraintes occasionnées par l'application d'un champ électrique provoquent également un vieillissement de l'isolation électrique. Sous l'action de ce champ, le matériau est le siège de décharges partielles qui conduisent à son érosion et affectent par conséquent sa rigidité diélectrique

et sa tenue mécanique. Cependant, dans les transformateurs modernes bien imprégnés, cet effet est très faible: en fonctionnement normal, les isolants sont soumis à des champs dont le niveau est inférieur au seuil d'apparition des décharges partielles. Enfin, le vieillissement peut être accéléré par la contamination de l'huile, les particules métalliques et conductrices, les fibres humides et les bulles de gaz présentes dans l'huile peuvent pénétrer dans des endroits où le champ électrique est élevé. De plus, la rigidité diélectrique de la cellulose peut diminuer en raison d'infiltration d'humidité. [29]

2.2.1.2 Calcul du vieillissement:

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 [30].

En négligeant toutes les autres influences, sous l'effet de la température de l'huile, comme cela a été expliqué au paragraphe précédent, l'isolation subit une dégradation chimique. Après un certain temps d'exploitation, selon un certain critère retenu, l'isolation est affaiblie. La loi d'Arrhenius sur les réactions chimiques donne l'intervalle de temps pour atteindre ce point final:

$$\text{Durée de vie} = a \cdot e^{(\beta / T)} \quad 2.1$$

Où a est la vie initiale, β est une constante dépendant des propriétés du matériau à étudier et T la température absolue en Kelvin (K).

Comme il est difficile de déterminer de manière univoque la fin de vie d'un transformateur du fait, aussi qu'elle est liée aussi à la vie du papier, la vitesse de vieillissement a été définie sur la base de la durée de vie selon Montsinger et la norme CEI :

$$\text{Vitesse de vieillissement} \left[\frac{\%}{\Delta} \right] = 2^{\frac{\theta_{hs} - 98}{6}} \quad 2.2$$

θ_{hs} : Température du point chaud.

En pratique, un incrément de 6°C au delà de 98°C multiplie de deux fois la vitesse du vieillissement (cas du papier non amélioré thermiquement). [31]

2.2.2 L'isolation dans les transformateurs de puissance:

2.2.2.1 Isolation Cellulosique:

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

Dans la plupart des applications industrielles, les isolations cellulosiques sont rarement utilisées en dehors de l'imprégnation avec un autre matériel isolant. Le but principal de l'imprégnation est de protéger l'isolation diélectrique de la cellulose contre les effets diélectriques de l'humidité absorbée et d'augmenter son BIL (Basic Impulse Level). Pour l'utilisation en basse tension comme dans le cas du fonctionnement de certains moteurs électriques et condensateurs, les papiers isolants sont souvent imprégnés avec de la cire et le vernis. Quand ils sont utilisés pour l'équipement à haute tension, ils seront imprégnés avec des isolants liquides tels que les huiles diélectriques. [32]

2.2.2.2 Isolation liquide:

L'huile de transformateur est souvent une huile minérale qui est faite d'un mélange d'alcane, de naphthènes, et des hydrocarbures aromatiques, raffinés à partir du pétrole brut. Les processus de raffinage pourraient inclure le traitement par l'acide, l'extraction par solvants, l'hydrotraitement, ou la combinaison de ces méthodes lorsqu'elle est parfaitement achevée, peut rapporter les caractéristiques de l'huile minérale aux spécifications exigées. Son rôle fondamental est d'assurer l'isolation diélectrique et le refroidissement du transformateur. Les huiles modernes procurent plus de stabilité à la dégradation, et elles sont dépourvues du soufre corrosif.

Au plus, elles devraient avoir les caractéristiques suivantes :

- Point d'inflammabilité élevé
- Point de congélation bas
- Rigidité diélectrique élevée
- Basse viscosité
- Bonne résistance à l'électrification statique
- Tendance au gassing. [33]

2.2.3 Mécanismes de génération des gaz :

2.2.3.1 Décomposition de l'huile :

Les huiles minérales isolantes sont constituées d'un mélange de molécules différentes d'hydrocarbures. Contenant des groupes chimiques CH₃, CH₂ et CH reliés les uns aux autres par des liaisons moléculaires carbone-carbone. Des défauts thermiques ou électriques peuvent couper certaines

de ces liaisons C-H et C-C, avec la formation de petits fragments instables, sous forme radicalaire ou ionique, comme H^* , CH_3^* , CH_2^* , CH^* ou C^* (parmi bien d'autres formes plus complexes), qui se recombinaient rapidement, par des réactions complexes, en molécules de gaz comme l'hydrogène (H_2), le méthane (CH_4), l'éthane (C_2H_6), l'éthylène (C_2H_4) ou l'acétylène (C_2H_2). Des hydrocarbures gazeux en C3 et C4, ainsi que des particules solides de carbone et de polymères hydrocarbonés (cires-X), sont d'autres produits de recombinaison possibles. Les gaz formés se dissolvent dans l'huile, ou s'accumulent sous forme de gaz libres, s'ils sont produits rapidement en grandes quantités, et peuvent être analysés par l'analyse des gaz dissous (AGD) conformément à la CEI 60567. [34]

Les défauts de faible énergie, tels que les décharges partielles de type plasma froid (décharge couronne), favorisent la coupure des liaisons C-H plus faibles (338 kJ/mole) par des réactions d'ionisation et l'accumulation d'hydrogène comme gaz principal de recombinaison. De plus en plus d'énergie et/ou des températures plus élevées sont nécessaires pour la coupure des liaisons C-C, et leur recombinaison en gaz contenant une liaison simple C-C (607 kJ/mole), une double liaison C=C (720 kJ/mole) ou une triple liaison C \equiv C (960 kJ/mole), suivant des réactions présentant des analogies avec celles observées dans l'industrie de craquage du pétrole.

Ainsi, la formation d'éthylène est favorisée par rapport à celle de méthane et l'éthane au-dessus d'environ 500°C (bien que, au-dessous, l'éthylène soit toujours présent, mais en plus faibles quantités). L'acétylène nécessite des températures d'au moins 800°C à 1200°C, suivies d'une trempe rapide jusqu'à de plus basses température, pour pouvoir s'accumuler comme produit de recombinaison stable. L'acétylène se forme ainsi en quantités significatives principalement dans les arcs, où le canal de conduction ionisé est à plusieurs milliers de degrés Celsius, et l'interface avec l'huile liquide avoisinante est nécessairement en dessous de 400°C (température au-dessus de laquelle l'huile se vaporise complètement), avec une couche de vapeur d'huile et de gaz de décomposition entre les deux. L'acétylène peut se former à plus basse température (<800°C), mais en très faibles quantités. Les particules de carbone se forment de 500°C à 800°C et s'observent, en effet, après claquage dans l'huile ou autour de points très chauds. L'huile peut s'oxyder, avec la formation de faibles quantités de CO et de CO $_2$, qui peuvent s'accumuler en quantités plus importantes sur de longues durées.

