الجمهـــوريـــــة الجزائـــريـــــة الديمقـــراطيـــة الشـعبيـــة الشـعبيـــة

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التـــعلـــيـــم العـــــالـــــي والبـحـــــث العـلـمـــــي

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

محمد بن أ حمد 2جامعة وهران

Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed

معهد الصيانة واألمن الصناعي

Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

MÉMOIRE

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Electromécanique

Spécialité : Maintenance Industrielle et Electromécanique

Thème:

Etat de l'art sur les huiles utilisées dans les transformateurs de puissances

Présenté et soutenu publiquement par :

Mabedi Abdelmounaim **Benregreg Salim**

Devant le jury composé de :

Mouloushoul Atika	MCA	Président
TALHI Mama	MCA	Encadreur/rapporteur
LABAIR Hakima	MCA	Examinateur

Année universitaire 2024/2025

Remerciements

Avant toute chose, je rends grâce à Dieu Tout-Puissant pour m'avoir accordé la force, la patience et la persévérance nécessaires à l'accomplissement de ce travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **Madame TALHI mama**, mon encadreur, pour sa disponibilité, ses orientations pertinentes, ses conseils précieux ainsi que pour la confiance qu'elle m'a accordée tout au long de ce travail. Son accompagnement scientifique et humain a été essentiel à la réalisation de ce travail.

Mes sincères remerciements s'adressent également aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer ce travail, et pour l'intérêt qu'ils lui portent.

Je remercie également l'ensemble des enseignants et personnels du **Département de maintenance en électromécanique** pour la qualité de l'enseignement dispensé, ainsi que pour leur accompagnement durant toutes les années de formation.

Mes pensées les plus respectueuses vont à ma famille, pour son soutien moral, sa patience et ses encouragements constants, en particulier à mes parents, pour leur amour inconditionnel et leurs sacrifices silencieux.

Enfin, je n'oublie pas mes camarades et amis, pour leur aide, leur écoute et les moments partagés qui ont enrichi cette expérience universitaire.

Dédicace

Je dédicace mémoire à mes chers parents,

pour leur amour, leurs sacrifices et leur soutien indéfectible tout au long de mon parcours.

À mes frères et sœurs,

pour leur présence rassurante et leurs encouragements permanents.

Que ce travail soit le reflet de votre foi en moi et de mon engagement envers vous.

Avec toute ma gratitude.

Dédicace

Je dédie ce mémoire à mon encadreur,
pour son accompagnement rigoureux, sa disponibilité et ses conseils précieux.
À mes camarades de promotion,
pour les moments de partage, de réflexion et d'entraide qui ont marqué ces années d'études.
À tous ceux qui ont cru en moi,
merci d'avoir éclairé ce chemin d'apprentissage et de dépassement de soi.

Résume

Ce mémoire propose une revue détaillée des huiles isolantes utilisées dans les transformateurs de puissance, en mettant en lumière leur rôle crucial dans l'isolation électrique, le refroidissement et la protection contre les défaillances internes.

En commençant par une présentation des transformateurs de puissance, de leur fonctionnement, de leurs composants et des contraintes liées à leur exploitation, notamment dans des conditions climatiques extrêmes comme celles observées en Algérie.

L'étude inclut également une analyse approfondie des diverses familles d'huiles isolantes. — minérales, esters naturels, esters synthétiques, huiles de silicone et fluides émergents comme les nano-huiles ; en s'appuyant sur les normes internationales (IEC, ASTM, IEEE) et sur de nombreuses recherches menées dans les universités algériennes (USTHB, Boumerdès, Batna, Sétif). Elle examine leurs propriétés physico-chimiques et électriques, les mécanismes de vieillissement, les critères de sélection et les enjeux environnementaux liés à leur usage.

Cette étude consacre une partie à l'étude des nouvelles huiles plus écologiques et performantes, en soulignant leurs avantages et leurs limites technico-économiques. Il met en avant les perspectives de développement, notamment à travers la recherche appliquée locale, l'industrialisation des esters naturels et l'intégration progressive de solutions innovantes dans le réseau national.

Mots clés : Huile minérales, huiles végétales, transformateur de puissance – propriétés électriques – propretés physicochimiques

Abstract:

This master's thesis provides a detailed review of the insulating oils used in power transformers, highlighting their crucial role in electrical insulation, cooling, and protection against internal failures. It begins with an overview of power transformers, their operation, their components, and the constraints associated with their operation, particularly in extreme climatic conditions such as those observed in Algeria.

The study also includes an in-depth analysis of various families of insulating oils: mineral, natural esters, synthetic esters, silicone oils, and emerging fluids such as nano-oils; based on international standards (IEC, ASTM, IEEE) and numerous research projects conducted in Algerian universities (USTHB, Boumerdès, Batna, Sétif). It examines their physicochemical and electrical properties, aging mechanisms, selection criteria, and environmental issues related to their use.

This study devotes a section to the study of new, more environmentally friendly and efficient oils, highlighting their advantages and technical and economic limitations. It highlights development prospects, particularly through local applied research, the industrialization of natural esters, and the gradual integration of innovative solutions into the national network.

Keywords: Mineral oils, vegetable oils, power transformer – electrical properties – physicochemical properties

الملخص:

يقترح هذا البحث مراجعة مفصلة للزيوت العازلة المستخدمة في محولات القدرة، مع تسليط الضوء على دورها الأساسي في العزل الكهربائي، التبريد، والحماية من الأعطال الداخلية .يبدأ بدراسة تعريفية لمحولات القدرة، آلية عملها، مكوناتها، وكذا التحديات المرتبطة بتشغيلها، خاصةً في الظروف المناخية القاسية مثل تلك التي تشهدها الجزائر

تتضمن هذه الدراسة أيضًا تحليلًا معمقًا لمختلف عائلات الزيوت العازلة، مثل الزيوت المعدنية، الإستر الطبيعية، الإستر الاصطناعية، زيوت السيليكون، والسوائل الناشئة مثل الزيوت النانوية، وذلك استنادًا إلى المعايير الدولية IEC)، ASTM، (IEEEوالعديد من المشاريع البحثية المنجزة في الجامعات الجزائرية USTHB)، بومرداس، باتنة، سطيف .(كما تُعنى بدراسة خصائصها الفيزيائية والكيميائية والكهربائية، وآليات تقادمها، ومعايير اختيارها، إضافة إلى الإشكالات البيئية المرتبطة باستخدامها.

تخصص هذه الدراسة قسمًا لدراسة الزيوت الجديدة الأكثر كفاءة والصديقة للبيئة، مع إبراز مزاياها وحدودها التقنية والاقتصادية .كما تسلط الضوء على آفاق تطوير هذه الزيوت، لاسيما من خلال البحث التطبيقي المحلي، وتصنيع الإستر الطبيعية، والدمج التدريجي للحلول المبتكرة ضمن الشبكة الوطنية.

