

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene



Faculté d'Electronique et d'Informatique

Département d'Electrotechnique

Laboratoire des Systèmes Electriques et Industriels

Mémoire de Magister

En Electrotechnique

Option : Systèmes Electro-énergétiques

Présenté par

Fahem BENYAHIA

Ingénieur d'Etat en Electrotechnique (USTHB)

Thème

***Traitements du signal et des gaz dissous pour le
diagnostic des huiles de transformateurs***

Soutenu publiquement le 10 Décembre 2011, devant le jury composé de :

Président : M^r S. BOUAZABIA

Rapporteur: M^r H. MOULAI

Examineurs :

M^r A. MEKHALDI

M^r A. ZIANI

Invitée : M^{me} F. ABERKANE

Maître de conférences, USTHB

Maître de conférences, USTHB

Professeur, ENP

Maître de conférences, USTHB

Chargée de cours, USTHB

ملخص:

نعرض من خلال هذا العمل دراسة لتيارات الانفصام في الزيت المعدنية للمحولات, وكذلك الخصائص الفيزيوكيميائية للزيت و الغازات المتسربة. التيارات المختلفة سجلت لإعداد طريقة لتمييز التيارات للتمكن من حماية المحولات في الوقت الحقيقي. أعد هذا البرنامج بواسطة الشبكة العصبونية الاصطناعية, و تم التمييز بواسطة الموجات. أعد برنامج لتقييم تحاليل الغازات المتسربة.

الكلمات المفتاحية: الانفصام, تمييز التيارات, الموجات, الخصائص الفيزيوكيميائية, الغازات المتسربة

Résumé :

Nous présentons dans ce travail l'étude des courants de préclaquage dans l'huile minérale de transformateur ainsi que les propriétés physico-chimiques des huiles et les gaz dissous. Les différents types de courant ont été enregistrés dans le but de développer une technique de discrimination de ces courants basée sur leur forme et leur amplitude, et permettant d'avoir un dispositif complémentaire de diagnostic en temps réel pouvant servir à la protection des transformateurs. Un algorithme de discrimination a été développé par les réseaux de neurones artificiels (RNA), et la discrimination est faite sur la base de la transformée en ondelettes et de la droite de régression.

Un algorithme de test des analyses des gaz dissous a été développé pour renforcer le diagnostic par l'analyse des propriétés physico-chimiques.

Mots clés : Préclaquage, discrimination des courants, RNA, classification, ondelettes, droite de régression, propriétés physico-chimiques et diélectriques des huiles, gaz dissous.

Abstract :

We present in this work the study of pre-breakdown currents triggered in transformer mineral oil, oil's physico-chemical properties and dissolved gas analysis. Different types of current have been recorded in the purpose to develop a discrimination technique of this currents, mainly based on their shape in order to enable a complementary diagnosis tool that can serve as a on line transformer protection. A neural network based discrimination algorithm has been developed. The discrimination is based on wavelet transform and multi-linear regression line.

A DGA analysis algorithm was developed in order to support physic-chemical analysis diagnosis.

Key words: breakdown, current discrimination, ANN, classification, wavelet, linear regression, DGA, physico-chemical analysis

Remerciements

Remerciements

الحمد لله ربّ العالمين, خالق السماوات و الأرض, و جاعل الظّلمات و النّور
الحمد لله الذي وفّقني و منحني القوّة و الصّبر لإتمام هذه المذكرة
و صلّى الله على نبينا محمّد خاتم الأنبياء و الرّسل

Je remercie tout d'abord Dieu de m'avoir prêté santé et volonté pour mener à terme ce mémoire.

Je remercie beaucoup mes parents pour leurs aides et sacrifices, qu'ils trouvent ici tous signes de ma gratitude.

Au terme de ce travail, mes plus vifs remerciements vont à mon directeur de mémoire Monsieur H. MOULAI, pour m'avoir confié ce sujet et de l'avoir dirigé de façon continue et efficace et pour l'aide précieuse qu'il m'a apportée, ainsi que pour son soutien moral, sa compréhension et ses conseils le long de cette période. Qu'il trouve ici l'expression de ma sincère reconnaissance.

J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur S. BOUAZABIA, Maitre de Conférences à l'USTHB, de me faire honneur en acceptant de présider le jury.

Que Monsieur A. MEKHALDI, Professeur à l'ENP, et Monsieur A. ZIANI, Maitre de Conférences à l'USTHB, soient remerciés d'avoir accepté d'examiner ce travail.

Je remercie tous les enseignants qui m'ont enseigné tout le long de ma formation et grâce à qui je suis arrivé à ce stade aujourd'hui.

Ma gratitude va à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ce travail et à mes études.

Dédicaces

Dédicaces

Je dédie ce mémoire à :

-Mes chers parents,

-Mes chers frères et sœur,

-Ma famille,

-Mes amis.

Fahem

Table des matières

Table des matières

Introduction générale	1
Chapitre I - Caractérisation des Huiles Diélectriques des Transformateurs	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Défaillances et problèmes des transformateurs de puissance.....	4
I.3 Pourquoi est-il important de surveiller un transformateur ?.....	4
I.4 Rôles des liquides isolants.....	5
I.4.1 Fonction diélectrique.....	5
I.4.2 Fonction transfert de chaleur.....	6
I.5 Propriétés des liquides isolants.....	7
I.5.1 Propriétés Electriques.....	7
I.5.1.1 Permittivité ou la constante diélectrique.....	7
I.5.1.2 Conductivité et Résistivité.....	8
I.5.1.3 Facteur de dissipation diélectrique ($\tan \delta$).....	8
I.5.1.4 Rigidité diélectrique et Tension de claquage.....	8
I.5.2 Propriétés Physiques.....	9
I.5.2.1 Densité.....	9
I.5.2.2 Couleur et aspect.....	9
I.5.2.3 Viscosité.....	10
I.5.2.4 Point d'écoulement.....	10
I.5.2.5 Le point de congélation.....	10
I.5.2.6 La capacité thermique.....	11
I.5.2.7 La conductivité thermique.....	11
I.5.2.8 La masse volumique et le coefficient de dilatation volumique.....	11
I.5.3 Propriétés Chimiques.....	11
I.5.3.1 Acidité.....	11
I.5.3.2 Teneur en eau.....	12
I.5.3.3 Teneur en soufre.....	12
I.5.3.4 La stabilité à l'oxydation.....	12
I.5.3.5 Gassing.....	12
I.5.3.6 Teneur en particules.....	12
I.5.3.7 Teneur en gaz.....	13
I.5.4 Les propriétés au feu.....	13
I.5.4.1 Le point de feu.....	13
I.5.4.2 Le point d'éclair.....	13
I.6 Caractérisation des différents types d'huiles isolantes.....	14
I.6.1 Les huiles végétales.....	15
I.6.2 Huiles de synthèse.....	16
I.6.3 Huiles minérales.....	16
I.6.3.1 Introduction aux huiles minérales isolantes.....	16
I.6.3.2 Présentation d'une huile minérale isolante.....	17
I.6.3.2.1 Tendance paraffinique.....	18
I.6.3.2.2 Tendance naphénique.....	18
I.6.3.2.3 Tendance aromatique.....	18
I.7 Principales causes d'altération des propriétés diélectriques.....	18

I.7.1 L'humidité et l'oxygène.....	19
I.7.2 La température.....	20
I.7.3 Pollutions.....	20
I.7.4 Les décharges partielles.....	21
I.7.5 Le préclaquage.....	21
I.8 Conclusion.....	22

Chapitre II - Les phénomènes de décharge et de pré décharge

II.1 Introduction.....	23
II.2 Processus de formation et nature des streamers.....	23
II.3 Vitesse de propagation.....	24
II.4 Structure des streamers	26
II.5 Courants et émissions lumineuses accompagnant les streamers	27
II.6 Influence de différents paramètres sur les streamers.....	30
II.6.1 Influence des propriétés physiques du liquide.....	30
II.6.1.1 Influence de la viscosité.....	30
II.6.1.2 Influence de la masse volumique.....	30
II.6.1.3 Structure du liquide	31
II.6.2 Influence des variables d'état	31
II.6.2.1 Influence de la pression.....	31
II.6.2.2 Influence de la température.....	31
II.6.3 Influence du niveau de tension appliqué.....	32
II.6.4 Influence du rayon de courbure de la pointe	32
II.6.5 Influence des additifs.....	33
II.6.5.1 Additifs capteurs d'électrons.....	33
II.6.5.2 Additifs à bas potentiel d'ionisation.....	33
II.7 Courants étudiés.....	34
II.8 Fréquence d'apparition des streamers.....	34
II.9 Formes des courants.....	35
II.10 Formes des courants en fonction de la tension appliquée.....	37
II.11 Conclusion.....	39

Chapitre III – Caractérisation des signaux

III.1 Introduction.....	40
III.2 Transformée de Fourier.....	40
III.2.1 Transformée de Fourier et analyse temps-fréquences	40
III.2.2 Transformée de Fourier à fenêtre glissante.....	41
III.2.3 Limites de la TF à fenêtre glissante.....	42
III.3 Les Ondelettes.....	44
III.3.1 Historique.....	44
III.3.2 Transformée en ondelette.....	45
III.3.3 Transformée en ondelettes de Daubechies	46
III.4 Droite de régression.....	47
III.5 Réseaux de neurones.....	48
III.5.1 Historique.....	48
III.5.2 Les réseaux de neurones artificiels.....	49
III.5.2.1 Le neurone biologique.....	49
III.5.2.2 Neurone artificiel	50

III.5.2.3 Topologies de réseaux	52
III.5.2.4 Choix de l'architecture de RNA.....	53
III.5.2.5 Algorithmes d'apprentissage.....	54
III.5.3 Applications des réseaux de neurones	55
III.5.3.1 Prédiction	55
III.5.3.2 Classification.....	55
III.5.3.3 Contrôle.....	55
III.5.3.4 Filtrage	56
III.6 Conclusion.....	56

Chapitre IV – Propriétés physico chimiques et Analyse des huiles par les gaz dissous

IV.1 Introduction.....	57
IV.2 Analyse des huiles.....	57
IV.2.1 Propriétés et détérioration/dégradation de l'huile.....	57
IV.2.2 Evaluation de l'huile en service.....	58
IV.2.3 Procédures d'essais	58
IV.2.4 Classification des états des huiles en service.....	59
IV.3. Analyse des gaz dissous.....	60
IV.3.1 Mécanisme de formation des gaz dissous dans l'huile minérale isolante.....	60
IV.3.2 Méthodes d'Interprétation.....	61
IV.3.2.1 Méthode des gaz clés	61
IV.3.2.2 Méthode de la CEI 60599.....	62
IV.3.2.3 Méthode de Dornenburg.....	63
IV.3.2.4 Méthode de Rogers	64
IV.3.2.5. Méthode de DUVAL	65
IV.4 Test et résultats.....	66
IV.4.1 Présentation des résultats de l'algorithme.....	66
IV.4.2 Exploitation des résultats.....	70
IV.4.3 Discussion des résultats.....	71
IV.5 Conclusion.....	72

Chapitre V - Programmation et résultats

V.1 Introduction.....	73
V.2 Travail effectué.....	73
V.2.1 Numérisation des graphes.....	73
V.2.2 Création de la base de données.....	74
a) Découpage du signal en fenêtres.....	76
b) Droite de régression multilinéaire robuste.....	76
c) La transformée en ondelette.....	77
d) Attribution de la classe du signal.....	78
V.2.3 Apprentissage du réseau de neurones.....	79
V.2.4 Test du réseau de neurones.....	81
V.3 Schéma global de diagnostics.....	85
V.4 Conclusion.....	85
Conclusion générale.....	86
Bibliographie.....	88

Introduction générale

Introduction générale

Les transformateurs de puissance sont parmi les éléments les plus importants dans un réseau électrique. Leur place au sein de cette infrastructure est primordiale et critique. Ils sont normalement prévus pour fonctionner plus de 30 ans, ce qui fait de ces appareils l'une des machines les plus fiables construites par l'industrie électrique. Les défaillances des transformateurs en service sont très contraignantes pour l'exploitation et le développement du réseau. Ces défauts sont habituellement déclenchés par des contraintes électriques, thermiques et mécaniques ou d'autres incidents.

L'ingénieur a toujours cherché à trouver des techniques et méthodes lui permettant de diagnostiquer l'état intérieur d'un transformateur, notamment son système d'isolation. Cette question a fait l'objet de différentes normes consacrées aux techniques de mesure et aux méthodes de diagnostic. Une bonne partie des méthodes ainsi préconisées est effectuée sur un meilleur délai d'une journée ou carrément à l'arrêt du transformateur. Elles viennent parfois très tardivement, notamment lorsque le processus de dégradation est accéléré.

Plusieurs techniques et appareillages de surveillance ou de pré-diagnostic en temps réel ont été développés pour venir en appoint aux méthodes classiques. Elles sont basées sur la détection d'une moindre signature électrique, acoustique ou optique rayonnée par le transformateur. Ces signatures sont dues aux phénomènes de claquage et pré claquage dans les diélectriques liquides.

Le claquage des diélectriques liquides est loin d'être instantané. Il est précédé d'un ensemble de phénomènes dits de pré claquage. Ainsi, la compréhension des phénomènes de préclaquage amènerait à anticiper voire à éviter le claquage. L'étude des phénomènes de pré claquage des diélectriques liquides présente donc un intérêt certain tant du point de vue industriel que du point de vue de la physique.

Ces phénomènes ont fait l'objet de nombreuses études. Celles-ci ont porté principalement sur la forme et la vitesse des streamers ainsi que sur les paramètres électriques, optiques et acoustiques qui les accompagnent. Les courants, les émissions de lumière qui leur sont corrélées ainsi que les émissions sonores sont des paramètres privilégiés pour les concepteurs de capteurs devant servir d'élément moteur pour la protection des équipements dans lesquels ces huiles sont utilisées.

Nous nous proposons dans ce travail de développer une méthodologie de diagnostic et de surveillance de l'état de dégradation de l'isolation d'un transformateur à travers l'analyse de l'amplitude et de la forme des courants de décharges dans l'huile ainsi qu'à travers l'analyse des propriétés physico-chimiques et des gaz dissous.

Pour prendre les bonnes décisions concernant l'état de l'huile en temps réduit, les ingénieurs non expérimentés utilisent les systèmes intelligents pour se rapprocher de la qualité de diagnostic des experts. Le Réseau de Neurones Artificiel (RNA) est une technique largement utilisée dans le domaine du diagnostic et de la surveillance des systèmes industriels. Son usage a donné de bons résultats, ce qui nous a incités à l'introduire dans le système de diagnostic des huiles de transformateurs.

Nous présenterons un système de surveillance et de protection de l'état d'un transformateur contre les décharges issues des courants associés à la propagation des streamers positifs dans l'huile minérale de transformateur soumis aux tensions alternatives, et ceci sur la base de la classification des signaux par les réseaux de neurones artificiels.

Le présent travail est subdivisé en six chapitres. Le premier chapitre donne un aperçu sur les diélectriques liquides, leurs propriétés ainsi que leurs principales causes d'altération.

Dans le deuxième chapitre, nous parlerons des courants associés à la propagation des streamers dans les diélectriques liquides, ainsi que des signaux de courant constituant la base de données du réseau de neurones.

Dans le troisième chapitre, nous rappelons dans un premier temps quelques résultats sur la transformée de Fourier et ses limites, et nous introduirons le concept de la transformée en ondelettes ainsi que les réseaux de neurones artificiels et leurs applications.

Le quatrième chapitre concerne l'analyse des gaz dissous des huiles minérales de transformateurs, avec une discussion et interprétation des résultats.

Finalement, le dernier chapitre comprendra la partie pratique du programme élaboré et son application à la reconnaissance des formes des signaux de décharges. Nous présenterons également les interprétations des résultats obtenus.

Chapitre I

Caractérisation des huiles diélectriques des transformateurs

I.1 Introduction

Les transformateurs de puissance sont en majorité immergés dans l'huile minérale extraite à partir des hydrocarbures. Elle est de faibles coûts relatifs et présente des propriétés physico chimiques avantageuses et une bonne compatibilité avec les isolants solides avec lesquels elle forme une isolation stratifiée.

La durée de vie des transformateurs de puissance dépend des contraintes :

- Electriques : mauvais contact dans les connexions et changeur de prise ;
- Electrodynamiques : efforts dus au court-circuit interne ou externe ;
- Electromagnétiques : courant de Foucault induit dans le circuit magnétique et les pièces de serrage ;
- Mécaniques : vibrations dues aux hautes tensions appliquées ;
- Thermiques : échauffement anormal et pollution de l'huile.

Historique sur les isolants liquides

Les isolants électriques étaient, à l'origine, des produits naturels non imprégnés qui, en contact direct avec l'air, s'oxydaient rapidement. La première tentative pour protéger des enroulements de la corrosion en les plongeant dans de l'essence de térébenthine date de 1854. Cette immersion dans un liquide organique a amélioré la tenue électrique, allongé la durée de fonctionnement et soustrait l'isolation solide à l'oxydation directe.

Les premières bobines d'induction, les transformateurs primitifs, les transformateurs industriels, réalisés en 1884, étaient du type sec. G. Westinghouse introduit les isolants liquides dans la technique des transformateurs en 1887 et il a fallu attendre 1891 pour que l'huile de pétrole soit utilisée à titre expérimental dans l'isolation de transformateurs triphasés ; mais, la fin du 19^{ème} siècle verra encore des appareils dans l'air de 1000 kVA sous 30kV, tous ventilés à partir de 50kVA. Devant la multiplication des réseaux de distribution d'énergie électrique et l'accroissement des puissances installées, les transformateurs dans l'air deviennent énormes. Pour réduire leur volume, l'emploi de l'huile minérale se généralise dès 1905. En 1917, le premier câble à conducteur creux et à huile fluide a été réalisé. En 1918, l'huile minérale a été employée comme imprégnant de condensateurs.

La nécessité d'employer des liquides de sécurité, révéla à la fin des années 1920, avec l'apparition des askarels, liquides de synthèse, la possibilité de créer des molécules adaptées, par exemple de permittivité plus grande que celle des huiles minérales.

Peu à peu les paramètres électriques se précisèrent sous l'influence de diverses contraintes d'emploi. Les askarels, suspectés dès 1966, puis interdits dans certains pays en 1972 (chez nous à partir de 1985) sont peu à peu remplacés par d'autres liquides.

Les évolutions technologiques progressives dans ce domaine ont permis de multiplier par trente la puissance volumique des appareils.

Dans le domaine des transformateurs, le bannissement des askarels et de tous les produits chlorés n'a pas permis de conserver la propriété de résistance au feu. Les produits utilisés pour cette application particulière sont inflammables mais à des températures très élevées (>300°C). Par ailleurs, les transformateurs sont toujours imprégnés avec des huiles minérales, dont la qualité a fortement progressée [1].

I.2 Défaillances et problèmes des transformateurs de puissance

Après une durée de mise en service d'un transformateur de puissance, l'huile finit toujours par se dégrader, ses caractéristiques seront donc modifiées à un point où cette dernière ne peut plus assurer ses fonctions. Et son maintien en service peut conduire à de sérieux problèmes.

Les causes principales (51% des défaillances des transformateurs ont lieu dans une période de cinq ans) sont dues aux problèmes suivants [2]:

- L'absorption de l'eau, de l'air (humidité), les impuretés dans l'huile (contamination) et le vieillissement font diminuer la rigidité diélectrique interne du transformateur.
- L'entrée en contact de l'air avec l'huile chauffée dans l'appareil provoque une oxydation, c'est une cause majeure de dégradation du transformateur.
- Des matériaux insolubles constitués par des réactions chimiques, peuvent se déposer sur le noyau, sur l'enroulement et sur le fond ferreux du réservoir, ce qui baissera la tension de claquage de l'huile et réduira le refroidissement du transformateur.
- L'existence des bulles dans l'huile, provoque des décharges électriques, ceci peut se produire particulièrement dans une zone fortement soumise à des contraintes telles que le court-circuit (zone autour de l'enroulement par exemple).
- Une pièce pleine d'isolation exposée à l'arc pendant la commutation peut souffrir d'une décomposition thermique ou formation de voies carbonisées sur la surface du matériau.

De telles anomalies se manifestent habituellement par la surchauffe de l'huile ou du papier, par décharges partielles ou par l'arc électrique. Ces symptômes s'appellent les défauts dans le contexte de l'entretien électrique d'équipement.

Statistiquement, les principales causes de défaillance et de dégradation pour des transformateurs de puissance, mis en service entre 15 et 25 ans, sont : le vieillissement de l'isolant, l'endommagement des enroulements et la contamination. A noter que le coût et le temps de réparation et de remplacement du transformateur sont considérables [3].

I.3 Pourquoi est-il important de surveiller un transformateur ?

Suite à l'important rôle qu'il joue au sein d'une installation électrique, le transformateur de puissance occupe une place primordiale et critique ; c'est l'élément lourd de l'investissement, et la moindre défaillance dans l'une de ses parties peut causer de lourdes conséquences sur tous les domaines : technique, financier, commercial, humain et même environnemental. La surveillance en service des gros transformateurs doit être donc systématique.

En général, la vie d'un transformateur est égale à la vie de l'isolation, et cela dépend nécessairement de la rigidité mécanique et électrique des isolants utilisés. La température d'un transformateur a aussi un impact important sur la vie de l'isolation.

L'évaluation de la vie des grands transformateurs [3] sert à :

- Surveiller l'état des transformateurs et fournir une détection précoce des défauts ;
- Diagnostiquer les problèmes quand les transformateurs montrent des signes de détresse, ou pour suivre l'opération de protection de l'équipement ;
- Définir si un transformateur répond aux conditions convenables pour affronter les situations inhabituelles ;
- Obtenir des résultats pour aider dans l'entreprise des essais ;
- Aider à la stratégie de remplissage pour une population de transformateurs.

I.4 Rôles des liquides isolants

En électrotechnique, les liquides isolants sont utilisés comme imprégnant d'isolations cellulose ou comme produits de remplissage de divers matériels électriques : transformateurs, réactances, condensateurs, câbles, traversées, disjoncteurs, changeurs de prise, etc... [4].

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 est très nettement supérieure à celle des gaz). Cependant, dans beaucoup d'applications, ils servent à la fois à améliorer les propriétés diélectriques et à évacuer la chaleur d'un assemblage, comme dans le cas des transformateurs, par exemple.

De manière générale, les principales fonctions des liquides isolants sont :

- L'évacuation des pertes d'énergie
- L'isolation au sens strict (ralentir l'oxydation de l'isolation solide)
- L'isolation au sens électrique

En plus de ces trois fonctions fondamentales, les liquides isolants sont utilisés aussi 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 (cas des transformateurs de distribution proches de la population) [1].

I.4.1 Fonction diélectrique

Les principales propriétés permettant de juger de l'aptitude d'une huile à remplir sa fonction diélectrique sont :

- La rigidité (tension de claquage)
- Le facteur de dissipation (Tangente δ).
- La permittivité et résistivité

Ces caractéristiques dépendent nécessairement de la température et de la fréquence pour une tension donnée. Elles sont essentielles pour le dimensionnement d'un transformateur.

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

- Soit un diélectrique liquide seul, lorsqu'il s'agit d'une isolation entre deux pièces métalliques nues (plot de commutateur par exemple).
- Soit une couche solide (papier ou carton) imprégné de diélectrique liquide : c'est le cas par exemple de l'isolation entre deux conducteurs voisins d'un même enroulement
- Ou bien une isolation mixte : combinaison entre deux films diélectriques liquides et de barrière isolante solide : c'est le cas d'une isolation entre deux enroulements concentriques de tensions différentes [6].

I.4.2 Fonction transfert de chaleur

Malgré le rendement du transformateur qui est excellent (soit 99 à 99.9%), l'évacuation produite par les pertes dans le fer et dans le cuivre doit être largement assurée pour ne pas causer une élévation dangereuse de la température. Cette énergie perdue se dissipe alors sous forme de chaleur, d'où la nécessité de refroidir le transformateur. En effet, à cause des pertes, la température de chaque élément s'élève jusqu'à établissement d'un équilibre entre les vitesses de production et d'évacuation de chaleur, un dispositif bien réglé permet ainsi d'évacuer cette chaleur et d'éviter la formation de points chauds grâce à une bonne circulation de l'huile. Le refroidissement se fait par convection et par conduction thermique [6], et les principales caractéristiques qui permettent de juger de l'aptitude d'une huile à évacuer la chaleur sont la viscosité, la conductivité thermique et la chaleur spécifique.

On place le circuit magnétique, muni de ses enroulements dans une cuve métallique remplie d'huile isolante très fluide. L'huile, circulant le long des bobinages et du circuit magnétique, véhicule la chaleur dégagée, une chaleur qu'elle transmet ensuite à la cuve munie de radiateurs.

Ce procédé, dit à ventilation naturelle, peut convenir jusqu'à des puissances de plusieurs milliers de kVA, mais au-delà, il faut faire appel à l'un des procédés suivants :

- **Ventilation forcée** : Pour activer les échanges de chaleur, on emploie des ventilateurs qui soufflent l'air frais sur les parois des radiateurs ; ce procédé est dit ventilation forcée (figure I.1) .
- **Apéro-réfrigérants** : Pour les unités de très grande puissance (au-delà de 10.000 kVA), l'encombrement des radiateurs, même ventilés, ne permet pas de les fixer directement sur la cuve du transformateur. Ces radiateurs sont alors disposés en batterie, à côté du transformateur. L'huile chaude, amenée aux radiateurs par des tuyauteries, est refroidie puis retournée au transformateur par d'autres tuyauteries.

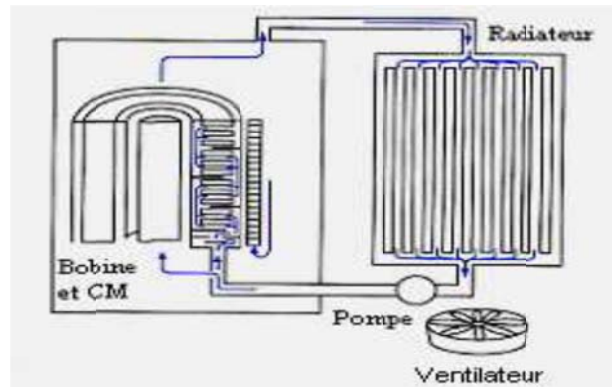


Figure-I.1 : Schématisation de l'évacuation de la chaleur dans un transformateur (ventilation forcée)

I .5 Propriétés des liquides isolants

Le choix d'une huile isolante repose sur un nombre important de propriétés telles que :

- Les propriétés électriques;
- Les propriétés physiques ;
- Les propriétés chimiques ;
- Les propriétés au feu

I .5.1 Propriétés Electriques [1,7]

Les caractéristiques électriques des liquides dépendent de leur formation (composition, constitution moléculaire, etc.) et de leurs conditions d'utilisation ou de conditionnement. L'étude des propriétés électriques est un domaine qui se caractérise par sa pluridisciplinarité puisqu'il touche à la chimie, à l'électronique et à la mécanique des fluides.

Par conditionnement, il faut comprendre l'élimination de tout ce qui ne constitue pas le liquide lui-même : résidus de synthèse, particules, gaz et molécules d'eau. Ces impuretés peuvent être plus ou moins éliminées par des opérations de traitement qui comprennent des phases de déshydratation et de dégazage sous vide et en température, ainsi que des opérations de filtration de l'ordre du μm .

I .5.1.1 Permittivité ou la constante diélectrique

La permittivité d'une huile isolante pure est surtout due aux phénomènes de polarisation électronique et atomique. C'est une caractéristique électrique liée à la formation du liquide. La permittivité absolue s'exprime en farads par mètre. Elle définit la possibilité, sous l'action du champ électrique, de libérer des charges.

La permittivité est une caractéristique intrinsèque d'un produit. Elle dépend essentiellement de la structure chimique et caractérise la polarité de la molécule.

I .5.1.2 Conductivité et Résistivité

Un liquide, pour être isolant électrique, doit conduire le moins possible l'électricité lorsqu'une tension lui est appliquée. Sa conductivité doit donc être la plus faible possible. Cette dernière est due à la présence de charges libres positives et négatives (des ions) en quantités égales. Sous l'effet d'un champ électrique, ces ions se déplacent provoquant ainsi un courant de conduction.

La résistivité est une propriété fortement dépendante du conditionnement. Ainsi, la résistivité d'une huile est influencée par la présence de substances étrangères considérées comme impuretés (poussières, particules, gaz et humidité), qui même en quantité aussi faible que quelques *ppm* (*mg/l*) ont une influence sur les valeurs mesurées.

La conductivité n'est pas une propriété intrinsèque d'un liquide isolant. Elle est liée à la présence d'infimes quantités (en général, inférieures à *1 ppm*) d'impuretés ionisables.

Plus la température est élevée, plus la viscosité du liquide est faible et plus la mobilité des ions est grande, et par conséquent plus la conductivité est élevée. Par ailleurs, la dissociation des impuretés dissociables en ions est d'autant plus forte que la température est élevée. La résistivité d'un liquide diminue donc lorsque la température augmente. Pour cette raison, la plupart des spécifications des produits indiquent une valeur de résistivité à 90°C (température moyenne de fonctionnement d'un transformateur) [8].

I .5.1.3 Facteur de dissipation diélectrique ($\tan \delta$)

Le facteur de dissipation diélectrique d'un matériau isolant est la tangente de l'angle de perte qui est l'angle complémentaire du déphasage entre la tension appliquée et le courant qui en résulte.

Tout diélectrique soumis à une tension continue ou alternative est toujours le siège de pertes diélectriques qui se traduisent par un échauffement du liquide plus ou moins important. La cause principale de ces pertes est la présence d'un courant de fuite qui traverse le liquide sous un champ électrique.

Cette caractéristique est très sensible à la présence de produits de vieillissement de l'huile. Il existe une relation entre le facteur de dissipation et l'acidité de l'huile. Une acidité élevée est accompagnée par une valeur élevée de $\tan \delta$, mais l'inverse n'est pas vérifié. Une valeur défavorable de $\tan \delta$ peut être due à la dissolution dans l'huile des produits qui n'ont pas pour origine l'altération de l'huile. Une huile neuve possède en moyenne un facteur de dissipation diélectrique inférieur ou égal à 5.10^{-3} .

I .5.1.4 Rigidité diélectrique et Tension de claquage

La rigidité diélectrique d'une huile est la valeur maximale du champ électrique que l'on peut lui appliquer sans décharge disruptive. Dans l'industrie, elle est maximisée conventionnellement par la tension efficace nécessaire pour provoquer, dans des conditions normalisées, le claquage d'un volume de liquide compris entre deux électrodes dont la forme,

la distance et la nature font l'objet d'une norme. Ce paramètre est connu sous le nom de tension de claquage.

La rigidité diélectrique n'est pas un critère de la qualité de fabrication des huiles isolantes, mais un essai conventionnel destiné à déceler leur état plus ou moins grand de pollution physique par l'eau et d'autres matières en suspension et à conclure ou non à l'opportunité de faire un traitement de dégazage et filtration avant introduction dans les appareils auxquels ils sont destinés.

L'obtention d'une forte valeur de rigidité ne permet cependant pas de s'assurer que l'huile est exempte d'impuretés. Par contre, une valeur correcte permet essentiellement de s'assurer que le traitement de l'huile (dégazage, filtration) est satisfaisant [9].

I .5.2 Propriétés Physiques [10, 11].

Comme les propriétés électriques, les propriétés physiques des huiles isolantes ont une grande importance dans le traitement et la surveillance des transformateurs de grande puissance, elles sont toutefois plus accessibles par rapport aux autres propriétés.

La densité, l'aspect et la couleur sont des paramètres très importants dans l'étude d'huile isolante pour transformateurs de puissance. Nous présenterons dans cette partie une caractérisation globale sur ces propriétés.

I .5.2.1 Densité

Dans les climats froids, il est important de spécifier la densité de l'huile pour éviter la création de glace flottant dans l'huile à basse température. Ce phénomène peut se produire lorsqu'il y a de l'eau libre présente dans des transformateurs hors tension et peut provoquer des pannes lors de la mise en route. Les huiles à haute teneur aromatique ont une densité plus élevée que les huiles qui contiennent plus de molécules naphténiques et paraffiniques. La densité décroît lorsque la température croît et le coefficient standard $0,00065/^{\circ}\text{C}$ est utilisé pour calculer la densité à d'autres températures que celles mesurées. Ce coefficient varie légèrement selon les huiles en fonction de la structure et du degré de raffinage.

I .5.2.2 Couleur et aspect

La couleur et l'aspect fournissent rapidement des informations utiles qui peuvent être obtenues sur site. Une personne expérimentée peut remarquer immédiatement un phénomène anormal. Si on y ajoute l'odeur, de nombreuses informations peuvent être rassemblées. Une couleur sombre peut indiquer que l'huile a commencé à se dégrader. Cet élément est également le premier indice de formation de boues. L'aspect d'une huile peut indiquer la présence d'eau libre et d'impuretés telles que fibres ou particules de cellulose. Une mauvaise odeur peut révéler des amorçages d'arcs électriques, qui provoquent le claquage de l'huile. La consignation systématique de ces observations est néanmoins nécessaire pour assurer la continuité en cas de changement de personnel.