2.2.3.2 Décomposition de l'isolation cellulosique :

Les chaînes polymériques de l'isolation solide cellulosique (papier, carton, bois de calage) contiennent un grand nombre de noyaux anhydroglucosiques, et de faibles liaisons moléculaires C-O et glycosiques, qui sont thermiquement moins stables que les liaisons hydrocarbonées de l'huile et se décomposent à des températures plus basses.

Les vitesses de coupure de chaînes polymériques deviennent significatives à des températures supérieures à 105°C, avec décomposition complète et carbonisation au-dessus de 300°C. Il se forme principalement du monoxyde et du dioxyde de carbone, ainsi que de l'eau, en quantités beaucoup plus importantes que par oxydation de l'huile aux mêmes températures, ainsi que de faibles quantités d'hydrocarbures gazeux de l'huile et de composés furaniques. Ces derniers, peuvent être analysés conformément à la CEI 61198, en complément à l'interprétation de l'AGD, pour confirmer si oui ou non l'isolation cellulosique est impliquée dans le défaut. La formation du CO et du CO₂ augmente non seulement avec la température, mais également avec la teneur en oxygène dissous dans l'huile et avec la teneur en eau du papier. [34]

2.3 Introduction à l'Analyse des Gaz Dissous (AGD) comme outil de diagnostic :

L'huile minérale des transformateurs de puissance se compose de plusieurs molécules d'hydrocarbure. Les défauts électriques et thermiques peuvent causer la rupture des liaisons entre ces molécules qui conduisent à la formation de gaz. Selon l'intensité dégagée du défaut, le gaz formé se dissout ou se libère de l'huile en accord avec les différentes limites de solubilités de chaque gaz dans l'huile. La concentration de ces gaz peut être suivie à l'aide de la chromatographie en phase gazeuse (AGD) [35]. Cette méthode exige seulement un prélèvement de quelques *ml* de l'huile isolante pour être analysée sur un transformateur en service.

Quand les transformateurs de puissance subissent des contraintes internes ou externes, les gaz caractéristiques de chaque défaut apparaissent, et leur concentration dépend de l'intensité de celui-ci et de son activité. Les résultats obtenus à partir de la chromatographie en phase gazeuse indiquent les quantités relatives dissoutes des gaz dans l'huile en parties par million (ppm). Les principaux gaz qui peuvent être identifiés et déterminés sont :

- Les gazes- Hydrocarbure et hydrogène: méthane (CH_4), éthane (C_2H_6), éthylène (C_2H_4), acétylène (C_2H_2), propylène et hydrogène (H_2).
- Les oxydes de Carbone: carbone monoxyde (CO) et carbone dioxyde (CO_2).
- l'oxygène (O_2) et l'azote (N_2) (atmosphère). [33]

2.3.1 Historique de AGD:

L'identification des gaz dans le matériel électrique avait d'abord été utilisée pour distinguer entre les gaz combustibles et non combustibles produits dans les transformateurs depuis les années vingt du 19ème siècle. Ceci a été réalisé en brûlant les gaz rassemblés à partir de l'échantillon ou du robinet du relais Buchholz.

Initialement, la procédure visant à détecter la présence d'hydrogène, ce qui signifia qu'il y avait un défaut réel dans le transformateur du moment que celui ci peut être présent dans tous les défauts. Au cours des années 30, la procédure a été améliorée pour permettre simultanément à l'hydrogène, à l'acétylène et au Monoxyde de carbone d'être détectés, ce qui a permis une certaine déduction de la nature du défaut en particulier, la présence d'acétylène qui signifia l'existence d'un défaut de forte énergie, et le monoxyde de carbone associé à l'implication de la cellulose.

Le développement de: la chromatographie, la spectrométrie de masse, les techniques infrarouges et les méthodes analytiques de séparation liquide-gaz entre 1955-1965 ont conduit à l'analyse de gaz dissous qui était impossible à faire jusqu'au la, sauf que lorsque les gaz atteindront leur saturation pour devenir libres et mesurables après à une alarme du Buchholz (défaut intense). Ce ci constitue un risque imminent d'avarie du transformateur ; et l'arrivée donc de la méthode des gaz dissous avait pallié à ce problème. [36]

2.3.2 Théorie de l'évolution de gaz :

La composition des gaz produits lors d'un défaut et leur concentration est influencée par plusieurs facteurs tels que l'historique des événements et de maintenance parvenue sur le transformateur, la charge qu'il transitait, l'état de son isolation, le degré de contamination ainsi que l'endroit du défaut. Néanmoins, il est possible de lier certains modes d'évolution des gaz à l'énergie entraînée par le défaut qu'il faut associer aux conditions d'exploitation et à la conception du transformateur pour percevoir la gravité du problème. L'effet immédiat de la rupture sur les molécules d'hydrocarbures comme résultat de l'énergie produite par le défaut est la création des radicaux libres (**Fig 2.1**) qui se recombinent par la suite pour produire des gaz hydrocarbures à bas poids moléculaires. C'est ce processus de recombinaison qui est en grande partie responsable de la formation des gaz. [36]

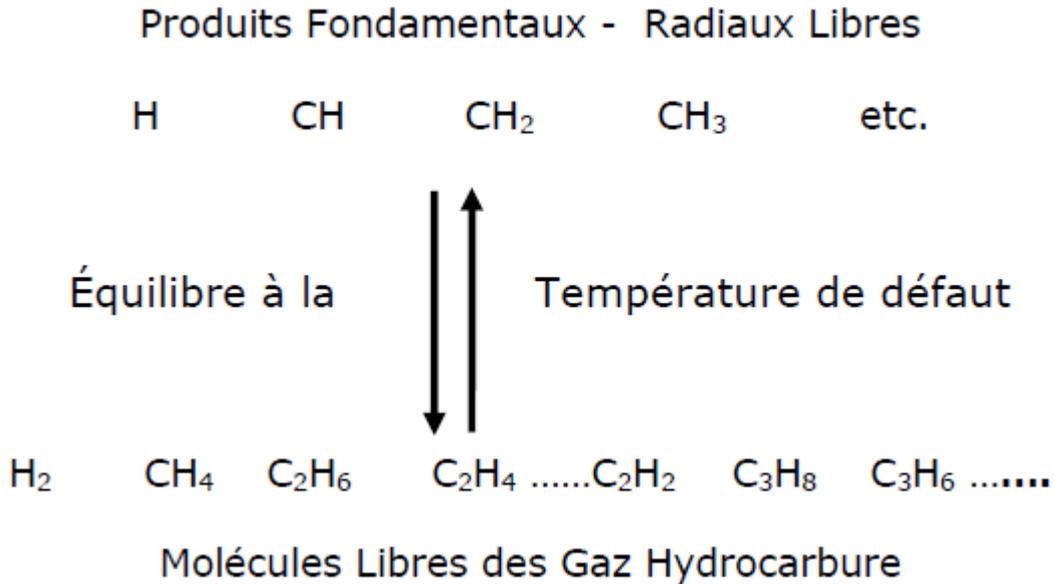


Fig 2.1 : Radicaux libres résultant de l'échauffement de l'huile minérale [36]