الكلمات المفتاحية :الزيوت المعدنية، الزيوت النباتية، محول القدرة –الخصائص الكهربائية – الخصائص الفيزيائية والكيميائي

Sommaire

Page de garde
Remerciement
Dédicace
Résume
Sommaire
Liste des tableaux
Liste des figures

Introduction générale 2

Chapitre I :

Les Transformateurs De Puissance

1.1 Introduction 5

1.2 Historique et évolution des transformateurs 5

1.3 Définition, fonction et importance 6

1.4 Principes physiques de fonctionnement 7

1.5 Composants principaux d'un transformateur de puissance 9

1.6 Types et classifications des transformateurs 10

1.7 Méthodes de refroidissement 11

1.8 Problèmes fréquents et pannes observées 12

1.9 Maintenance et prolongation de la durée de vie 12

1.10 Conclusion 13

Chapitre II :

Les huiles utilisées dans les transformateurs

II.1 Introduction 15

II.2 Rôles et exigences des huiles isolantes dans les transformateurs 16

II.3 Classification des huiles isolantes 17

II.4 Propriétés physico-chimiques et électriques des huiles isolantes 18

II.5 Mécanismes de vieillissement des huiles isolantes 20

II.6 Normes et critères de sélection des huiles isolantes 22

II.7 Conclusion 25

Chapitre III :

Les nouvelles huiles utilisées dans les transformateurs de puissanc

III.1 Introduction 27

III.2 Contexte et limites des huiles isolantes traditionnelles..... 27

III.3 Exigences techniques et normatives des nouveaux fluides..... 28

III.4 Esters naturels : vers une solution écologique 29

III.5 Esters synthétiques : performance et durabilité..... 32

III.6 Huiles de silicone : robustesse et fiabilité en conditions extrêmes 34

III.7 Autres fluides émergents : nano-huiles et fluides composites..... 36

III.8 Comparaison technico-économique des huiles disponibles 37

III.9 Perspectives de recherche et d'industrialisation..... 39

III.10 Conclusion..... 41

Conclusion générale 42

Références Bibliographiques..... 39

Figure(I.1) : Transformateur électrique 06
Figure(I.2) : schéma de principe de fonctionnement du transformateur..... 09
Figure(I.3) : Les éléments d'un transformateur 10
Figure(I.4) : Typologie locale des transformateurs..... 11

Liste des tableaux

Tableau 1 : Propriétés physico-chimiques du NYTRO BIO 300X comparées à d'autres liquides 32

Tableau 2 : Tableau comparatif des fluides isolants selon leurs propriétés techniques (viscosité, point de feu, biodégradabilité) et économiques (coût, durée de vie), facilitant le choix selon les priorités du projet 39

Introduction générale

Introduction générale

Dans un système électrique de plus en plus sollicité par la croissance démographique, l'industrialisation et l'intégration progressive des énergies renouvelables, la fiabilité des équipements de transport et de distribution devient une exigence incontournable.

Parmi ces équipements, le transformateur de puissance occupe une place centrale, il assure la conversion des niveaux de tension nécessaires à l'acheminement optimal de l'énergie sur de longues distances, tout en garantissant la sécurité et la stabilité du réseau.

Le bon fonctionnement de ces transformateurs dépend non seulement de la qualité de leur conception électromécanique, mais également de l'efficacité de leurs systèmes d'isolation et de refroidissement.

À ce titre, les huiles isolantes constituent un élément stratégique, tant pour leurs propriétés diélectriques que pour leur capacité à dissiper la chaleur.

Traditionnellement, les huiles minérales issues du raffinage pétrolier ont été massivement utilisées dans les transformateurs de puissance, en raison de leur disponibilité et de leur coût réduit.

Cependant, les limites environnementales, sécuritaires et thermiques de ces fluides ont progressivement conduit les chercheurs et industriels à explorer des alternatives plus performantes et écologiquement viables, telles que les esters naturels, les esters synthétiques, les fluides silicones, voire des formulations avancées comme les nano-huiles.

Cette dynamique est renforcée par l'évolution des normes internationales et les exigences croissantes en matière de développement durable.

Dans ce contexte, le présent mémoire propose un état de l'art structuré et critique sur les huiles utilisées dans les transformateurs de puissance.

Il s'appuie notamment sur des travaux de recherche récents menés dans plusieurs établissements universitaires algériens et étrangers, afin de dresser un panorama complet des différents types de fluides, de leurs caractéristiques physico-chimiques et électriques, des phénomènes de vieillissement qui les affectent, ainsi que des critères normatifs guidant leur sélection.

Cette synthèse vise à éclairer les choix technologiques actuels et futurs dans le domaine de l'isolation liquide des transformateurs, tout en tenant compte des spécificités climatiques et industrielles propres au contexte algérien.

Le mémoire est divisé en trois chapitres distincts, suivis d'une conclusion générale.

Chapitre 1 : Les Transformateurs De Puissance

Chapitre 2 : Les huiles utilisées dans les transformateurs

Chapitre 3 : Les nouvelles huiles utilisées dans les transformateurs de puissance.

Chapitre I :

Les Transformateurs De Puissance

1.1 Introduction

Le transformateur de puissance constitue une pièce maîtresse dans l'infrastructure des réseaux électriques modernes.

Il agit comme un pont indispensable entre les différents niveaux de tension, assurant à la fois la sécurité, l'efficacité énergétique et la fiabilité du système de transport et de distribution de l'électricité.

Dans un pays vaste comme l'Algérie, où les distances entre les centres de production d'énergie (souvent situés dans le nord ou en zones isolées) et les zones de consommation sont importantes, le rôle des transformateurs devient encore plus fondamental.

Ils permettent d'élever la tension à la sortie des centrales afin de réduire les pertes par effet Joule durant le transport, puis de l'abaisser pour une distribution conforme aux besoins des usagers finaux.

Ce dispositif statique, dont la robustesse et la précision sont des éléments-clés, intervient donc à toutes les étapes du parcours de l'énergie.

Ce chapitre vise à offrir une analyse approfondie et documentée de l'évolution, du fonctionnement, des composants et des contraintes d'exploitation des transformateurs de puissance, avec un accent particulier sur leur déploiement en Algérie, en s'appuyant notamment sur des recherches menées dans des établissements universitaires nationaux tels que l'USTHB, l'Université de Boumerdès, de Batna ou encore de Sétif.

1.2 Historique et évolution des transformateurs

Depuis la découverte des principes de l'induction électromagnétique au XIXe siècle, les transformateurs de puissance ont connu une transformation significative, tant sur le plan technologique que fonctionnel.

Au départ, ces équipements utilisaient des noyaux en fer massif, avec des enroulements isolés sommairement, ce qui les rendait peu efficaces et sujets à des pertes énergétiques importantes.

Toutefois, avec l'avènement de la révolution industrielle et l'expansion rapide des besoins en électricité, les ingénieurs ont progressivement amélioré la conception des transformateurs en introduisant des noyaux feuilletés, des isolants plus performants, et des systèmes de refroidissement plus efficaces.

En Algérie, l'histoire des transformateurs est intimement liée au processus d'électrification entamé sous l'époque coloniale, qui s'est ensuite accéléré après l'indépendance grâce aux plans de développement mis en place par l'État pour moderniser le secteur énergétique.

À partir des années 1970, avec la création de la société Sonelgaz, une politique d'équipement

massif en transformateurs de puissance a été lancée, accompagnée de programmes de formation d'ingénieurs spécialisés dans les écoles nationales.

Aujourd'hui, les transformateurs **Figure I.1** représentent un transformateur de puissance triphasé utilisé dans les réseaux de distribution d'électricité. Cet appareil est immergé dans une huile isolante qui joue un double rôle : refroidir les composants internes et assurer l'isolation électrique. On distingue plusieurs éléments importants tels que les isolateurs en céramique situés en haut, qui servent à isoler électriquement les bornes sous tension.

Les radiateurs latéraux (ou ailettes) permettent de dissiper la chaleur générée pendant le fonctionnement. À l'arrière, on observe un conservateur d'huile, conçu pour compenser les variations de volume de l'huile en fonction de la température.

Ce type de transformateur est essentiel pour garantir une transmission efficace et sécurisée de l'énergie électrique sur de longues distances. Des technologies intelligentes, capables de détecter et d'anticiper les pannes, de réguler la température en temps réel et de transmettre des données de performance à distance, ce qui les rend incontournables dans les réseaux électriques du XXIe siècle.

La numérisation des réseaux et l'intégration des énergies renouvelables dans le mix énergétique national imposent désormais des exigences nouvelles en matière de flexibilité, de rendement et de résilience, poussant les chercheurs et ingénieurs algériens à concevoir des prototypes innovants, plus compacts, plus durables et mieux adaptés aux conditions climatiques locales, notamment les fortes températures estivales et les tempêtes de sable dans les régions sahariennes [1].



Figure(I.1) : Transformateur électrique [2].

1.3 Définition, fonction et importance

Un transformateur de puissance est défini comme un appareil électromagnétique statique permettant de transférer de l'énergie électrique entre deux circuits à travers un couplage magnétique, tout en modifiant le niveau de tension.