I .5.2.3 Viscosité

La viscosité et sa variation avec la température sont des paramètres de première importance pour le transfert thermique. En effet, plus le liquide est visqueux, plus il est difficile de le faire circuler dans l'appareil, pour refroidir les parties actives chaudes.

La viscosité peut être définie comme étant la résistance à l'écoulement uniforme et sans turbulence se produisant dans la masse d'une matière. C'est donc, la résistance au mouvement que manifestent tous les fluides. Les huiles pour transformateurs ont une viscosité très basse ; ce qui permet une circulation plus facile, donc un refroidissement plus efficace.

Lorsque la viscosité augmente, la capacité du fluide à s'écouler diminue. Pour un liquide, la viscosité tend généralement à diminuer lorsque la température augmente. On pourrait croire que la viscosité d'un fluide s'accroît avec sa densité mais ce n'est pas nécessairement le cas : l'huile est moins dense que l'eau (huile de colza: 0.92 à 20°C, contre 1 pour l'eau), cependant elle est nettement plus visqueuse.

Il existe deux types de viscosité : la viscosité dynamique qui visualise l'aspect microscopique et la viscosité cinématique exprimée en centistokes (cst) qui est la plus importante car elle traduit l'aspect macroscopique [1, 12].

I.5.2.4 Point d'écoulement

Le point d'écoulement est également un paramètre important dans le choix d'une huile destinée à évacuer les calories. Il est défini comme la température au-dessous de laquelle le liquide ne coule plus. Deux phénomènes peuvent être responsables de la perte d'écoulement :

- l'augmentation de viscosité à basse température.
- la cristallisation de certains composants (notamment les paraffines dans l'huile minérale).

La connaissance de cette caractéristique est primordiale pour l'utilisation de transformateurs dans les pays froids. Les liquides isolants en électrotechnique se figent généralement à des températures allant de (-60°C à -30°C) [13].

I.5.2.5 Le point de congélation

Le point de congélation est la température la plus haute à laquelle le produit analysé reste immobile quand on incline le tube qui le contient à 45°. Pour une fraction pétrolière, le point de congélation s'étend sur tout un intervalle de température, du fait de la présence des différentes familles d'hydrocarbures. Cette caractéristique présente un avantage dans le domaine du raffinage, étant donné qu'elle est la base de la séparation par cristallisation fractionnée.

Un point de congélation bas dénote une nature de tendance aromatique. Un point de congélation élevé (supérieur à 70-75°C) est relatif à des fractions riches en paraffines.

I.5.2.6 La capacité thermique

La capacité thermique des huiles isolantes, exprimée en joules par kilogramme kelvin, croît avec la température et est généralement d'autant plus élevée que la masse volumique est plus faible. A 20°C, la capacité thermique varie de 1000 à 2300 J/ (kg.K) [14].

I.5.2.7 La conductivité thermique

La conductivité thermique (λ), mesurée en watts par mètre-kelvin, exprime le flux thermique s'écoulant, en régime permanent, sous l'effet d'un gradient thermique entre deux isothermes du liquide. Elle décroît lorsque la température et la masse volumique augmentent. Les valeurs usuelles sont de l'ordre de 0,14 W/ (m.K). A 20 °C, λ vaut 0.11 à 0.12 W/ (m.K) [14].

I.5.2.8 La masse volumique et le coefficient de dilatation volumique

La masse volumique est le rapport d'une masse m du liquide à son volume v déterminée à la température T [14]. C'est une caractéristique intrinsèque d'un produit. Elle dépend de la composition chimique. Ainsi, les huiles minérales paraffiniques ont une masse volumique plus faible que les huiles naphténiques.

La masse volumique diminue lorsque la température augmente. Le coefficient de dilatation volumique α_v caractérise cette variation. Pour les applications fermées, on recherche généralement des produits ayant le plus faible coefficient de dilatation.

I .5.3 Propriétés Chimiques [10, 11].

L'étude des caractéristiques chimiques d'un liquide diélectrique est très importante car d'une part, elle permet de connaître les composantes réelles qui constituent ce dernier et d'autre part, elle nous renseigne sur l'état d'évolution de ce liquide et son aptitude à remplir ses fonctions principales, à savoir l'isolation électrique et l'évacuation de la chaleur.

I .5.3.1 Acidité

L'acidité représente les dérivés acides formés au cours du vieillissement de l'huile. Sa détermination procure le moyen le plus direct pour apprécier et suivre l'altération de l'huile. Elle est exprimée par la mesure de l'indice d'acidité qui est le nombre de mg de KOH normale nécessaires pour neutraliser un gramme d'huile.

L'acidité d'une huile neuve est très faible en service. Elle est de l'ordre de 0.02 à 0.03 mg de KOH/g d'huile en service. Aux premiers stades d'oxydation, elle augmente pour atteindre, après un certain temps de service, une valeur où elle reste constante. Cette stabilité s'explique par les dépôts qui précipitent.

I .5.3.2 Teneur en eau

La teneur en eau d'une huile isolante donne une idée de la teneur en eau des isolants celluloses. Une teneur en eau trop élevée de l'huile indique que le papier également contient trop d'eau et que ce facteur va affecter le vieillissement du papier, c'est-à-dire déclencher la décomposition des fibres de papier, ce qui conduira à des dégâts irréversibles qui pourront provoquer une panne électrique dans le transformateur.

Deux autres points méritent attention : une huile isolante ancienne qui a commencé à s'oxyder présente un niveau de saturation en eau plus élevé qu'une huile neuve ; de l'eau est également produite pendant l'oxydation, aussi bien de l'huile que du papier, facteur qui accélère encore la détérioration du papier (gouttelettes d'eau) ou en émulsion (apparition de deux phases non miscibles).

I .5.3.3 Teneur en soufre

Une huile minérale peut contenir des traces de soufre, soit sous la forme de soufre libre, soit sous forme de composés sulfurés; les premiers sont très corrosifs, les seconds le sont beaucoup moins, tant que la température ne dépasse pas 100°C environ.

Sa présence est détectée par la corrosion d'une lame de cuivre électronique immergée dans une huile à 140 °C pendant 19h (norme NFT60-131 (CEI 296A)); la coloration qu'elle prend permet de juger si les composés soufrés sont corrosifs ou non .

I .5.3.4 La stabilité à l'oxydation

La tenue à l'oxydation est une propriété particulièrement importante pour les applications ouvertes, où le liquide est en contact avec de l'air. C'est notamment le cas des transformateurs.

La vitesse des réactions d'oxydation croît évidemment avec la température et la concentration en oxygène : on admet qu'elle double tous les 8 à 10 °C, à partir de 60 °C. Les réactions d'oxydation sont catalysées par certains métaux (cuivre, fer) ainsi que par certains produits comme les mercaptans qui peuvent être contenus dans les huiles minérales.

I .5.3.5 Gassing

Les décharges partielles provoquent l'apparition de gaz (par décomposition des molécules du liquide). Si des bulles de gaz subsistent, voire grossissent, à la tension nominale, les décharges partielles vont persister. Si, au contraire, les bulles disparaissent, les décharges vont s'éteindre.

On appelle gassing G la vitesse de variation du volume de gaz pendant 120 minutes d'application de la tension. Il s'exprime en mm^3/min [1]. La tension, la température et le temps d'application de la tension ont une forte influence sur le comportement d'un produit.

I .5.3.6 Teneur en particules

Les très petites particules, de taille inférieure à $1 \mu m$, n'ont été prises en considération que récemment, les méthodes de mesures n'étant pas disponibles jusque-là. Les huiles en service peuvent contenir beaucoup plus de particules, métalliques et celluloses, provenant des matériaux avec lesquelles l'huile est en contact. Les particules métalliques sont, de ce

point de vue, beaucoup plus nuisibles que les particules isolantes. Elles jouent un rôle prépondérant dans l'initiation du claquage des grands volumes d'huile.

I.5.3.7 Teneur en gaz

En présence de fortes concentrations en gaz, les liquides présentent des seuils d'apparition des décharges partielles plus faibles. Les liquides sont donc toujours dégazés, sous vide, avant d'être utilisés pour l'imprégnation d'un matériel électrique.

I.5.4 Les propriétés au feu

Les huiles minérales ne sont pas des produits ininflammables. Elles présentent toutes un point d'éclair et un point de feu qui caractérisent l'inflammabilité d'une huile.

I.5.4.1 Le point de feu

C'est la température minimale pour laquelle la combustion des vapeurs d'un liquide sera entretenue.

I.5.4.2 Le point d'éclair

Le chauffage progressif d'un liquide provoque le dégagement de vapeurs suivant sa courbe de tension de vapeur, qu'il s'agisse d'un corps pur ou d'un mélange. Dès que la concentration de ces vapeurs dans l'atmosphère surmontant le liquide, devient suffisante pour former un mélange inflammable, elles brûlent à l'approche d'une flamme. La température correspondante est appelée le point d'éclair du liquide.

Le point d'éclair d'une huile est indiqué pour des raisons de sécurité, mais également parce qu'il signale le degré de volatilité de l'huile. Les parties légères de l'huile déterminent le point d'éclair qui est extrêmement sensible aux impuretés provenant d'huiles plus légères, telles que gas-oil ou l'essence. Le point d'éclair est atteint lorsque l'huile libère suffisamment de gaz pour rendre le mélange de gaz inflammable en présence d'une flamme.

Cette propriété renseigne sur la présence de certains hydrocarbures gazeux dissous dans l'huile suite à un défaut électrique ou thermique. Elle correspond à la température pour laquelle l'huile émet un flash, c'est-à-dire, la température critique maximale à ne pas dépasser au risque de provoquer un incendie dans le transformateur.

Les huiles les plus fluides doivent présenter un point d'éclair supérieur à 95 °C, alors que les huiles de *classe I* doivent avoir un point d'éclair supérieur à 140 °C.

La combustion des huiles minérales libère une grande quantité d'énergie. La norme CEI 61100 permet de classer les liquides isolants en fonction de leur point de feu et de leur pouvoir calorifique inférieur (CPI) (qui caractérise la quantité d'énergie produite par la combustion totale du produit).

I.6 Caractérisation des différents types d'huiles isolantes [15, 16]

D'une manière globale, il existe trois types de liquides isolants :

- Huiles végétales
- Huiles minérales
- Liquides de synthèse

Ce classement est lié à leur ordre d'apparition chronologique dans les applications électrotechniques. En effet, les huiles végétales furent les premières utilisées, ensuite les huiles minérales ont été développées puis les liquides de synthèse ont été fabriqués par la suite pour pallier aux lacunes de l'huile minérale dans certaines applications.

Le tableau-I.1 résume les types d'huiles isolantes, utilisées pour des applications d'électrotechnique [11] :

Tableau-I.1 : Types d'huiles isolantes utilisées pour des applications d'électrotechnique

Catégorie	Type	Application	Caractéristiques particulières
Huiles minérales	Naphténiques	tous types : transformateurs, condensateur, câbles, etc.	- Bas point d'écoulement sans additif
	Paraffiniques		- Teneur en hydrocarbures aromatique > 12%
	A masse moléculaire élevée	transformateurs de distribution (remplacement des PCB)	- Indice de viscosité de 115 à 120 (60 pour une huile naphténique)
hydrocarbure de synthèse	polybutènes	câbles d'énergie	- Pertes diélectriques très faibles $tg\delta < 0,0005$ à 50 Hz et 90°C
	Alkylbenzènes	Traversées	- Rigidité électrique au choc de foudre élevée
	Alkylnaphtalènes	Condensateurs	
	Alkylbiphéniles	Condensateurs tout film	
Hydrocarbures halogénés	Perchloréthylène	Transformateurs de distribution	- Résistant au feu
	Trichlorobenzènes	liquides d'attente en rétrofilling (post-remplissage)	- Appareils scellés et à points chauds limités par la température d'ébullition
			- Solvant des PCB
			- Ininflammabilité

Hydrocarbures halogénés (suite)	Polychlorobiphényles (PCB)	Transformateurs	- Ininflammabilité
	Polychlorophénylalcannes		- Biodégradabilité - Ininflammabilité
	Trichlorotrifluoroéthane	transformateurs pour équipement électronique et rayon X	- Agent de refroidissement - Stabilité thermique
Esters organiques	Néocaprates de benzyle	Condensateur au papier	- Permittivité relative > 5 à 20°C à 50 Hz
	Dioctylphtalate	Remplacement des PCB	- Permettent en mélange d'accroître le point de feu des diélectriques liquides
	Esters phosphates	organe de coupure immergé	
	Esters du pentaérythrol	Transfo de traction et de distribution	- Point de feu >300°C
Silicones liquides	Polydiméthylsiloxanes	Transfo de traction	- Point de feu >300°C - Indice de viscosité élevé : 170
	polyméthylphénylsiloxane	Liquide expérimental	- Absorption gazeuse sous décharge partielle
Liquides divers	éthers-oxydes (alkyldiphényle-éther, ditolyléther)	Condensateurs	- Permittivité relative, à 20°C, supérieure à 3, adaptabilité.
	Mélanges de liquides	Condensateurs	- Adaptabilité - Réduction ou suppression de pertes Joule.
	Gaz liquéfiés (Argon)	Enroulement supraconducteur et cryogénique	

I.6.1 Les huiles végétales

Les huiles végétales ont fait partie des premiers liquides isolants utilisés dans la fabrication d'appareils électriques. Elles sont essentiellement constituées de triglycérides qui sont en fait un triester, comme représenté dans la figure I.2 ci-dessous. Les huiles végétales portent aussi le nom d'ester naturel ou végétal car elles sont synthétisées naturellement par tout organisme vivant et peuvent provenir de différentes semences telles que le ricin, le colza, le tournesol, etc.... [16].

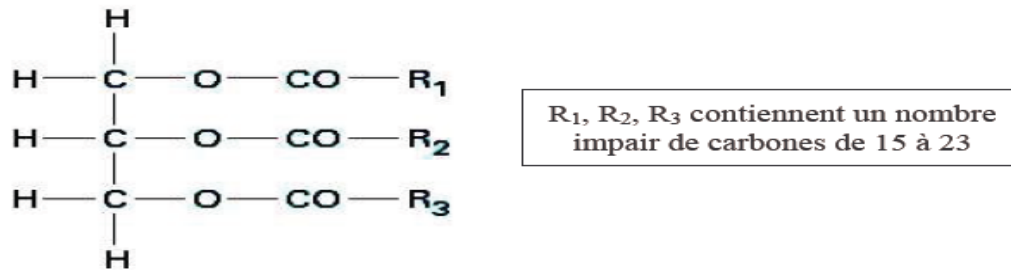


Figure I.2: Structure chimique d'une huile végétale

I.6.2 Huiles de synthèse

Bien que les huiles minérales occupent une place très importante parmi les liquides pour les applications électrotechniques, les huiles de synthèse 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 la population (distribution et traction). Ces liquides de synthèse sont tous obtenus à partir des différents procédés de la pétrochimie [16].

I.6.3 Huiles minérales

I.6.3.1 Introduction aux huiles minérales isolantes

L'huile minérale est le liquide le plus utilisé dans l'équipement électrique pour ces bonnes propriétés diélectriques et de transfert de chaleur, sa bonne compatibilité avec les isolants cellulosiques et son faible coût. C'est principalement pour cette raison technico-économique que cette huile est aussi la plus communément utilisée dans les transformateurs de puissances [16].

Une huile minérale isolante ou diélectrique est une huile qui présente une faible conductivité électrique du fait d'une densité de charges peu importante. Elle se compose principalement

- D'une huile dite de base (ou d'un mélange d'huile de base) obtenue selon des propriétés traditionnelles de raffinage du pétrole brut ;
- De composés chimiques appelés additifs, en teneur très variable, qui permettent d'atteindre les spécifications d'emploi des huiles finies.

La composition d'une huile minérale est généralement définie par sa teneur en carbone paraffiniques C_p , en carbone naphthéniques C_N et en carbone aromatiques C_a . C_p et C_N ont une influence prépondérante sur la densité, la viscosité et le comportement à basse température (figure-I.3 et figure-I.4). Leur composition chimique est extrêmement compliquée (plusieurs milliers de molécules différentes) [1].

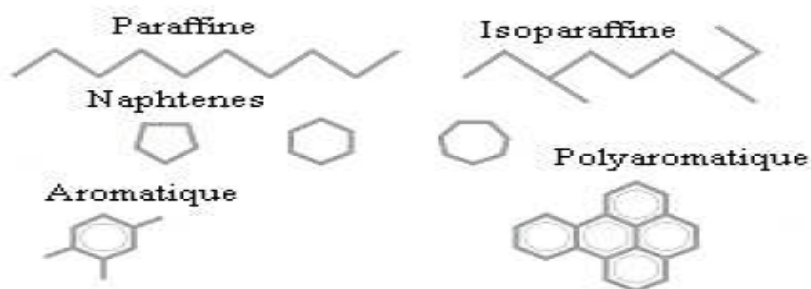


Figure-I.3 structure des hydrocarbures de base dans une huile minérale

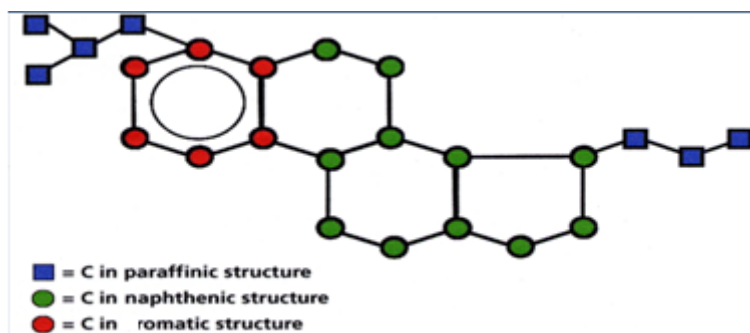


Figure-I.4. Structure générale d'une huile minérale

I.6.3.2 Présentation d'une huile minérale isolante

La réalisation d'une formule d'huile consiste à trouver la composition optimale de base et les additifs permettant de répondre aux exigences des diverses contraintes d'utilisation.

La composition d'une huile minérale reflète, en général celle du distillat d'origine. Les huiles de base en électrotechnique répondent à trois grandes classes de tendances chimiques.

Elles sont définies par leurs teneurs en carbone paraffinique C_P , en carbone naphténiq C_N et en carbone aromatique C_A , comme on le voit dans le tableau I.2.

Tableau-I.2 : Compositions typiques des bruts pétroliers en %

Type d'hydrocarbures	Type de bruts pétroliers		
	Paraffiniques	Mixtes	Naphténiques
Paraffiniques	60	40	20
Naphténiques	25	40	65
Aromatique	15	20	15

I.6.3.2.1 Tendance paraffinique

Dans ce type d'huile, la tendance paraffinique ou la présence d'hydrocarbures paraffinique prédomine. Ces hydrocarbures sont des molécules complexes à structure saturée et à chaîne droite ou alcanes, qui peuvent être linéaire (n-alcanes) ou ramifiés (iso-alcanes) et dont la formule générale est : C_nH_{2n+2} , mais non cycliques.

Les caractéristiques de cette famille d'huiles riches en hydrocarbures paraffiniques sont :

- une faible densité pour une viscosité donnée ;
- une variation relativement faible de la viscosité en fonction de la température ;
- une faible volatilité pour une viscosité donnée ;
- un faible pouvoir solvant [17].

I.6.3.2.2 Tendance naphénique

C'est une huile riche en hydrocarbures naphéniques, c'est-à-dire, Les molécules de ce groupe sont également connues sous le nom d'hydrocarbures saturés cycliques ou cycloalcanes. Elles correspondent à des chaînes carboniques fermées de formule générale C_nH_{2n} . Les cycloalcanes présentent un meilleur pouvoir solvant que les n-alcanes.

Les caractéristiques physiques et chimiques de ces hydrocarbures se traduisent en particulier par :

- une densité relativement élevée pour une viscosité donnée ;
- des variations assez rapides de viscosité en fonction de la température ;
- une plus grande volatilité que les fonctions paraffiniques correspondantes de même viscosité.
- un pouvoir solvant relativement élevé [17].

I.7.3.2.3 Tendance aromatique

Ce sont des huiles de composées de fonctions benzéniques. Ces molécules sont des composées cycliques, aussi appelées : hydrocarbures insaturés de formule générale C_nH_{2n-6} (avec $n \geq 6$).

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). Cette huile se caractérise par :

- une densité très élevée ;
- un indice de viscosité très faible ;
- une faible résistance à l'oxydation ;
- un point d'aniline très bas (soit un pouvoir solvant très élevé) ;
- une facilité d'émulsion avec l'eau.

L'utilisation de ces hydrocarbures dans la fabrication des huiles est très limitée en raison de leur altérabilité. Ils sont facilement oxydables et provoquent la formation des dépôts résineux ou asphaltiques accompagnées de dérivées corrosifs [17].

I.7 Principales causes d'altération des propriétés diélectriques

Les différentes fonctions évoquées sont vitales pour les appareillages utilisant les diélectriques liquides. Toute défaillance d'ordre électrique, peut se traduire par un claquage dont les conséquences sont toujours graves. Aussi, tout échauffement anormal, surtout s'il est localisé, ayant pour conséquence une réduction des caractéristiques électriques, peut également conduire au claquage entraînant la fragilisation des isolants solides utilisés.

D'autre part, avec les transformateurs à circulation forcée, on introduit des problèmes d'électrisation statiques. Tous ces aspects nous conduisent aux principales causes d'altération des diélectriques liquides [18].

I.7.1 L'humidité et l'oxygène

L'introduction de ces deux éléments dans les liquides diélectriques résulte essentiellement du phénomène de "respiration". L'influence de l'oxygène est surtout notable vis-à-vis des huiles minérales dont l'oxydation est un facteur de vieillissement.

L'humidité a une action nocive sur la tenue de tous les liquides diélectriques (Figure-I.5), particulièrement lorsque cette humidité se trouve sous forme d'eau libre, en suspension, en émulsion ou fixée sur des particules solides (poussières en suspension ou dépôts). On note une réduction de la tension de claquage d'environ 25 % lorsqu'on passe de 20 à 60 ppm d'humidité dans l'huile.

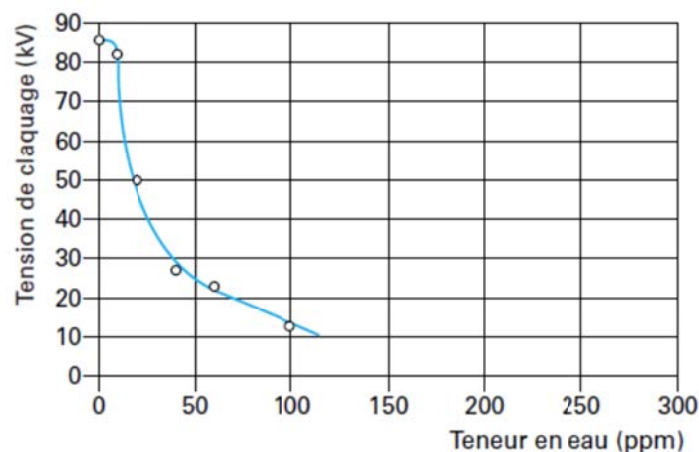


Figure-I.5 – Influence de l'humidité relative sur la tension de claquage (norme CEI 60156) d'une huile minérale naphénique

Si un liquide diélectrique très chargé en humidité peut encore assurer, tant bien que mal, sa fonction électrique tant que sa température assure une solubilité suffisante, il pourra, en cas de refroidissement brutal, (rupture de charge par temps froid par exemple) être disqualifié par suite de solubilité.

I.7.2 La température

Les askarels vieillissent peu par oxydation et, de ce fait, sont peu sensibles à l'action prolongée de la température.

La conductivité d'un liquide est due au mouvement d'ions sous l'effet du champ électrique. Plus la température est élevée, plus la viscosité du liquide est faible et, par conséquent, plus la mobilité des ions est grande. Par ailleurs, la dissociation des impuretés en ions est d'autant plus forte que la température est plus élevée. La conductivité d'un liquide augmente donc lorsque la température augmente. Pour cette raison, la plupart des spécifications des produits indiquent une valeur de résistivité ou de $\tan \delta$ à 90 °C [1, 19].

La figure-I.6 montre la variation de $\tan \delta$, avec la température.

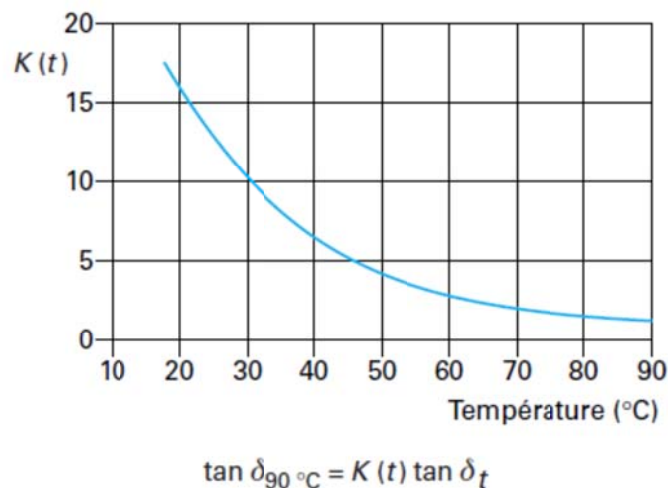


Figure-I.6 – Exemple de variation de $\tan \delta$, avec la température [cas du mono/dibenzyltoluène (M/DBT)]

I.7.3 Pollutions

Des impuretés de toute nature (poussières, graisses, etc.) peuvent être introduites dans les appareillages électriques à l'occasion de manipulations maladroites (à la fabrication ou pendant l'entretien), par exemple dans un transformateur lors d'un complément de remplissage.

Enfin, il arrive notamment dans le cas des askarels que ceux-ci en raison de leur grand pouvoir solvant, aient une action de dissolution sur les peintures, vernis et les joints, ayant pour résultat la mise en solution ou en suspension de matières étrangères au liquide diélectrique. De façon générale, un choix convenable de matériaux permet d'éviter ces inconvénients.

Si des poussières ou des fibrilles, éventuellement chargées d'humidité sont entraînées par le liquide diélectrique en circulation, elles peuvent, à cause des différences entre leurs constantes diélectriques et celle du liquide environnant, être soumises à des attractions électrostatiques, s'organiser en chaîne suivant les lignes du champ électrique et conduire au claquage [20].

I.7.4 Les décharges partielles

Les décharges partielles sont des microclaquages localisés qui ne traversent pas tout l'espace entre les éléments portés à des potentiels différents dans lequel serait contenu le diélectrique [21].

Sous l'effet du champ électrique et les inhomogénéités locales, provoquées par exemple par l'apparition de bulles de gaz, il peut apparaître des micro-décharges auxquelles le liquide diélectrique est, dans le cas particulier des transformateurs à circulation, en général peu sensible puisque toujours renouvelé par la circulation, mais qui peuvent devenir nocives, à long terme, si elles tendent à se fixer sur les isolants solides imprégnés et parviennent à un niveau suffisant pour le détériorer.

L'ensemble de ces principales causes d'altération des diélectriques liquides nous place au cœur des phénomènes de préclaquage et de claquage de ces derniers.

I.7.5 Le préclaquage

A présent, nous abordons l'un des aspects fondamentaux des diélectriques liquides. Il a été observé par l'ensemble des chercheurs travaillant dans le domaine des diélectriques liquides, l'existence d'un phénomène dit de claquage qui surviendrait à court ou long terme lorsqu'une ou plusieurs des conditions d'altération ci-dessus seraient présentes.

Le claquage est loin d'être instantané! Il est précédé d'une phase de préclaquage (ou prédécharge) [21] qui à son tour peut être scindée en deux phases :

Une phase de génération pendant laquelle se créent les circonstances favorables à l'apparition de l'étape suivante.

Une phase de propagation de la perturbation précédemment créée. Elle peut durer de la millième de microseconde à la centaine de microseconde ($1/1000 \mu s$ à $100 \mu s$).

Nous tenterons dans le chapitre qui suit d'étudier ce phénomène afin de mieux le comprendre.

I.8 Conclusion

Le choix d'un liquide pour une application donnée se fait dans l'optique d'assurer la fiabilité de fonctionnement des appareils ainsi que la sécurité des opérateurs. C'est toujours un compromis entre les performances techniques du liquide et son coût.

Dans le cas des transformateurs, il n'est pas possible de tirer avantage des meilleures propriétés diélectriques des liquides de synthèse, raison pour laquelle les huiles minérales sont universellement utilisées dans cette application. Cependant, quand la résistance au feu devient un paramètre prépondérant, les transformateurs sont imprégnés avec des huiles silicones ou des esters lourds. Ces produits ne sont pas ininflammables, comme l'étaient les polychlorobiphényles. Par contre, ils présentent un point de feu très élevé ($>300^{\circ}\text{C}$), ce qui limite le risque d'inflammation du liquide.

Nous avons vu les principales causes de l'altération des huiles, et parmi elles, les phénomènes de préclaquage. Ce sont ces phénomènes auxquels nous nous intéresserons dans ce travail, et qu'on étudiera dans le prochain chapitre.

Chapitre II

Les phénomènes de décharge et de pré décharge

II.1 Introduction

Il est communément admis qu'il existe deux phases dans les phénomènes de pré claquage des matériaux diélectriques: Une phase d'initiation dont la durée décroît lorsque le champ appliqué augmente et/ou le rayon de l'électrode acérée diminue. Elle est suivie par une phase de propagation menant éventuellement vers un claquage.

Le cycle de vie d'un transformateur dépend de ses propriétés, électriques, mécaniques, thermique et le stress environnemental qui affecte la durée de service de ce transformateur. Les structures des isolants représentent la partie importante. Elle est constituée de solides (polymères) et les isolants fluides qui servent aussi à évacuer la chaleur.

La détérioration de la structure des isolants engendrée par les décharges partielles change les propriétés physiques et chimiques de l'huile suivie par une formation de gaz dans le liquide sous forme de bulles. Nous nous intéressons plus particulièrement à la forme de ces courants de décharges, par l'association aux charges électriques correspondantes et la tension appliquée.

II.2 Processus de formation et nature des streamers

Il existe trois courants principaux concernant la nature et les processus de formation des streamers.

Le premier est basé sur le modèle présenté par Devins et al. [22] où le streamer est assimilé à une colonne de plasma dont les porteurs de charge sont produits selon un mécanisme similaire à celui proposé par Zener pour les solides (effet Zener). Les électrons passent par effet tunnel de la bande de valence à la bande de conduction sous l'effet du champ.

Le second, basé sur les processus gazeux, a été essentiellement développé par Watson et al. [23]. Ces auteurs considèrent le streamer comme le développement d'une microbulle créée suite à une injection rapide d'énergie conduisant à l'évaporation du liquide et engendrant la force de poussée. L'expansion de la bulle sera limitée par l'inertie du milieu liquide environnant et par le travail dépensé pour vaincre la pression ambiante.

Beroual [24] a montré que les deux mécanismes, électronique et gazeux, n'agissent pas séparément dans la phase de préclaquage. L'influence remarquable de la pression hydrostatique sur l'initiation et la propagation des streamers, et l'analyse chromatographique des liquides testés, montrent que la nature physique des streamers est gazeuse. Par ailleurs, l'influence d'additifs capteurs d'électrons sur les streamers négatifs et à bas potentiel d'ionisation sur les streamers positifs, l'effet de la présence d'halogènes dans la structure moléculaire du liquide sur les streamers négatifs, et l'analyse spectroscopique de la lumière émise par les streamers, indiquent que les processus électroniques sont aussi présents.

Lewis, dans une approche tout à fait originale [25], montre théoriquement que la propagation des streamers est due beaucoup plus à un processus mécanique qu'électrique, ayant lieu dans le liquide, ce dernier étant assimilé à une structure solide amorphe. Sous l'effet du champ

électrique appliqué, il y a d'abord génération de trous par effet thermique, dans la zone de champ fort, et lorsque la concentration est suffisante, il se produit un phénomène de "cracking" dans le liquide (comme cela est bien connu dans les solides) donnant ainsi naissance à une zone (colonne) de basse pression se propageant dans le liquide et dans laquelle une émission électronique renforcée par le champ peut avoir lieu; celui-ci sera suivi par un processus de collision et ionisation. L'auteur, suggère un modèle électromécanique pour le préclaquage et claquage dans lequel les décharges électriques jouent un rôle plutôt secondaire. Il ne tient cependant pas compte du mouvement très important du liquide, observé dès l'application d'une modeste tension.

II.3 Vitesse de propagation

La vitesse des streamers a été étudiée de manière intense. Elle varie fortement selon la structure du liquide, la polarité de la pointe et la géométrie des électrodes. Une classification des liquides selon leurs masses volumiques a été proposée par Sakamoto et Yamada [26]. Le tableau II.1 donne les vitesses moyennes des streamers positifs et négatifs déduites à partir du temps de retard au claquage et où les liquides ont été classés selon cinq groupes [26]. Beroual et Tobazéon [27] ont montré que cette classification (en cinq groupes) en fonction des masses volumiques était fautive. Beroual [28] a montré que la structure moléculaire du liquide et plus particulièrement son affinité électronique ainsi que la présence ou non d'halogènes étaient les paramètres décisifs quant à la forme et la vitesse des streamers dans un liquide donné. En effet, la présence d'un seul atome de chlore dans le chlorocyclohexane multipliait la vitesse des streamers négatifs par dix par rapport à celle du cyclohexane.