La quantité de chaque gaz individuel dépend de la température au voisinage du point soumis à une contrainte. Halstead propose un modèle thermo-dynamique pour décrire la relation entre le défaut de température et les caractéristiques du gaz, en supposant que tous les hydrocarbures dans l'huile sont décomposés en même produit et que chaque produit est en équilibre avec tous les autres. Le taux d'évolution de chaque gaz peut être calculé à n'importe quelle température, de sorte qu'une relation entre la génération du gaz et la température peut être obtenue pour chaque gaz. L'analyse de cette relation indique que des gaz sont produits avec une augmentation de la température [27]. La **figure 2.2** suivante montre cette relation.

On remarque que l'**hydrogène** est produit à basses températures et sa quantité augmente avec l'augmentation de la température, alors que l'**acétylène** est produit à une température très élevée (près de 700°C) et augmente également avec l'augmentation de la température.

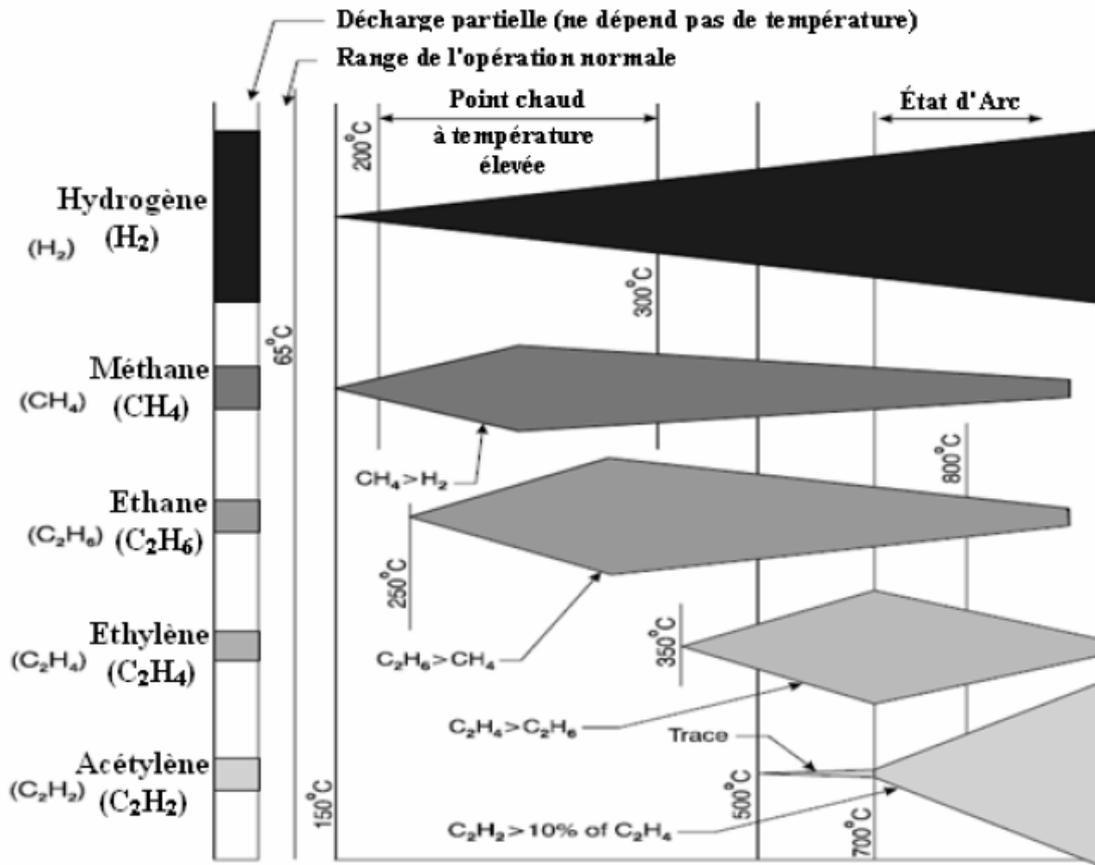


Fig 2.2 : Evolution des gaz dissous en fonction de la To de l'huile [37]

2.3.3 Interprétation et analyse des gaz dissous :

Tous les transformateurs génèrent de gaz dans une certaine mesure à la température d'exploitation normale. Mais de temps en temps, une concentration anormale peut se produire provenant d'une surchauffe locale ou générale, des problèmes d'origine diélectrique, ou à partir d'une combinaison de ces éléments. Dans le matériel électrique, ces anomalies sont appelées "défauts" ou défaillances si la gravité est plus poussée. Les défauts de type thermique, couronne ou arcs électriques sont décrits comme suit :

2.3.3.1 Défauts thermiques : en se référant aux normes (CEI, IEEE), la décomposition de l'huile minérale entre les températures de 150 C° à 500 C°, produit des quantités relativement importantes des gaz de faible masse moléculaire tels que l'hydrogène (H₂), le méthane (CH₄) et l'éthane (C₂H₆) avec des quantités de gaz moins importantes d'éthylène (C₂H₄). Une température du défaut plus élevée produira une concentration plus élevée de ce gaz. S'il y'a implication de la cellulose, le dioxyde de carbone (CO₂) ainsi que le monoxyde du carbone (CO) se formeront à des concentrations qui

dépendent toujours de l'intensité du défaut avec l'endroit de sa localisation. Par contre, l'acétylène (C_2H_2) se forme quand le transformateur est soumis à un arc électrique de forte énergie.

2.3.3.2 Défaits électriques :

- **Décharges de basse intensité** : Les décharges de faible énergie telles que les décharges partielles produisent principalement de l'hydrogène, avec quelques traces d'acétylène et du méthane. Si, l'intensité de la décharge augmente, les concentrations d'acétylène, d'hydrogène et d'éthylène augmenteront davantage.

- **Arc d'intensité élevée** : pour des arcs de forte énergie, l'acétylène se produira de manière plus prononcée et significative. [30]

2.3.4 Différentes méthodes d'analyse des gaz dissous :

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, on a généralement recours aux méthodes suivantes :

2.3.4.1 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 [38].