Cette capacité à élever ou abaisser la tension électrique constitue la fonction principale de l'appareil, qui intervient dans les différentes étapes du transport et de la distribution de l'électricité.

En réduisant les pertes énergétiques dues à la résistance des conducteurs, le transformateur permet un transport à haute tension sur de longues distances, ce qui est crucial pour un pays comme l'Algérie, dont le réseau électrique couvre à la fois des zones urbaines très peuplées et des régions isolées dans le sud saharien.

De plus, dans un contexte où la demande énergétique augmente continuellement, que ce soit pour accompagner la croissance démographique, le développement industriel ou l'extension du réseau d'électrification rurale, le transformateur est un outil stratégique.

Il assure une alimentation stable, sécurisée et adaptée aux besoins spécifiques de chaque catégorie d'utilisateurs. Sa robustesse, sa fiabilité et sa longévité influencent directement la qualité de service offerte par les gestionnaires de réseau, et toute défaillance à son niveau peut entraîner des interruptions de service majeures, voire des incidents industriels ou domestiques graves.

Par conséquent, sa conception, son choix technologique, sa maintenance et son exploitation doivent être rigoureusement étudiés.

En Algérie, les enjeux liés à l'intégration croissante des énergies renouvelables, comme le solaire photovoltaïque et l'éolien, nécessitent également une adaptation continue des transformateurs aux nouvelles conditions de fonctionnement, notamment en termes de variabilité des charges et de stabilisation de la fréquence du réseau [3].

1.4 Principes physiques de fonctionnement

Le fonctionnement du transformateur repose essentiellement sur le principe de l'induction électromagnétique, mis en évidence pour la première fois par Michael Faraday.

Ce principe stipule qu'une variation de flux magnétique à travers un enroulement entraîne l'induction d'une force électromotrice dans un second enroulement placé à proximité **FigureI.2** le principe de fonctionnement d'un transformateur monophasé à travers un schéma simplifié.

Le transformateur se compose de deux enroulements : le primaire et le secondaire, enroulés autour d'un noyau magnétique constitué de tôles feuilletées. Lorsqu'un courant

alternatif traverse l'enroulement primaire (N_1 spires), il crée un champ magnétique variable dans le noyau. Ce champ induit une tension dans l'enroulement secondaire (N_2 spires), selon la loi de transformation U1 / U2 = N1 / N2 .

Ainsi, le transformateur permet d'adapter les niveaux de tension entre la source d'alimentation et le point d'utilisation, sans contact électrique direct entre les deux circuits, tout en assurant un transfert d'énergie sûr et efficace.

Dans le cas d'un transformateur, un courant alternatif traverse l'enroulement primaire, générant un flux magnétique variable dans le noyau ferromagnétique.

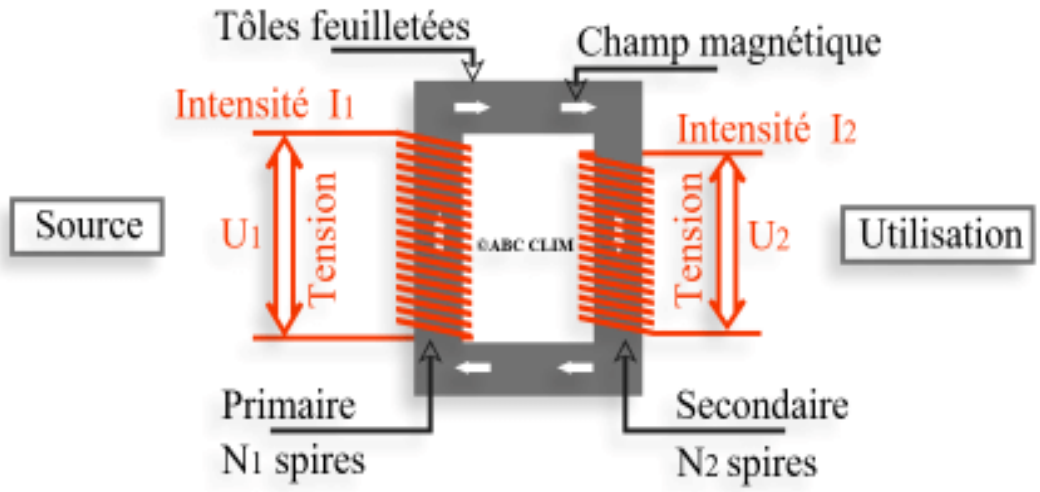
Ce flux induit à son tour une tension dans l'enroulement secondaire, le rapport des tensions entre les deux enroulements dépend directement du rapport du nombre de spires. Ainsi, on peut obtenir une tension plus élevée ou plus basse selon le besoin.

Toutefois, dans la réalité, ce transfert n'est pas parfait, et plusieurs pertes viennent altérer le rendement: pertes magnétiques dans le noyau (hystérésis et courants de Foucault), pertes ohmiques dans les enroulements, pertes diélectriques et pertes mécaniques dues aux vibrations. Pour améliorer le rendement global, les concepteurs utilisent des matériaux à faibles pertes et optimisent la géométrie des bobinages.

En Algérie, les transformateurs sont généralement conçus pour fonctionner à une fréquence de 50 Hz, avec des tensions nominales variant entre 30 kV et 400 kV selon l'usage.

Des efforts de recherche sont actuellement menés, notamment dans les laboratoires des universités de Batna et de Boumerdès, pour améliorer les performances des matériaux magnétiques et les techniques de refroidissement, en tenant compte des spécificités climatiques locales.

Par ailleurs, des études sont également en cours pour développer des transformateurs plus légers, intégrant des nanomatériaux ou des alliages innovants, susceptibles de réduire les pertes et de prolonger la durée de vie opérationnelle des équipements [4].



Figure(I.2) : Le fonctionnement du transformateur [5].

1.5 Composants principaux d'un transformateur de puissance

Un transformateur de puissance **Figure (I.3)** est constitué de plusieurs éléments fondamentaux, chacun jouant un rôle crucial dans le processus de transformation de l'énergie électrique.

Le noyau magnétique, généralement constitué de tôles en acier au silicium empilées et isolées, est conçu pour canaliser le flux magnétique tout en minimisant les pertes par courants de Foucault et par hystérésis.

Il supporte les enroulements primaire et secondaire, composés de conducteurs en cuivre ou en aluminium isolés, dont le nombre de spires est déterminé selon les niveaux de tension requis.

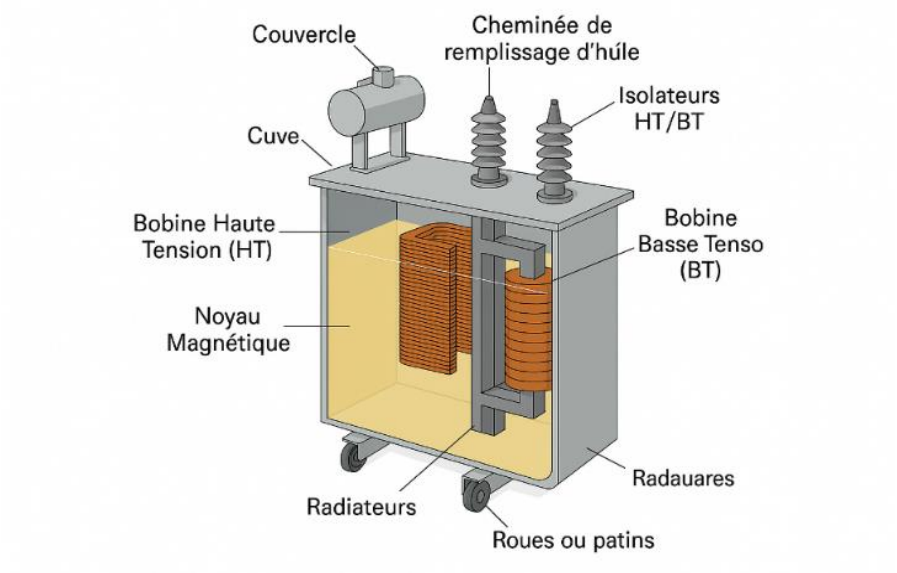
Le système d'isolation, souvent à base de papier Kraft imbibé d'huile minérale ou végétale, assure l'isolement électrique entre les différentes parties actives du transformateur.