Selon Lewis [25], la vitesse des streamers dépendrait de la vitesse de création de trous par cassure des molécules du liquide sous l'effet du champ électrique.

La distribution des vitesses passe par un minimum plus ou moins marqué situé approximativement entre le milieu et les 2/3 de l'intervalle inter-électrodes ($d < 5\text{mm}$) quels que soient le liquide et la polarité de la pointe. Ce minimum est d'autant plus marqué que la tension est augmentée [27]. Pour les distances plus importantes (1.27 à 2.54cm), ce minimum est moins marqué; la vitesse des streamers positifs reste pratiquement constante dans certains hydrocarbures et huiles silicones [22].

Tableau II.1 : Vitesse moyenne des streamers déduite du retard au claquage en géométrie pointe plan

Liquides	Vitesse en polarité Positive (km/s)	Vitesse en polarité négative (km /s)	Masse volumique ρ (kg/m ³) (20 à 25°C)
n-pentane	3,6	0,11	626
n-hexane	3,2	0,19	660
n-heptane	3,4	0,22	684
n-octane	3,3	0,13	703
cyclohexane	2,8	0,056	779
Marcol 70	2,4	0,08	-
huile silicone (50cst)	2,7	0,07	-

benzène	1,2	0,12	879
Toluène	1,2	0,60	867
dodecylbenzène	2,3	0,081	856
huile de transformateur	2,2	1,1	~900
tétrachlorure de carbone	30	8,4	1596
monochlorobenzène	76	0,45	1107
trichlorobenzène	62	25	1460
Iodobenzène	15	9,1	1832

A partir du temps de transit (temps correspondant à la valeur maximale de la composante continue du courant), Harrold [29] a pu estimer la valeur moyenne de la vitesse de propagation des streamers positifs dans différents liquides et gaz. Ceci a été confirmé par A. Beroual [24] en comparant les résultats obtenus par cette méthode avec ceux obtenus par ombroscopie.

La vitesse du streamer est corrélée à sa forme ; plus le streamer est filamentaire, plus sa vitesse est grande. Selon Yamashita *et al*, la vitesse moyenne des streamers positifs filamenteux dans le n-hexane est de l'ordre de 1.1 à 2 km/s alors que celle des streamers positifs buissonneux est de l'ordre de 120 à 270m/s (Figure II.1 et Figure II.2). Les streamers sont d'autant plus rapides qu'ils sont filamenteux.

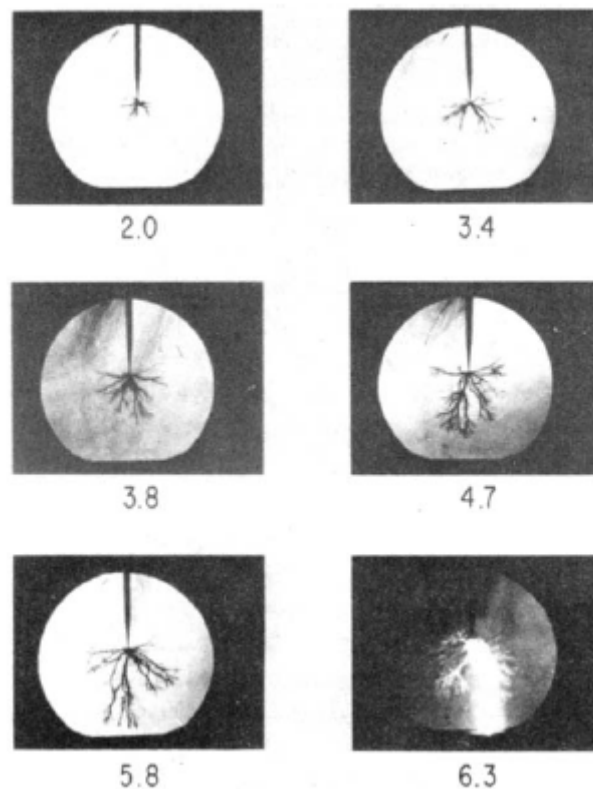


Figure II.1: Propagation d'un streamer positif et transition vers la décharge dans l'huile (le temps est en microsecondes, $d = 1.27 \text{ cm}$, $U = 82 \text{ kV}$).

II.4 Structure des streamers

La structure des streamers est fonction de la polarité de la pointe, du niveau de tension appliqué et de la géométrie des électrodes (distance et rayon de courbure de la pointe). La figure II.2 montre les formes de streamers les plus observées dans le cyclohexane; d'autres formes ont été également observées.

En polarité positive, lorsque la valeur du champ appliqué est modérée ($2\text{MV/cm} < E < 12\text{MV/cm}$), les streamers positifs primaires apparaissent en branches sous forme de "parapluie". Ils se propagent à une vitesse constante de l'ordre de 2 à 3 km/s.

Aux champs électriques plus élevés, $E > 12\text{MV/cm}$, des streamers de deuxième type sont observés. Ils présentent une structure spatiale assez complexe avec un canal principal illuminé de rayon compris entre 60 et 90 μm à partir duquel dérivent des branches secondaires, également lumineuses, dont les terminaisons sont sous forme de buissons de 0.7 à 1.2mm de rayon. Chaque buisson est constitué de pas moins de 20 ramifications, peu lumineuses et dont le rayon est de l'ordre de 3 à 6 μm . Les valeurs de champ nettement plus élevées engendrent un court streamer primaire suivi par un streamer secondaire puis un tertiaire, ultra rapide (sa vitesse peut dépasser 100km/s) et souvent auto-illuminé, dont la structure est très peu différente de celle des streamers secondaires.

Yamashita et al. [30] ont observé dans le cyclohexane sous tension impulsionnelle (200ns/540 μs), des streamers positifs subsoniques sous forme de buisson dont la vitesse est située entre 120 et 270m/s, à $U_+ = 9.27\text{kV}$ et $r_p = 0.5\mu\text{m}$. Lorsque le niveau de tension est augmenté, des streamers filamenteux apparaissent.

En polarité négative, les streamers prennent naissance à partir d'un champ à la pointe $E > 2.5\text{MV/cm}$ sous forme de buisson dont les branches (de diamètre de l'ordre de 30 à 70 μm) se propagent simultanément dans les directions axiale et latérale jusqu'à atteindre l'électrode opposée. Aux valeurs de champ plus élevées, le streamer apparaît sous forme de buisson assez compact et se propage à une vitesse légèrement supérieure à celle des précédents. Lorsque le champ est très élevé, une seule branche atteint l'électrode opposée à une vitesse pouvant dépasser les 100km/s.

Selon Yamashita et al. [30], la structure des streamers négatifs dans le cyclohexane, passe d'une forme sphérique à une forme hémisphérique puis en "pagode" et finalement en buisson, lorsque la tension appliquée ou le rayon de courbure de l'électrode pointe sont augmentés.

Ces auteurs rapportent également que les streamers, dans le cyclohexane soumis à une tension impulsionnelle, apparaissent sous forme de court filament qui se développe, en un court instant ($\approx 40\text{ns}$), en sphère lorsque la polarité de la pointe est négative et en buisson lorsqu'elle est positive. Dans le polyether perfluoré, les streamers, aussi bien positifs que négatifs, sont filamenteux (peu de ramifications) mais les streamers positifs se propagent à une vitesse environ 10 fois supérieure à celle des négatifs ($v_+ = 30\text{km/s}$ et $v_- = 4.5\text{km/s}$).

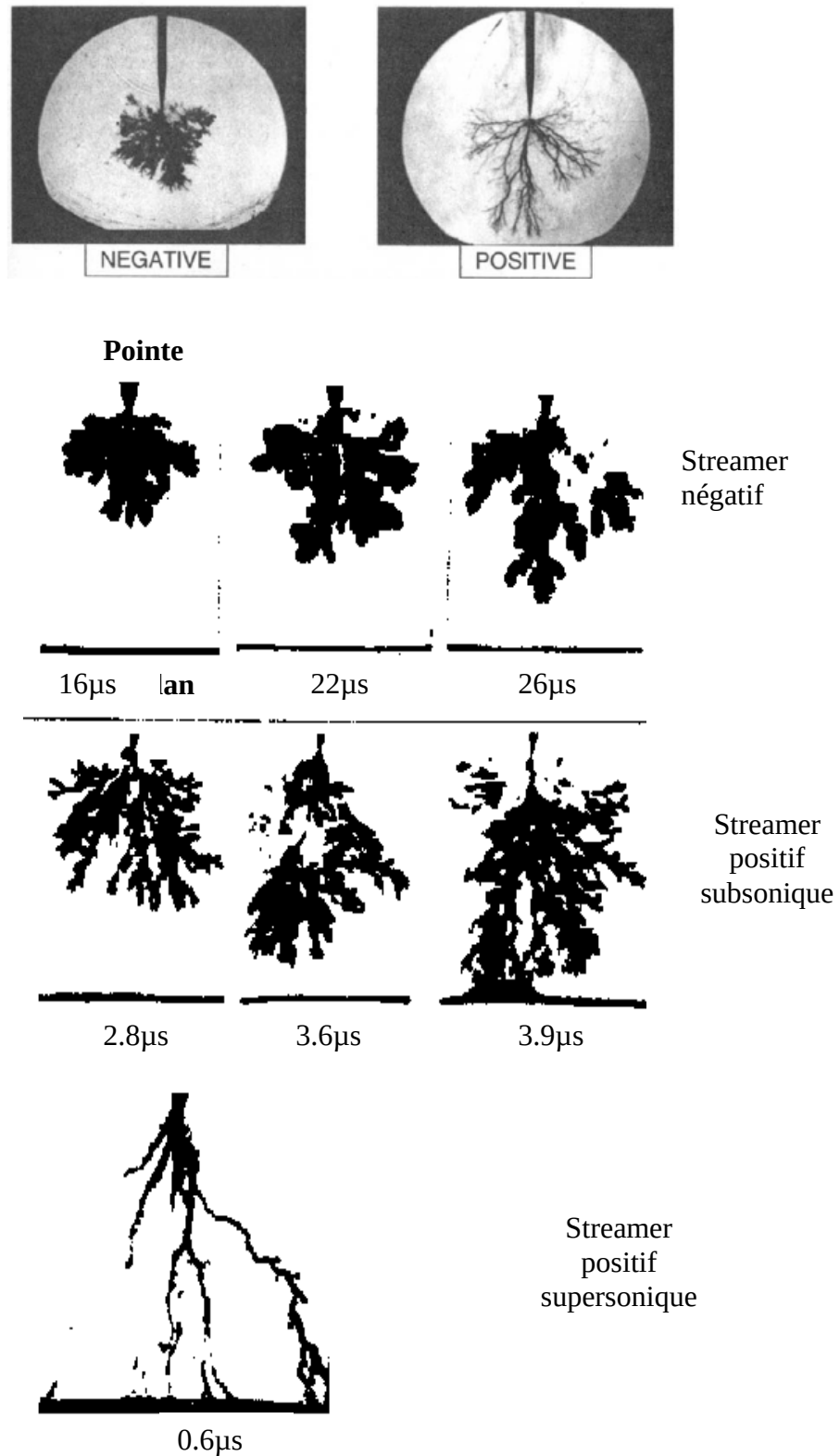


Figure II.2: Types de streamers usuellement observés dans le cyclohexane, $d=2\text{mm}$, $r_p=3\mu\text{m}$, $U=40\text{kV}$ [31]

II.5 Courants et émissions lumineuses accompagnant les streamers

Le courant transitoire des streamers est généralement accompagné d'émissions lumineuses; une bonne corrélation entre les formes de ces deux signaux caractéristiques a été largement observée. L'amplitude et la forme du courant et de l'émission lumineuse correspondante dépendent de plusieurs paramètres.

Pour les faibles distances inter électrodes ($d < 5\text{cm}$), les courants sont faibles (quelques mA) et leur forme dépend essentiellement de la polarité de l'électrode pointe. En géométrie pointe-plan, le courant des streamers lents (sous forme de buisson) est constitué de pics discrets (de durée $< 10\text{ ns}$), irrégulièrement espacés, dont l'amplitude croît généralement dans le temps au fur et à mesure que le streamer se propage. La figure II.3 montre un exemple type de streamer négatif enregistré simultanément avec le courant et la charge correspondante.

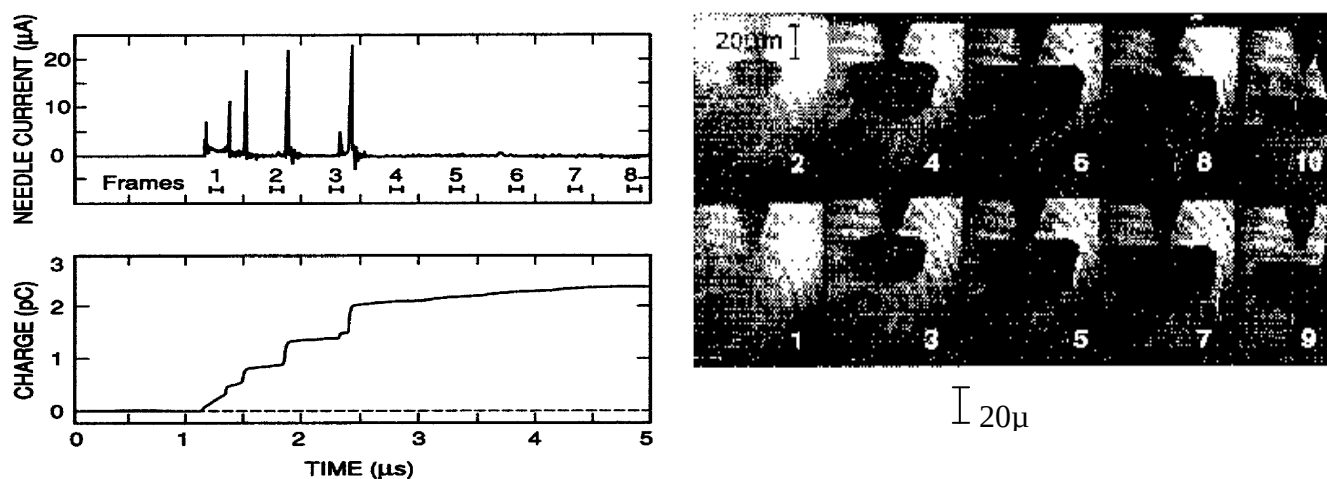


Figure II.3 : Enregistrement simultané de l'évolution d'un streamer négatif dans l'hexane avec le courant et la charge correspondante. $U=15.5\text{kV}$; $d=3.2\text{mm}$; $r_p=1\mu\text{m}$. L'intervalle entre images et le temps d'exposition sont respectivement de 512 et 102ns [32].

Le signal lumineux le long de l'intervalle inter électrodes présente une forme similaire à celle du courant. Cependant, certains auteurs ont observé des pics de courant sans que ceux-ci soient accompagnés de pics de lumière et vice-versa [33]. Le nombre et l'amplitude des impulsions de courant et d'émission lumineuse augmentent avec le niveau de tension appliqué, pour un liquide donné.

Le signal lumineux (Figure II.4) émis par les streamers positifs filamenteux rapides est constitué d'une impulsion unique et le courant présente une composante continue sur laquelle se superposent d'autres impulsions de fréquence plus régulière que celles relatives aux streamers négatifs. Le courant augmente de façon continue jusqu'à atteindre une valeur maximale généralement attribuée à l'arrivée du streamer sur la barrière isolante recouvrant l'électrode plane [33, 34].

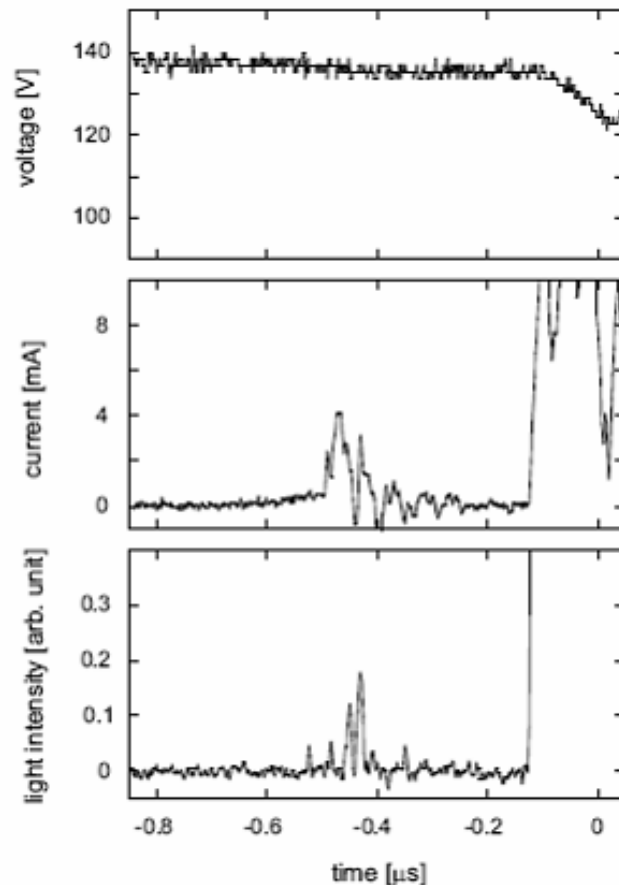


Figure II.4 : Emission lumineuse de pré claquage[46]

Sous les deux polarités, l'amplitude du courant et l'intensité de l'émission lumineuse augmentent avec la vitesse de propagation du streamer. Les courants des streamers rapides sont toujours supérieurs à ceux des streamers lents. La figure II.5 monte le courant associé à un streamer rapide dans l'huile minérale de transformateur.

Pour les longues distances (5 à 100cm), les courants de streamers aussi bien positifs que négatifs, sont constitués de pics irrégulièrement espacés [35,36]. L'amplitude de ces pics peut atteindre quelques ampères. La durée de chaque pic dépend du liquide testé ; elle est inférieure à 20ns dans l'huile minérale soumise à une impulsion positive (1.2/700 μs) en longues distances ($d=20\text{cm}$) et de l'ordre de 300ns dans le benzyl-toluène. La forme du courant et de l'émission lumineuse des streamers positifs et négatifs sous tension alternative est similaire à celle observée sous tension impulsionnelle ou en créneau de tension [37].

De la même manière que pour le courant, la forme et l'amplitude de la charge électrique des streamers positifs et négatifs dépendent de la vitesse de ces streamers. La charge globale des streamers positifs et négatifs rapides est plus importante que celle des streamers lents. Cependant, La vitesse de propagation du streamer et sa charge totale sont d'autant plus faibles que la distance inter électrodes est élevée et/ou le niveau de tension appliqué est faible.

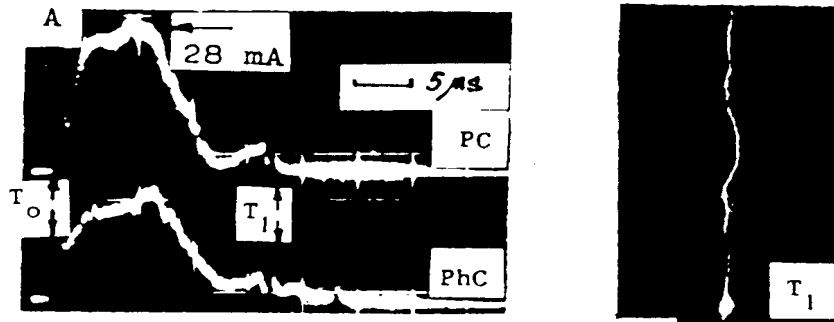


Figure II.5 : Enregistrement de la phase finale d'un streamer positif rapide (à droite) dans l'huile de transformateur et le courant et émission lumineuse correspondante (à gauche). $U=100\text{kV}$; $d=50\text{mm}$; $r_p=5\mu\text{m}$. [5]

II.6 Influence de différents paramètres sur les streamers

II.6.1 Influence des propriétés physiques du liquide

II.6.1.1 Influence de la viscosité

L'influence de la viscosité sur la forme et la vitesse des streamers est différemment appréciée selon les auteurs. Badent *et al* [38], ont mené une étude sur une huile de transformateur soumise à des températures entre -40 et $+25$ °C, lui donnant ainsi des viscosités comprises entre 15 et 3114 cSt. Ils trouvent que les streamers positifs vont d'une forme en parapluie à filamenteuse et les négatifs vont d'une forme en buisson à celle en éventail, lorsque la viscosité est augmentée.

En considérant ainsi cette évolution des formes, les vitesses devraient augmenter avec la viscosité, à l'inverse de ce qui a été rapporté par Watson *et al* [23] sur les huiles silicones. En considérant des polybutènes de viscosité variant de 90 à 4.10^5 cSt, Beroual [28] n'a pas observé d'effet significatif de la viscosité.

Le temps de retard au claquage diminue et la tension d'initiation des streamers positifs augmente avec l'accroissement de la viscosité dans l'huile minérale [38], alors que dans les polydiméthylsiloxanes, la variation du temps de retard au claquage est insignifiante lorsque la viscosité est multipliée par 1000 [28].

II.6.1.2 Influence de la masse volumique

Une tentative de classification des liquides diélectriques en fonction de leur masse volumique et de la vitesse des streamers positifs s'y propageant, a été établie par Sakamoto et Yamada [39]. Cette classification trouve ses limites dans le cas des liquides halogénés où la vitesse des streamers est nettement plus élevée que dans les liquides sans halogènes comme l'a montré Béréal [28].

II.6.1.3 Structure du liquide

La structure et l'affinité électronique des molécules d'un liquide sont des caractéristiques intrinsèques déterminantes quant à la forme et la vitesse des streamers. Dans les liquides halogénés, les vitesses des streamers positifs et négatifs sont plus importantes que celles obtenues dans les liquides sans halogènes. La présence d'un seul atome de chlore dans le chlorocyclohexane mène à une multiplication de la vitesse des streamers négatifs par un facteur 10 par rapport à celle obtenue dans le cyclohexane pur. Dans un système d'électrodes pointe-plan, le streamer positif est plus filamentaire, donc plus rapide, dans le chlorocyclohexane que dans les autres liquides tels que le cyclohexane, le transdécahydronaphthalène et le cis-décahydronaphthalène.

Dans la plupart des hydrocarbures saturés, avec des pointes de rayon $r_p > 10 \mu\text{m}$, le streamer négatif présente une structure en buisson alors que dans les liquides aromatiques purs (hydrocarbures non saturés), on observe une structure filamentaire [24].

II.6.2 Influence des variables d'état

II.6.2.1 Influence de la pression

Il est connu depuis longtemps qu'en appliquant une pression à un isolant liquide donné, on améliore de façon importante la rigidité diélectrique de celui-ci.

Le volume, le courant et la lumière émise par les streamers négatifs sont fortement affectés par l'application d'une modeste pression hydrostatique [24]. Lorsque la pression augmente, le nombre et l'amplitude des pics de courant, la lumière émise et le volume du streamer négatif diminuent [24,28,30]; ils disparaissent pour une pression suffisamment élevée. La pression hydrostatique nécessaire à la disparition de ces impulsions est d'autant plus importante que la charge correspondant à ces pics de courant est élevée. En général, la pression nécessaire à la disparition des streamers positifs rapides est plus importante que celle nécessaire aux streamers négatifs lents [24].

Aucun effet appréciable n'a été cependant relevé lorsque la pression est diminuée en dessous de la pression atmosphérique.

II.6.2.2 Influence de la température

Selon Hoch et Reinders [40], la rigidité de l'huile minérale est meilleure entre 20 et 80°C. Elle est cependant améliorée au plus de 30% à la température de 60 °C, que ce soit dans l'huile seule ou en présence de 35% de CCl_4 .

En portant l'hexane jusqu'à une température proche de son point d'ébullition, McGrath et Nelson [41] n'ont observé pratiquement aucun effet sur les phénomènes de

préclaquage. La vitesse des streamers positifs passe de 2.3 km/s à seulement 2.7 km/s lorsque la température varie de 5 à 42 °C ; celle des streamers négatifs ne subit aucune variation.

La vitesse des streamers positifs dans le cyclohexane passe de 1.9 km/s à 3km/s lorsque la température est élevée de 18 à 76°C ; alors qu'aucun changement dans la tension de génération n'a été relevé dans ce liquide [31]. Seule une légère augmentation du nombre et de l'amplitude des pics de courant et de lumière, a été observée. Par contre ; lorsqu'on baisse la température à une valeur comprise entre -6 et -30 °C, la tension de génération devient beaucoup plus importante qu'aux températures supérieures à +5 °C : Elle augmente de 15 à 25 kV en polarité négative et de 17 à 26 kV en polarité positive [31].

II.6.3 Influence du niveau de tension appliqué

Nakao et al. [42] ont rapporté que dans le n-hexane, les streamers positifs deviennent plus filamenteux et leur vitesse augmente lorsque la tension ou/et la concentration d'un additif comme le N,N'-dimethylaniline (D.M.A.) augmente.

Selon Yamashita et al.[43], lorsque la tension (impulsion : 200ns/540µs) augmente, la forme des streamers négatifs dans le cyclohexane change de sphère en hémisphère pour prendre une forme en buisson lorsque la tension est suffisamment élevée.

Cependant, d'après les résultats rapportés par ces auteurs, seul le streamer en 'buisson' est susceptible d'atteindre l'électrode opposée. Les autres se désintègrent en petites bulles après avoir parcouru une certaine distance.

Beroual [31] a observé une augmentation de la vitesse des streamers aussi bien positifs que négatifs dans le cyclohexane lorsque la tension est augmentée. Elle est de l'ordre de 30m/s à U=20kV et passe à environ 80m/s à U=40kV, lorsque la polarité de la pointe est négative. En polarité positive, elle est de l'ordre de 0.3km/s à U=25kV et passe à 0.5km/s pour une tension de 40kV.

La vitesse des streamers négatifs est également affectée par la pente d'une rampe de tension. Elle est de l'ordre de 40m/s pour une pente de $4,3 \cdot 10^{10}$ V/s et passe à 100m/s lorsque la pente est de $2,4 \cdot 10^9$ m/s. Ces résultats ont été obtenus pour une distance inter-électrodes de 2mm et un rayon de la pointe de 3µm.

II.6.4 Influence du rayon de courbure de la pointe

Pour obtenir des valeurs de champ très élevées pour des tensions modestes (quelques kilovolts), on utilise des électrodes pointes dont les rayons de courbure r_p peuvent être inférieures à 1µm. La phase d'initiation et la forme des streamers initiés sont fortement dépendants de l'intensité du champ électrique local alors que la propagation est également entretenue par le champ électrique moyen. En tension alternative et impulsionnelle, Les streamers sont générés à $E_0 > 10\text{MV/cm}$ lorsque r_p est inférieur à 3µm, alors que pour $r_p > 100\mu\text{m}$, ils sont générés à $E_0 > 1\text{MV/cm}$. E_0 est le champ harmonique sur la pointe assimilée à une hyperboloïde de révolution sans injection de charges.

D'après Yamashita et al [43], la tension de génération des streamers augmente avec le rayon de courbure de la pointe; elle est plus élevée lorsque la pointe est positive que lorsqu'elle est négative. Il existe un rayon de courbure critique r_c ($r_c=5$ à $6\mu\text{m}$ dans le cyclohexane) à partir duquel la forme et la vitesse des streamers change. Aux rayons $r_p > r_c$, seuls les streamers en buisson sont observés en pointe négative et, aux rayons $r_p < r_c$, les formes en sphère, hémisphère et en "pagode" sont également observées. En polarité positive, lorsque la tension appliquée est faible et $r_p < r_c$, la structure des streamers est en forme de buisson, alors que pour les fortes tensions et $r_p > r_c$, elle devient filamenteuse.

II.6.5 Influence des additifs

II.6.5.1 Additifs capteurs d'électrons

Afin de montrer l'influence des processus électroniques sur les phénomènes de préclaquage, Devins et al. [22] étudièrent séparément l'influence d'additifs capteurs d'électrons et à bas potentiel d'ionisation. L'addition d'une faible quantité (0.05 mole/l) d'additif capteur d'électrons non ionique tel que l'hexafluorure de soufre (SF_6) ou le chlorure d'éthylène ($\text{C}_2\text{H}_5\text{Cl}$) à l'huile naphénique ou au 2,2,4 triméthyl-pentane, rend les streamers négatifs plus filamenteux et augmente leur vitesse d'un facteur 5. Un effet similaire est rapporté sur l'action du CCl_4 et le $\text{CF}_3(\text{CF}_2)(\text{CF}_3)$ sur le n-hexane.

A. Beroual *et al* [45] obtiennent une multiplication par 10 de la vitesse des streamers négatifs en ajoutant 0.04 mole/l de CCl_4 au cyclohexane. Il n'y a pas d'effet notable de ces additifs sur les streamers positifs dans les mêmes liquides.

L'action du CCl_4 augmente également le nombre et l'amplitude des pics de courant des streamers négatifs dans le cyclohexane et dans le n-hexane. Lorsque la concentration de CCl_4 atteint 0.08 mole/l , le courant tend vers une forme ayant une composante continue.

II.6.5.2 Additifs à bas potentiel d'ionisation

L'addition d'un composé non ionique à bas potentiel d'ionisation tel que le N,N-diméthylaniline (DMA) n'a pas d'effet sur la vitesse des streamers négatifs dans une huile naphénique (Marcol 70) et dans le 2,2,4-triméthyl-pentane [22], tandis qu'elle augmente (d'un facteur 2 ou 3) celle des streamers positifs. Aucun effet remarquable de cet additif n'est cependant observé sur la vitesse des streamers positifs dans le n-hexane.

A. Beroual et al. [45] obtiennent une légère augmentation de la vitesse des streamers négatifs et une multiplication par 3 de celle des streamers positifs, en ajoutant 0.05 mole/l de tétraméthyle paradiphénylamine (TMPD) au cyclohexane. Il existe cependant une valeur de la concentration (0.4 à 0.5 mole/l) au-dessus de laquelle aucune augmentation significative de la vitesse n'est observée [44,45].

II.7 Courants étudiés

Cette partie portera essentiellement sur l'étude des courants des streamers dans l'huile minérale de transformateur principalement, soumis à un champ électrique divergent sous tension alternative 50Hz. Ces courants qui feront l'objet de notre travail ont été acquis dans un travail antérieur [46] au laboratoire de haute tension à l'Ecole Centrale de Lyon .

II.8 Fréquence d'apparition des streamers

Dans l'huile minérale, les streamers positifs apparaissent plus tôt que les streamers négatifs. Leurs courants, assez reproductibles (figure II.6), sont nettement supérieurs en amplitude et en durée. Les rares streamers négatifs enregistrés dans l'huile minérale sont peu énergétiques et apparaissent à des niveaux de tension proches du seuil de claquage. Dans le toluène, ce sont plutôt les streamers négatifs qui apparaissent en premier et leur proportion est toujours supérieure à celle des streamers positifs.

Dans l'huile minérale, la fréquence d'apparition des streamers augmente avec le niveau de tension appliqué (figure II.7) et, pour un niveau de tension donné, elle diminue lorsque la distance inter-électrodes augmente. Lorsque cette fréquence d'apparition avoisine les 100 streamers/min, des claquages apparaissent dans l'huile minérale alors que dans le toluène, les claquages ne sont observés que lorsque l'on atteint les 200 streamers/min.