Parmi ces méthodes, on trouve :

- la méthode CEI 60599,
- la Méthode IEEE,
- la méthode CEGB/Rogers,
- la Méthode de Doernenburg.

2.3.4.2 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 [39].

La représentation graphique des trois gaz sur le triangle appelé "**Triangle de Duval**" dépend de la surface sur laquelle un diagnostic est mené.

2.3.4.3 Méthode des gaz-clés :

Le rapport entre la température et les types de gaz de décomposition de l'huile et de la cellulose sert de base à une détermination qualitative des types de défaut à partir des gaz qui sont typiques, ou prédominants, à diverses températures. Ces gaz majeurs et leurs proportions sont appelés « gaz-clés ». Cette technique fournit des courbes pour quatre types de défaut généraux, à savoir : thermique (décomposition de l'huile), thermique (décomposition de la cellulose), électrique (effet de couronne) et électrique (contournement). Les procédures détaillées sont décrites dans la norme IEEE C7.104-1991. [30].

2.3.4.4 Autres méthodes d'interprétation :

a) Méthode du Nomogramme De Church:

La méthode de Church diffère des précédentes par l'utilisation simple des valeurs absolues directement tracées sur un graphe. Il s'agit d'une combinaison du concept de rapport des gaz de défaut et de valeurs définies. Cette méthode vise à fournir à la fois une représentation graphique des données de gaz de défaut et les moyens d'interpréter leur signification.

Le nomogramme est constitué d'une série d'échelles logarithmiques verticales représentant les concentrations des gaz individuels. Des lignes droites sont tracées entre échelles adjacentes pour relier les points qui représentent les valeurs des concentrations des gaz individuels. Les pentes de ces lignes sont les critères de diagnostic qui servent à déterminer le type de défaut. Des ajustements des échelles sont parfois nécessaires, compte tenu des historiques d'utilisation des transformateurs défectueux. [38]. Cette méthode permet de diagnostiquer quatre types de défauts qui sont: la décharge partielle, la surchauffe, l'arc et la dégradation de la cellulose. Elle est particulièrement bien adaptée pour une évaluation manuelle. [40]

b) Méthodes Schliesinger :

Il s'agit d'une technique de rapports combinés avec des seuils de concentration de gaz. La combinaison d'un rapport et d'une limite de concentration de gaz se traduit par un code qui peut servir

Chapitre 02 : Revue sur le diagnostic des transformateurs de puissance

à l'interprétation des résultats. Cinq rapports sont utilisés. Il s'agit de C_2H_2/H_2 , C_2H_2/C_2H_6 , H_2/CH_4 , C_2H_4/C_2H_6 et CO_2/CO . Les codes sont extraits en fonction des rapports. L'étape suivante consiste à trouver le code pour le niveau de concentration pour C_2H_2 , H_2 .

La somme de CxHx et la somme de la concentration de CO et de CO2. Pour ces gaz, il existe une plage de concentration (de...jusqu'à...). Selon la concentration de ces gaz, des codes sont extraits de la table. Des combinaisons de codes sont répertoriées dans la table des diagnostics. Cette méthode permet de distinguer plusieurs défauts. [38]

2.4 Conclusions:

Dans ce chapitre, une revue sur l'importance du diagnostic des transformateurs de puissances et de son intérêt, sur les principaux défauts qui peuvent apparaître et sur les différentes méthodes d'analyse des gaz dissous sont soigneusement étalés.

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

3.1 Introduction :

Le diagnostic des défauts est basé sur l'analyse des gaz dissous dans l'huile (AGD). Comme méthodes de diagnostic traditionnelles Parfois il y a un défaut qui conduit à des erreurs fatales. Parmi ces raisons on trouve :

1. Il existe une incohérence et une ambiguïté considérables dans leur application des méthodes, en raison de la validité des plages spécifiées des rapports.
2. Cacher les nombreux défauts devant le plus évident.
3. La limite de la prise de décision (la présence d'ambiguïté).

Des solutions aux problèmes peuvent être trouvées et contrôlées sur la nature du défaut ou de la défaillance en utilisant diverses techniques d'intelligence artificielle (IA), alors que ses derniers termes font référence à la logique floue (LF), aux systèmes experts (SE) et aux réseaux de neurones artificiels (ARN).

3.2 Les réseaux de neurones :

Les réseaux de neurones artificiels constituent une alternative aux systèmes experts pour le traitement des alarmes. L'origine des réseaux de neurones vient de l'essai de modélisation mathématique du cerveau humain les premiers travaux datent de 1943 et sont l'oeuvre de W.M. Culloch et W. Pitts. Ils supposent que l'impulsion nerveuse est le résultat d'un calcul simple effectué par chaque neurone et que la pensée née grâce à l'effet collectif d'un réseau de neurone interconnecté (figure 3.1).

Les RNA constituent une technique de traitement de données bien comprise et bien maîtrisée. Ces techniques s'intègrent parfaitement dans les stratégies de commande. En effet, elles réalisent des fonctionnalités d'identification, de contrôle ou de filtrage, et prolonge les techniques classiques de l'automatique non linéaire pour aboutir à des solutions plus efficaces et robustes.[41]

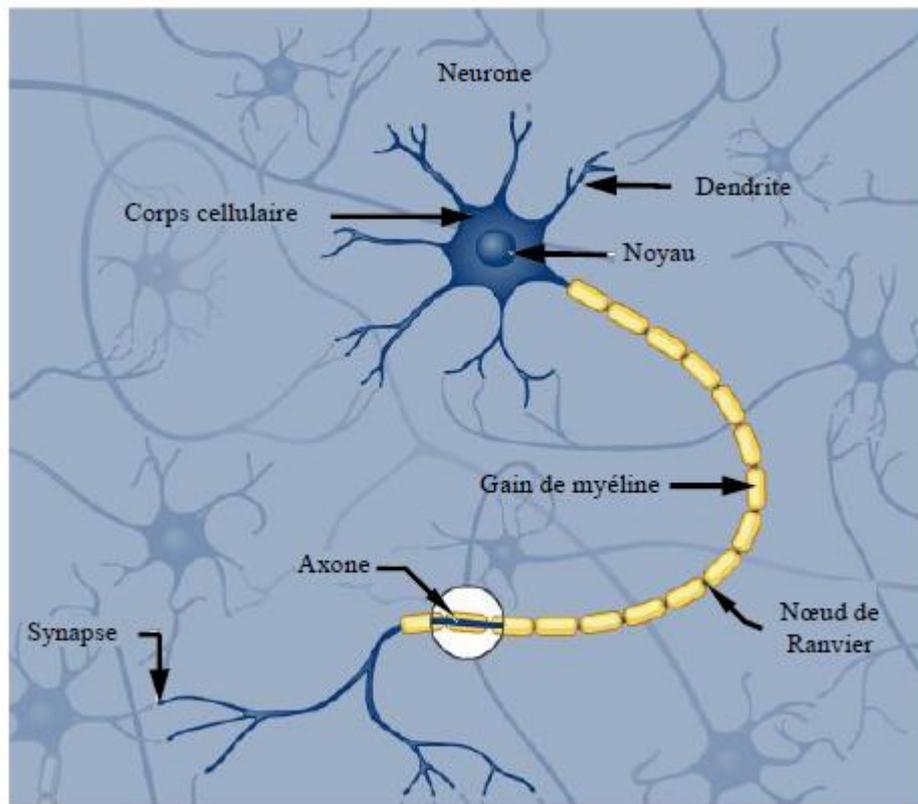


Fig 3.1: Modèle d'un neurone biologique.[42]