Cette huile joue également un rôle essentiel dans le refroidissement en absorbant la chaleur produite par les pertes internes.

D'autres composants incluent le conservateur d'huile, le radiateur, les thermomètres, les soupapes de sécurité, le déshydrateur d'air, ainsi que des dispositifs de régulation tels que le changeur de prises en charge (OLTC ou tap-changer) permettant d'ajuster la tension secondaire.

En Algérie, plusieurs études issues d'universités comme celle de Sétif [6] ont montré que le choix des matériaux pour chaque composant influe significativement sur les performances, la longévité et la fiabilité du transformateur, surtout dans les zones à climat aride.

Ces recherches ont aussi mis en évidence l'importance d'adapter la conception des transformateurs aux conditions environnementales locales, notamment en matière de refroidissement et de protection contre les surtensions.



Figure(I.3) : Les éléments d'un transformateur [7]

1.6 Types et classifications des transformateurs

Les transformateurs de puissance peuvent être classifiés selon plusieurs critères : leur niveau de tension, leur fonction dans le réseau, leur mode de refroidissement ou encore leur technologie de régulation.

Selon leur utilisation, on distingue les transformateurs élévateurs, qui augmentent la tension en sortie de centrale, et les transformateurs abaisseurs, utilisés en fin de ligne pour adapter la tension aux besoins des usagers.

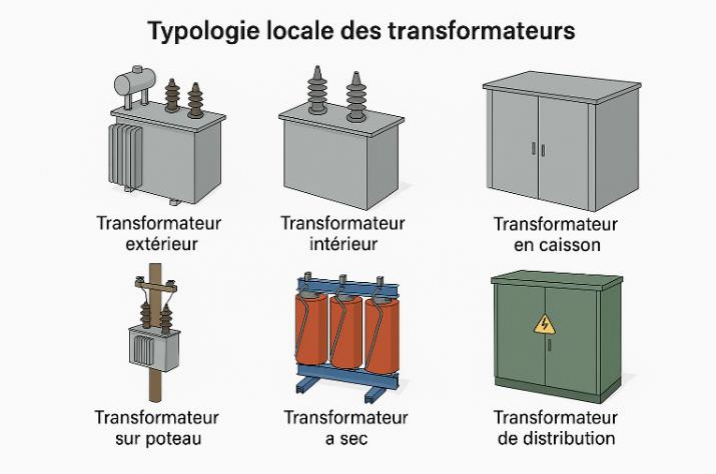
Ils peuvent également être monophasiques ou triphasés, selon la configuration du réseau dans lequel ils s'intègrent.

En fonction du système de refroidissement, on trouve les transformateurs à refroidissement naturel à l'huile (ONAN : OIL NATURAL AIR NATURAL), à circulation d'huile forcée (OFAF: OIL FORCE AIR FORCE).

Ou encore ceux utilisant des systèmes de refroidissement à air ou à eau, du point de vue de la régulation, les transformateurs peuvent être à prises fixes ou à prises réglables en charge.

En Algérie, les transformateurs les plus répandus dans les postes de haute tension sont de type triphasé ONAN ou OFAF, d'une puissance variant entre 40 MVA et 250 MVA.

Des recherches menées à l'université de Batna [8] ont proposé une typologie locale des transformateurs **Figure (I.4)**.



Figure(I.4) : Typologie locale des transformateurs [9]

De selon leur performance thermique et leur comportement sous surcharge, ce qui pourrait servir de base à une standardisation nationale adaptée aux réalités du réseau électrique algérien, notamment dans le sud où les températures ambiantes extrêmes affectent le rendement et accélèrent le vieillissement de l'isolant.

1.7 Méthodes de refroidissement

Le refroidissement est un facteur déterminant dans la performance et la durabilité des transformateurs de puissance.

En effet, l'énergie perdue sous forme de chaleur lors du fonctionnement peut entraîner une dégradation accélérée des isolants, une réduction de la durée de vie de l'équipement, voire des défaillances graves. Les transformateurs utilisent plusieurs techniques de refroidissement : le refroidissement à huile naturelle (ON), à huile forcée (OF), ou à air et eau selon les besoins.

Dans le cas des grands transformateurs de puissance, le refroidissement par huile avec radiateurs extérieurs est souvent combiné à des ventilateurs ou des pompes pour assurer une dissipation thermique efficace.

En Algérie, où les températures estivales peuvent dépasser les 45 °C, le choix du système de refroidissement est critique.

Des expérimentations conduites à l'Université de Boumerdès [10] ont démontré l'efficacité d'huiles végétales comme alternative aux huiles minérales, notamment en matière de stabilité thermique et de biodégradabilité.

Ces huiles, combinées à des systèmes de refroidissement optimisés, permettent de maintenir les températures internes dans des plages acceptables, même en cas de surcharge momentanée.

Par ailleurs, des recherches récentes s'intéressent à l'utilisation de matériaux à changement de phase (PCM) intégrés dans les parois du transformateur pour une meilleure gestion thermique passive.

1.8 Problèmes fréquents et pannes observées

Les transformateurs de puissance, bien que conçus pour une grande robustesse, sont exposés à divers types de dysfonctionnements liés à leur environnement, à leur conception, ou à leur mode d'exploitation.

Parmi les pannes les plus fréquentes, on note les défauts d'isolation, les courts-circuits internes, les échauffements anormaux, les fuites d'huile, les bruits anormaux liés aux vibrations magnétiques, ou encore les dysfonctionnements des changeurs de prises.

Ces anomalies peuvent être provoquées par des surtensions, des transitoires d'origine atmosphérique, ou encore par un vieillissement accéléré des composants.

En Algérie, de nombreuses pannes ont été enregistrées dans les régions du sud, où les conditions climatiques extrêmes contribuent à l'accélération des dégradations.

Des études réalisées à l'université de Tlemcen [11] ont montré l'importance d'une maintenance préventive rigoureuse, notamment par le biais d'analyses périodiques de l'huile isolante, de mesures thermographiques et d'essais diélectriques.

L'introduction de capteurs intelligents permettrait à l'avenir d'assurer une surveillance en temps réel de l'état du transformateur, et de prévenir les défaillances avant qu'elles ne surviennent.

1.9 Maintenance et prolongation de la durée de vie

La maintenance constitue un pilier essentiel pour garantir le bon fonctionnement et la longévité des transformateurs de puissance, elle peut être préventive, conditionnelle ou corrective.

La maintenance préventive consiste à effectuer des contrôles réguliers et des remplacements systématiques d'éléments sensibles (joints, huile, composants électriques), tandis que la maintenance conditionnelle repose sur la surveillance des paramètres en temps réel (température, taux d'humidité, gaz dissous dans l'huile) pour intervenir uniquement lorsque cela est nécessaire.

Enfin, la maintenance corrective intervient après la détection ou la survenue d'un défaut. En Algérie, la mise en place d'une stratégie de maintenance conditionnelle s'avère particulièrement pertinente compte tenu de la diversité climatique et géographique du pays.

Des travaux menés à l'USTHB [12] ont proposé l'implémentation de modèles prédictifs basés sur l'intelligence artificielle et les réseaux de neurones pour anticiper les pannes à partir des données d'exploitation collectées sur le terrain.

En intégrant ces outils dans les systèmes de gestion de maintenance assistée par ordinateur (GMAO), il devient possible d'optimiser les interventions, de réduire les arrêts non planifiés et d'améliorer la fiabilité globale du réseau.

1.10 Conclusion

Les transformateurs de puissance occupent une place centrale dans le système électrique, assurant la conversion des niveaux de tension, la stabilité du réseau, et la sécurité de l'alimentation électrique.