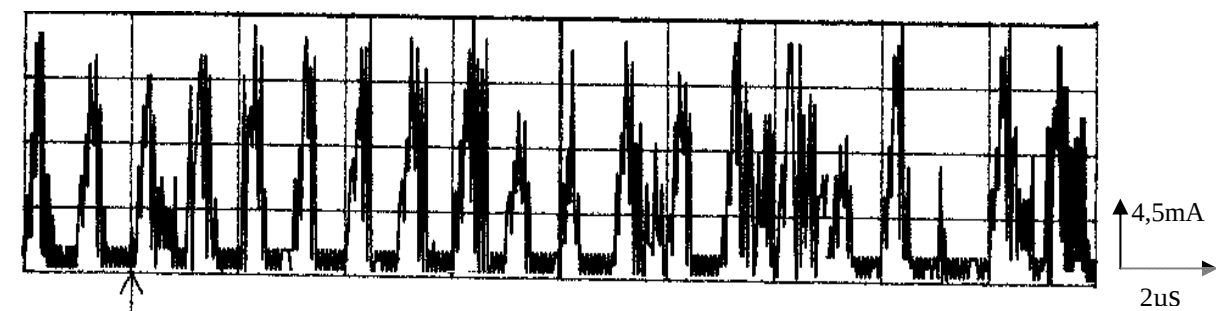


Figure II.6 : Enregistrement d'une série de 20 événements successifs dans l'huile minérale
 $D = 5\text{mm}$, $U=22\text{kV}$, 4.5mA/div. [46]

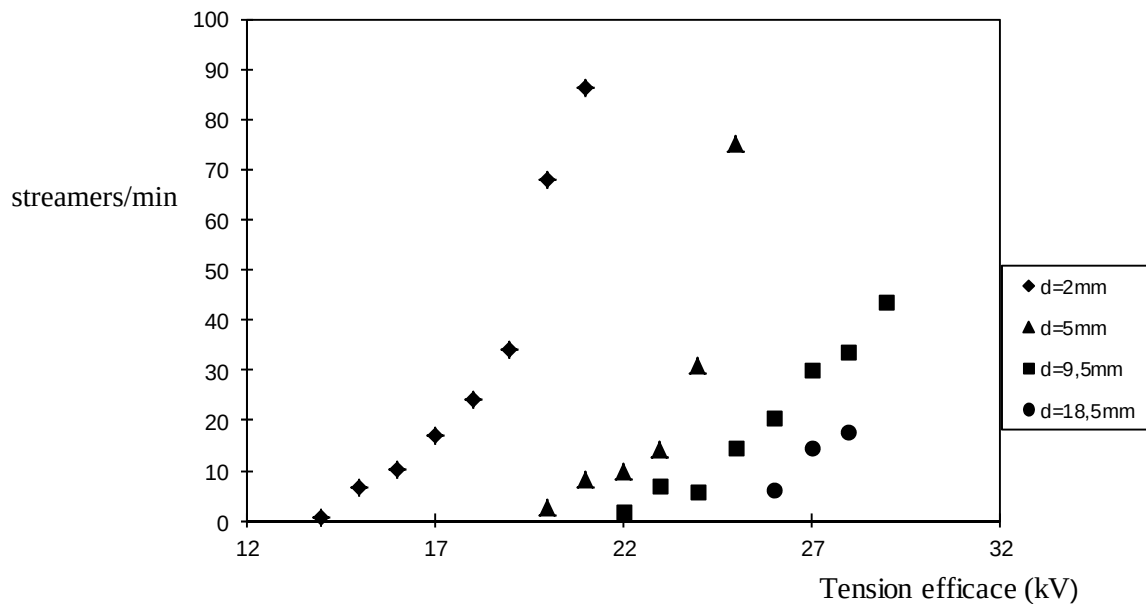


Figure II.7 : Variations du nombre de streamers initiés par minute en fonction de la tension appliquée dans l'huile minérale pour différentes distances inter-électrodes, $r_p=10\mu\text{m}$. [46]

II.9 Formes des courants

Selon l'amplitude de la tension appliquée, différentes formes de courant peuvent être observées. Celles-ci apparaissent sous les deux alternances (positive et négative) lorsque la tension dépasse une certaine valeur seuil correspondant à l'initiation des streamers. L'apparition des streamers positifs devient plus fréquente que celle des streamers négatifs. Les figures II.(8,9,10 et 11) montrent les différentes formes de courant, observées dans l'huile minérale sous différentes tensions et dans la même géométrie des électrodes [46].

Les courants des figures II (9 et 10) sont caractérisés par une composante continue qui augmente dans le temps jusqu'à une valeur maximale correspondant à leur arrivée sur le plan. Sur cette composante continue sont superposés des pics de courant dont l'amplitude diminue avec l'accroissement de la tension appliquée. Le temps de décroissance du courant correspondant à l'extinction du streamer, tend à augmenter avec la tension.

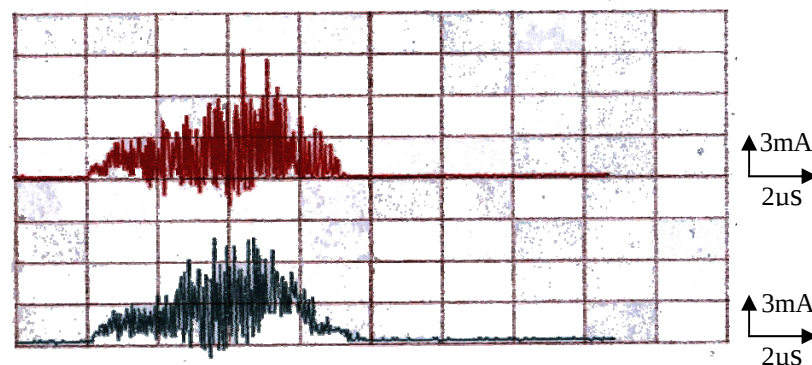


Figure II.8 : Décharge dans l'huile minérale (1) [46]

Ce type de décharge ne présente pas de risque potentiel pour le transformateur.

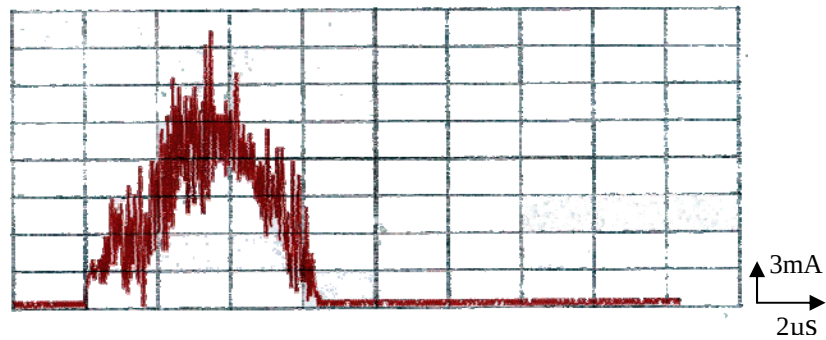


Figure II.9 : Décharge dans l'huile minérale (2) [46]

Ce type de décharge également ne présente pas de risque potentiel pour le transformateur

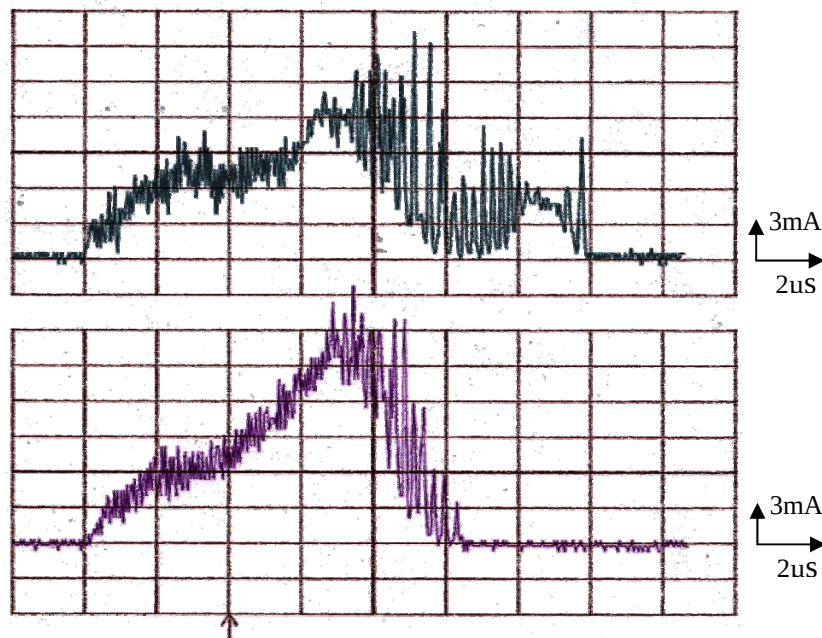


Figure II.10 : Décharge dans l'huile minérale (3) [46]

Ce type de signal est plus ou moins dangereux.

Les courants du même type que ceux de la figure II.10 peuvent transiter vers un courant du type de la figure II.11, constitué d'un ou deux forts pics de courant positifs (3 à 4 fois la valeur maximale de la composante continue) puis s'inverse brusquement sous forme de trois ou quatre pics négatifs de très forte amplitude (10 fois la valeur maximale de la composante continue).

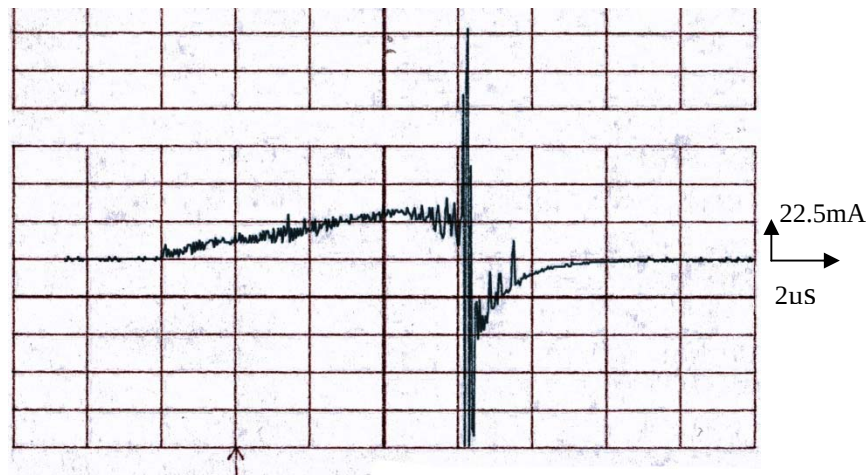


Figure II.1 : Courant de claquage dans l'huile minérale
($2\mu\text{s}/\text{div}$; $22.5\text{mA}/\text{div}$) [46]

Ce type de signal est dangereux pour le transformateur.

II.10 Formes des courants en fonction de la tension appliquée

Lorsque la tension est augmentée, l'amplitude de la composante continue des courants positifs augmente jusqu'à une valeur maximale. Cette valeur maximale est atteinte à une tension appliquée de 27kV. Au-delà de ce niveau de tension, la composante continue du courant du streamer reste inchangée, mais ce dernier est souvent suivi par un claquage de type arc du diélectrique, caractérisé par un courant bref et de forte amplitude (figure II.11, $U=29\text{kV}$).

L'amplitude des pics se superposant sur la composante continue du courant, durant sa montée, diminue avec le niveau de tension appliqué. Par contre, l'amplitude et la durée des pics accompagnant sa décroissance, augmentent avec cette dernière. La figure II.12 montre un type de courant observé dans l'huile minérale lorsque la tension est suffisamment élevée ($U=28\text{kV}$ à $d=12\text{mm}$). Après son arrivée sur le plan, le streamer tend à se maintenir en générant un courant sous forme de pics semblables à ceux caractérisant les streamers négatifs lents. A priori, cela semble correspondre à un streamer positif filamentaire relayé par un streamer en buisson. Ce phénomène est d'autant plus observé que la distance inter-électrodes est faible.

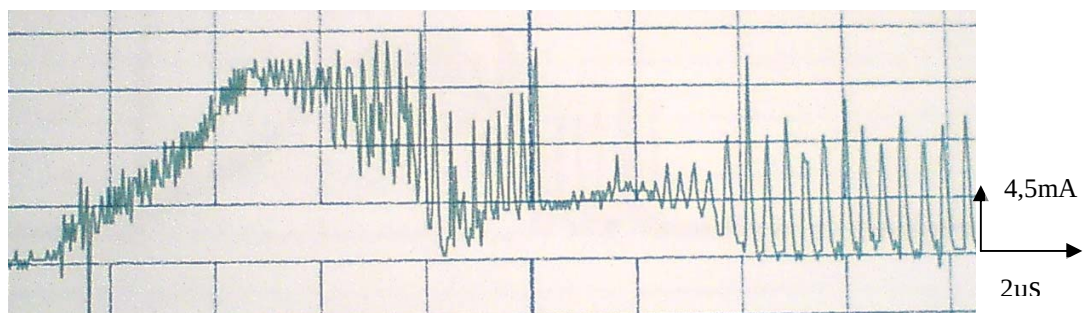


Figure II.12 Courant de streamer positif dans l'huile minérale, suivi d'un train d'impulsions
[46]

La figure II.13 montre les formes de courants en fonction de la tension appliquée

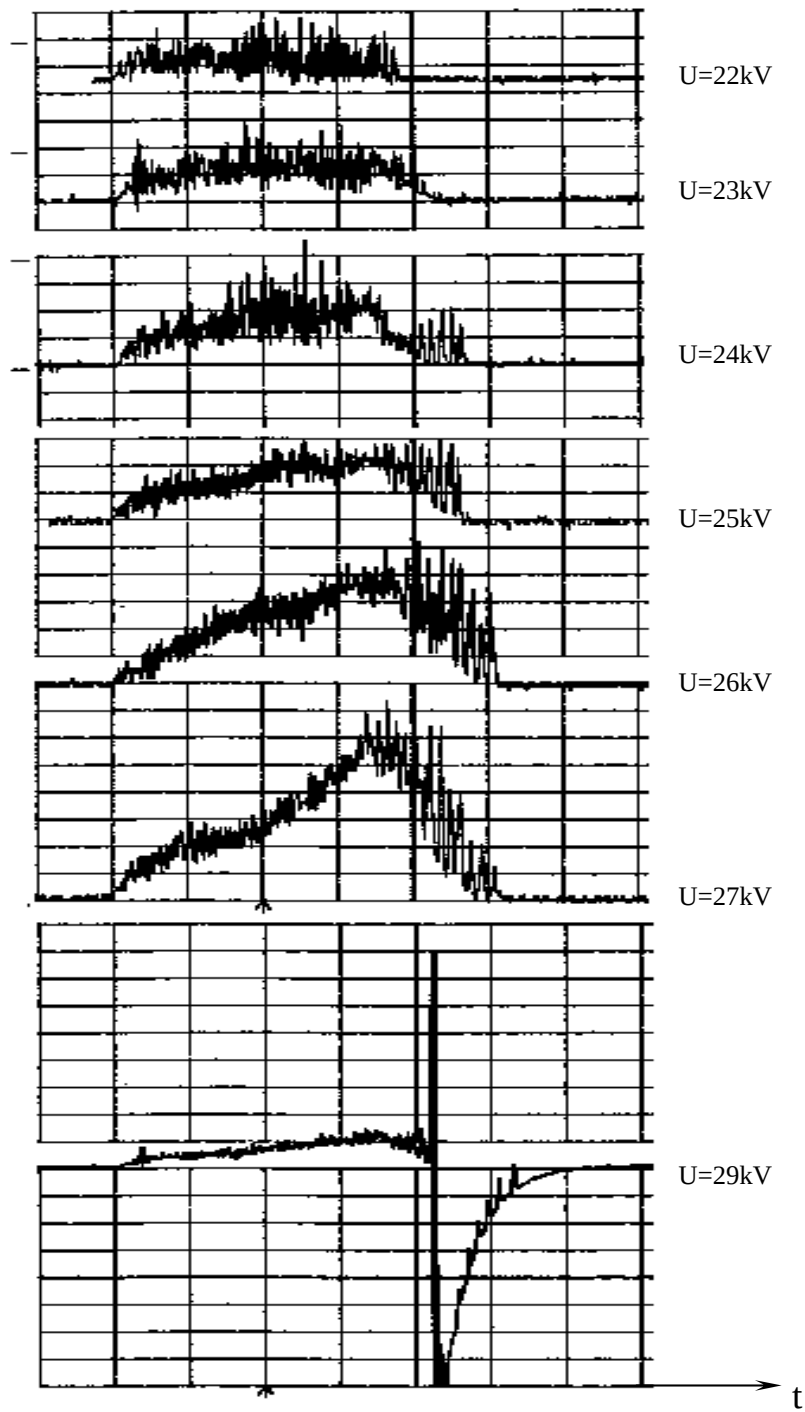


Figure II.13 Évolution des courants typiques de streamers positifs en fonction du niveau de tension appliqué dans l'huile minérale.

$d=9.5\text{mm}$, $r_p=10\mu\text{m}$. $2\mu\text{s/div}$; 3mA/div (sauf dernier signal : 15mA/div) [46]

II.11 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de connaître la nature des streamers, leur processus de propagation et de transition au claquage. Les mécanismes de propagation sont complexes et multiples. Il y a contribution simultanée de processus thermiques et électroniques. L'apparition des différents types de streamers dépend de plusieurs paramètres : énergie mise en jeu, polarité, nature du liquide ... De même qu'il existe une parfaite corrélation entre le courant du streamer, l'émission lumineuse correspondante, sa forme et sa vitesse.

La forme des courants diffère selon le niveau d'énergie mis en jeu. Ce niveau d'énergie est très lié au niveau de tension appliqué.

Sous tension alternative en polarité positive, les courants des streamers sont tous caractérisés par une composante continue sur laquelle sont superposés des pics de fréquences élevées.

Les formes de courants présentées dans ce chapitre vont servir de base pour la suite de ce travail (chapitre V).

Chapitre III

Caractérisation des signaux

III.1 Introduction

Le type de signaux étudié est d'origine non stationnaire et non reproductible. Leur caractérisation est complexe et difficilement accessible. Ceci nécessite l'utilisation d'un modèle prédictif basé sur le calcul de probabilités et statistiques. C'est justement dans l'évolution de leurs caractéristiques (statistiques, fréquentielles, temporelles, spatiales) que réside l'essentiel de l'information qu'ils contiennent. Les signaux de décharge sont à ce titre exemplaires. Or l'analyse de Fourier propose une approche globale du signal, les intégrations sont faites de moins l'infini à plus l'infini, et toute notion de localisation temporelle disparaît dans l'espace de Fourier ; il faut donc trouver un compromis, une transformation qui renseigne sur le contenu fréquentiel tout en préservant la localisation afin d'obtenir une représentation temps/fréquence ou espace/échelle du signal [50].

Dans cette partie, nous rappelons dans un premier temps quelques résultats sur la transformée de Fourier qui a longtemps dominé le traitement de signal laissant peu de place aux mathématiques modernes. Nous terminerons par la présentation des transformées en ondelettes et de la droite de régression du signal pour leur implantation dans un programme basé sur les réseaux de neurone artificiels.

III.2 Transformée de Fourier

III.2.1 Transformée de Fourier et analyse temps-fréquences [51]

Dans le contexte de description des signaux liés au monde réel, les transformations linéaires ont toujours joué un très grand rôle, et parmi ces dernières, la plus célèbre et la plus anciennement étudiée est la transformation de Fourier (1822). Cette transformation permet d'explorer la composition fréquentielle du signal et, par ses propriétés, de lui appliquer facilement des opérateurs de filtrage. Lors de cette transformation, le signal est décomposé sur un ensemble de signaux de base qui sont les cosinus et sinus ou l'exponentielle imaginaire.

Du point de vue mathématique, un signal est une fonction $S(x)$, représentant une information d'origine variée (acoustique, optique, mécanique, ...etc.). L'analyse de ce signal consiste à mettre en évidence certains phénomènes (transitoires, périodiques, ...etc.) qui le composent dans le cas d'une analyse en fréquence.

Dans le cas de l'analyse par transformée de Fourier, les fonctions analysantes sont les ondes pures de fréquence f . La transformée de Fourier peut être vue comme une représentation à base de sinusoides qui sont bien localisées en fréquences, mais pas en temps (ou espace) car leur support est infini (c'est une conséquence de leur périodicité). Donc les inconvénients de l'analyse par la transformée de Fourier proviennent du fait que les fonctions analysantes sont à support de longueur infinie, ce qui ne correspond pas à un signal physique qui est un support temporel fini.

On peut en particulier résumer les limites de la transformée de Fourier dans les points suivants:

Pour calculer $S(f)$, il faut connaître l'ensemble des valeurs de $S(x)$ sur R , de même que, la reconstitution de S à partir de $S(f)$ dépend de l'ensemble des valeurs de $S(f)$ sur R .

Or, dans la pratique, on ne peut connaître une fonction sur un temps de longueur infinie (perte de localisation temporelle).

Considérons un signal composé d'une succession de deux sinusoïdes de fréquences différentes, la première étant sinusoïde d'une fréquence de 30Hz et la deuxième de 10Hz (figure III.1). La transformée de Fourier indique les fréquences, mais ne donne aucune information concernant l'ordre d'apparition des sinusoïdes (figure III.2).

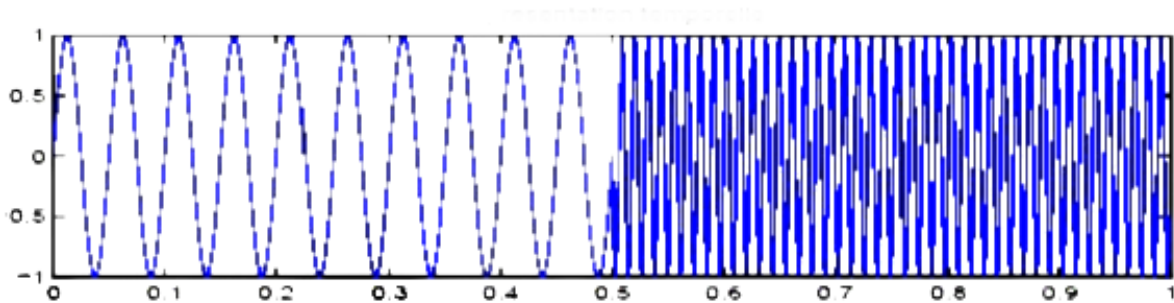


Figure III.1 Signal de deux sinusoïdes (Représentation temporelle)[44]

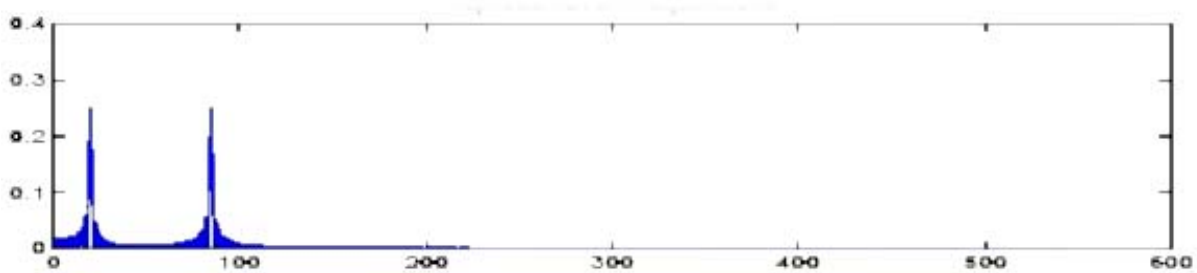


Fig. III.2 Signal de deux sinusoïdes (sa transformée de Fourier) [44]

L'analyse en fréquence ne nous informe pas sur la localisation temporelle du changement du régime dans le signal.

III.2.2 Transformée de Fourier à fenêtre glissante

Pour répondre au problème de localisation de la transformée de Fourier, D. Gabor a introduit vers les années 40 l'approche de la transformée de Fourier à fenêtre glissante. Il s'agit de "découper" le signal en petits "morceaux" et de calculer ensuite leurs transformées de Fourier (Figure III.3). Dans la pratique, cette méthode consiste à multiplier le signal $S(x)$ par une fonction (fenêtre) localisée dans le temps ou l'espace (support compact ou d'excroissance rapide par exemple) $h(x-b)$; ainsi la transformée de Fourier à fenêtre glissante est définie par :

$$T^f_{\text{en}} S(s, b) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} S(x) \overline{h(x-b)} e^{-is(x-b)} dx \quad (2)$$

$T^{fen}S(\xi, b)$ Renseigne sur la nature fréquentielle du signal S au voisinage du point b . Un choix particulier de la fenêtre est celui de D. Gabor.

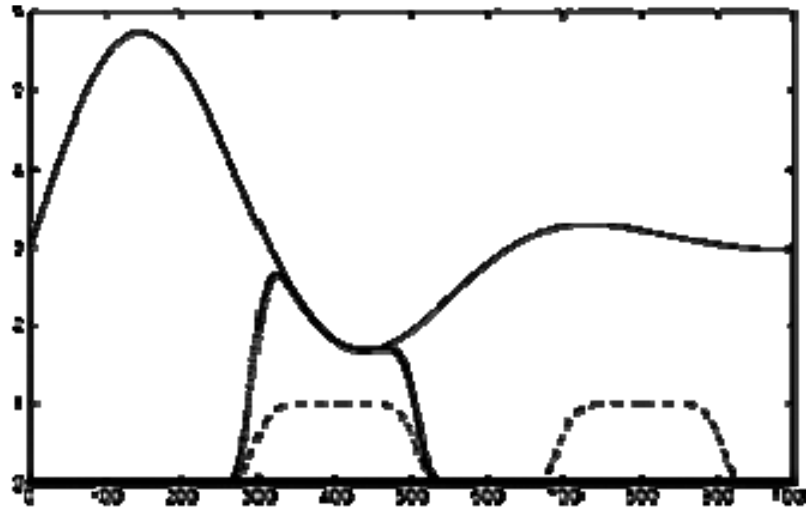


Figure III.3 Multiplication du signal par la fenêtre glissante. [44]

$$h(x - b) = \frac{1}{\sqrt{a_0}} e^{-\frac{1}{2}(\frac{x-b}{a_0})^2}. \quad (3)$$

Où a_0 est fixe (échelle).

Un autre choix classique de la fenêtre est celui d'une gaussienne :

$$h(x) = C e^{-\alpha x^2} \quad (C, \alpha) \in \mathbb{R}_+^2. \quad (4)$$

L'analyse par cette transformée permet de retrouver à la fois les fréquences et l'information temporelle (l'ordre dans lequel elles surviennent).

III.2.3 Limites de la TF à fenêtre glissante

Le signal de la figure III.4 est caractérisé par les deux phénomènes suivants :

- Deux sinusoides successives
- Deux masses de Dirac qui présentent des défauts locaux d'enregistrement (perturbations).

L'analyse par transformée de Fourier à fenêtre glissante ne permet pas de mettre en évidence simultanément les deux phénomènes. Ceci est dû à la taille de la fenêtre qui est fixe (figure III.4 et figure III.5).

En effet, pour le choix de la taille de la fenêtre, a_0 égale à la fréquence des sinusôides, la transformée de Gabor permet de localiser l'ordre d'apparition des sinusôides (Figure III.4), alors que pour le choix de a_0 égal à la fréquence des pics de Dirac, cette transformée renseigne sur la localisation temporelle des pics, mais cette fois les informations concernant les fréquences des sinusôides sont perdues (Figure III.6).

En particulier, il est impossible de trouver une échelle a_0 qui permet en même temps de trouver les fréquences des sinusôides et de localiser dans le temps les pics de Dirac.

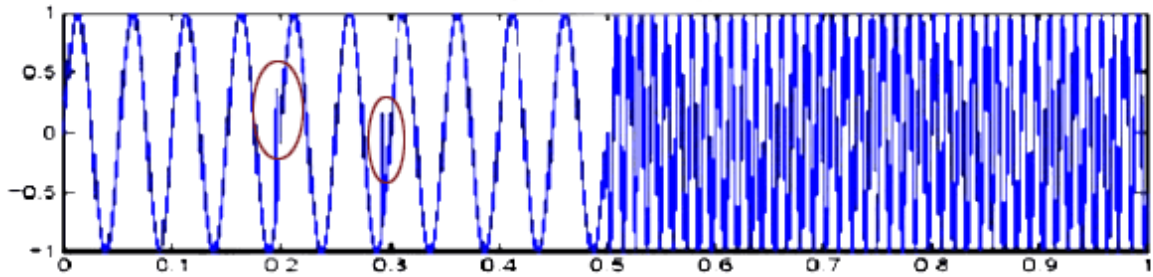


Figure III.4 Signal de deux sinusôides et deux Dirac. [44]
(Fonction à analyser)

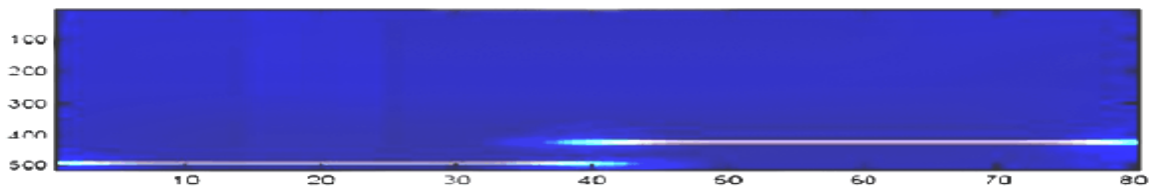


Figure III.5 Transformée de Gabor du signal de deux sinusôides et deux Dirac.
(avec $a_0 = \alpha_{\text{sinusoides}}$)

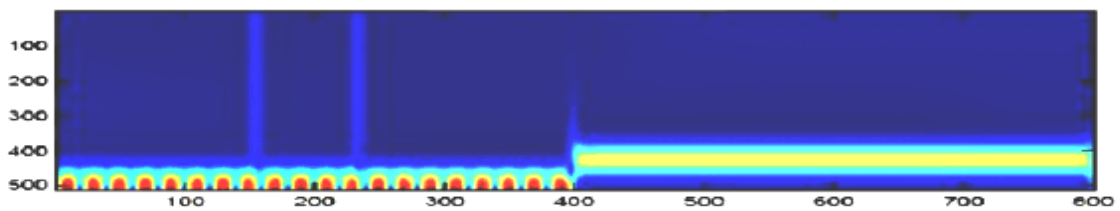


Figure III.6 Localisation des pics de Dirac (avec $a_0 = \alpha_{\text{Dirac}}$) [44]

Ce phénomène trouve une explication du fait qu'il est impossible de trouver en pratique une fenêtre h qui soit bien localisée à la fois en temps et en fréquence. Autrement dit, il n'existe aucune fonction d'énergie finie qui soit à support compact à la fois en temps et en fréquence, et ceci est justifié par le principe d'incertitude d'Heisenberg qui interdit à un signal donné d'avoir une localisation arbitraire précise en temps et en fréquence.

Autrement dit, si une fonction f non nulle est à support compact, alors sa transformée de Fourier ne peut s'annuler sur tout un intervalle. Cette limite de la transformée de Gabor est à la base de l'introduction du concept de la transformée en ondelettes. L'analyse en ondelettes a pour objectif de rendre compte de ces deux phénomènes simultanément, en introduisant une fenêtre dont la taille varie avec la fréquence.

III.3 Les Ondelettes

III.3.1 Historique

Très tôt dans l'histoire du traitement du signal, il est apparu que la transformée de Fourier n'était pas toujours la plus satisfaisante et la première transformation en ondelettes (le nom n'est pas encore utilisé) est proposée par Haar en 1910; il serait plus judicieux de parler alors de «paléo-ondelette». La transformée en ondelettes est un outil qui découpe les données, les fonctions ou les opérateurs en composantes fréquentielles suivant une résolution adaptée à l'échelle.

Les précurseurs conscients de cette technique ont été des mathématiciens (Calderon 1964), des physiciens (Aslaken et Klauder en 1968, Paul en 1985), et surtout des ingénieurs (ou des chercheurs en sciences pour l'ingénieur) comme Esteban et Galand (1977), Smith et Barnwell (1986), Vetterli (1986). Nous pourrions parler dans leur cas de «pré-ondelette». Mais le premier à avoir utilisé la méthode et le premier à avoir proposé le nom d'ondelettes fut Jean Morlet (1983). Le problème traité par Morlet était celui de l'analyse de données issues de sondages sismiques effectués pour des recherches géologiques ; ces données faites de nombreux transitoires sont particulièrement adaptées à une technique d'analyse conservant la notion de localisation de l'événement tout en fournissant une information sur son contenu fréquentiel ce qui est tout l'intérêt de ce type de transformation. Les résultats obtenus par Morlet et formalisés par le physicien Alex Grossmann ont rapidement éveillé l'attention de nombreux chercheurs et bientôt des bases mathématiques solides ont été mises en place faisant apparaître la notion de base orthogonale (Y.Meyer 1985), d'analyse multirésolution (S. Mallat 1989 [52-54]) et d'ondelettes à support compact (I. Daubechies 1988) [55].

Les ondelettes modernes étaient nées [56]. Les recherches tant théoriques qu'appliquées se sont très largement développées ces dernières années au point que les ondelettes sont maintenant très à la mode et qu'on a parfois voulu en faire l'outil idéal adapté à tous les problèmes.

Les applications les plus prometteuses qui semblent se dégager se retrouvent dans les domaines de l'analyse vocale, de l'analyse des signaux radar et dans le domaine de la compression des images. Les thématiques de recherche s'orientent vers les transformées de signaux périodiques ou à support compact, les transformées multidimensionnelles, les transformées adaptées au problème, les analyses multi-ondelettes, la déconvolution des signaux bruités, les approches multi échelles dans les algorithmes stochastiques et bien entendu la mise en œuvre des algorithmes de transformée en ondelettes discrètes.

III.3.2 Transformée en ondelette

La transformée en ondelette est une méthode de traitement du signal adaptée aux signaux non périodiques. Elle permet une analyse temps-fréquence que ne permet pas une analyse par Fourier.

Les algorithmes d'ondelettes ont deux composantes (figure III.7), une fonction d'ondelette et une fonction d'échelle (dénommé parfois filtre passe haut et filtre passe bas).