3.2.1 Architecture d'un réseau neurone :

L'architecture d'un réseau de neurones est la façon dont les neurones sont ordonnées et connectés entre eux au sein d'un même réseau. C'est alors un maillage de plusieurs neurones, généralement organisé en couches : couche d'entrée, couches cachées et couche de sortie. L'architecture d'un réseau de neurones est la façon dont les neurones sont ordonnées et connectés entre eux au sein d'un même réseau. C'est alors un maillage de plusieurs neurones, généralement organisé en couches : couche d'entrée, couches cachées et couche de sortie [43]:

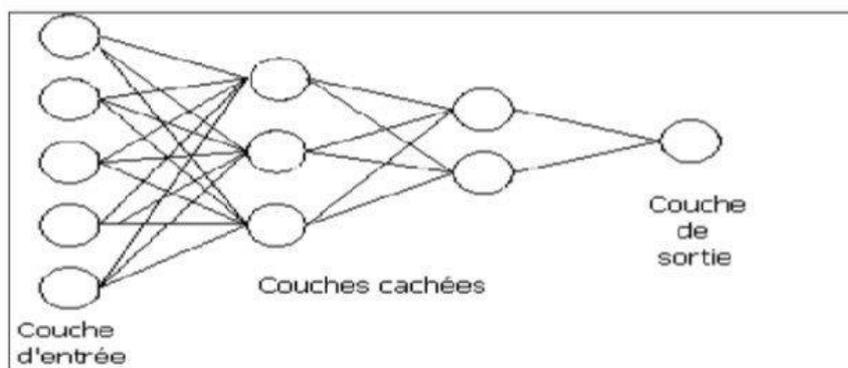
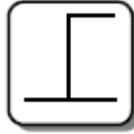


Fig 3. 2: Exemple simple de réseau de neurones

3.2.2 Fonctions d'activations :

Il se trouve que plusieurs natures de la fonction d'activation existent. Différentes fonctions de transfert pouvant être utilisées comme fonction d'activation du neurone sont énumérées au tableau 3.1.

Tableau 3. 1: Différentes fonctions d'activations utilisées dans les RNA.[44]

| Nom de la fonction | Relation entrée/sortie | Icône | Nom MATALB |
|-----------------------------|--|--|------------|
| Seuil | $y = 0 \quad si \quad s < 0$ $y = 1 \quad si \quad s \geq 0$ |  | hardlim |
| Seuil symétrique | $y = -1 \quad si \quad s < 0$ $y = 1 \quad si \quad s \geq 0$ |  | hardlims |
| Linéaire | $y = s$ |  | purelin |
| Linéaire saturée | $y = 0 \quad si \quad s \leq 0$ $y = s \quad si \quad 0 \leq s \leq 1$ $y = 1 \quad si \quad s \geq 1$ |  | satlin |
| Linéaire saturée symétrique | $y = -1 \quad si \quad s < -1$ $y = s \quad si \quad -1 \leq s \leq 1$ $y = 1 \quad si \quad s > 1$ |  | satlins |
| Linéaire positive | $y = 0 \quad si \quad s \leq 0$ $y = s \quad si \quad s \geq 0$ |  | poslin |
| Sigmoïde | $y = \frac{1}{1 + exp^{-s}}$ |  | logsig |
| Tangente hyperbolique | $y = \frac{e^s - e^{-s}}{e^s + e^{-s}}$ |  | tansig |
| Compétitive | $y = 1 \quad si \quad s \text{ maximum}$ $y = 0 \quad autrement$ |  | compet |

3.2.3 L'apprentissage :

L'apprentissage est un processus dynamique et itératif permettant de modifier les paramètres d'un réseau en réaction avec les stimuli qu'il reçoit de son environnement. Le type d'apprentissage est déterminé par la manière dont les changements de paramètre surviennent .

Cette définition implique qu'un réseau se doit d'être stimulé par un environnement, qu'il subisse des changements en réaction avec cette stimulation, et que ceux-ci provoquent dans le futur une réponse nouvelle vis-à-vis de l'environnement. Ainsi, le réseau peut s'améliorer avec le temps.[45]

L'apprentissage n'est pas modélisable dans le cadre de la logique déductive : celle-ci en effet procède à partir de connaissances déjà établies dont on tire des connaissances dérivées. Or il s'agit ici de la démarche inverse : par observations limitées tirer des généralisations plausibles.

La notion d'apprentissage recouvre deux réalités [45]:

- La mémorisation : le fait d'assimiler sous une forme dense des exemples éventuellement nombreux ;
- La généralisation : le fait d'être capable, grâce aux exemples appris, de traiter des exemples distincts, encore non rencontrés, mais similaires.

3.2.4 Domaines d'application des réseaux de neurones artificiels :

Aujourd'hui, les réseaux de neurones artificiels ont de nombreuses applications dans des secteurs très variés :

- Traitement d'images : reconnaissance de caractères et de signatures, compression d'images, reconnaissance de forme, cryptage, classification, etc.
- Traitement du signal : filtrage, classification, identification de source, traitement de la parole...etc.
- Contrôle : commande de processus, diagnostic, contrôle qualité, asservissement des robots, systèmes de guidage automatique des automobiles et des avions...etc.
- Défense : guidage des missiles, suivi de cible, reconnaissance du visage, radar, sonar, lidar, compression de données, suppression du bruit...etc.
- Optimisation : planification, allocation de ressource, gestion et finances, etc.
- Simulation : simulation du vol, simulation de boîte noire, prévision météorologique, recopie de modèle...etc.

3.3 Logique floue :

La logique floue est une extension de la logique booléenne créée par Lotfi Zadeh en 1965 en se basant sur sa théorie mathématique des ensembles flous, qui est une généralisation de la théorie des ensembles classiques. Classiquement, les règles de cette logique reposent sur la possibilité pour une variable à prendre deux valeurs: «vrai» ou «faux» (0 ou 1). Les variables sont combinées dans des propositions exprimées selon une syntaxe établie (fonctions logiques) dont le résultat n'est autre qu'une variable logique établie sur une base théorique solide.