Leur conception, leur exploitation et leur maintenance doivent répondre à des critères rigoureux, d'autant plus dans un contexte national marqué par des contraintes climatiques, économiques et technologiques spécifiques.

L'étude approfondie des transformateurs permet non seulement de mieux comprendre leurs principes de fonctionnement et leurs composants, mais aussi de cerner les enjeux liés à leur modernisation dans une optique de durabilité et d'efficacité énergétique.

En s'appuyant sur des travaux universitaires algériens récents, ce chapitre a mis en lumière les efforts de recherche locaux visant à adapter ces équipements aux besoins du pays, notamment à travers l'innovation en matière de matériaux, de systèmes de refroidissement, de surveillance et de maintenance.

À l'heure où l'Algérie investit massivement dans les énergies renouvelables et dans l'extension de son réseau électrique, il devient crucial de continuer à renforcer les capacités nationales dans la conception, la fabrication et la gestion des transformateurs de puissance.

Chapitre II :

Les huiles utilisées dans les transformateurs

II.1 Introduction

Dans le contexte des systèmes électriques modernes, les transformateurs de puissance jouent un rôle indispensable dans l'acheminement de l'énergie sur de longues distances et la distribution à différents niveaux de tension.

garantissant un rendement élevé et une fiabilité opérationnelle.

Cependant, leur bon fonctionnement repose sur une synergie complexe entre différents composants internes, parmi lesquels l'huile isolante constitue un élément fondamental.

L'huile utilisée dans les transformateurs remplit plusieurs fonctions essentielles. Elle sert tout d'abord de milieu diélectrique, c'est-à-dire qu'elle assure l'isolation électrique entre les composants internes sous tension tels que les enroulements et le noyau magnétique.

Ensuite, elle joue un rôle de refroidissement, en absorbant et en transférant la chaleur produite par les pertes thermiques, ce qui permet de limiter l'échauffement des parties actives.

Enfin, elle participe à la protection du système contre les phénomènes de décharge partielle, l'humidité, et les effets de l'oxydation. Ainsi, les exigences posées aux huiles diélectriques sont nombreuses et strictes : elles doivent présenter une stabilité thermique élevée, une faible viscosité, une haute rigidité diélectrique, une faible teneur en humidité, une résistance à l'oxydation, ainsi qu'une bonne compatibilité avec les matériaux isolants solides tels que le papier ou le presspahn.

Traditionnellement, les huiles minérales issues du raffinage du pétrole ont dominé le marché en raison de leur coût relativement bas et de leur disponibilité à grande échelle. En Algérie, la majorité des transformateurs exploités par les sociétés nationales, telles que SONELGAZ ou GRTE, utilisent encore ce type de fluide [1].

Cependant, ces huiles présentent des limitations importantes, notamment leur inflammabilité, leur faible biodégradabilité et leur sensibilité à la dégradation thermique et chimique, autant de facteurs qui soulèvent des préoccupations croissantes en matière de sécurité, d'environnement et de durabilité.

Face à ces contraintes, l'industrie électrique explore de nouvelles alternatives, à savoir les huiles végétales (ou esters naturels), les esters synthétiques, les fluides silicones et d'autres types de liquides isolants plus écologiques.

Ces nouveaux fluides promettent de meilleures performances environnementales, une sécurité accrue en cas d'incendie, et une meilleure durabilité dans le temps. Plusieurs études universitaires menées dans des établissements algériens tels que l'USTHB, l'Université de Boumerdès ou encore l'Université de Batna, ont permis de caractériser ces fluides émergents en laboratoire, et d'évaluer leur potentiel de remplacement des huiles classiques [2][3].

Le présent chapitre vise donc à proposer un état de l'art détaillé et critique sur les huiles utilisées dans les transformateurs de puissance, en distinguant les différents types d'huiles (minérales, naturelles, synthétiques), en étudiant leurs caractéristiques physico-chimiques et électriques, et en mettant en lumière les apports des recherches académiques algériennes dans ce domaine en pleine mutation.

II.2 Rôles et exigences des huiles isolantes dans les transformateurs

Les huiles isolantes occupent une position stratégique dans le fonctionnement optimal et durable des transformateurs de puissance.

Leur rôle ne se limite pas à une seule fonction, mais s'étend à un ensemble de propriétés physico-chimiques et électriques qui assurent à la fois la performance, la longévité et la sécurité de l'équipement.

En effet, ces fluides diélectriques sont conçus pour assurer simultanément l'isolation électrique, l'évacuation thermique, ainsi que la protection contre les agressions chimiques internes et externes.

Sur le plan électrique, l'huile doit posséder une rigidité diélectrique suffisamment élevée pour prévenir la formation d'arcs électriques entre les parties sous tension.

Cette propriété dépend directement de la pureté du fluide, de sa teneur en humidité, de la présence de gaz dissous et de particules en suspension.

Toute dégradation de cette qualité isolante peut entraîner des décharges partielles, voire un claquage diélectrique, mettant en péril la sécurité de l'équipement et du réseau.

D'un point de vue thermique, l'huile agit comme agent de transfert de chaleur, en circulant autour des enroulements et du noyau, absorbant ainsi les pertes thermiques générées par l'effet Joule et les pertes magnétiques.

Cette dissipation thermique est cruciale pour maintenir les températures dans des plages opérationnelles sûres, prévenir l'accélération du vieillissement du papier isolant, et ainsi prolonger la durée de vie du transformateur.

D'un point de vue chimique, l'huile doit faire preuve d'une grande stabilité à l'oxydation, car elle est soumise à des conditions de fonctionnement sévères, souvent à haute température et en présence de métaux catalyseurs.

Une huile instable peut générer des boues, des acides et des composés corrosifs qui dégradent les matériaux internes.

Ainsi, les exigences imposées à une huile isolante sont nombreuses : faible viscosité pour faciliter la circulation thermique, faible teneur en soufre corrosif, point d'éclair élevé pour

réduire les risques d'incendie, et enfin, un bon comportement à long terme en présence d'humidité et d'oxygène.

Plusieurs travaux universitaires algériens ont souligné l'importance de ces exigences. Par exemple, dans une étude menée à l'Université de Boumerdès, il a été démontré que la variation du pouvoir isolant des huiles en service est fortement corrélée à la contamination par l'eau et les gaz dissous [4].

À l'USTHB, des expériences de vieillissement accéléré ont permis de quantifier les effets de l'oxydation sur les propriétés diélectriques, notamment la baisse significative de la tension de claquage et l'augmentation de la conductivité [5].

En somme, la performance d'une huile isolante est tributaire de l'ensemble de ses propriétés physiques, chimiques et électriques, lesquelles doivent répondre à des normes strictes telles que IEC 60296. Cette rigueur est essentielle pour garantir la fiabilité des transformateurs dans des conditions d'exploitation toujours plus exigeantes.

II.3 Classification des huiles isolantes

La diversité des exigences techniques imposées aux transformateurs de puissance a conduit au développement de plusieurs types d'huiles isolantes, classées selon leur origine, leur composition chimique, leur comportement thermique et leur impact environnemental.

Cette classification est indispensable pour guider le choix du fluide en fonction du contexte d'utilisation, de la puissance de l'équipement, des contraintes climatiques et des politiques environnementales en vigueur.

Traditionnellement, les huiles isolantes sont divisées en deux grandes catégories : les huiles d'origine minérale et les huiles synthétiques ou naturelles alternatives.

Les huiles minérales, issues du raffinage du pétrole brut, représentent la majorité des huiles utilisées dans le parc mondial de transformateurs.

Elles sont généralement composées de paraffines, de naphténiques et d'aromatiques, avec des propriétés bien connues en matière de rigidité diélectrique, de stabilité thermique et de coût maîtrisé.

Toutefois, leur inflammabilité, leur faible biodégradabilité et leur propension à générer des sous-produits nocifs en fin de vie soulèvent des préoccupations croissantes, notamment dans les installations urbaines ou écologiquement sensibles.