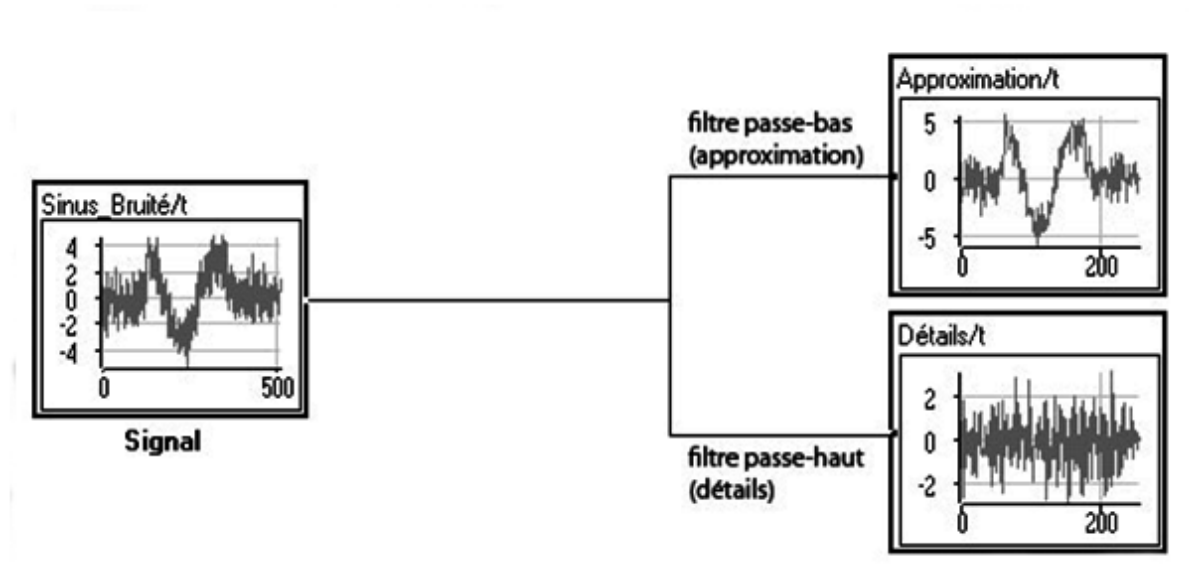


Figure III.7 Représentation de la décomposition en ondelettes d'un signal

La fonction d'ondelette utilise deux (ou plus) mesures pour déterminer un coefficient d'ondelette. La fonction d'échelle utilise ces mêmes mesures pour créer une version comprimée du signal.

Dans la pratique, la première moitié des données est remplacée par les valeurs déterminées par la fonction d'échelle, la seconde moitié des données est remplacée par les valeurs déterminées par la fonction d'ondelette.

On peut donc dire que le signal traité est remplacé dans la première moitié par un signal équivalent "en moyenne" mais à fréquence d'échantillonnage deux fois plus faible et que la seconde partie du signal par les coefficients (les détails) qui, ajoutés à la première partie du signal, permettent de le recomposer identiquement.

On obtient un traitement en multi-résolution en reproduisant ce processus à chaque fois sur la première moitié du signal (le séparant à nouveau en valeurs d'échelles et en valeur d'ondelette). Un traitement en multi-résolution doit donc se réaliser sur 2^m mesures.

III.3.3 Transformée en ondelettes de Daubechies

L'algorithme de la transformée d'ondelette de Daubechies est composé d'une fonction d'ondelette et d'échelle (figure III.8). Les coefficients de la fonction d'échelle sont notés " h " et les coefficients de la fonction d'ondelette sont notés " g ". L'application de la fonction d'échelle donne un coefficient de type " e " et l'application de la fonction d'ondelette donne un coefficient de type " o ".

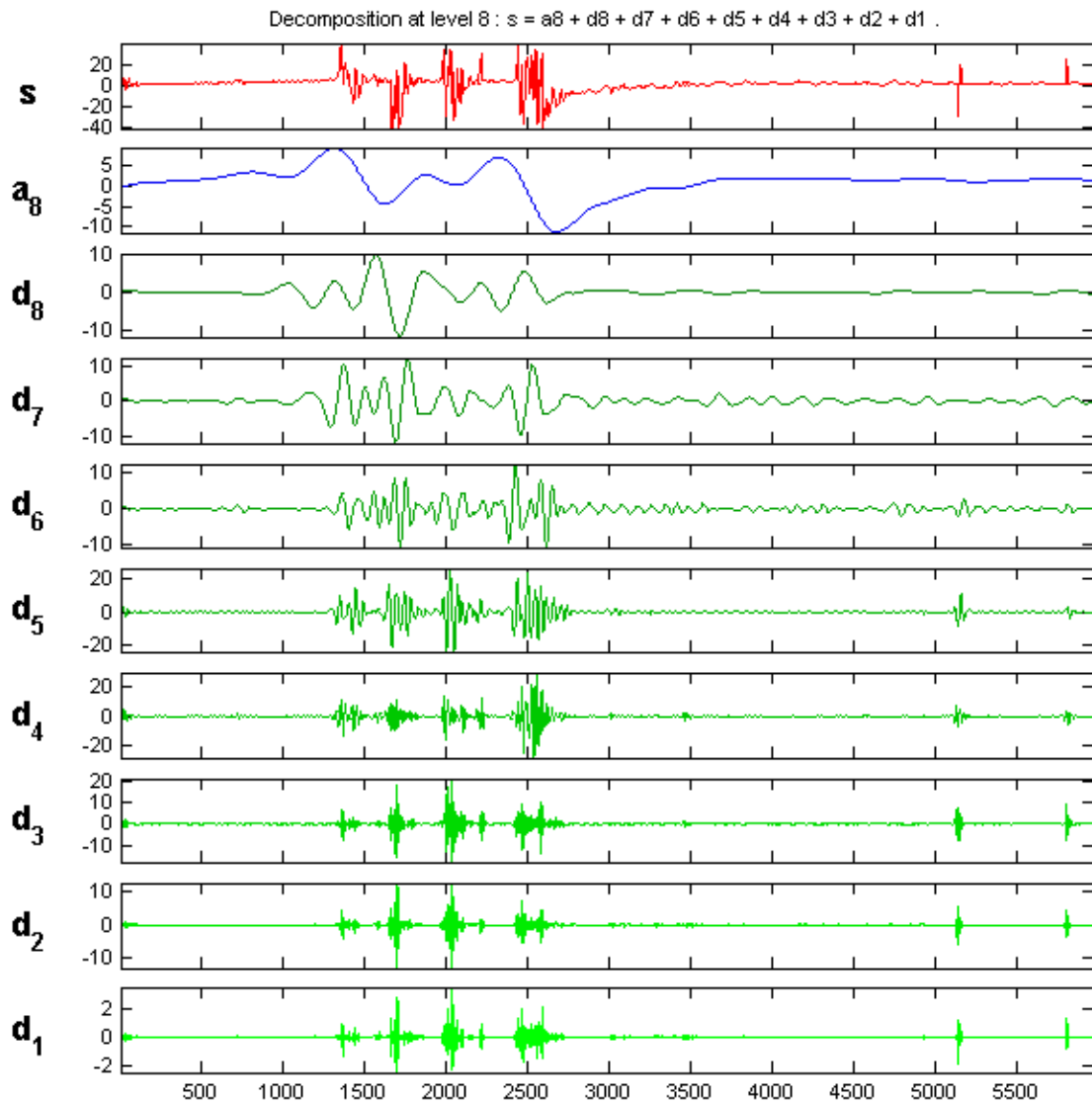


Figure III.8 Ondelettes de Daubechies

III.4 Droite de régression

Etablie dans le cadre d'une analyse de régression, la droite du même nom est simplement la représentation graphique de l'équation de régression. Elle est définie par les paramètres a et b que l'on détermine en appliquant la méthode dite des moindres carrés. Il s'agit en effet de trouver les valeurs de ces deux paramètres qui minimisent la somme des écarts au carré entre les différents points du nuage et la droite elle-même.

La droite de régression (Figure III.9) fournit une idée schématique, mais souvent très utile, de la relation entre les deux variables. En particulier, elle permet facilement d'apprécier comment évolue l'une des variables en fonction de l'autre.

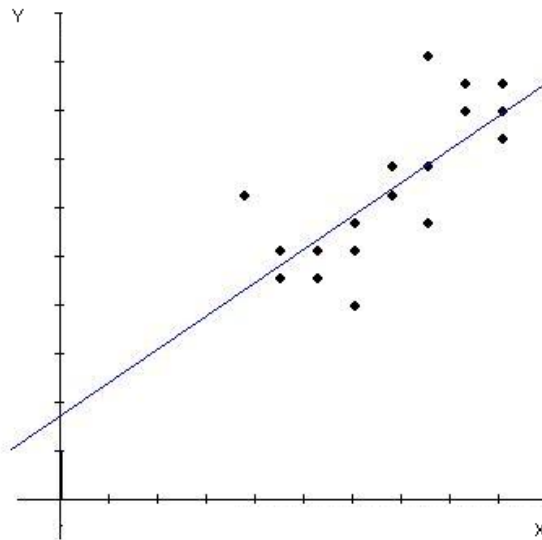


Figure III.9 Droite de régression

Formules de calcul

La droite de régression est représentée par l'équation $y = ax + b$ qui va tenter de décrire la manière dont y évolue en fonction de x .

$$A = \text{Cov}(x, y) / V(x) \quad (5)$$

$$A = \left(\frac{\sum xy}{n} - \bar{x} \cdot \bar{y} \right) / \left(\frac{\sum x^2}{n} - \bar{x}^2 \right) \quad (6)$$

$$B = \bar{y} - A \cdot \bar{x} \quad (7)$$

n = nombre d'observations

Le calcul sera effectué par l'outil informatique (Matlab)

III.5 Réseaux de neurones

III.5.1 Historique

Les réseaux de neurones artificiels sont des réseaux fortement connectés de processeurs élémentaires fonctionnant en parallèle. Chaque processeur élémentaire calcule une sortie unique sur la base des informations qu'il reçoit.

Les réseaux de neurones sont à l'origine une tentative de modélisation mathématique du cerveau humain. Les premiers travaux datent de 1943 et sont l'œuvre de deux neurobiologistes américains Warren Mc Culloch et Walter Pitts. Ils présentent un modèle assez simple pour les neurones et explorent les possibilités de ce modèle [57].

Aujourd'hui, de nombreux termes sont utilisés dans la littérature pour désigner le domaine des réseaux de neurones comme « connexionnisme » ou « neuromimétique » .

En 1890, W. James célèbre psychologue américain introduit le concept de mémoire associative, et propose ce qui deviendra une loi de fonctionnement pour l'apprentissage sur les réseaux de neurones connue plus tard sous le nom de Loi de Hebb. Mais le vrai début, c'est en 1943 lorsque Mc Culloch et Pitts laissent leurs noms à une modélisation du neurone biologique. Un peu plus tard, en 1949, un physiologiste américain, D. Hebb explique le conditionnement chez l'animal par les propriétés des neurones eux-mêmes.

Les premiers succès datent de 1957. En effet, F. Rosenblatt développe le modèle du perceptron ; il construit le premier neuro-ordinateur basé sur ce modèle et l'applique au domaine de la reconnaissance des formes qui ne fonctionnait pas plus que quelques minutes.

En 1960, B. Widrow, un automaticien développe le modèle de l'Adaline (Adaptive Linear Element). Dans ce cas, le modèle ressemble au perceptron, cependant la loi d'apprentissage est différente.

C'est en 1969 que M. Minsky et S. Papert publient un ouvrage qui met en exergue les limitations du perceptron, limitations alors connues, notamment concernant l'impossibilité de traiter par ce modèle des problèmes non linéaires.

Entre 1967 et 1982, toutes les recherches ne sont pas interrompues. Elles se poursuivent mais déguisées, sous le couvert de divers domaines comme : le traitement adaptatif du signal, la reconnaissance des formes, la modélisation en neurobiologie, etc. De grands noms travaillent durant cette période, tels : S. Grossberg, T. Kohonen,...

La levée des limitations commence en 1983 avec la machine de Boltzman qui est le premier modèle connu apte à traiter de manière satisfaisante les limitations recensées dans le cas du perceptron, mais l'utilisation pratique s'avère difficile, la convergence de l'algorithme étant extrêmement longue (les temps de calcul sont considérables).

En 1985 la retro propagation du gradient apparaît, c'est un algorithme d'apprentissage adapté aux réseaux de neurones multicouches.

L'idée principale des réseaux de neurones modernes est la suivante :

On se donne une unité simple, un neurone qui est capable de réaliser quelques calculs élémentaires. On relie ensuite entre elles un nombre important de ces unités et on essaye de déterminer la puissance de calcul du réseau ainsi obtenu. Il est important de noter que ces neurones manipulent des données numériques et non symboliques.

Deux visions s'affrontent donc ; d'un côté les tenants de la modélisation biologique qui veulent respecter un certain nombre de contraintes liées à la nature du cerveau, de l'autre les tenants de la puissance de calcul qui s'intéressent au modèle en lui-même, sans aucun lien avec la réalité biologique.

III.5.2 Les réseaux de neurones artificiels

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) s'inscrivent dans cette nouvelle vague de recherche où l'effort de conception est mis sur le développement d'algorithmes d'apprentissage afin de doter un système d'autonomie et de capacités d'adaptation. Parfois, ces systèmes intelligents arrivent même à découvrir de nouvelles solutions à des problèmes fort complexes et difficilement accessibles pour un cerveau humain.

Les RNA répondent à plusieurs critères de l'entreprise moderne, dont le fait de trouver des solutions rapidement à des problèmes de plus en plus complexes. De plus, les RNA sont robustes, versatiles et peuvent s'adapter.

III.5.2.1 Le neurone biologique

a) Structure

Le neurone est une cellule composée d'un corps cellulaire et d'un noyau. Le corps cellulaire se ramifie pour former ce que l'on nomme les dendrites, celles-ci sont parfois si nombreuses que l'on parle alors de chevelure dendritique ou d'arborisation dendritique (Figure III.10).

C'est par les dendrites que l'information est acheminée de l'extérieur vers le soma, corps du neurone. L'information traitée par le neurone chemine ensuite le long de l'axone pour être transmise aux autres neurones.

La transmission entre deux neurones n'est pas directe. En effet, il existe un espace intercellulaire de quelques dizaines d'angströms (10^{-9}m) entre l'axe du neurone afférent et les dendrites du neurone efférent. La jonction entre deux neurones est appelée synapse.

b) Principe de fonctionnement

Le fonctionnement du système nerveux repose sur l'existence de synapses. Lorsqu'un potentiel d'action chimique arrive à l'extrémité d'un axone au niveau des synapses, il provoque l'éjection d'une substance chimique appelée neurotransmetteur.

Cette substance diffuse jusqu'à la dendrite du neurone cible où elle donne naissance à un signal électrique qui se propage vers le noyau (corps cellulaire) du neurone.

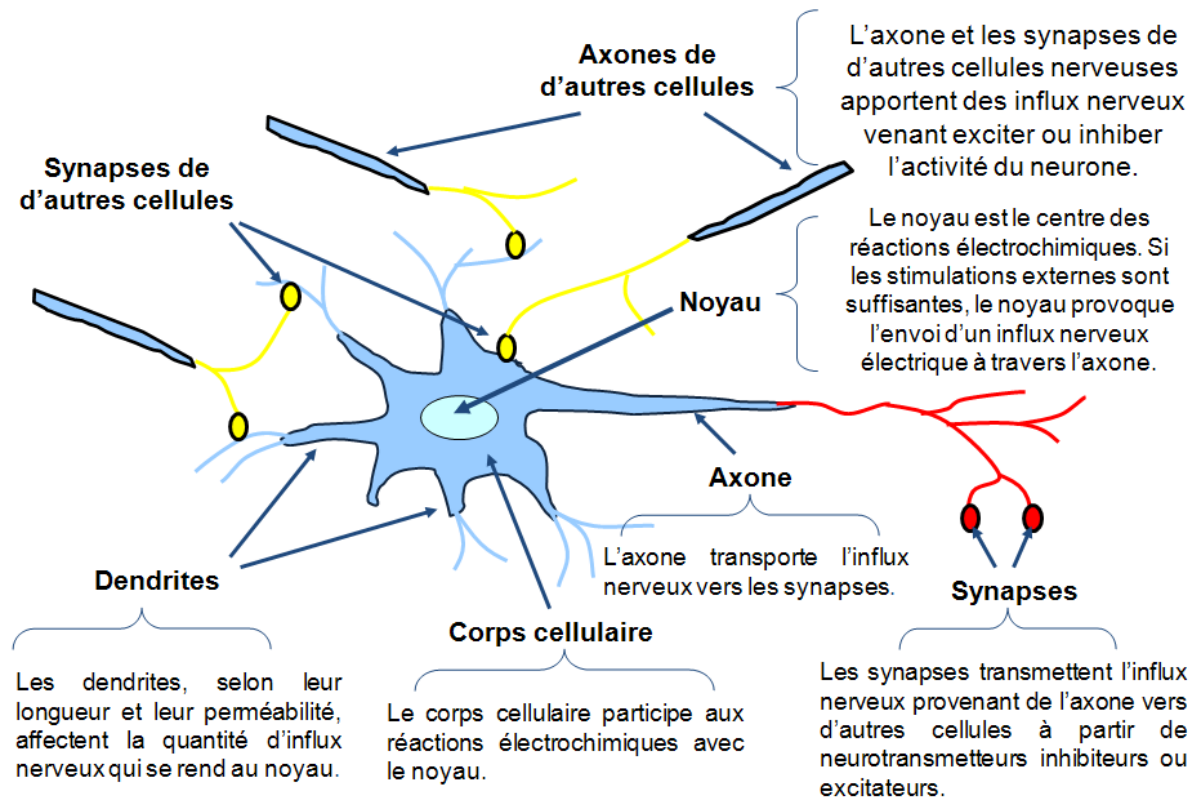


Figure III.10 Structure du Neurone biologique

III.5.2.2 Neurone artificiel

C'est à partir de l'hypothèse que le comportement intelligent émerge de la structure et du comportement des éléments de base du cerveau que les réseaux de neurones artificiels se sont développés [58].

Les réseaux de neurones artificiels sont des modèles. A ce titre, ils peuvent être décrits par leurs composants, leurs variables descriptives et les interactions des composants.

a) Structure:

Le modèle du neurone formel présenté (Figure III.11), dû à McCulloch et Pitts est un modèle mathématique assez simple dérivé d'une analyse de la réalité biologique.

On constate que le modèle biologique fait intervenir la notion temporelle qui est difficile à intégrer dans un modèle simple. On oublie donc cette notion et de ce fait on remplace l'intégration temporelle par une simple sommation des signaux arrivant au neurone.

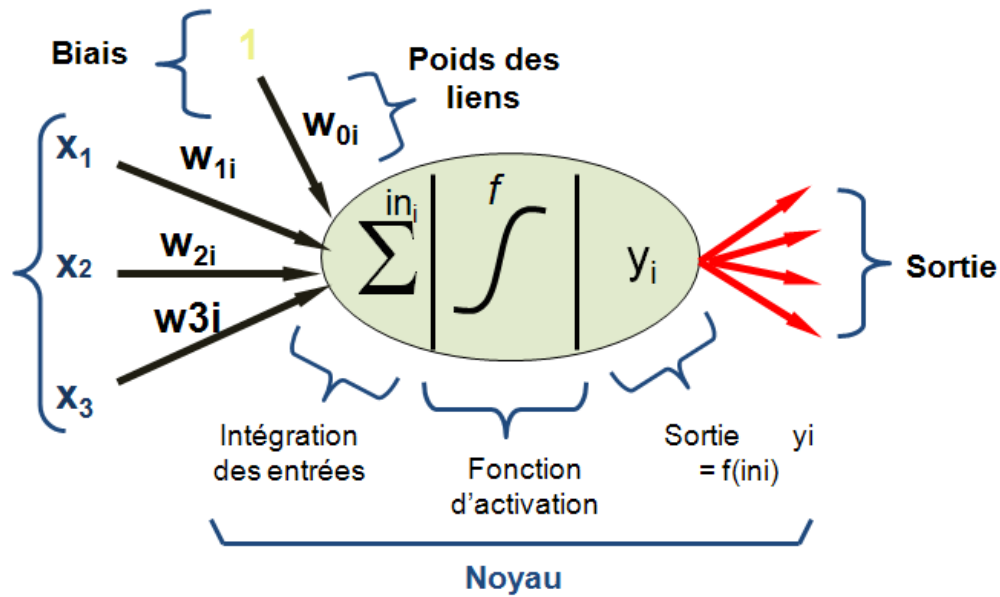


Figure III.11 Structure du Neurone artificiel

b) Entrées

Les paramètres x_1, x_2, x_3 , représentent les entrées directes du système ou peuvent provenir d'autres neurones.

c) Biais

Ce paramètre est mis généralement à 1. Il permet d'ajouter de la flexibilité au réseau en permettant de varier le seuil de déclenchement du neurone par l'ajustement du poids du biais lors de l'apprentissage.

d) Poids

Facteurs multiplicateurs qui affectent l'influence de chaque entrée sur la sortie du neurone.

e) Noyau

Le noyau intègre toutes les entrées et le biais et calcule la sortie du neurone selon une fonction d'activation qui est souvent non-linéaire pour donner une plus grande flexibilité d'apprentissage.

f) Sortie

Directement une des sorties du système ou peut être distribuée vers d'autres neurones.

g) La fonction d'activation f

Pour répondre aux exigences de certaines opérations, telle que la différentiation qui est nécessaire pour l'amélioration des paramètres internes du réseau. Dans la plupart des cas, cette fonction d'activation doit être continue, dérivable et monotone.

L'utilisation d'une fonction d'activation non-linéaire permet au RNA de modéliser des équations dont la sortie n'est pas une combinaison linéaire des entrées. Cette caractéristique confère au RNA de grandes capacités de modélisation fortement appréciées pour la résolution de problèmes non-linéaires.

Il existe de nombreuses formes possibles de fonctions d'activation dont les plus courantes sont représentées sur la figure III.12.

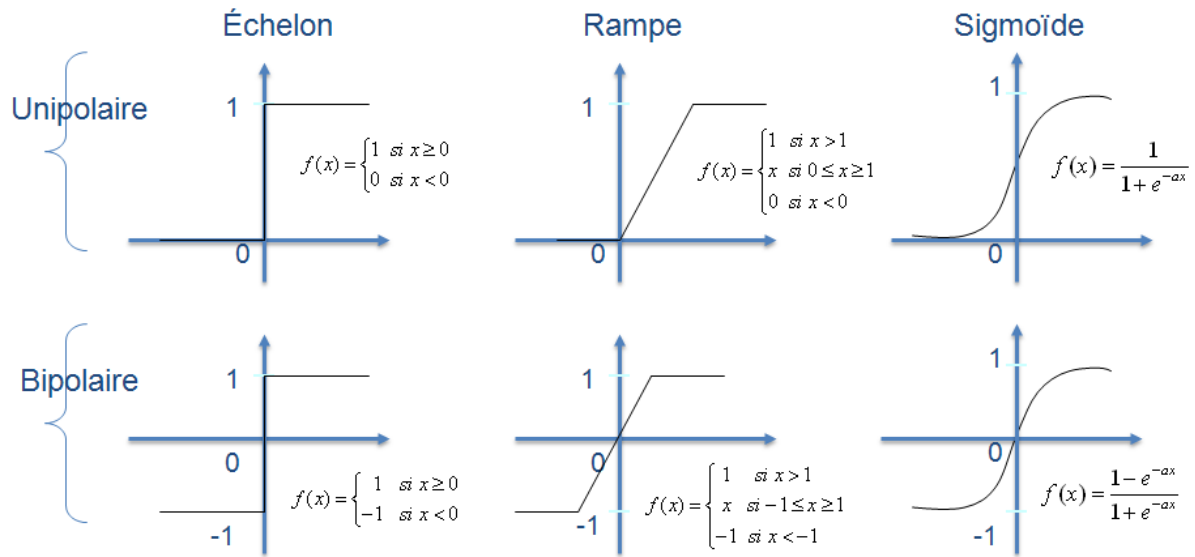


Figure III.12 Fonctions d'activation

III.5.2.3 Topologies de réseaux

a) Propagation avant

Il existe une panoplie impressionnante d'architectures de réseaux possibles. En fait, lorsque les neurones sont branchés entre eux d'une façon peu commune, la difficulté principale devient alors de trouver un algorithme efficace pour l'apprentissage de ce réseau. L'architecture multicouche à propagation avant est sans aucun doute la plus utilisée. Nous présentons dans la figure III.13 un exemple avec 4 entrées, 2 sorties et la sigmoïde comme fonction d'activation :

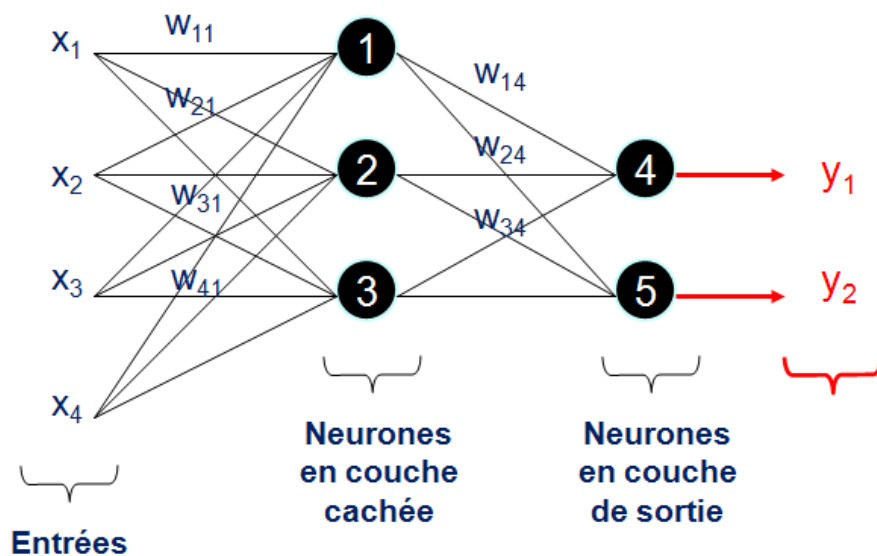


Figure III.13 Exemple d'un réseau de neurone

b) Propagation réursive

Dans l'exemple précédent, uniquement des liens à propagation avant ont été utilisés. Parfois des liens réursifs sont aussi présents et cela pour ajouter plus de flexibilité au réseau (figure III.14). Par ailleurs, le cerveau humain compte plusieurs neurones avec des liens réursifs. Plusieurs chercheurs affirment que la réursivité des réseaux neuronaux du cerveau sont à la base de notre capacité de mémorisation.

Il est à noter que les sorties du réseau de neurones réursif peuvent être calculées de la même façon que pour la topologie à propagation avant pour seule différence que les liens réursifs doivent aussi être considérés dans la somme des entrées pondérées par le poids des liens entre les neurones [59].

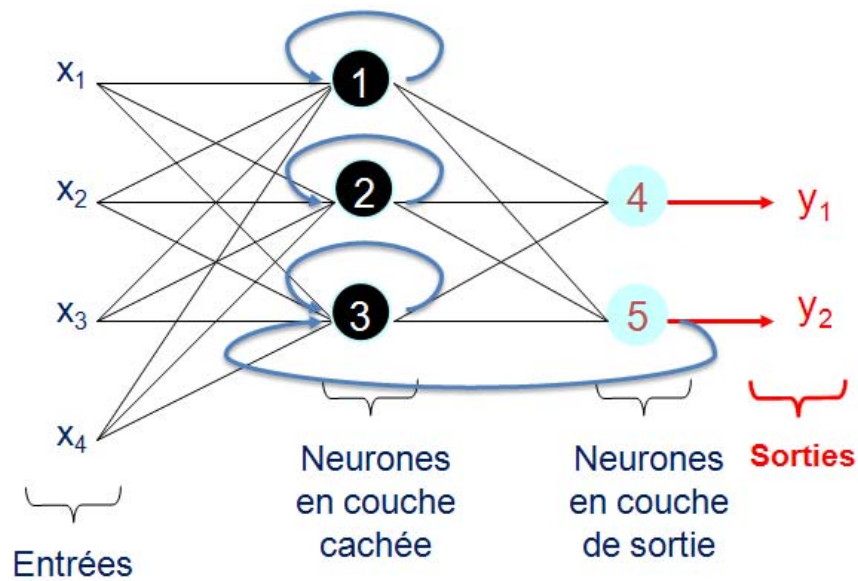


Fig. III.14 Propagation réursive

III.5.2.4 Choix de l'architecture de RNA

Le choix d'une architecture adéquate de RNA est primordial pour obtenir un système performant ou tout au moins fonctionnel. Or plusieurs aspects sont à considérer lors de la conception dont les plus importants sont :

- Le nombre d'entrées et de sorties
- Le nombre de couches de neurones
- Le nombre de neurones sur chaque couche
- Les interconnexions entre les couches
- La fonction d'activation

Par ailleurs, pour ce qui est du choix d'une topologie à propagation avant ou réursive et des interconnexions entre les neurones, il faut d'abord bien connaître le problème à résoudre.

Toutefois, la topologie de réseaux à propagation avant n'en demeure pas moins la plus utilisée de par la simplicité des algorithmes d'apprentissage utilisés pour cette topologie et de par sa réputation méritée de produire des solutions performantes à plusieurs problèmes concrets de l'industrie. Sous cette configuration, tous les neurones d'une couche sont habituellement reliés à tous les neurones de la couche suivante, bien qu'il y ait une liberté totale quant au choix des interconnexions [60].

Lorsque le RNA doit fournir une réponse en temps réel, ou plus encore, lorsque le RNA doit s'adapter aux changements de son environnement en poursuivant son apprentissage en temps réel, la structure du réseau doit alors être simplifiée au maximum afin de diminuer le nombre d'opérations mathématiques requises et de limiter les ressources matérielles nécessaires à l'implémentation du RNA.

III.5.2.5 Algorithmes d'apprentissage

Comme le cerveau humain, les réseaux de neurones artificiels (RNA) peuvent apprendre par expérience. Ainsi, suite à l'application séquentielle de plusieurs entrées à apprendre, les algorithmes d'apprentissage modifient la valeur des poids entre les neurones ainsi que la valeur des biais de façon à améliorer la performance du RNA. En fait, l'ajustement des poids est plus ou moins efficace tout dépendamment de la connaissance que nous avons du système à modéliser ou du problème à résoudre. Ainsi trois grandes classes d'apprentissage existent :

a) Apprentissage non-supervisé

Ce type d'apprentissage est choisi lorsqu'il n'y pas de connaissances à priori des sorties désirées pour des entrées données. En fait, c'est de l'apprentissage par exploration où l'algorithme d'apprentissage ajuste les poids des liens entre neurones de façon à maximiser la qualité de classification des entrées.

b) Apprentissage par renforcement

Dans ce cas, bien que les sorties idéales ne soient pas connues directement, il y a un moyen quelconque de connaître si les sorties du RNA s'approchent ou s'éloignent du but visé. Ainsi, les poids sont ajustés de façon plus ou moins aléatoire et la modification est conservée si l'impact est positif ou rejetée sinon.

c) Apprentissage supervisé (back propagation)

Cet algorithme d'apprentissage ne peut être utilisé que lorsque les combinaisons d'entrées-sorties désirées sont connues. L'apprentissage est alors facilité et par là, beaucoup plus rapide que pour les deux autres algorithmes puisque l'ajustement des poids est fait directement à partir de l'erreur, soit la différence entre la sortie obtenue par le RNA et la sortie désirée.

L'ajustement du poids des liens entre les neurones peut s'effectuer selon diverses équations mathématiques, dont la plus populaire est sans aucun doute la loi de Hebb.

Les autres équations sont souvent des dérivées de cette dernière. Par ailleurs, le choix de l'équation d'adaptation des poids dépend en grande partie de la topologie du réseau de neurones utilisé. Notons qu'il est aussi possible de faire évoluer l'architecture du réseau, soit le nombre de neurones et les interconnexions, mais avec d'autres types d'algorithmes d'apprentissage.

III.5.3 Applications des réseaux de neurones

Il existe une grande variété de projets dans lesquels les réseaux de neurones artificiels ont eu du succès. Les RNA se démarquent de techniques plus conventionnelles notamment grâce à leur capacité d'apprendre et de généraliser, à leur immunité au bruit ainsi que par leur architecture hautement parallèle, fortement appréciée pour le traitement de l'information en temps réel [61]. Or, voici quelques exemples d'applications possibles, regroupées sous forme de grandes classes fonctionnelles

III.5.3.1 Prédiction

Les réseaux de neurones artificiels peuvent apprendre à prédire certaines sorties qui tendent à apparaître lorsqu'une certaine combinaison d'entrées lui est présentée. Les RNA peuvent parfois même déduire certaines sorties pour des vecteurs d'entrée qui ne leur sont pas été présentés lors de leur phase d'apprentissage. Les RNA sont donc capables de généraliser. La prédiction avec des RNA est notamment utilisée en finance pour prédire les fluctuations du prix sur le marché de divers produits en fonction des facteurs économiques ou autres influences fournis en entrée au réseau.

III.5.3.2 Classification

La reconnaissance de caractères est probablement l'une des applications qui a fait le plus connaître la capacité de classification des réseaux de neurones artificiels. Ainsi, chaque lettre manuscrite peut être classifiée par le réseau de façon à regrouper et différencier efficacement le plus de caractères possible. Une autre application de classification est NETtalk, soit un réseau de neurones qui a appris à prononcer un texte écrit (Sejnowski et Rosenberg, 1987).