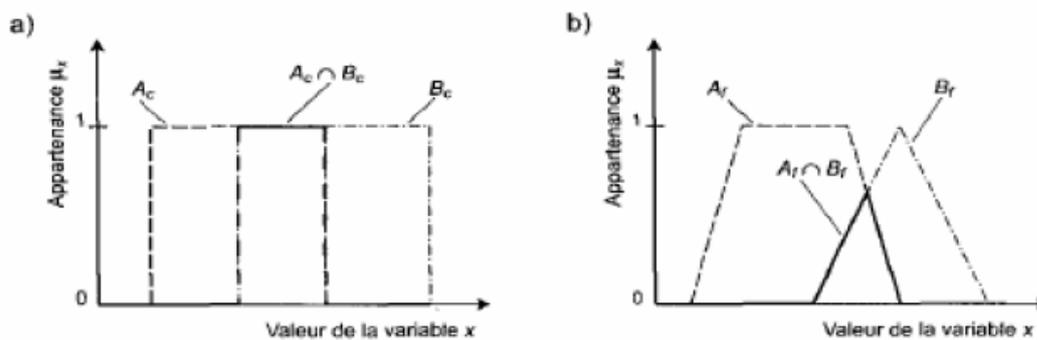


Fig 3. 3: Exemples de définition d'un ensemble : (a) définition selon la logique formelle classique ; (b) définition selon la logique floue.

Cette représentation formelle s'avère souvent trop rigide pour prendre en compte toutes les nuances nécessaires. La logique floue ou logique à plusieurs valeurs permet de mieux représenter le raisonnement nuance d'un expert humain. Comme le montre la figure 3.2, en logique classique la notion d'appartenance à un ensemble est caractérisée par une variable booléenne. Le concept de logique floue permet de définir des zones pour lesquelles cette fonction d'appartenance se situe entre ces deux valeurs.

3.3.1 Structure et fonctionnement d'un système d'inférence flou (SIF)

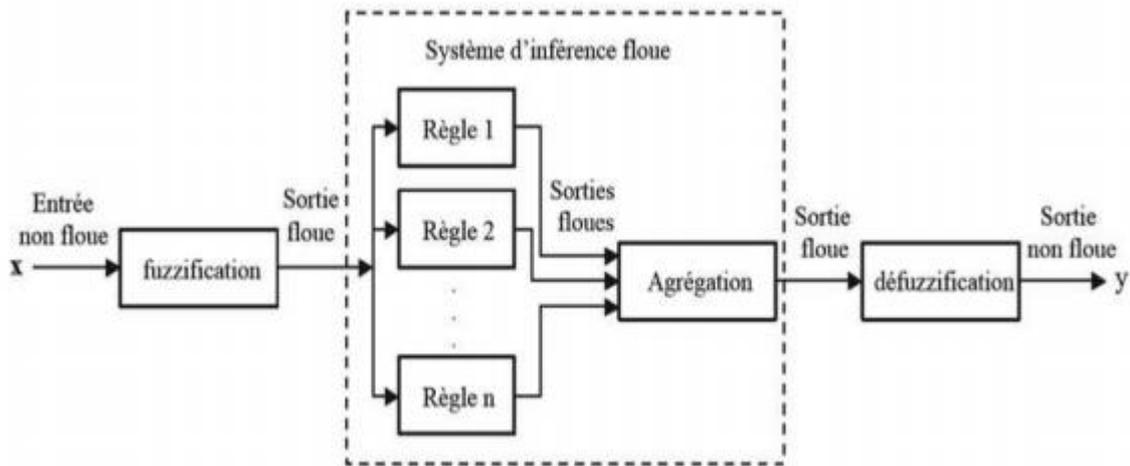


Fig 3. 4: Structure d'un système flou

3.4 Systèmes experts :

Un système expert est un système informatique qui a été créé pour résoudre de nombreux problèmes dans le cas d'un transformateur, c'est un outil capable de reproduire les mécanismes cognitifs d'un expert dans un domaine particulier. Il existe de nombreuses variantes de systèmes experts qui utilisent différentes méthodes pour déterminer la nature de l'erreur et accéder à l'intelligence artificielle.

Le système expert est construit sur la base d'un programme, qui doit être alimenté en données par l'utilisateur pour être exploitées si une fois un problème parviendra dans le futur sur le transformateur. Il suit les processus logiques de pensée que doit un expert utiliser pour déterminer quelles sont la cause et la nature du problème.

3.4.1 Structure et fonctionnement d'un système expert :

L'architecture d'un système expert typique est constituée de plusieurs modules qui s'interagissent :

- L'interface utilisateur sert à simplifier la communication, elle peut utiliser la forme question-réponse, le menu, le langage naturel etc.
- La base de connaissances contient les connaissances concernant la résolution du problème.
- Le moteur d'inférence applique une stratégie de résolution en utilisant les connaissances et ceci pour en dériver une nouvelle information.

- La base de faits contient les données spécifiques liées à l'application traitée. Elle peut contenir aussi les solutions intermédiaires ou les conclusions partielles trouvées lors de l'inférence.
- Le module d'explication permet au système expert d'expliquer son raisonnement.
- L'éditeur permet l'édition des connaissances dans la base. [46]

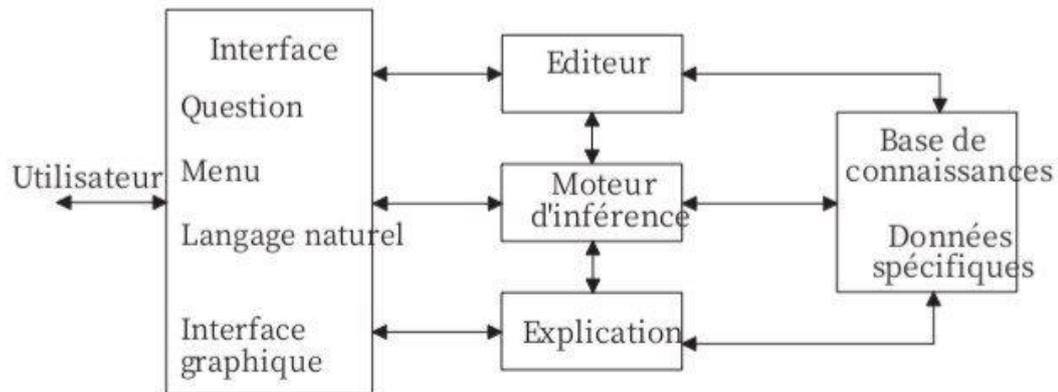


Fig 3. 5 : Structure d'un système expert[6]