En réponse à ces limitations, l'industrie a vu émerger une nouvelle génération d'huiles isolantes dites non minérales, que l'on peut subdiviser comme suit le détail sur ces huiles sera donné dans le chapitre III:

1. **Les esters naturels** : extraits d'huiles végétales comme le colza ou le soja, ces fluides offrent une excellente biodégradabilité, une inflammabilité réduite (point d'éclair supérieur à 300 °C), ainsi qu'une bonne compatibilité avec les isolants solides. Ils conviennent particulièrement aux transformateurs installés en intérieur ou dans les zones protégées. Leur principal inconvénient réside dans leur sensibilité à l'hydrolyse et leur viscosité relativement élevée.
2. **Les esters synthétiques** : conçus chimiquement pour reproduire les avantages des esters naturels tout en améliorant leur stabilité hydrolytique et thermique, ces fluides représentent un compromis intéressant entre performance et sécurité. Ils sont toutefois plus coûteux et leur fabrication requiert une technologie de pointe peu disponible localement.
3. **Les fluides silicones et hydrocarbures synthétiques** : bien que performants du point de vue thermique et électrique, leur utilisation reste limitée à des applications spécifiques, souvent en raison de leur coût élevé ou de leur comportement environnemental discutable.

Plusieurs recherches réalisées dans les universités algériennes ont permis d'approfondir cette classification.

Une étude menée à l'Université de Batna a comparé les performances d'un échantillon d'huile minérale locale avec celles d'un ester naturel importé, en mettant en évidence les différences notables en termes de rigidité diélectrique et de stabilité à l'oxydation [6].

À l'USTHB, des travaux ont porté sur la mise en place de protocoles de vieillissement accéléré pour caractériser la tenue dans le temps des huiles de différentes origines, avec un accent particulier sur leur capacité à protéger les isolants solides [7].

Cette classification ne se limite pas à une catégorisation théorique, mais s'accompagne également d'une réflexion sur les normes internationales (telles que IEC 60296 pour les huiles minérales et IEC 62770 pour les esters naturels) ainsi que sur les possibilités d'adaptation aux contextes nationaux.

En effet, en Algérie, les conditions climatiques extrêmes, les spécificités du réseau électrique, et les impératifs environnementaux exigent une sélection rigoureuse du fluide isolant le plus approprié.

II.4 Propriétés physico-chimiques et électriques des huiles isolantes

Les huiles isolantes destinées aux transformateurs de puissance doivent satisfaire à un ensemble de propriétés physico-chimiques et électriques rigoureusement définies, car ces paramètres conditionnent leur aptitude à jouer leur double rôle de fluide isolant et de refroidissement.

Ces caractéristiques ne sont pas statiques : elles évoluent avec le temps, en fonction des conditions de fonctionnement, du vieillissement thermique, de la présence d'humidité, de l'oxydation et des interactions avec les matériaux isolants solides.

Une compréhension approfondie de ces propriétés est donc indispensable pour évaluer la qualité d'une huile, diagnostiquer l'état du transformateur et anticiper les interventions de maintenance.

Sur le plan physico-chimique, plusieurs paramètres sont déterminants :

- **La viscosité** : elle influe directement sur la circulation de l'huile et l'efficacité de l'échange thermique. Une viscosité trop élevée peut réduire la capacité de refroidissement et entraîner une surchauffe des enroulements. À l'inverse, une viscosité trop faible peut indiquer une dégradation du fluide. Des valeurs typiques acceptables pour les huiles minérales se situent entre 8 et 12 mm^2/s à 40°C [8].
- **La densité** : elle doit rester stable pour garantir une séparation correcte entre l'huile et l'eau ou les impuretés solides. En général, les huiles minérales ont une densité proche de 0,88 g/cm^3 à 20°C.
- **L'indice d'acide** : indicateur de la formation de produits d'oxydation acides, il augmente avec le vieillissement et la dégradation de l'huile. Un indice d'acide supérieur à 0,2 mg KOH/g est souvent le signe d'un fluide en fin de vie [9].
- **La teneur en humidité** : l'eau dissoute ou libre affecte fortement les performances diélectriques de l'huile et accélère le vieillissement du papier isolant. Elle doit être inférieure à 30 ppm dans les conditions normales d'exploitation.
- **La stabilité à l'oxydation** : essentielle pour garantir une longue durée de vie, notamment dans les huiles végétales qui y sont naturellement sensibles.
- **La tension de claquage** : La tension de claquage est la plus faible tension alternative (ou continue), à fréquence industrielle, appliquée entre deux électrodes immergées dans un échantillon d'huile isolante, qui provoque le passage brusque d'un courant électrique (claquage diélectrique) à travers le fluide.

Elle est exprimée en kilovolts (kV)

Référence normative : IEC 60156.

- **Le point d'éclair :** Le point d'éclair est la température la plus basse à laquelle un liquide émet suffisamment de vapeurs combustibles pour former avec l'air un mélange pouvant s'enflammer momentanément au contact d'une flamme.

Il s'agit d'un critère de sécurité incendie, exprimé en degrés Celsius (°C).

Référence normative : ISO 2719 / ASTM D93 (méthode de coupelle fermée).

- **Point d'écoulement :** Le point d'écoulement est la température minimale à laquelle une huile peut encore s'écouler librement sous des conditions normalisées de refroidissement. En dessous de cette température, l'huile devient trop visqueuse ou semi-solide, ce qui compromet sa circulation dans le transformateur.

Référence normative : ISO 3016.

Sur le plan électrique, les propriétés suivantes sont particulièrement critiques :

- **Rigidité diélectrique (tension de claquage)** : elle mesure la capacité de l'huile à résister à un champ électrique élevé sans subir de décharge. Une huile neuve présente généralement une rigidité supérieure à 60 kV, mais cette valeur peut chuter drastiquement en présence d'humidité ou de contaminants [10].
- **Facteur de dissipation diélectrique (tan δ)** : reflète les pertes diélectriques dans l'huile. Un tan δ élevé indique une dégradation de la qualité isolante. Il est recommandé que cette valeur reste inférieure à 0,005 à 90°C.
- **Conductivité électrique** : plus cette conductivité est faible, plus le fluide est isolant. Une augmentation de la conductivité est souvent associée à un vieillissement avancé.

Des études menées dans plusieurs laboratoires universitaires algériens ont permis de caractériser ces propriétés à travers des essais normalisés.

Par exemple, à l'Université de Boumerdès, des essais de tension de claquage ont été effectués sur des échantillons d'huiles usagées prélevées sur le réseau national, mettant en évidence une dégradation significative après plusieurs années d'utilisation [11].

À l'USTHB, l'utilisation de techniques de chromatographie gazeuse pour l'analyse des gaz dissous a permis de détecter précocement les signes de vieillissement et d'altération de la rigidité diélectrique [12].

L'ensemble de ces paramètres fait l'objet de normes techniques internationales, comme l'**IEC 60296** pour les huiles minérales neuves ou l'**ASTM D6871** pour les esters naturels. Le respect de ces standards est essentiel pour garantir la qualité, la sécurité et la durabilité du fluide et, par extension, du transformateur dans son ensemble.

II.5 Mécanismes de vieillissement des huiles isolantes

Le vieillissement des huiles isolantes est un processus complexe, influencé par plusieurs facteurs thermiques, électriques, chimiques et environnementaux, qui dégradent progressivement leurs propriétés initiales.

Ce phénomène affecte non seulement les performances électriques du fluide, mais il compromet également l'intégrité des isolants solides et, par conséquent, la durée de vie du transformateur dans son ensemble.

Comprendre les mécanismes de vieillissement est donc fondamental pour établir des stratégies de maintenance conditionnelle et prévenir les défaillances prématurées des équipements.

L'un des principaux mécanismes responsables du vieillissement est **l'oxydation**. Sous l'effet de la température et en présence d'oxygène dissous, les constituants organiques de l'huile subissent des réactions d'oxydation qui génèrent des composés polaires tels que les acides, les aldéhydes et les peroxydes.