III.5.3.3 Contrôle

Les systèmes devenant de plus en plus complexes et dont plusieurs doivent opérer en temps réel, les RNA, dotés d'une structure de calcul hautement parallèle, capables d'apprendre et de s'adapter, sont souvent très efficaces pour ce genre de tâche. Les sorties du système sont alors contrôlées en fonction des entrées (ex: sorties de senseurs, commandes d'entrées, boucles de rétroaction, etc...) suite à un préapprentissage ou un apprentissage continu adéquat. Le projet ALVIN (Autonomous Land Vehicle In a Neural Network) (Pomerleau, 1995) est un exemple de RNA qui a appris à conduire une automobile à partir d'images vidéo de la route enregistrées lors de la conduite du véhicule par un utilisateur. Après la phase d'apprentissage, le RNA a pu conduire l'automobile sur plusieurs kilomètres sans quitter la route.

III.5.3.4 Filtrage

Un filtrage avec un RNA est souvent très efficace pour réduire des types de bruits non-linéaires qui sont difficiles à synthétiser autrement. La réduction de bruit avec des RNA est entre autres utilisée en télécommunication.

III.6 Conclusion

Les techniques de traitement de signal modernes gagnent en popularité, c'est qu'elles ont eu et continuent d'avoir du succès dans des situations où d'autres techniques, plus traditionnelles, s'avèrent peu efficaces ou à la limite ont échoué.

L'analyse des signaux par ondelettes permet de prendre en considération les paramètres temporels et fréquentiels et conviennent donc pour la discrimination des signaux.

Les réseaux de neurones artificiels sont un outil intelligent très utilisé dans la classification.

Les diverses techniques présentées dans ce chapitre vont servir pour création de notre système de détection et de reconnaissance de forme qui sera présenté dans le chapitre V.

Chapitre IV

***Propriétés physico chimiques
et Analyse des huiles par les
gaz dissous***

IV.1 Introduction

Au cours de la vie d'un transformateur, les surtensions du réseau peuvent provoquer l'apparition de décharges partielles conduisant à la génération de gaz et autres sous-produits solubles ou insolubles. De même, un échauffement local prolongé peut provoquer la dégradation de l'imprégnant avec également production de sous-produits.

Les défaillances des transformateurs sont très contraignantes non seulement sur la qualité de service mais aussi sur le plan des coûts de réparation ou de remplacement.

La maintenance conditionnelle a pour objectif de réduire la probabilité de ces défaillances et elle est subordonnée à des actions prédéterminées de diagnostic qui permettent de renseigner l'exploitant sur l'état d'un transformateur.

Parmi les principales méthodes que l'on retrouve pour juger de la qualité ou de la dégradation d'une huile en service, il y a l'analyse des gaz dissous et des propriétés physico-chimiques des huiles.

IV.2 Analyse des huiles

IV.2.1 Propriétés et détérioration/dégradation de l'huile

La performance fiable de l'huile isolante minérale dans un système d'isolation dépend de certaines caractéristiques de base de cette huile qui peuvent affecter la performance globale du matériel électrique.

Afin d'assurer ses fonctions multiples, l'huile doit posséder certaines propriétés fondamentales, en particulier:

- une rigidité diélectrique élevée, afin de tenir les contraintes électriques imposées en service;
- une viscosité suffisamment faible pour ne pas freiner la circulation ni diminuer le transfert de chaleur;
- des propriétés d'écoulement à basses températures appropriées et pour les conditions climatiques les plus basses susceptibles d'exister sur le lieu d'installation;
- une résistance à l'oxydation convenable, afin d'assurer une longue durée de service.

La dégradation de l'huile minérale en service est due aux conditions d'utilisation. Dans de nombreuses applications, l'huile isolante est en contact avec l'air et est ainsi soumise à des réactions d'oxydation. Les températures élevées accélèrent l'oxydation. La présence de métaux, de dérivés organo-métalliques ou les deux peut agir comme promoteur d'oxydation.

Il peut se produire un changement de couleur, une formation de produits acides et, à un stade d'oxydation avancé, une précipitation de dépôts. Les propriétés diélectriques et dans les cas extrêmes, les propriétés thermiques peuvent en être affectées.

En plus des produits d'oxydation, d'autres agents contaminants indésirables, tel que l'eau, les particules solides, les produits polaires solubles – peuvent s'accumuler dans l'huile en service et altérer ses propriétés.

La présence de ces agents contaminants et de tout produit de dégradation de l'huile se traduit par la modification d'une ou de plusieurs propriétés.

La dégradation d'autres matériaux de construction, pouvant affecter le bon fonctionnement des matériels électriques et diminuer leur durée de fonctionnement, peut également se traduire par des modifications des propriétés de l'huile [72].

IV.2.2 Evaluation de l'huile en service

L'huile isolante en service est soumise à la chaleur, à l'oxygène, à l'eau et à d'autres catalyseurs, qui sont nuisibles aux propriétés de l'huile. Afin de maintenir la qualité de l'huile en service, il convient de réaliser l'échantillonnage et l'analyse de manière régulière.

Souvent le premier signe de la détérioration de l'huile peut être obtenu par l'observation directe de la clarté et de la couleur de l'huile à travers le pare-soleil de conservateur. D'un point de vue environnemental, cette inspection simple et facile peut être également utilisée pour contrôler les fuites et les flaques d'huile dans l'environnement du transformateur.

IV.2.3 Procédures d'essais

Le lieu d'essai, le nombre et le type d'essai qui peuvent être exécutés sur un échantillon d'huile peuvent varier suivant les circonstances locales et les considérations économiques.

Le niveau de dégradation et le degré de contamination des huiles en service varient beaucoup. En général un seul type d'essais ne peut être utilisé comme critère unique de l'état d'un échantillon d'huile.

Il convient de baser de préférence l'évaluation de cet état sur l'évaluation de l'ensemble des caractéristiques significatives, mesurées dans des laboratoires convenablement équipés. Cependant, certains utilisateurs considèrent qu'il est avantageux d'effectuer des essais de sélection sur site.

Les essais d'huile sur site sont choisis pour :

- Obtenir une estimation rapide de l'état de l'huile
- Etablir la classification des huiles usagées en service.
- Eliminer toute modification des propriétés d'échantillonnage d'huile à cause du transport à un laboratoire et/ou du stockage des échantillons d'huile ; et
- La présence sur site et en ligne des instruments d'essai avec une précision comparable aux instruments d'essais en laboratoire.

Les essais effectués sur site fournissent souvent des résultats plus fiables que ceux obtenus en laboratoire. Les essais sur site sont habituellement limités à l'inspection visuelle (couleur et aspect), à la tension de claquage, à la teneur en eau et, avec moins de précision, à l'acidité. Ces essais peuvent parfois être utilisés pour l'évaluation des huiles usagées en

service, bien que plus souvent, des essais sont effectués sur site pour identifier des échantillons d'huile exigeant l'évaluation en laboratoire.

IV.2.4 Classification des états des huiles en service

Il est virtuellement impossible d'établir des règles strictes et immuables pour évaluer les huiles en service ou même pour recommander des valeurs limites d'essais correspondant à toutes les applications possibles des huiles isolantes en service. Il convient de considérer uniquement la classification et toute action corrective conséquente après de mures considération des résultats de tous les essais. La tendance de tels résultats sur une certaine période de temps est considérée comme l'information essentielle en arrivant à la décision finale.

Conformément à une expérience industrielle actuelle, les huiles en service peuvent être classées comme « satisfaisant », « correct » ou « mauvais » selon un classement fondé sur l'évaluation des propriétés significatives et sur leur possibilité de restituer les caractéristiques souhaitées. Le tableau IV.1 fournit des lignes directrices (selon la norme CEI 60422) afin de faciliter ce procédé. Et le tableau IV.2 donne des valeurs types de certaines propriétés physiques :

Tableau IV.1 - Application des essais de transformateurs de puissance de tension de réseau maximale supérieure à 170 kV

Propriété	Limites recommandataires justifiant une intervention		
	Satisfaisant ⁽¹⁾	Correct ⁽²⁾	Mauvais ⁽³⁾
Couleur et aspect	Propre et sans contamination visible		Sombre et/ou trouble
Tension de claquage (kV)	>60	50 - 60	50
Teneur en eau (mg H ₂ O/kg huile) à 20°C	<5	5 - 10	>10
Acidité (mgKOH/ghuile)	<0,10	0,10 – 0,15	>0,15
Facteur de dissipation diélectrique à 90°C	<0,10	0,10 – 0,20	>0,20
Résistivité (GΩm)	A 20°C		
	>200	20 – 200	<20
	A 90°C		
	>10	1-10	<1
Teneur en inhibiteur	1)concentration en inhibiteur de 40 à 60 % de la valeur originale et acidité =0.06 mgKOH/ghuileet tension interfaciale (TIF)=30 mN/m 2)concentration en inhibiteur de <40 % de la valeur originale et acidité >0.06 mgKOH/ghuileet tension interfaciale (TIF)<30 mN/m		
Dépôts et sédiments	Pas de sédiments ou de dépôtsprécipitables les résultats < 0.02 % en masse peuvent être négligés		
Tension interfaciale (mN/m)	>28	22 – 28	<22

(1) Satisfaisant : Huile en état normal ; échantillonnage normal continu.

(2) Correct : Dégradation d'huile détectable; un échantillonnage plus fréquent est recommandé.

(3) Mauvais : Dégradation anormale de l'huile ; une action immédiate est conseillée.

Tableau IV.2 – Valeurs expérimentales de caractéristiques d'étude de l'huile minérale [1]

Caractéristiques	Masse volumique à 20 °C ρ_{20} (kg/m ³)	Coefficient de dilatation volumique αV (en 10 ⁻⁴ K ⁻¹)	Capacité thermique massique à pression constante cp (J/(kg · K))	Conductivité thermique λ (W/(m · K))	Viscosité cinématique à 40 °C ν (mm ² /s)	Point d'écoulement (°C)	Point d'éclair COC (3) (°C)	Point de feu COC (3) (°C)
Valeurs types	825 à 890	7 à 9	1 600 à 2 100	0,11 à 0,16	3 à 16	- 30 à - 60	100 à 170	110 à 185

IV.3. Analyse des gaz dissous

L'analyse des gaz dissous ou libres est surtout utilisée pour les transformateurs de puissance. Dans ce cas particulier, des guides ont été rédigés pour l'interprétation de ces analyses. Cependant, l'interprétation des résultats de l'Analyse des gaz dissous (AGD) est souvent complexe et il convient qu'elle soit toujours faite avec prudence, en s'entourant de personnel expérimenté en maintenance d'isolation [62].

IV.3.1 Mécanisme de formation des gaz dissous dans l'huile minérale isolante

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 fragments petits et instables, sous forme radicalaire ou ionique, comme H*, CH₃*, CH₂* ou C* (parmi bien d'autres formes plus complexes), qui se recombinent rapidement, par des réactions complexes en molécules de gaz comme l'hydrogène (H-H), le méthane (CH₃-H), l'éthane (CH₃-CH₃), l'éthylène (CH₂ = CH₂) ou l'acétylène (CH $\equiv$ CH). 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 [63]. On peut aussi trouver du monoxyde de carbone CO et du dioxyde de carbone CO₂ liés à la dégradation du papier mais aussi à la décomposition de l'huile en présence d'air. L'oxygène O₂ et l'azote N₂ sont quant à eux des gaz présents systématiquement dans l'huile [64].

Pour quantifier la teneur de ces gaz dissous dans l'huile, on utilise la méthode de Chromatographie en phase gazeuse.

IV.3.2 Méthodes d'Interprétation

Plusieurs méthodes d'interprétation des gaz dissous dans les transformateurs sont fournies dans la norme CEI 60599 [63], la guide IEEE C57.104 [65] ainsi que des revues publiées sur le sujet [66,67,47].

Nous allons nous intéresser dans ce travail aux cinq méthodes les plus connues, à savoir la méthode de la CEI, méthode des gaz clés, méthode de Dornenburg, méthode de Rogers et la méthode de Duval. Ces méthodes utilisent les gaz présentés dans le tableau IV.3.

Tableau IV.3 Principaux gaz analysés par AGD

Nom	Symbole
Hydrogène	H ₂
Méthane	CH ₄
Ethane	C ₂ H ₆
Ethylène	C ₂ H ₄
Acétylène	C ₂ H ₂

Les techniques principales de diagnostic utilisent six rapports caractéristiques des gaz dissous (tableau IV.4).

Tableau IV.4: Définition des rapports utilisés dans les méthodes de diagnostic

Rapport	CH ₄ / H ₂	C ₂ H ₂ / C ₂ H ₄	C ₂ H ₂ /CH ₄	C ₂ H ₄ / C ₂ H ₆	C ₂ H ₆ /CH ₄	C ₂ H ₆ / C ₂ H ₂
Abréviation	R1	R2	R3	R4	R5	R6

IV.3.2.1 Méthode des gaz clés

Cette méthode associe un gaz particulier à un type de défaut. Cette règle est le fruit de la composition d'une grande quantité de cas. Il a été observé que dans tel ou tel cas de défaut, les mêmes gaz étaient produits. La formation de ces gaz est aussi explicable du point de vue des conditions chimiques nécessaires à leur formation. Ainsi la formation d'acétylène en présence d'arc est explicable au sens chimique en raison de l'énergie nécessaire supérieure pour produire l'acétylène par rapport aux autres gaz combustibles [63]. Le tableau IV.5 donne les gaz considérés et les défauts qui leurs sont associés. Et le tableau IV.6 donne les valeurs limites de ces gaz.

Tableau IV.5: Méthode des gaz clés

Gaz clé	Défaut probable
Acétylène (C_2H_2)	Arc électrique
Hydrogène (H_2)	Décharge partielle
Éthylène (C_2H_4)	Dégradation thermique de l'huile
Monoxyde de carbone (CO)	Vieillissement thermique de la cellulose

Tableau IV.6: Gamme de valeur typique des gaz

GAZ	C_2H_2	H_2	CH_4	C_2H_4	C_2H_6
Catégorie de transformateur		50-150	30-130	60-280	20-90
Sans CPC	2-20				
CPC non étanche	60-280				

IV.3.2.2 Méthode de la CEI 60599

Chacune des six grandes classes de défauts donne naissance à une composition caractéristique en hydrocarbures gazeux, qu'on peut mettre sous la forme d'une table d'interprétation d'AGD, telle que celle recommandée ci-dessous (Tableau IV.7), utilisant trois rapports fondamentaux de gaz [63].

Tableau IV.7: Étude des rapports par CEI 60599

Type de défauts	C_2H_2/C_2H_4	CH_4/H_2	C_2H_4/C_2H_6
Décharges partielles (DP)	NS	<0.1	<0.2
Arcs électriques (D1)	> 1	0.1- 0.5	> 1
Arcs électriques (D2)	0.6 – 2.5	0.1- 1	> 2

Défaut thermique de basse température, $t < 300^{\circ}\text{C}$ (T1)	NS ⁽¹⁾	>1 mais NS ⁽¹⁾	< 1
Défaut thermique de moyenne température, $300 < t < 700^{\circ}\text{C}$ (T2)	< 0.1	>1	1 - 4
Défaut thermique de haute température, $t > 700^{\circ}\text{C}$ (T3)	$< 0.2^{(2)}$	> 1	>4

NS⁽¹⁾ : Non significatif quelle que soit la valeur

⁽²⁾ : Une valeur importante de C_2H_2 peut indiquer que le point chaud est à une température $> 1000^{\circ}\text{C}$.

IV.3.2.3 Méthode de Dornenburg

Dornenburg utilise dans son diagnostic quatre rapports et six gaz caractéristiques (tableau IV.8). Il a pu séparer les défauts thermiques des défauts électriques et établir des valeurs limites des gaz clés (tableau IV.8).

Tableau IV.8 : Méthode des rapports de Dornenburg

Rapports de gaz	Critères	Codes
CH_4/H_2	< 0.1	0
	$> 0.1 < 1$	1
	> 1	2
$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	< 0.75	0
	> 0.75	1
$\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_2$	< 0.4	0
	> 0.4	1
$\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$	< 0.3	0
	> 0.3	1

Tableau IV.9 : Table de correspondance des codes, méthode de DOERNENBURG

CH_4/H_2	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	$\text{C}_2\text{H}_6/\text{C}_2\text{H}_2$	$\text{C}_2\text{H}_2/\text{CH}_4$	Diagnostic
2	0	1	0	Décomposition thermique (points chauds)
1	1	0	0	Arc électrique
0	0	1	0	Décharges partielles
0	1	0	0	Décharges partielles

IV.3.2.4 Méthode de Rogers

Cette méthode est la première dans le domaine. Proposée en 1973, affinée en 1975 et ensuite en 1977, elle utilise principalement quatre rapports de gaz caractéristiques.

Le diagnostic a été amélioré avec la proposition de deux tableaux : l'un pour la définition des codes (tableau IV.10) et l'autre pour le diagnostic proprement dit (tableau IV.11) [48].

Tableau IV.10 : Diagnostic de la méthode des rapports de Rogers

R1	R5	R4	R2	Diagnostic
0	0	0	0	Détérioration normale
5	0	0	0	Décharges partielles
1 ou 2	0	0	0	Faible échauffement : inférieur à 150°C
1 ou 2	1	0	0	Faible échauffement : 150°C-200°C
0	1	0	0	Faible échauffement : 200°C-300°C
0	0	1	0	Surchauffe générale des conducteurs
1	0	1	0	Courants de circulation des enroulements
1	0	2	0	Circulation de courant dans le noyau ou la cuve, ou mauvaise connexion électrique
0	0	0	0	Arc, faible énergie, contournement sans écoulement de courant de puissance
0	0	1 ou 2	1 ou 2	Arc, haute énergie, contournement avec écoulement de courant de puissance
0	0	2	2	Arc, faible énergie, étincelage à un potentiel flottant
5	0	0	1 ou 2	Décharges partielles avec cheminement

Tableau IV.11: Définition des codes de la méthode affinée des rapports de Rogers

Rapport des gaz	Grandeurs	code
CH_4/H_2	<0.1	5
	Entre 0.1 et 1.0	0
	Entre 1.0 et 3.0	1
	>3.0	2
$\text{C}_2\text{H}_6/\text{CH}_4$	<1.0	0
	>1.0	1
$\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$	<1.0	0
	Entre 1.0 et 3.0	1
	>3.0	2
$\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$	<0.5	0
	Entre 0.5 et 3.0	1
	>0.3	2

IV.3.2.5. Méthode de DUVAL [49]

Cette méthode a été mise au point par un chercheur d'Hydro-Québec « Michel DUVAL » dont les études ont porté sur les données de transformateurs de puissance supérieure à 100 MVA.

Le triangle de Duval a été développé en premier en 1974. Il utilise trois gaz seulement (CH_4 , C_2H_4 et CH_2). Ces trois gaz correspondent à l'augmentation des niveaux d'énergies nécessaires à la génération de gaz dans les transformateurs en service. La méthode du triangle est indiquée en figure IV.1. En plus des 6 zones des types de défauts individuels mentionnés dans le tableau IV. 7 (DP, D1, D2, T1, T2 or T3), une zone intermédiaire a été attribuée aux défauts mixtes électriques et thermiques dans le transformateurs.

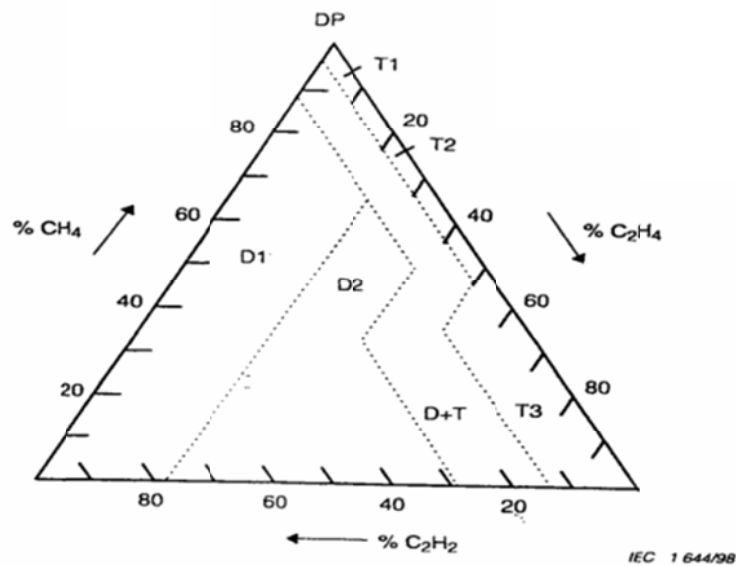


Figure IV.1 : Triangle de Duval

$$\% C_2H_2 = \frac{100 x}{x+y+z} \quad \text{où } x = [C_2H_2] \text{ en microlitres par litre} \quad (8)$$

$$\% C_2H_4 = \frac{100 y}{x+y+z} \quad \text{où } y = [C_2H_4] \text{ en microlitres par litre} \quad (9)$$

$$\% CH_4 = \frac{100 z}{x+y+z} \quad \text{où } z = [CH_4] \text{ en microlitres par litre} \quad (10)$$

Les trois côtés du triangle sont exprimés en coordonnées triangulaires (x,y,z) représentant les proportions relatives de CH₄, C₂H₄ et C₂H₂ de 0% à 100% de chaque gaz.

Cette méthode permet d'établir un diagnostic peu importe la combinaison de gaz dissous. Celle-ci n'utilise pas l'hydrogène, Il faut donc s'attendre à ce que cette méthode ait une sensibilité diminuée pour les défauts classés comme « Décharges partielles ».

IV.4 Test et résultats

IV.4.1 Présentation des résultats de l'algorithme

Un algorithme permettant le diagnostic des résultats d'analyse des gaz dissous a été développé. Il teste les résultats d'analyse (de Sonelgaz) d'un ensemble d'échantillons (100 échantillons) avec les méthodes de diagnostic (CEI, GAZ CLES, DORNENBUR, ROGERS et DUVAL) et compare leurs résultats. La figure IV.2 présente un schéma général de l'algorithme développé. Les états de diagnostic ont été codifiés selon le tableau IV.12. Les valeurs de concentration des gaz pour chaque échantillon ainsi que les résultats d'interprétation selon les cinq méthodes sont donnés sur le tableau IV.13.

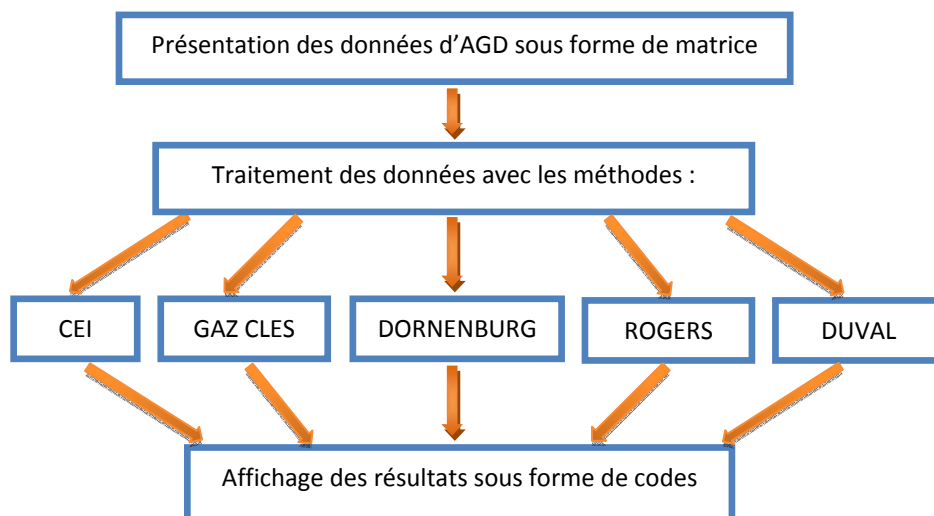


Figure IV.2 Présentation générale de l'algorithme de calcul

Tableau IV.12 : Codification du diagnostic

Code	Signification
0	pas de diagnostic
1	valeurs normales
2	Décharges partielles (DP)
3	Décharges basse énergie (D1)
4	Décharges grande énergie (D2)
5	Défaut thermique et électrique (DT)
6	Défaut thermique basse température (T1)
7	Défaut thermique moyenne température (T2)
8	Défaut thermique haute température (T3)

Tableau IV.13: Résultats de l'analyse des gaz dissous par les différentes méthodes

EchantillonN°	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CEI	DORNEN BURG	ROGERS	GAZ CLES	DUVAL
1	1256	49	0.9	0.9	9	2	0	2	2	6
2	298	1	1	1	1	0	0	0	2	4
3	496	12	1	1	1	0	0	0	2	5
4	621	19	1	1	2	0	0	2	2	5
5	726	21	1	1	1	0	0	0	2	5
6	286	1.9	0.9	1.9	3	0	0	0	2	5
7	595	9	0.9	0.9	5	2	0	2	2	5
8	996	12	0.9	2	7	0	2	2	2	5
9	170	72	171	38	103	0	0	0	3	3
10	103	0.9	153	34	14	0	2	0	3	3
11	176	0.9	138	30	7	0	2	0	3	3
12	148	23	77	20	10	3	2	4	3	3
13	34	29	53	26	23	0	0	4	3	4
14	53	0.9	30	4	0.9	0	2	0	3	3
15	56	18	37	8	5	3	2	4	3	3
16	69	30	30	14	7	3	2	4	3	3
17	75	29	22	13	5	3	2	4	3	3
18	87	29	34	16	8	3	2	4	3	3
19	113	272	3	1432	54	0	6\7\8	5\7	6	8
20	113	257	5	1437	39	0	6\7\8	5\7	6	8
21	53	98	21	812	29	0	6\7\8	5\7	3	8
22	58	103	26	817	34	0	6\7\8	5\7	3	8
23	69	108	31	822	39	0	6\7\8	5\7	3	8

EchantillonN°	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CEI	DORNEN BURG	ROGERS	GAZ CLES	DUVAL
24	68	112	36	827	44	0	0	5\7	3	8
25	73	117	41	832	49	0	0	5\7	3	8
26	21	246	0	193	237	6	6\7\8	6	0	7
27	136	452	0.7	691	227	7	6\7\8	0	6	8
28	16	161	0	373	89	0	6\7\8	0	6	8
29	22	295	0	340	183	7	6\7\8	0	6	8
30	9	55	0	6	194	6	6\7\8	6	0	6
31	280	537	10	1096	137	0	6\7\8	5\7	2	8
32	221	563	5	1287	220	0	6\7\8	5\7	2	8
33	61	105	0	39	375	6	6\7\8	6	0	7
34	196	325	20	1464	50	0	6\7\8	5\7	2	8
35	201	330	25	1469	55	0	6\7\8	5\7	3	8
36	176	295	5	1454	50	0	6\7\8	5\7	2	8
37	161	310	0	1419	20	0	6\7\8	5\7	2	8
38	186	290	10	1459	5	0	6\7\8	5\7	2	8
39	181	285	25	1439	60	0	6\7\8	5\7	3	8
40	156	290	5	1429	45	0	6\7\8	5\7	2	8
41	171	300	0	1439	25	0	6\7\8	5\7	2	8
42	10	9	14	99	7	0	0	0	0	8
43	15	14	19	104	12	0	0	0	0	8
44	20	19	24	109	17	0	0	0	3	5
45	25	24	29	114	22	0	0	0	3	5
46	30	29	34	119	27	0	0	0	3	5
47	35	34	39	124	32	0	0	0	3	5
48	40	39	44	129	37	0	0	0	3	5
49	5	9	4	104	94	7	0	0	0	8
50	0	19	14	99	84	0	0	0	0	8
51	196	325	20	1464	50	0	6\7\8	5\7	2	8
52	201	330	25	1469	55	0	6\7\8	5\7	3	8
53	206	335	30	1474	40	0	6\7\8	5\7	3	8
54	211	340	35	1479	45	0	6\7\8	5\7	3	8
55	176	220	5	1469	40	0	6\7\8	5\7	2	8
56	166	215	15	1414	20	0	6\7\8	5\7	2	8
57	201	225	10	1434	20	0	6\7\8	5\7	2	8
58	143	488	18	1769	15	0	6\7\8	0	6	8
59	138	483	13	1764	10	0	6\7\8	0	6	8
60	133	478	8	1759	5	0	6\7\8	0	6	8
61	178	523	53	1804	50	0	6\7\8	5\7	3	8
62	148	478	0	1769	5	0	6\7\8	0	6	8
63	128	463	28	1759	0	0	2	0	3	8

EchantillonN°	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CEI	DORNEN BURG	ROGERS	GAZ CLES	DUVAL
64	113	493	0	1779	10	0	6\7\8	0	6	8
65	50	60	45	276	47	0	0	5\7	3	8
66	55	65	50	281	52	0	0	5\7	3	8
67	80	350	34	1666	18	0	6\7\8	0	3	8
68	85	355	39	1671	23	0	6\7\8	0	3	8
69	57	304	0	1782	0	0	6\7\8	0	6	8
70	52	299	0	1777	0	0	6\7\8	0	6	8
71	92	339	34	1817	21	0	6\7\8	0	3	8
72	97	344	39	1822	26	0	6\7\8	0	3	8
73	102	349	44	1827	31	0	6\7\8	0	3	8
74	107	354	49	1832	36	0	6\7\8	0	3	8
75	113	359	45	1837	41	0	6\7\8	0	3	8
76	72	314	4	1782	0	0	2	0	6	8
77	45	400	0	1000	60	0	6\7\8	0	6	8
78	40	450	0	1500	55	0	6\7\8	0	6	8
79	35	500	1	2000	50	0	6\7\8	0	6	8
80	30	550	1	2500	45	0	6\7\8	0	6	8
81	25	600	0	3000	40	0	6\7\8	0	6	8
82	20	650	1	3050	35	0	6\7\8	0	6	8
83	15	700	2	3100	30	0	6\7\8	0	6	8
84	10	750	3	3200	25	0	6\7\8	0	6	8
85	5	800	4	3300	20	0	6\7\8	0	6	8
86	4	850	5	3400	15	0	6\7\8	0	6	8
87	3	900	10	900	10	0	6\7\8	0	6	7
88	1	1000	15	800	5	0	2	0	6	7
89	0	1005	20	700	4	0	2	0	6	7
90	1	1010	25	450	1	0	2	0	3	7
91	49	390	5	850	290	7	6\7\8	0	6	8
92	45	86	2	1234	285	0	6\7\8	0	6	8
93	8	75	4	798	295	7	6\7\8	0	6	8
94	2	52	15	790	300	7	6\7\8	0	6	8
95	30	187	25	980	305	7	6\7\8	0	3	8
96	20	98	1	4150	310	0	6\7\8	0	6	8
97	7	50	3	460	350	7	6\7\8	0	6	8
98	9	71	1	700	400	7	6\7\8	0	6	8
99	10	150	0	2800	410	0	6\7\8	0	6	8
100	1	240	0	1000	402	7	6\7\8	0	6	8

IV.4.2 Exploitation des résultats

Pour une meilleure vue d'ensemble des résultats du test, ils ont été exprimés sous forme de secteurs pour chaque méthode (figure IV.3). Ceci donne une d'idée sur l'état du parc de transformateurs bien que ces échantillons ont été pris d'une manière arbitraire, et elles concernent plusieurs transformateurs et un transformateur peut avoir été prélevé à différents intervalles de temps. En plus il nous donne une vue d'ensemble sur les différences d'interprétation de chaque méthode.