3.4.2 Domaines d'application :

Les systèmes experts ont été conçus pour résoudre certains types de problèmes comme en médecine, en droit, en chimie, en éducation etc. Les catégories de problèmes abordés par les systèmes experts sont :

- L'interprétation ou la construction d'une description abstraite à partir de données.
- Le prédiction des conséquences à partir de situations données.
- Le diagnostic d'une défaillance à partir d'un ensemble d'observations.
- La conception d'une configuration de composants à partir d'un ensemble de contraintes.
- La planification d'une séquence d'actions pour l'accomplissement d'un ensemble de buts à partir de certaines conditions de départ et en présence de certaines contraintes.
- La réparation d'un dysfonctionnement.
- le contrôle du comportement d'un environnement complexe.[46]

3.5 Systèmes hybrides :

Pour la recherche d'un meilleur rendement des systèmes de diagnostics intelligents, plusieurs chercheurs ont mis au point des systèmes hybrides combinés de deux ou de plusieurs méthodes d'intelligence artificielle pour la résolution de diagnostics complexes pour des défauts dans les transformateurs de puissance. Nous avons trouvé dans la littérature la combinaison de la logique floue et des systèmes experts, systèmes experts et les réseaux neuronaux, réseaux de neurones et logique floue et d'autres associations. [47]

3.6 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté la diagnostic des défauts du transformateur de puissance en utilisant des méthodes modernes basées sur l'intelligence artificielle. Il s'appuie sur les méthodes les plus utilisées par les chercheurs dans ce domaine, comme : la logique floue et le réseau de neurones, système expert et système hybride.

En parlent de chaqu'une de ces methodes, on peut dire que l'application des réseaux de neurones artificielle est plus convenablement et précis que les autres méthodes. Pour cela, on a choisi cette méthode pour détecter les défauts naissants dans le transformateur de puissance et puis localiser ces défauts dans les parties essentielles du transformateur.

Conclusion générale

Le diagnostic et la détection de défauts mobilisent à ce jour beaucoup de chercheurs dans différents domaines industriels. Les transformateurs de puissance composants critiques de transport d'énergie électrique ne font pas l'exception. Les transformateurs de puissance sont des composants décisifs. Ils sont soumis à de nombreuses contraintes et nécessitent une surveillance et un suivi régulier. Un transformateur défaillant produit des situations parfois très lourdes de conséquences: techniques, financières, commerciales, et environnementales, d'où la nécessité de détecter et d'identifier le défaut dès possible.

L'analyse des gaz libres et des gaz dissous dans l'huile (AGD) est l'un des outils de diagnostic les plus utilisés pour la détection et l'évaluation de défauts dans les matériels électriques. Les recherches et l'expérience ont permis de trouver et de mettre au point des méthodes permettant l'utilisation de certains produits qui se trouvent dans l'huile afin de déterminer l'état des transformateurs.

Les méthodes conventionnelles d'analyses de gaz dissous dans les transformateurs de puissance (Méthodes de Doernenburg, rapport de Rogers, rapport CEI, DUVAL, IEEE (TDCG et Gaz clés), leurs convergences, avantages et inconvénients sont dévoilées. Les limitations de ces méthodes imposent le recours à des systèmes plus performants de diagnostic tels que les techniques d'intelligences artificielles. Les méthodes modernes les plus utilisées (réseaux de neurones ANN, systèmes experts, systèmes flous) peuvent apporter de bonnes solutions pour le diagnostic.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Mme Talhi Mama, EP. Bouri, «Contribution à l'étude du phénomène d'électrification par écoulement dans les transformateurs de puissance»,Thèse de Doctorat, Département Electrotechnique, Université d'Oran Mohamed Boudiaf, pp 10, 2017-2018.
- [2] Amel NAIT DJOUDI, «Caractérisation de l'huile pour transformateurs en service», Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE, Département Génie Electrique, UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, pp 3, soutenu publiquement le 29 septembre 2014.
- [3] REFFAS Abderrahim, « Etude des Décharges Electriques dans les Huiles Isolantes Végétales », thèse de doctorat, département d'Electrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène, pp12, Soutenu publiquement le 17/03/2018.
- [4] A. Bourgeois, « Etude Du Phenomene D'électrification Par Ecoulement Sur Les Cartons Des Transformateurs De Puissance » Docteur De L'inp Grenoble, These, Institut National Polytechnique, Grenoble, 9 Fevrier 2007.
- [5] Mme Talhi Mama, EP. Bouri, «Contribution à l'étude du phénomène d'électrification par écoulement dans les transformateurs de puissance»,Thèse de Doctorat, Département Electrotechnique, Université d'Oran Mohamed Boudiaf, pp 11, 2017-2018.
- [6] REFFAS Abderrahim, « Etude des Décharges Electriques dans les Huiles Isolantes Végétales », thèse de doctorat, département d'Electrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène, pp13, Soutenu publiquement le 17/03/2018.
- [7] Noëlle BERGER Service Sécurité ATOFINA Centre de recherches Rhône-Alpes, « Liquides isolants en électrotechnique - Caractéristiques des produits », ARTICLE TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR Techniques L'expertise technique et scientifique de référence , publié le 10/11/2002.
- [8] Noëlle BERGER Service Sécurité ATOFINA Centre de recherches Rhône-Alpes, « Liquides isolants en électrotechnique - Présentation générale», ARTICLE TECHNIQUES DE L'INGÉNIEUR Techniques L'expertise technique et scientifique de référence , publié le 10/05/2002.
- [9] Mme Talhi Mama, EP. Bouri, «Contribution à l'étude du phénomène d'électrification par écoulement dans les transformateurs de puissance»,Thèse de Doctorat, Département Electrotechnique, Université d'Oran Mohamed Boudiaf, pp 13, 2017-2018.
- [10] R. Barnikas, electrical insulating liquids, 3rd ed. montreal: ASTM, 1994.
- [11] N. Berger, « Liquides Isolants En Electrotechnique. Techniques De L'ingenieur. D 2470.. »
- [12] C. L. 11/06/2016, « <Http://Www.Cbsa-Asfc.Gc.Ca/Sima-Lmsi/I-E/Ad1395/Ad1395->

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[I12-De-Fra.Html#Archived.](#) »

[13] I. Fofana, « 50 Years in the Development of Insulating Liquids », IEEE Electr. Insul. Mag., Vol. 29, No. 5, pp. 13–25, 2013.

[14] L. R. Rudnick, Synthetics, Mineral Oils, and Bio-Based Lubricants Chemistry and Technology. New York: Taylor & Francis Groupe, 2006.

[15] X. Qgr, D. Xnl, H. F. Hqylurqphqw, I. Ljk, Y. Vlolfqrh, and R. L. O. Ri, “Analysis of Gasses Generated by Electrical Discharges in Low Viscosity Silicone Oil,” in International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis, 2008.