Ces sous-produits provoquent une augmentation de l'indice d'acide, la formation de boues insolubles et un accroissement de la viscosité, réduisant ainsi la capacité de refroidissement de l'huile et son aptitude à jouer son rôle isolant. Dans les huiles minérales, ce processus est catalysé par la présence de métaux tels que le cuivre et le fer, ce qui accélère la dégradation même à des températures modérées.

Un autre facteur déterminant est la présence d'humidité, qu'elle soit introduite par perméabilité à l'air, par condensation ou par dégazage du papier isolant. L'eau agit comme un catalyseur pour les réactions chimiques et diminue drastiquement la rigidité diélectrique du fluide.

De plus, elle favorise l'hydrolyse des esters dans les huiles végétales, ce qui entraîne une perte de stabilité chimique et une augmentation du taux d'acidité.

L'effet du stress électrique constitue également une source importante de vieillissement. Les décharges partielles et les arcs électriques provoquent la décomposition moléculaire de l'huile, générant des gaz comme l'hydrogène, le méthane ou l'éthylène.

L'analyse de ces gaz dissous est d'ailleurs un outil de diagnostic largement utilisé pour évaluer l'état de santé de l'huile.

Des études algériennes ont démontré l'importance de cette méthode : à l'Université de Batna, une corrélation a été établie entre la concentration de certains gaz et le type de défaut présent dans le transformateur (surchauffe, décharge partielle, claquage) [13].

Le vieillissement thermique, souvent en synergie avec les autres mécanismes, résulte d'une exposition prolongée à des températures élevées, notamment autour des points chauds des enroulements.

Ce phénomène accélère la polymérisation et la craquelure des molécules d'huile, affectant à la fois la conductivité et la viscosité du fluide.

Le papier imprégné d'huile, servant d'isolant solide, subit également une dégradation par coupure des chaînes de cellulose, libérant des sous-produits comme le furfural, dont la concentration est un indicateur fiable du vieillissement du système isolant.

Des travaux menés à l'USTHB et à l'Université de Boumerdès ont permis d'observer expérimentalement ces mécanismes.

Par exemple, des tests de vieillissement accéléré à 120°C sur des huiles minérales ont montré une perte de 40 % de la rigidité diélectrique après 500 heures, associée à une forte élévation du tan δ et de l'indice d'acide [14].

D'autres recherches ont mis en évidence la supériorité des esters naturels sur les huiles minérales en termes de résistance à l'oxydation et de comportement sous stress thermique [15].

isolé, mais bien comme un processus multi-paramétrique dans lequel interagissent les conditions d'exploitation, la nature du fluide, les matériaux en contact et l'environnement extérieur.

Une surveillance continue, associée à une analyse régulière des propriétés physico-chimiques et à des diagnostics par chromatographie des gaz dissous ou mesure du furfural, est indispensable pour prolonger la durée de vie du transformateur.

II.6 Normes et critères de sélection des huiles isolantes

Le choix d'une huile isolante pour transformateurs de puissance ne peut se faire sans une référence précise aux normes internationales qui encadrent la qualité, la sécurité et les performances de ces fluides.

exigences d'exploitation, mais aussi de garantir leur compatibilité avec les équipements existants et leur impact environnemental maîtrisé.

économiques et écologiques, définis dans les standards élaborés par des organismes tels que la Commission Électrotechnique Internationale (CEI/IEC), l'American Society for Testing and Materials (ASTM) ou encore l'IEEE.

Parmi les normes les plus importantes, on peut citer :

- **IEC 60296** : elle spécifie les exigences relatives aux huiles minérales neuves destinées aux transformateurs électriques. Elle fixe les limites pour des propriétés essentielles telles que la tension de claquage (au moins 30 kV), l'indice d'acide (inférieur à 0,01 mg KOH/g pour les huiles inhibées), la teneur en humidité, la viscosité, et le facteur de dissipation diélectrique (tan δ). [16]
- **IEC 62770** : cette norme s'applique aux esters naturels et définit les critères d'acceptation pour leur utilisation dans les équipements électriques. Elle prend en compte leur biodégradabilité, leur résistance à l'hydrolyse, leur inflammabilité et leur compatibilité avec les matériaux solides. [17]

- **ASTM D3487** : elle couvre les huiles isolantes minérales utilisées dans les transformateurs et contient des méthodes d'essai pour l'analyse de leur pureté, stabilité thermique et comportement diélectrique. [18]
- **IEEE C57.104** : cette norme est utilisée pour l'interprétation des gaz dissous dans les huiles, permettant de diagnostiquer les défauts internes par chromatographie. [19]

En Algérie, bien que la production locale d'huile isolante soit limitée, les opérateurs de transport et de distribution d'électricité (comme Sonelgaz ou GRTE) se réfèrent à ces normes internationales pour l'importation, le contrôle qualité et la maintenance des transformateurs.

Les critères de sélection sont donc directement alignés avec ces référentiels, mais tiennent aussi compte des conditions climatiques locales (hautes températures, tempêtes de sable, humidité variable), du coût économique, de la disponibilité du fluide et de sa facilité de recyclage.

Les critères techniques les plus couramment évalués lors du choix d'une huile incluent :

- **La stabilité thermique et oxydative**, garantissant la durabilité du fluide même en conditions extrêmes.
- **La compatibilité avec les matériaux isolants solides**, notamment le papier kraft et les vernis utilisés dans les enroulements.
- **Les performances diélectriques**, qui déterminent la capacité de l'huile à assurer l'isolation électrique.
- **La biodégradabilité** et **la toxicité**, surtout dans les zones protégées ou urbaines.

Des travaux algériens ont exploré l'adaptabilité de certaines huiles importées aux conditions locales. À titre d'exemple, une étude menée à l'Université de Boumerdès a testé trois types d'huiles (minérale, ester synthétique et ester naturel) sous des cycles thermiques simulés à 45 °C ambiant et 90 °C en charge, avec une attention particulière à la stabilité du tan δ et à la rigidité diélectrique [20].

Les résultats ont mis en évidence la supériorité des esters naturels en matière de tenue thermique, tout en soulignant leur sensibilité à l'humidité, nécessitant un système de déshydratation renforcé.

De même, à l'USTHB, des essais de compatibilité entre les huiles isolantes et différents types de papiers isolants ont été réalisés.

Les auteurs ont conclu qu'une bonne imprégnation et une faible interaction chimique entre le papier et l'huile étaient cruciales pour ralentir le vieillissement global du système isolant [21].

En somme, les normes internationales fournissent un cadre robuste pour la sélection des huiles isolantes, mais leur application doit être contextualisée selon les réalités opérationnelles du réseau national.

Un choix optimal ne peut résulter que d'un compromis entre performance technique, coût, sécurité et respect des contraintes environnementales locales.

II.7 Conclusion

Les huiles minérales, historiquement dominantes, continuent de jouer un rôle prépondérant grâce à leur bonne stabilité thermique, leur disponibilité à grande échelle et leur coût relativement faible.

Cependant, leurs limites environnementales (biodégradabilité faible, toxicité en cas de fuite) et leur sensibilité au vieillissement oxydatif ouvrent progressivement la voie à l'introduction d'huiles alternatives, notamment les esters naturels et synthétiques.

Ces nouvelles huiles offrent des performances thermiques et écologiques prometteuses, bien que leur adoption à large échelle reste freinée par leur coût initial, leur disponibilité locale limitée et la nécessité de mettre à jour certains procédés de maintenance.

En parallèle, les normes internationales telles que IEC 60296, ASTM D3487 ou IEEE C57.104 jouent un rôle fondamental dans la définition des critères de qualité, dans l'harmonisation des essais de caractérisation, et dans la sélection des huiles adaptées à chaque environnement opérationnel.

Ainsi, l'état de l'art présenté dans ce chapitre met en relief les dynamiques d'évolution dans le domaine des huiles isolantes.