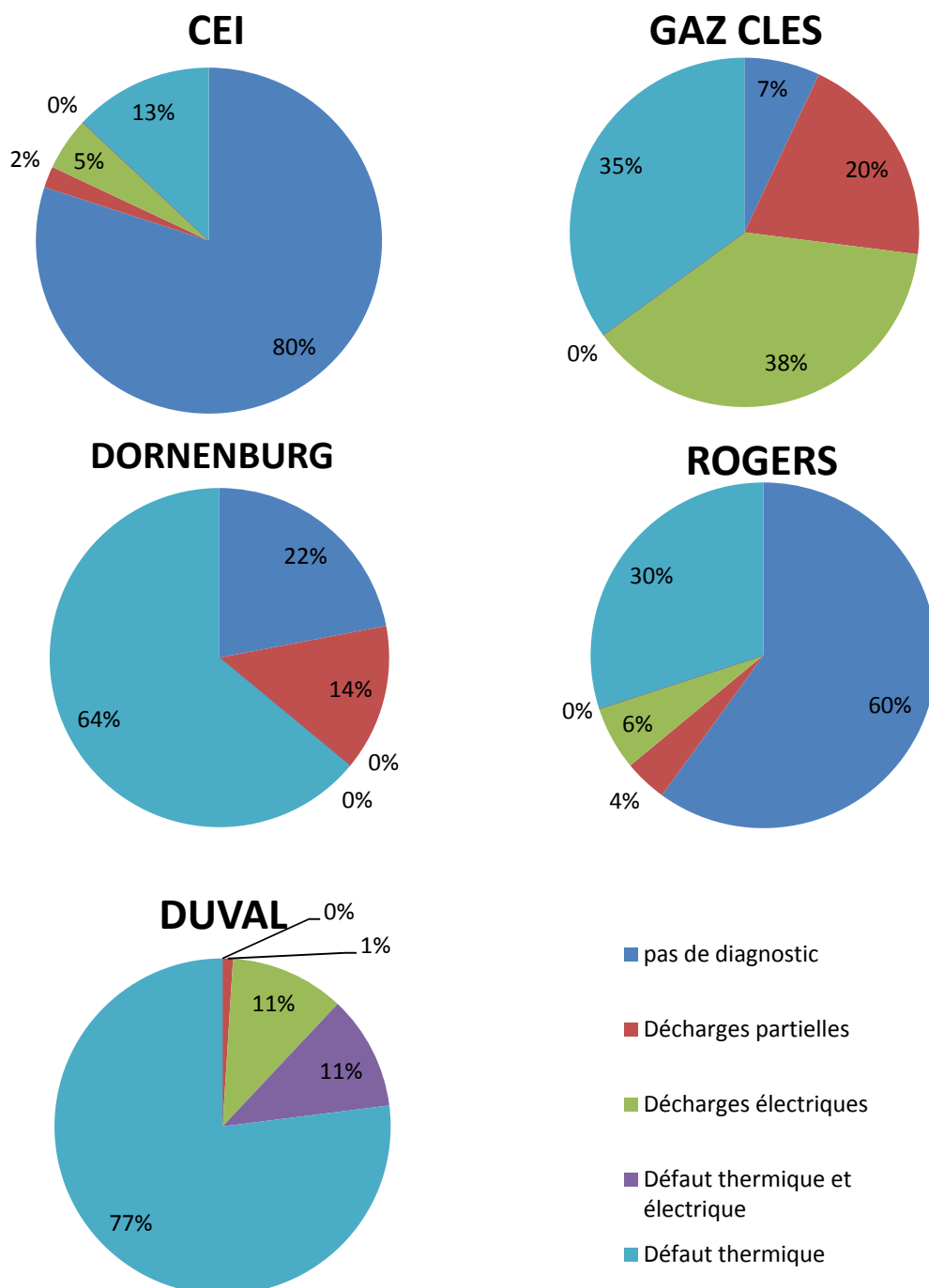


Figure IV.3 Résultats de diagnostic d'AGD

IV.4.3 Discussion des résultats

a) Méthode de Duval

Duval a montré les performances relatives pour chaque méthode (Tableau IV.14) [49]. Un des inconvénients des méthodes (CEI, Doernenburg, Rogers) est que certains résultats d'AGD peuvent tomber en dehors des codes de ratios et aucun diagnostic ne peut être donné (pas de diagnostic). Ceci n'arrive pas avec la méthode du triangle de Duval parce que c'est un système fermé et non ouvert.

Tableau IV.14 Comparaison des méthodes de diagnostic [49]

	% Pas de diagnostic	% Faut diagnostic	% Total
CEI	15	8	23
Gaz clés	0	58	58
Dornenburg	26	3	29
Rogers	33	5	38
Triangle	0	4	4

A partir de ce constat, nous pouvons considérer que méthode du triangle de Duval est la plus fiable (avec un faible taux d'erreur). Et les résultats de cette méthode seront considérés comme référence pour l'interprétation des résultats d'AGD.

Nous constatons pour nos résultats (figure IV.2 – DUVAL), que la majorité des défauts diagnostiqués sont des défauts de type T3 (défaut thermique à haute température). Ceci s'explique par le fait que la plupart des échantillons présentent un taux élevé d'Éthylène. Par contre selon cette méthode il n'y a qu'un seul cas de défaut relatif aux décharges partielles. Ceci peut être dû au fait que cette méthode ne détecte pas toujours les défauts de décharges partielles.

b) Méthode CEI

Nous constatons que pour la méthode CEI, 80% des cas n'ont pas été diagnostiqués. Ce n'est pas toujours le cas, mais dans ce cas-là il se trouve que 80% des résultats sont en dehors de la plage des défauts diagnostiqués par cette méthode.

Pour les 20% des défauts diagnostiqués, ils correspondent pratiquement tous au diagnostic du triangle. Sauf que les défauts thermiques cette méthode les a classés de type T2 alors que le triangle les a classés comme étant de type T3.

Ceci confirme la fiabilité de cette méthode quant aux cas diagnostiqués.

c) Méthode des gaz clés

Cette méthode a détecté 35% de défauts thermiques qui ont tous été identifiés par la méthode du triangle. Elle a détecté 20% de défauts de décharges partielles, ceci est dû au fait que cette méthode associe les taux élevés d'Hydrogène directement aux décharges partielles.

d) Méthode de Doernenburg

Cette méthode présente 22% de cas non diagnostiqués. Mais elle est presque aussi efficace que la méthode du triangle pour la détection des défauts thermiques, sauf qu'elle ne fait pas la distinction quant au type de défaut thermique (T1, T2 ou T3).

e) Méthode de Rogers

Cette méthode présente 60% de cas non diagnostiqués. Elle a détecté 30% de défauts thermiques qui ont tous été détecté également par la méthode du triangle. Ainsi que 6% de défauts de type D2 qui ont été identifié par la méthode du triangle comme étant de type D1.

IV.5 Conclusion

Les défauts qui sont produits dans les transformateurs dégagent des gaz dissous dans l'huile et cela influe sur ses propriétés diélectriques. L'apparition de gaz et de gouttelettes d'eau (soit dissoutes dans l'huile soit libres), affecte le transformateur et le met dans un état dangereux et indésirable.

Parmi les différentes méthodes d'interprétations des AGD, la méthode de Duval est considérée comme étant la plus fiable.

Si le résultat des analyses fait apparaître une huile présentant une rigidité diélectrique insuffisante et une teneur en eau importante, il est nécessaire d'effectuer un traitement complet de l'huile pour lui redonner un état proche de sa qualité initiale en supprimant les impuretés solides (filtration), l'humidité (séchage) ainsi que les gaz dissous (dégazage) dans cette huile.

Chapitre V

Programmation et résultats

V.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter le travail de programmation ainsi que les résultats des tests réalisés avec l'outil informatique concernant la discrimination des courants de décharges. Nous allons exploiter les résultats obtenus à partir des mesures de courants de décharges électriques décrites dans le chapitre III. Ensuite on les adapte et on les traite avec un système de diagnostic en leur faisant une discrimination et une classification.

Les performances du système seront données en termes de probabilité de bonne détection et de fausse détection.

V.2 Travail effectué

Les signaux étudiés sont non stationnaires et non reproductibles, leur caractérisation est complexe et difficilement accessible. Ceci nécessite l'utilisation d'un modèle prédictif basé sur le calcul des probabilités et statistiques.

Pour une meilleure approche du problème, on utilise un réseau de neurones. Celui-ci commence par adapter ces divers paramètres au problème grâce à des données entrées-sorties qui sont choisies. Lorsque les paramètres du réseau sont stables, on l'utilise alors pour la reconnaissance automatique des signaux. Mais avant cela, une préparation d'une base de données contenant les entrées du réseau de neurones s'impose.

Les principales étapes suivies sont :

- Numérisation des graphes
- Création d'une base de données des paramètres d'entrées pour le réseau de neurones
- Apprentissage du réseau de neurone.
- Test du réseau de neurone.

V.2.1 Numérisation des graphes

Des signaux sélectionnés ont été photographiés avec un appareil photo de haute résolution. Les signaux ont été par la suite numérisés, adaptés et mis sur échelle à l'aide du logiciel « Graph Digitizer Scout ».

Les principales étapes de numérisation consistent en :

- Transformation du graphe en image
- Identification des axes
- Mise sur échelle
- Sélection des différents points du signal point par point
- Numérisation
- Enregistrement des coordonnées sous format Excel « .xls »
- Conversion du fichier Excel en fichier données Matlab « .dat »

La figure V.1 montre la méthode de numérisation avec le logiciel « Graph Digitizer Scout ».

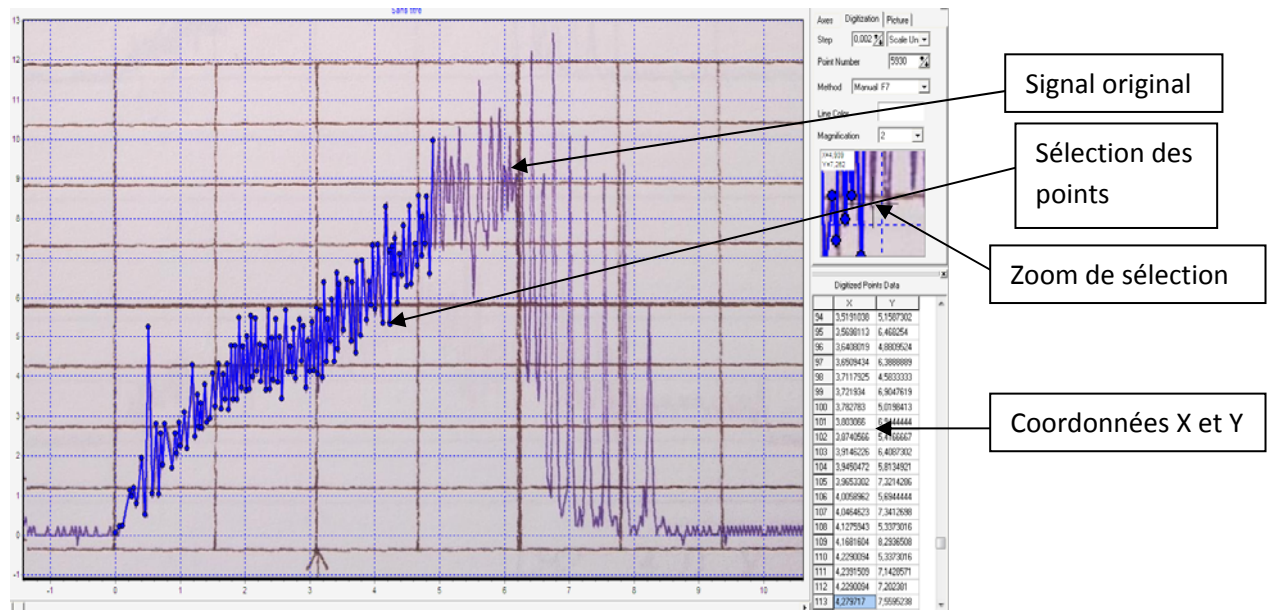


Figure V.1 Logiciel de numérisation

Une centaine de signaux ont été numérisés de cette manière. La figure V.2 montre la transition entre un signal scanné et le signal numérisé.

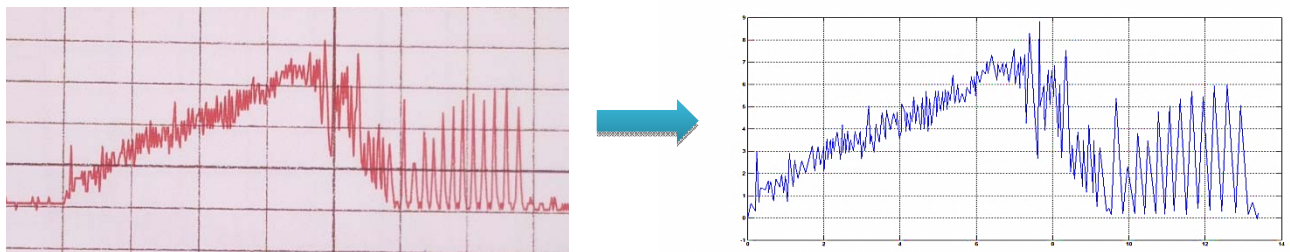


Figure V.2 Numérisation des signaux

On voit bien que la numérisation reproduit fidèlement la forme du signal original.

V.2.2 Création de la base de données

La création de la base de données consiste principalement au rassemblement des entrées les plus significatives des signaux choisis pour l'apprentissage, et à leur attribuer leurs classes (signal dangereux ou signal non dangereux).

Les entrées du modèle neuronal seront déterminées à partir des résultats obtenus de :

- La droite de régression multilinéaire robuste.
- L'application de la transformée en ondelette.

Le schéma de la figure V.3 montre les principales étapes du programme de préparation de la base de données pour chaque signal numérisé.

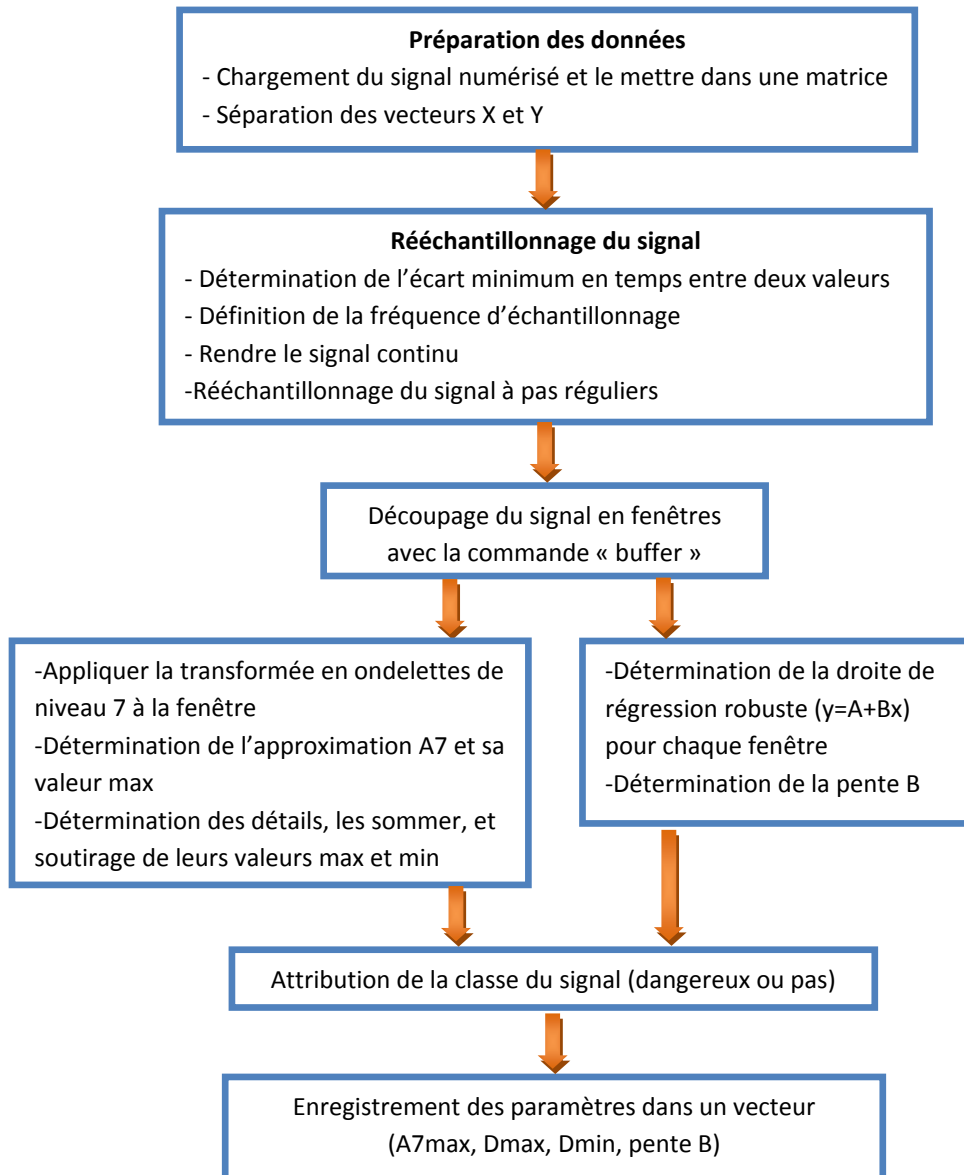


Figure V.3 Etapes de création des paramètres de la base de données

a) Découpage du signal en fenêtres

On découpe le signal en fenêtres (figure V.4) afin de pouvoir traiter le signal segment par segment et ainsi pouvoir diagnostiquer en temps réel. La commande Matlab utilisée est « *buffer (signal, taille d'une fenêtre)* ».

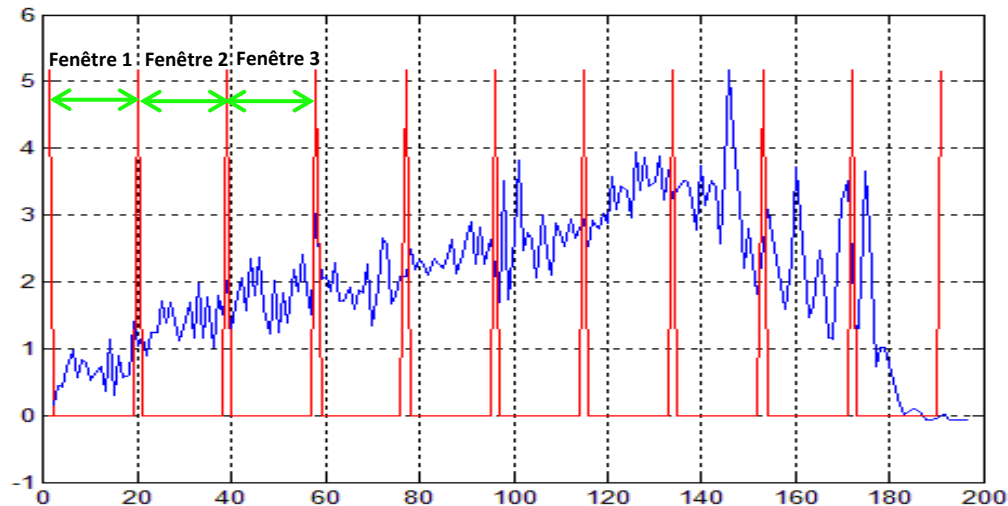


Figure V.4 Découpage d'un signal en fenêtres

b) Droite de régression multilinéaire robuste

Il s'agit de déterminer l'équation ($y=A+Bx$) de **la droite de régression multilinéaire robuste** d'une fenêtre, où B représente la pente. Ce paramètre représentera l'une des entrées du réseau de neurone.

L'avantage de la droite de régression multilinéaire est qu'elle est plus efficace que la droite de régression linéaire, comme le montre la figure V.5.

La commande Matlab utilisée est « *robustfit (signal, taille)* »

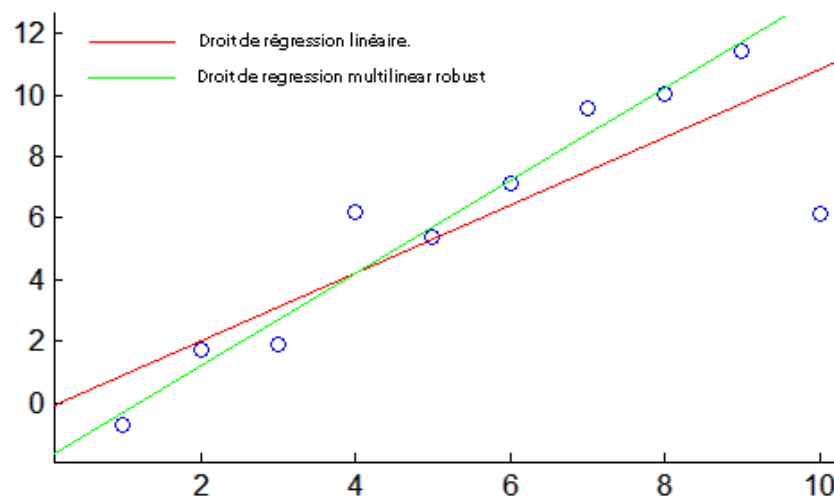


Figure V.5 Droites de régression

c) La transformée en ondelette

La transformée en ondelette est une méthode de traitement de signal adaptée aux signaux non périodiques. Elle permet une analyse temps-fréquence que ne permet pas une analyse par la transformée de Fourier. Les algorithmes d'ondelettes ont deux composantes, une fonction d'ondelette et une fonction d'échelle (dénommée parfois filtre passe haut et filtre passe bas).

La transformée en ondelettes peut se faire sur plusieurs niveaux de détails. Notre choix a été d'aller jusqu'au niveau 7. La figure V.6 nous montre un signal décomposé en ondelettes au niveau 7.

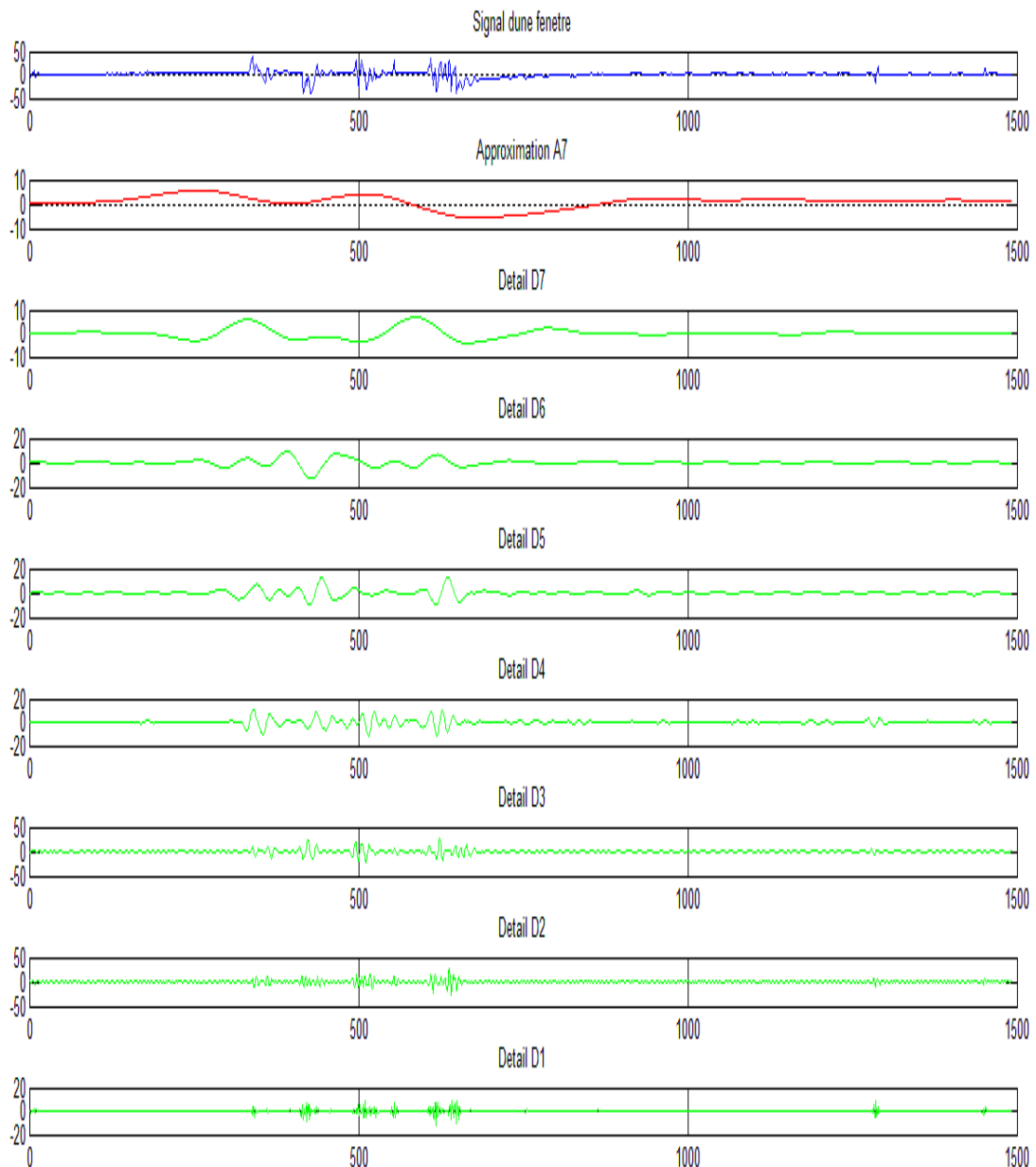


Figure V.6 Application de la transformée en ondelettes de niveau 7

Nous obtenons un signal d'approximation « A7 », qu'on peut assimiler à la composante continue du signal, et des détails jusqu'au niveau 7.

La commande Matlab utilisée est « $[C,L] = wavedec(signal,niveau,'nom')$ »

Si on appelle le signal « S », on aura :

$$S=A7+D1+D2+D3+D4+D5+D6+D7 \quad (11)$$

En sommant les détails, on aura :

$$S=A7+D \quad (12)$$

$$\text{Avec } D=D1+D2+D3+D4+D5+D6+D7 \quad (13)$$

La figure V.7 montre le résultat de la sommation des détails

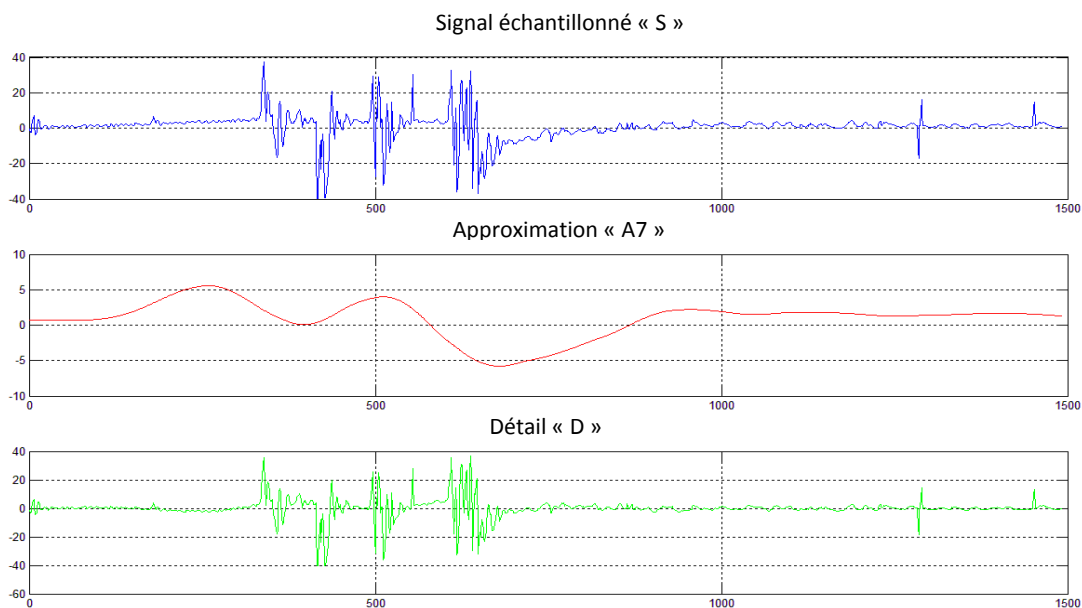


Figure V.7 Sommation des détails de niveau 7

A partir des résultats de cette transformée, nous avons fait le choix de soustraire pour chaque fenêtre du signal:

- La valeur maximale de l'approximation A7
- La valeur maximale du détail D
- La valeur minimale du détail D
-

Et ces trois paramètres sont également des entrées du réseau de neurones

d) Attribution de la classe du signal

Selon que le signal étudié est dangereux ou pas, on lui attribue les valeurs suivantes :

signal dangereux	signal non dangereux
1	0

Les paramètres de **60** signaux ont été déterminés et enregistrés dans la base de données pour servir à l'apprentissage.

V.2.3 Apprentissage du réseau de neurones

Les principales étapes du programme d'apprentissage du réseau de neurones sont montrées sur la figure V.8 :

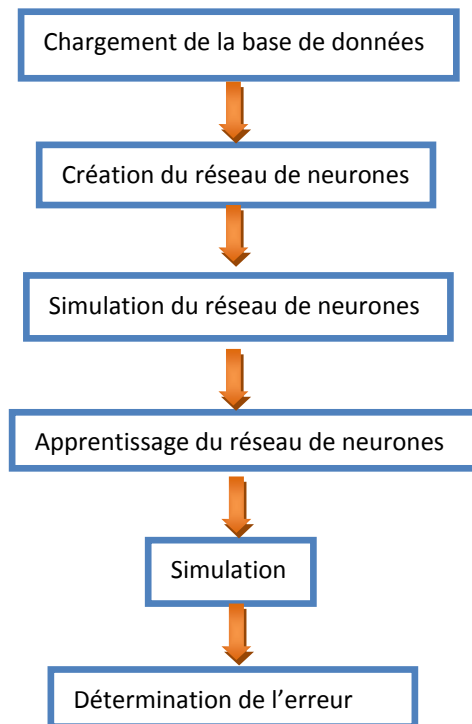


Figure V.8 Déroulement de l'apprentissage

Architecture du réseau de neurones

La fonction utilisée pour le réseau de neurones est newff (feedforwardnetwork).

Choix de l'architecture du RNA

Le choix d'une architecture adéquate de RNA est primordial pour obtenir un système performant ou tout au moins fonctionnel. Or plusieurs aspects sont à considérer lors de la conception dont les plus importants sont :

- **Le nombre d'entrées et de sorties**

D'après ce qui a été cité précédemment, nous avons un vecteur d'entrées à 4 éléments (pente, max(A7), max(D), min(D)). Et une sortie pour chaque vecteur (0 ou 1).

- **Le nombre de couches de neurones et le nombre de neurones sur chaque couche**

Habituellement, une seule couche cachée suffit pour résoudre la plupart des problèmes. En règle générale, plus un RNA a d'entrées et plus la résolution du problème est complexe, plus il faudra de neurones en couche cachée [81]. Une technique souvent utilisée consiste à effectuer l'apprentissage d'une première topologie de réseau avec beaucoup de neurones en couche cachée et de diminuer ce nombre jusqu'à ce que les performances commencent à se dégrader. Il est aussi possible de commencer avec une structure simple, pour ensuite la complexifier jusqu'à l'atteinte des performances souhaitées [82].

Plusieurs configurations (161 possibilités) en termes de nombre de couches cachées et de nombre de neurones par couche ont été essayées. Les résultats sont montrés sur le tableau V.1.

Tableau V.1 Détermination du nombre de couches et de neurones

Neurones	1 couche	2 couches	3 couches	4 couches	5 couches	6 couches	7 couches
4	0.1076	0.1092	0.1054	0.1042	0.1499	0.1049	0.1041
5	0.1102	0.1002	0.1117	0.1021	0.0959	0.0984	0.0980
6	0.1163	0.1003	0.1044	0.1068	0.1011	0.1031	0.1031
7	0.1091	0.1061	0.1034	0.1014	0.1023	0.1242	0.1163
8	0.1124	0.1032	0.1230	0.0996	0.1056	0.1006	0.1129
9	0.1120	0.1024	0.1039	0.1004	0.1186	0.1059	0.1102
10	0.0993	0.1058	0.0953	0.0968	0.1306	0.1027	0.1027
11	0.1052	0.1017	0.1020	0.1083	0.1020	0.1495	0.1206
12	0.1032	0.1004	0.1035	0.1017	0.1061	0.1059	0.1048
13	0.1066	0.1061	0.0969	0.1025	0.1112	0.1056	0.1089
14	0.1031	0.1085	0.1012	0.1018	0.1036	0.1022	0.1016
15	0.1073	0.1110	0.1063	0.1028	0.1034	0.1436	0.1028
16	0.1103	0.1095	0.0988	0.1048	0.1115	0.0905	0.0944
17	0.1143	0.1046	0.1045	0.1016	0.0986	0.0969	0.1081
18	0.1087	0.1011	0.1090	0.1407	0.1092	0.1058	0.1076
19	0.1002	0.1045	0.1034	0.1053	0.1012	0.1000	0.1026
20	0.1043	0.1178	0.1082	0.1021	0.1162	0.1118	0.1071
21	0.1090	0.1280	0.1014	0.1034	0.0949	0.1082	0.1028
22	0.1040	0.1079	0.0983	0.1024	0.1006	0.0948	0.1013
23	0.1051	0.1036	0.1042	0.1064	0.1001	0.1018	0.1026

La configuration retenue est donc un réseau de neurones avec 6 couches cachées
[10 5 10 10 21 16]

La figure V.9 montre un schéma simplifié du réseau de neurones créé.

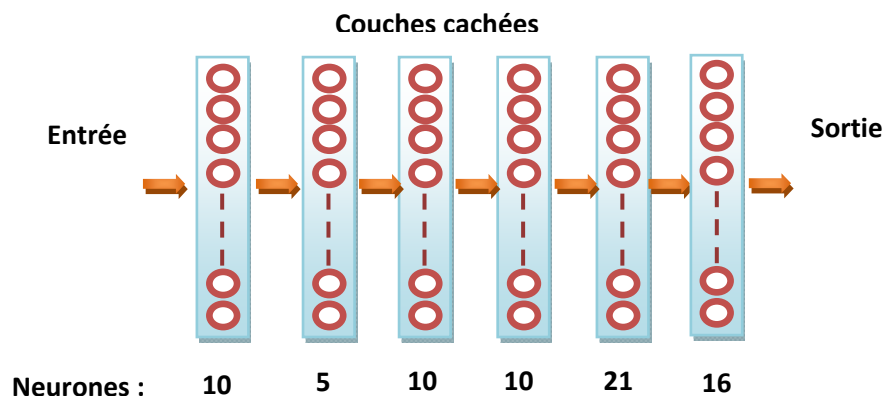


Figure V.9 Configuration du réseau de neurones

- **Les interconnexions entre les couches**

L'interconnexion entre les couches est récurrente. Une structure récurrente est souvent mieux adaptée à la reconnaissance et à la classification de signaux ou d'images. Une topologie récurrente est également très performante lorsque l'aspect temporel des signaux appliqués en entrée est important.