[16] O. Idir, « Etude du vieillissement thermique et électrique des huiles à base d'esters naturels », Mémoire de magistère, Alger, 2014.

[17] Mme Talhi Mama, EP. Bouri, «Contribution à l'étude du phénomène d'électrisation par écoulement dans les transformateurs de puissance»,Thèse de Doctorat, Département Electrotechnique, Université d'Oran Mohamed Boudiaf, pp 17, 2017-2018.

[18] H. J.Martin , C Eng,Fieee, The J And P Transformer Book , A Partial Technology Of Power Transformer Edition Twelfth Newnes 1998.

[19] C. Perrier, « étude des huiles et des mélanges a base d'huile minérale pour transformateur de puissance : recherche d'un mélange optimal », Thèse de doctorat, école centrale de Lyon, 2005.

[20] M. Chevreuil, M. Blanchard, M. J. Teil, and A. Chesterikoff, “Polychlorobiphenyl Behaviour In The Water / Sediment System Of The Seine River , France,” water Ressources, vol. 32, no. 4, pp. 1204–1212, 1998.

[21] W. Canada, H. P. Branch, and T. Pasture, « Polychlorobiphenyl in Children's Blood » Environmental Research, vol. 220, pp. 213–220, 1987.

[22] A. Domenico, A. R. Fulgenzi, N. Iacovella, and C. La Rocca, « Differences in polychlorobiphenyl (PCB) contamination patterns in various environmental matrices, » The Science of the Total Environment, pp. 1439–1451,1993

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [23] REFFAS Abderrahim, « Etude des Décharges Electriques dans les Huiles Isolantes Végétales », thèse de doctorat, département d'Electrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène, pp19, Soutenue publiquement le 17/03/2018.
- [24] C.L.J.2016, https://Library.E.Abb.Com/Public/7c6ea878f4f2b27fc1257b130057e1d5/11aa101003aafr_Large-Distribution-Transformers.Pdf.
- [25] REFFAS Abderrahim, « Etude des Décharges Electriques dans les Huiles Isolantes Végétales », thèse de doctorat, département d'Electrotechnique, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediène, pp20, Soutenue publiquement le 17/03/2018.
- [26] C. Myers, «Transformers – Condition Monitoring by Oil Analysis, Large or Small; Contentment or Catastrophe», Proceedings of the 1998 1st IEE/IMEChE International Conference on Power Station Maintenance – Profitability through Reliability, pp.53-58.
- [27] Z.Wang , «Artificial Intelligence Applications in the Diagnosis of Power Transformer Incipient Faults», These de Doctorat August 8, 2000 Blacksburg, Virginia.
- [28] CIGRE, Working Group 09 of CIGRE Study Committee 12, «Lifetime Evaluation of Transformers», Electra, 150 :38-52, October 1993.
- [29] Alain Schenk, «Surveillance Continue des Transformateurs de Puissance par Réseaux de Neurones Auto Organisés», Thèse de Doctorat N°2390 (2001) Ecole Polytechnique Fédérale De Lausanne, 2001.
- [30] IEEE Std C57.104-1991 - revision of IEEE C57.104-1978 , «IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil- Immersed Transformers».
- [31] Tim Gradnik , «Thermal profile of power transformers and their relevant papers ageing phenomena» EIMV elektro institut Milan vidar December 17-18, 2008, Torino.
- [32] Tai Chee Kheng, « Impact of Moisture on the Strength of Paper- Insulated Conductor» Department of Computer Science & Electrical Engineering The University of Queensland, St. Lucia, Brisbane, Queensland 4072 Australia, 20 October 2000.
- [33] SHIH -HUA (Patrick) Kuo , «Diagnostics of Transformer Condition by Polarization Current and Oil Conductivity Measurements» Undergraguade Thesis, School of Information Technology and Electrical Engineering, The University of Queensland, October 2002.
- [34] CEI 60599, Norme Internationale , «Matériels électriques imprégnés d'huile minérale en service - Guide pour l'interprétation de l'analyse des gaz dissous et des gaz libres» Deuxième édition 03-1999.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [35] K.F. Thang, R.K. Aggarvval, A. J. McGrail, D.G. Esp, « Application of Self- Organising Map Algorithm for Analysis and Interpretation of Dissolved Gases in Power Transformers», 2001 IEEE.
- [36] Martin J. Heathcote , «The J & P Transformer Book» Twelfth edition, A Practical Technology of the Power Transformer, Reed Educational and Professional Publishing Ltd , 1998.
- [37] R.R.Rogers, «IEE and IEC Codes to Interpret Incipient Faults in Transformers, using Gas in Oil Analysis», IEEE Trans. Electr.Insul. 1978, EL., 13, N° 5, pp.349-354.
- [38] A.Möllmann et B.Pahlavanpour, «Nouvelles Directives Pour l'Interprétation de l'Analyse des Gaz Dissous dans les Transformateurs dans l'Huile» Groupe d'Action15.01.01, Electra Cigre N° :186, octobre 1999.
- [39] M. Duval, « Dissolved Gas Analysis – It Can Save Your Transformer», IEEE Electrical Insulation Magazine, N°5, 22-27, 1989.
- [40] Michel Bélanger, « Transformateur de Puissance à l'huile Minérale» Recherche du Dysfonctionnement Méthodologie de l'entretien Expertise, Seidel, Janvier 2002.
- [41] Youcef Djeriri, « Les Réseaux de Neurones Artificiels », <https://www.researchgate.net/publication/319939107>, 20 septembre 2017, pp2.
- [42] Youcef Djeriri, « Les Réseaux de Neurones Artificiels », <https://www.researchgate.net/publication/319939107>, 20 septembre 2017, pp5.
- [43] A AZZAB.A BRIANE.M BENZAOUAGh, »Application des reseaux de neurons artificial pour la classification:cas des défaillances d'entereprises », Thèse licences,Voll Issue°2,pp03 .
- [44] Youcef Djeriri, « Les Réseaux de Neurones Artificiels », <https://www.researchgate.net/publication/319939107>, 20 septembre 2017, pp11.
- [45] Youcef Djeriri, « Les Réseaux de Neurones Artificiels », <https://www.researchgate.net/publication/319939107>, 20 septembre 2017, pp17.
- [46] MARIA MALEK, « Systemes experts-Notes de cours », Thèse de Doctorat,Département systèmes informatiques formels et intelligents,pp.4.5.6,Edition :2008.
- [47] Jose Geraldo Arantes "Diagnosis of oil Insulator in Power Transformer by the Dissolved Analysis of Gases through Neural Networks" Federal university of Itajubá – Brazil, 2005.