- **La fonction d'activation**

La fonction d'activation utilisée pour chaque neurone des couches cachées est la sigmoïde donnée par la formule :

$$f(x) = \frac{1}{1 + e^{-ax}} \quad (14)$$

Et une fonction linéaire pour le neurone de sortie.

- **La fonction d'apprentissage**

Plusieurs fonctions d'apprentissage ont été essayées, et la fonction retenue a été « **trainlm** »

V.2.4 Test du réseau de neurones

La procédure de test du RNA consiste en les mêmes étapes que la création de la base de données, puisque pour chaque fenêtre, il faudra d'abord déterminer les paramètres d'entrée, mais cette fois au lieu de les sauvegarder dans un vecteur, on les injecte au RNA enregistré suite à l'apprentissage et on obtient immédiatement un résultat.

Une quarantaine de signaux ont été testés. Les figures suivantes montrent certains résultats parmi les signaux testés.

Les figures V.(10, 11 et 12) sont issues du test du réseau de neurone. La couleur bleue représente le signal original et la couleur rouge représente le résultat du test. Ce dernier évolue avec le signal original jusqu'à ce que le réseau de neurones le détecte comme étant un signal dangereux. Alors la coupure se produit, sinon il continue son évolution avec le signal original jusqu'à la fin.

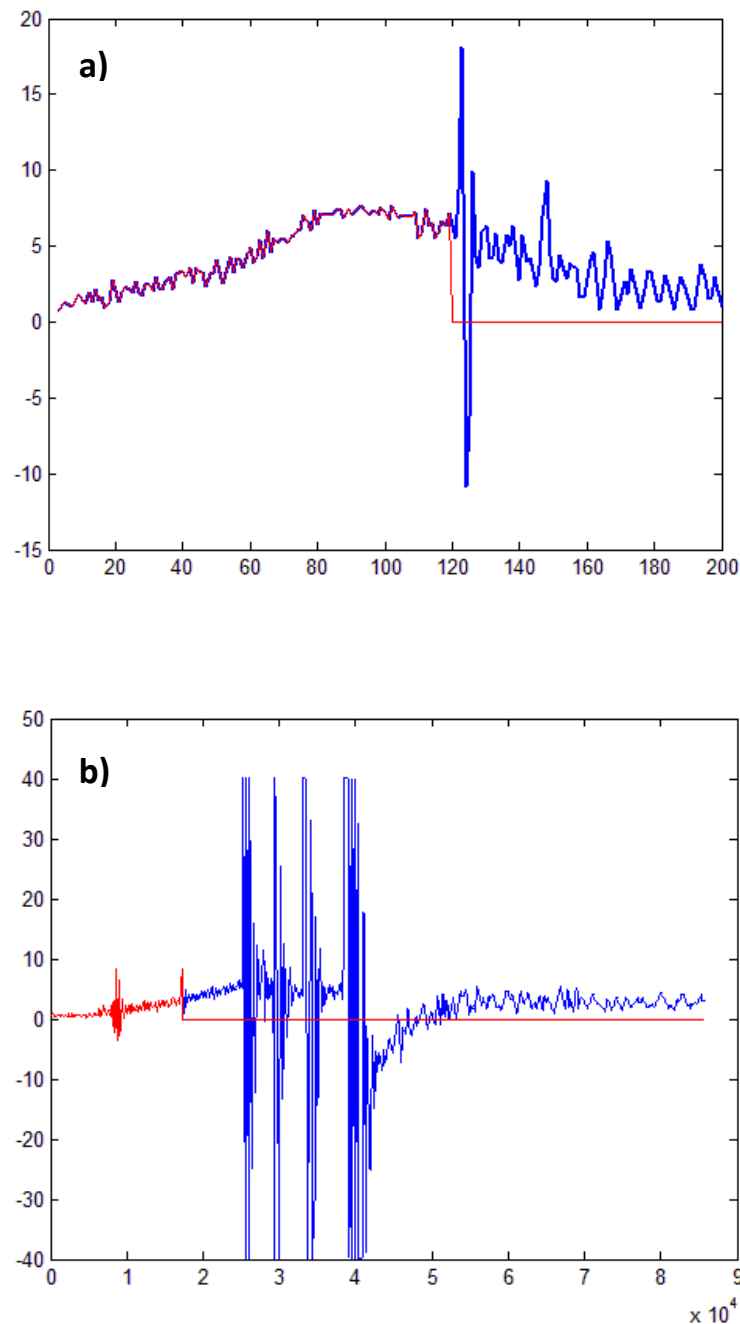


Figure V.10 Signaux de décharge testés avec réussite

Les deux signaux se superposent jusqu'à ce que le signal de couleur rouge s'annule, cela signifie qu'il y a eu coupure, donc détection d'une fenêtre dangereuse pour l'objet à protéger. Ce résultat est concluant puisque la coupure se produit à l'instant voulu, c'est-à-dire dans la zone de pré-claquage. Ceci va nous permettre de prévenir la détérioration de l'équipement.

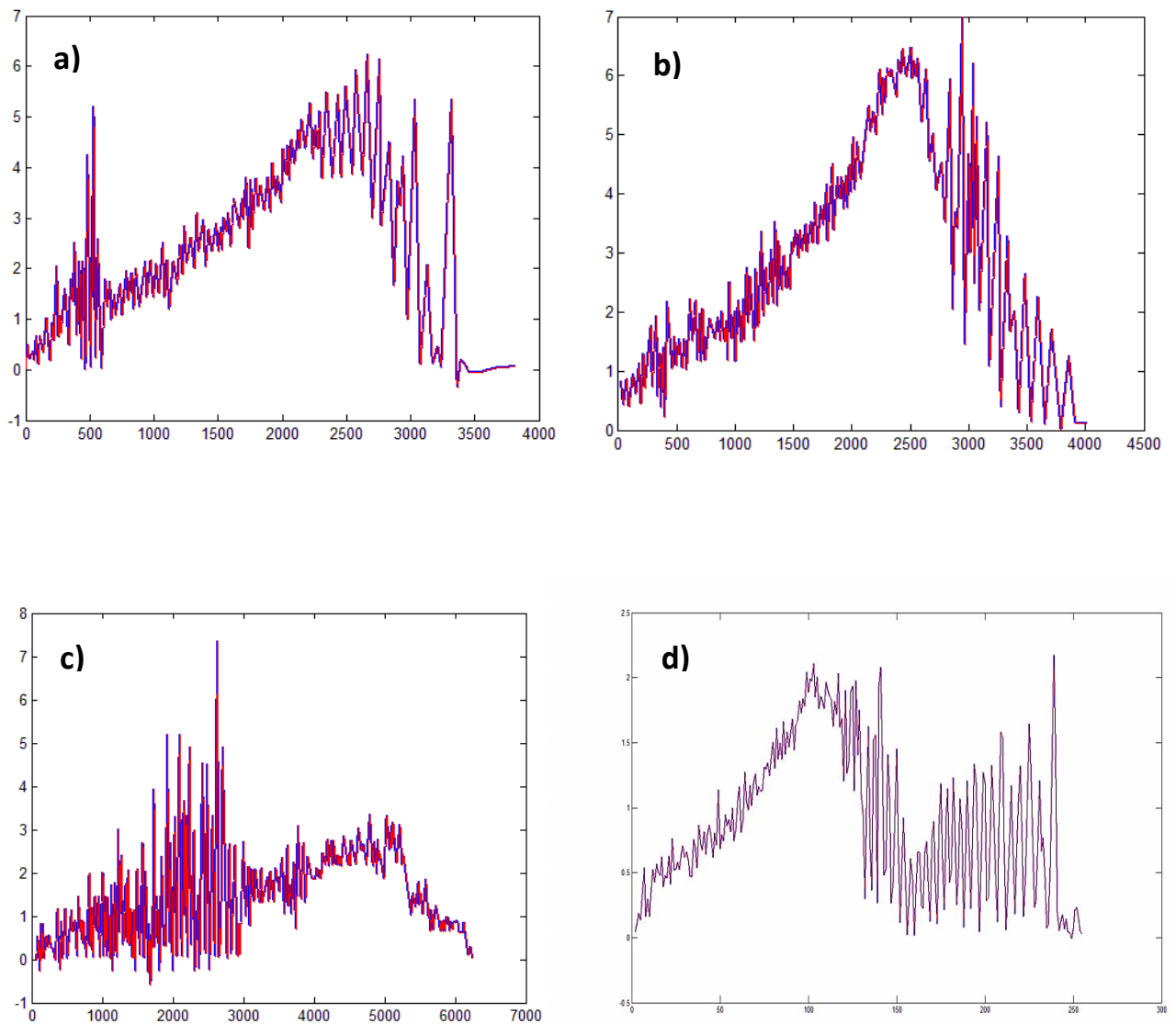


Figure V.11 Signaux détectés comme non dangereux avec réussite

Le signal de couleur rouge (Figure V.11) se superpose parfaitement avec le signal d'origine, ce qui signifie qu'il n'y a pas eu coupure. Ce type de signal ne présente pas de risque potentiel d'être suivi d'un arc.

On voit donc que pour plusieurs types de signaux non dangereux, le réseau de neurones les a laissés passer sans coupure.

Il y eu quelques erreurs, comme la détection un peu en retard d'une décharge, et la fausse détection d'un signal non dangereux (figure V.12).

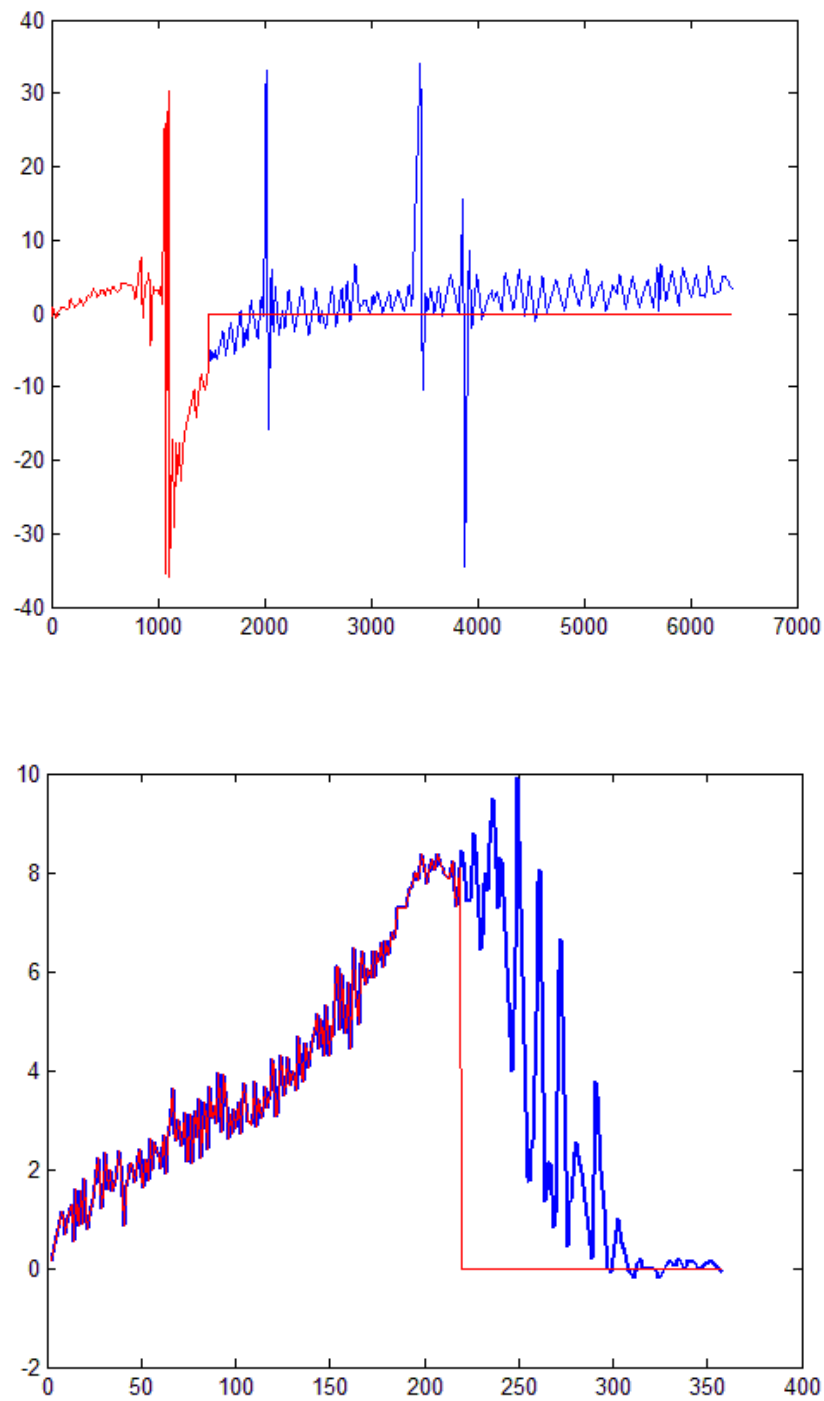


Figure V.12 Fausses détections des signaux

Au final **80%** des signaux ont été testés avec réussite, et **20%** ont été erronés.

V.3 Schéma global de diagnostics

A la fin, on peut obtenir un diagnostic global en s'appuyant sur les différents tests (électriques, physico-chimiques, gaz dissous). Nous présentons dans la figure V.13 un schéma assez général de l'ensemble des diagnostics.

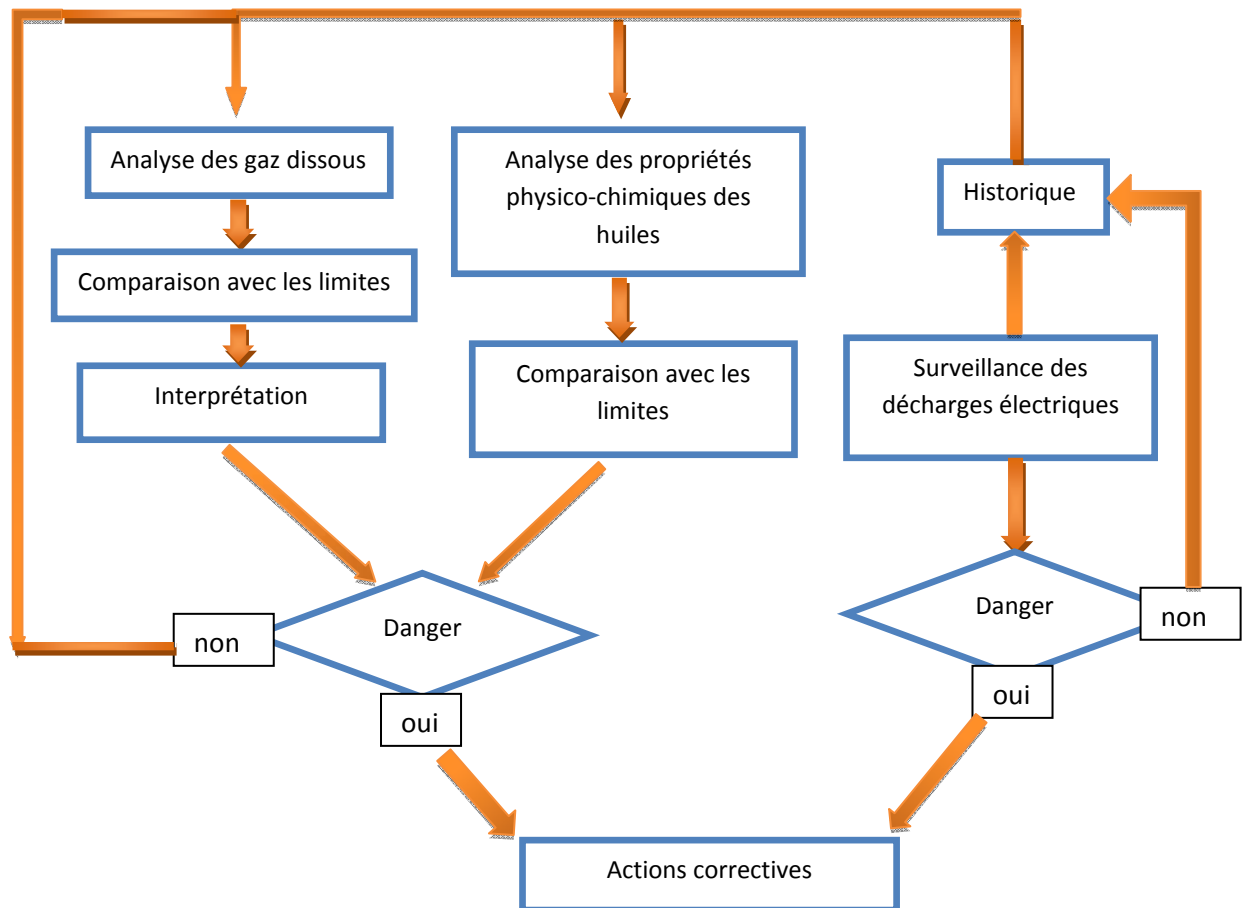


Figure V.13 Schéma global des diagnostics

V.4 Conclusion

L'analyse par l'outil informatique des signaux de décharges (courants de défaut) en temps réel peut représenter une solution rapide et fiable pour la protection des transformateurs.

Les réseaux de neurones sont très bien adaptés à la classification et à la discrimination des signaux. Leur utilisation s'est avérée comme étant une très bonne solution pour la résolution de ce type de problème dépendant de plusieurs paramètres. Les erreurs sont dues à un manque de la propriété de généralisation qui pourra être améliorée.

Conclusion générale

Conclusion générale

La recherche bibliographique, entreprise dans le cadre de ce travail, nous a permis de prendre connaissance de la complexité des phénomènes intervenant dans les décharges au niveau des diélectriques liquides. En effet, une bonne compréhension de ces derniers fait appel à des connaissances de disciplines diverses telles que : la chimie, l'électrochimie, la mécanique des fluides, ...etc.

Les transformateurs de puissance peuvent être à tout moment le siège de défauts thermiques ou électriques. Les conséquences de tels défauts affectent directement leur durée de vie et parfois même provoquent des dégâts dont les coûts sont difficilement supportables par les exploitants des réseaux électriques.

A cet effet des techniques de diagnostic (mesures électriques, mesures diélectriques, analyses physico-chimiques et analyses de gaz) sont prévues sur ces transformateurs afin de limiter les conséquences de ces perturbations sur leur fonctionnement. Ces techniques sont un outil très utile pour améliorer la fiabilité et la disponibilité des équipements.

Dans certains cas, les techniques de diagnostic ne sont pas capables d'éviter tous les dégâts potentiels mais peuvent aider à préciser la portée de l'avarie ; ce qui permet de réduire la portée de la réparation en diminuant le temps d'indisponibilité et le coût de la maintenance corrective.

Les analyses physico-chimiques des huiles sont indispensables pour la prévention des risques de défauts surgissant au niveau des huiles. Si le résultat des analyses fait apparaître une huile présentant une rigidité diélectrique insuffisante et une teneur en eau importante, il est nécessaire d'effectuer un traitement complet de l'huile pour lui redonner un état proche de sa qualité initiale en supprimant les impuretés solides (filtration), l'humidité (séchage) ainsi que les gaz dissous (dégazage) dans cette huile.

Les concentrations d'Analyses des Gaz Dissous (AGD) dans l'huile nous permettent d'identifier les points chauds et les arcs, et d'autres défauts contenus dans l'huile de transformateurs immergés. Bien qu'elle ne tienne pas compte de l'hydrogène, la méthode de Duval demeure la plus fiable étant donné qu'elle permet un diagnostic de tous les états possibles. Mais étant donné la multitude de facteurs pouvant influencer les concentrations des gaz dissous dans l'huile, il est préférable de pondérer les résultats obtenus par les différentes méthodes et d'éliminer celles pouvant contredire l'ensemble.

L'analyse par l'outil informatique des signaux de décharges (courants de défaut) en temps réel représente une solution rapide et fiable pour la protection des transformateurs.

En plus de la procédure de prédiction basée sur les caractéristiques obtenues par transformée en ondelette, les réseaux de neurones sont parfaitement adaptés à la classification et à la discrimination des signaux. Leur utilisation s'est avérée étant une très bonne solution pour la résolution de ce type de problème dépendant de plusieurs paramètres.

Le système ainsi élaboré pour la discrimination des courants de défaut nous a permis d'obtenir des résultats satisfaisants. Ils montrent que la performance du réseau de neurones dépend directement du choix de la structure, de la méthode d'apprentissage et principalement de la phase d'apprentissage. La base de données a une influence majeure sur l'apprentissage des RNA. Pour cela, le choix de cette base est une étape prudente dans les applications des réseaux de neurones.

Il est clair qu'au niveau de technologie actuel, il n'est pas possible d'isoler un transformateur en des micro-secondes. Mais associée aux techniques classiques de diagnostics périodiques, cette méthodologie peut représenter un outil complémentaire d'observation, d'analyse et de prise de décision corrective ou de mise à l'arrêt du transformateur, en temps réel.

Les techniques de diagnostics proposées sont complémentaires et servent ensemble à rendre plus fiables les résultats.

Les travaux entrepris nous ont permis d'améliorer nos connaissances concernant les diélectriques liquides et les techniques de diagnostic. Cependant, ce travail demande à être amélioré et approfondi davantage. Pour cela, nous proposons comme perspectives de recherche, qu'une étude similaire à la celle-ci soit effectuée, et l'élargir en testant de nouvelles méthodes de discrimination des courants de décharges afin d'améliorer les résultats. Ceci pourra mener à développer un programme intelligent qui prend en considération l'historique des données du transformateur afin d'optimiser les diagnostics.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] N.Berger « Liquides isolants en électrotechnique : Présentation générale », Techniques de L'ingénieur, D2470, 2002.
- [2] Y. Tournier , J. Lemaire et P. Hofer « Valeurs limites des tensions de service et des Puissances » - Unitaires des grands transformateurs. Congrès SFE Nice, 1971.
- [3] «Transformer oil handbook », ISBN n° 93-631 4982-6, Nynas Naphtenics AB, Sweden, 1st edition 2004.
- [4] N.BERGER, M. RANDOUX, G. OTTMANN et P. VUARCHEX. « Revue des isolants liquides», Electra (F), n° 171, 1997, pp.32-57
- [5] Yu.V. Torshin, IEEE Trans. on Diel. and Elect. Ins., Vol.2 No1, 1995, pp.167-179.
- [6] C. Perrier, « Etude des huiles et des mélanges à base d'huiles minérales pour transformateurs de puissance- recherche d'un mélange optimal », Thèse de doctorat, Ecole Centrale de Lyon, Avril 2005.
- [7] R. Tobazeon, « conduction électrique dans les liquides », Techniques de l'ingénieur, Traité D2430, Novembre 1996.
- [8] M. Krins, H. Borsi, E. Gockenbach "Influence of Ageing on the Dielectric Properties of Carbonized Transformer Oil". Conference Record of the 1996 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 1996.
- [9] Norme internationale CEI 156 « Isolants liquides : détermination de la tension de décharge disruptive », Août 1995.
- [10] Magazine Nynas naphtélique «guide des huiles minérales isolantes », p 21.
- [11]P. J. VUARCHEX, « Caractéristiques des diélectriques liquides», Techniques de l'ingénieur. Traité K 714. Janvier 1988.
- [12]A.BONDEAU, «Contribution à l'étude de la viscosité des milieux denses désordonnés dans la zone de transition vitreuse. Critique de la relation de Vogel-Fulcher » Thèse de doctorat, école doctorale électronique, électrotechnique, automatisme de Lyon, 1985.
- [13] Norme ISO 3016, « Produits pétroliers – Détermination du point d'écoulement », Août 1994.

- [14] S. Abdi, « Influence du vieillissement thermique sur les propriétés de l'huile de transformateur », Thèse de Magister, Département de Génie Electrique, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger, 2002.
- [15] C. T Dervos, C. D. Paraskevas, P. Skafidas, P. Vassiliou, IEEE electIns Magazine, Vol 21, No 1, 2005.
- [16] C. Ferrier.« Étude des huiles et des mélanges à base d'huile minérale pour transformateurs de puissances-recherche d'un mélange optimal ». Thèse de doctorat. Ecole centrale de Lyon. 2005.
- [17] S.E. Chitour. « Raffinage du pétrole », Tome01, USTHB, Alger, OPU, 1983.
- [18] L. PEYRAQUE, "Étude des Phénomènes d'Électrisation Statique dans les transformateurs de Puissance à Débit d'Huile Forcé", Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon, France, Novembre 1995.
- [19] T. J. GALLAGHER, "Simple Dielectric Liquids: Mobility, Conduction, and Break down", Oxford University Press, 1975.
- [20] J. A. KOK, "Rigidité Diélectrique des Liquides Isolants", Bibliothèque Technique Philips, DUNOD, 1964.
- [21] A. BEROUAL, "Electronic and Gaseous Processes in Prebreakdown Phenomena of Dielectric Liquids", J. Appl. Phys. 73 (9), pp. 4528-4533, 1993.
- [22] J.C. DEVINS, S.J. RZAD et R.J. SCHWABE, « Breakdown and Prebreakdown Phenomena in Liquids (Phénomènes de claquage et de préclaquage dans les liquides) ». J. Appl. Phys., 52, 1981, p. 4 531-4 545
- [23] P. K Watson, W.G. Chadband and M. Sadeghzadeh-Araghi, IEEE Trans. On Elect. Ins., Vol. 26 No.4, August 1991.
- [24] A. Beroual, Am. Journal of Appl. Phys., 73(9), 1 May 1993, pp.4528-4533.
- [25] T.J. Lewis, Conf. Rec. On the ICDL '96, 12th International Conference on Conduction and Breakdown in Dielectric Liquids, Roma, Italy, July 15-19, 1996.
- [26] S. SAKAMOTO et H. YAMADA – « Optical study of conduction and breakdown in dielectricliquids (Étude optique de la conduction et du claquage dans les liquides diélectriques) ». IEEE Trans. on Electr.Insul., EI 15, Nr 3, 1980, p. 171-181.
- [27] A. Beroual and R. Tobazeon, IEEE Trans. on Elect. Ins., Vol.EI-21, N°4, August 1986. pp.613-627.

- [28] A. Beroual, Archives of Electrical Engineering, volume XLIV, N°4, pp.579-592, 1995.
- [29] R.T. Harrold, Ann. Rep. CEIDP NAS-NRC, 1974, p123.
- [30] H. Yamashita, E.O.Forster and M.Pompili, IEEE Trans. on Elect. Insul., Vol.28, N°3, June 1993.
- [31] A. Beroual, Thèse de doctorat d'état es-sciences physiques, Grenoble, Janvier 1987.
- [32] W.G. Chadband, J. Phys. D : Appl. Phys., Vol.13, 1980, pp. 1299-1306.
- [33] A.C.T. Briggs, A. Beroual and F. Buret, IEEE Trans. on Diel. and Elect. Ins., Vol.1 No.3, June 1994, pp. 371-376.
- [34] H. Moulai et A. Beroual, 1^{ère} Conf. Nat. sur la H.T., Bejaia 1995, pp.139-143.
- [35] L. Lundgaard, D. Linhjell, G. Berg and S. Sigmond, Conf .Rec. of the ICDL'96, 12th Int. Conf. on Cond. and Breakd. In Diel.Liq., Roma, Italy, July 15-19, 1996 pp. 175-180.
- [36] Y. Kamata and Y. Kako, IEEE Trans. on Elect. Ins., Vol.15, 1980 , pp.18-26.
- [37] D. Linhjell, L. Lundgard and G. Berg, IEEE Trans. on. Diel.and Elect. Ins., Vol.1 No 3, June 1994, pp. 447-458.
- [38] B. Badent, K. Kist and A.J. Schwab, Conf. Record of the I.C.D.L.'96 12th International Conf. on Cond. And Breakd. In Diel. Liquids, Roma, Italy, July 15-19, 1996.
- [39] S. Sakamoto and H. Yamada, IEEE Trans. on Elect. Ins., EI-15, No 3, pp.171-181, 1980.
- [40] D.A. Hoch and J.P. Reynders, 7th International Symposium of High Voltage Engineering, Dresden, August 26-30, 1991.
- [41] P.B. McGrath and J.K Nelson, J. of Electrostatics (NL) 7, 1979, pp. 327-36.
- [42] Y.Nakao, H.Itoh, S. Hoshino Y. Sakai and H. Tagashira, IEEE Trans. on Dielect. and Elect. Insul., Vol.1, N°3, June 1994. pp. 383-390.
- [43] H. Yamashita, K. Yamazawa, W. Machidori and Y.S. Wang, Conf. Rec. of the ICDL '96, 12th Int. Conf. on Cond. And break. in Diel. Liq., Roma, Italy July 15-19, 1996. pp. 226-229.

- [44] J.P. Antoine, R. Murenzi, P. Vandergheynst, S. Syed Twareque Ali, "Two-dimensional Wavelets and their Relatives", Cambridge university Press, 2004.
- [45] A. Beroual, M. Zahn, A. Badent, K. Kist, A.J. Schwabe, H. Yamashita, K. Yamazawa, M. Danikas, W.G. Chadband, and Y. Torshin, IEEE Study group, IEEE Elect. Ins. Magazine, Vol. 14, N°2, p.6, 1998.
- [46] H MOULAI, « Etude des courants de streamers dans les diélectriques liquides », Thèse de doctorat d'état, ENP, 2001.
- [47] M.Duval, P.Gervais and G.Belanger, « Update on Hydro-Quebec's Experience in the Interpretation of Dissolved Gas Analysis in HV Transformers », CIGRE Symposium 1993, Berlin, p.110-114. 1993.
- [48] R.R. Rogers., "IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient Faults in Transformers Using Gas-in-Oil Analysis," IEEE Transformer Electrical Insulation (USA), vol. EI-13, no. 5, pp. 349-354, Oct. 1978.
- [49] M.Duval, "Dissolved Gas Analysis and the Duval Triangle", 2006.
- [50] F. Truchetet, «Ondelettes pour le signal numérique»,EditionsHermes,Paris 1998.
- [51] Y. Bentaleb, «Analyse par ondelettes des signaux sismiques : Applications aux ondes de surface», Université Mohammed V - Agdal, Faculté des Sciences, Rabat, 2006.
- [52] S. Mallat, «Multiresolution approximations and wavelet orthonormal bases of $L^2(\mathbb{R})$ », Trans. Am. Math. Soc., vol. 315, N°1, pp. 69-87, sep 1989.
- [53] S. Mallat, «Multifrequency channel decomposition of images and wavelet models», IEEE Trans. on Accoustic Speech and Signal Proc., vol.37, N°12, pp. 2091-2110, Dec 1989.
- [54] S. Mallat, «A theory for multiresolution signal decomposition : the wavelet represntation», IEEE, PAMI, vol. 11, N° 7, pp. 674-693, july 1989.
- [55] I. Daubechies, «Orthonormal bases of compactly supported wavelets», Com. on Pure Appl. Math., vol. 41, pp. 909-996, nov. 1988.
- [56] B.B. Hubbard, «Ondes et Ondelettes», Pour la science, dif. BELIN, Paris 1995.
- [57] C. Touzet, « Les réseaux de neurones artificiels, Introduction au connexionisme», Notes de cours sous forme HTML, juillet 1992.

- [58] C.T. Lin et C.S.G. Lee, « Introduction to artificial neural networks », dans Neural Fuzzy Systems, New Jersey, Prentice Hall, p. 205-217, p. 235-250. 1995.
- [59] P. DE WILDE, « Neural Network Models», Springer, 2e édition, 172 p. 1997.
- [60] J.D. Leroux, «Les réseaux de neurones artificiels», Université de Sherbrooke, Département de génie électrique et de génie informatique, 2004.
- [61] L. C. Jain et V. R. Vemuri, «Industrial Applications of Neural Networks», New York, International Series on Computational Intelligence, CRC Press, p325, 1999.
- [62] Norme internationale CEI 60 422 « Huiles minérales isolantes dans les matérielséletriques : guide pour la maintenance et la surveillance ». 2005.
- [63] Norme internationale CEI 60 599 « Guide pour l'interprétation de l'analyse des gaz dissous et des gaz libres ». 2005.
- [64] R.WILPUTTE. « Contribution à l'étude de l'évolution de gaz dans les isolants liquides et solides soumis à l'action de contraintes électriques », CIGRE, page15-03, Aout\ septembre 1970.
- [65] IEEE Std C57.104 “IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers”. 1991
- [66] M. Duval, “A Review of Faults Detectable by Gas-in-Oil Analysis in Transformers”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.18, No.3, p.8. 2002.
- [67] M. Duval and A. DePablo, “Interpretation of Gas-in-Oil Analyses Using New IEC Publication 60599 and IEC TC10 Databases”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol.17, No.2, p.31. 2001.