Il ouvre la voie à une transition progressive vers des fluides plus durables, tout en soulignant la nécessité de poursuivre les recherches, notamment sur les conditions de vieillissement en climat chaud, la compatibilité à long terme avec les matériaux isolants locaux, et l'optimisation des procédés de régénération des huiles usées.

Chapitre III :

Les nouvelles huiles utilisées dans les transformateurs de puissanc

III.1 Introduction

Le développement durable et la transition énergétique imposent aujourd'hui une révision profonde des matériaux et fluides utilisés dans les équipements électriques à haute tension.
Au cœur de ces dispositifs, les transformateurs de puissance nécessitent un fluide qui assure à la fois l'isolation électrique et le refroidissement.
Historiquement, les huiles minérales issues du pétrole ont rempli cette fonction, mais leur profil environnemental et sécuritaire ne répond plus aux exigences actuelles.
L'évolution des normes internationales, conjuguée à une prise de conscience écologique accrue, a stimulé l'émergence de nouveaux types d'huiles, plus performants, plus sûrs et écologiquement responsables.

Ce chapitre propose une revue critique et technique des fluides alternatifs aux huiles minérales classiques, en mettant l'accent sur les recherches menées dans les universités algériennes et les perspectives qu'elles ouvrent pour les réseaux électriques du futur.

III.2 Contexte et limites des huiles isolantes traditionnelles

Depuis le début du XXe siècle, les huiles minérales issues du raffinage du pétrole sont utilisées comme fluides isolants et réfrigérants dans les transformateurs de puissance.
Leur adoption massive s'explique historiquement par leur accessibilité économique, leur bonne stabilité initiale et la relative facilitée de leur traitement industriel.
Cependant, les exigences croissantes en matière de sécurité, de fiabilité et de durabilité environnementale ont progressivement mis en évidence les limites structurelles de ces huiles conventionnelles.
En effet, ces fluides présentent une inflammabilité élevée, un faible pouvoir de biodégradation et une propension accrue à se détériorer sous l'effet combiné des contraintes thermiques, électriques et de l'humidité.
Une étude conduite à l'Université de Boumerdès a révélé que les huiles minérales non inhibées subissent rapidement des processus de vieillissement chimique, conduisant à la formation de boues, d'acides organiques et de composés polaires qui affectent la performance globale du transformateur [1].

Ce phénomène de vieillissement ne se limite pas à la dégradation du fluide, mais impacte directement les composants internes du transformateur, notamment l'isolation en papier cellulose, accélérant ainsi les risques de décharges partielles, de claquage diélectrique et

d'incendie. En parallèle, le caractère non biodégradable de ces huiles aggrave leur impact écologique en cas de fuites accidentelles ou de déversements, causant une contamination durable des sols, des eaux souterraines et des écosystèmes environnants.

Le coût humain et environnemental de tels incidents, combiné à une prise de conscience mondiale autour de la protection des ressources naturelles, a conduit à une remise en question radicale de leur usage dans les systèmes énergétiques modernes.

C'est dans ce contexte que se sont développées de nombreuses recherches, en particulier au sein des universités algériennes telles que l'USTHB, l'Université de Batna et celle de Boumerdès, en vue d'identifier des fluides alternatifs plus sûrs, plus stables et respectueux de l'environnement.

Ces nouvelles approches visent à concilier performances techniques équivalentes, voire supérieures, à celles des huiles minérales, tout en intégrant des critères de sécurité incendie, de réduction de l'empreinte carbone et de compatibilité avec les infrastructures existantes.

À travers cette dynamique de transition, il apparaît aujourd'hui essentiel de réévaluer l'usage des huiles minérales non seulement sous l'angle économique mais aussi à la lumière des risques environnementaux et réglementaires croissants auxquels les gestionnaires de réseaux électriques doivent faire face [2].

III.3 Exigences techniques et normatives des nouveaux fluides

Avec l'évolution des technologies de l'énergie et les exigences croissantes en matière de durabilité, les nouveaux fluides diélectriques utilisés dans les transformateurs de puissance doivent satisfaire à des critères

techniques et environnementaux de plus en plus rigoureux. Sur le plan électrique, l'un des objectifs fondamentaux est d'assurer une excellente rigidité diélectrique, c'est-à-dire la capacité du fluide à résister aux tensions électriques sans se décomposer.

Cette propriété est essentielle pour prévenir les courts-circuits internes et garantir un fonctionnement sûr et fiable de l'équipement. En parallèle, la faible tangente de perte diélectrique, traduisant la capacité du fluide à limiter les pertes énergétiques sous l'effet du champ électrique, est aussi une exigence critique.

De plus, les fluides doivent démontrer une stabilité chimique élevée, en particulier face à l'humidité, à l'oxydation et aux températures élevées, afin de prolonger la durée de vie du transformateur et réduire la fréquence des opérations de maintenance.

Du point de vue thermique, la capacité du fluide à transférer et à dissiper efficacement la chaleur générée au sein du transformateur revêt une importance capitale.

Une mauvaise évacuation de la chaleur pourrait entraîner une dégradation prématurée des matériaux isolants solides, voire une défaillance complète du transformateur.

C'est pourquoi les fluides doivent posséder une haute conductivité thermique et une faible viscosité, même à basse température, afin d'assurer une circulation fluide à travers les canaux internes du système, par ailleurs, la question environnementale joue désormais un rôle central dans le choix des fluides.

Il est impératif que ces derniers soient non toxiques, facilement biodégradables et dotés d'un point d'éclair élevé, afin de minimiser les risques d'incendie et les impacts en cas de fuite accidentelle [3].

Ces caractéristiques sont particulièrement pertinentes dans les zones urbaines ou sensibles sur le plan écologique, où les conséquences d'un déversement peuvent être dramatiques.

En réponse à ces impératifs, des normes internationales telles que l'IEC 60296, dédiée aux huiles minérales neuves non inhibées et inhibées pour transformateurs, et les recommandations techniques émanant de la CIGRÉ (Conseil International des Grands Réseaux Électriques), fournissent un cadre strict définissant les seuils de performance, les méthodes d'essai et les critères d'acceptabilité pour l'utilisation de ces fluides.

Des travaux universitaires menés récemment, notamment au sein de l'Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), ont comparé plusieurs familles de fluides alternatifs aux huiles minérales classiques.

Ces recherches ont mis en lumière la capacité des esters naturels (issus de sources végétales) et des esters synthétiques à satisfaire ces exigences complexes.

Ils offrent non seulement une bonne performance diélectrique, mais aussi une meilleure compatibilité environnementale.

De même, les fluides à base de silicone ont démontré une excellente stabilité thermique et une grande longévité, ce qui en fait des candidats sérieux pour les environnements exigeants [4].

Ces résultats sont confortés par des études de cas et des essais normalisés qui tendent à confirmer la viabilité de ces nouveaux fluides dans des conditions opérationnelles réelles.

III.4 Esters naturels : vers une solution écologique

Dans le contexte actuel de transition énergétique et de recherche de solutions durables, les esters naturels apparaissent comme une alternative prometteuse aux huiles minérales conventionnelles utilisées dans les transformateurs de puissance. Issus de ressources renouvelables telles que l'huile de soja, de colza ou de tournesol, ces fluides offrent une réponse efficace aux préoccupations environnementales.

Leur principal avantage réside dans leur biodégradabilité exceptionnelle, souvent supérieure à 95 %, ainsi que dans leur faible toxicité, ce qui en fait des candidats idéaux pour une utilisation dans les zones écologiquement sensibles ou densément peuplées.

En outre, leur point de feu élevé — nettement supérieur à celui des huiles minérales — contribue à une réduction significative du risque d'incendie, un aspect crucial pour les installations situées dans des environnements urbains ou industriels à forte densité [5].

Sur le plan électrique, les esters naturels démontrent une rigidité diélectrique satisfaisante, comparable à celle des huiles minérales, avec en prime une meilleure affinité avec l'humidité, ce qui leur permet de maintenir des performances acceptables même en présence d'eau.

Cette propriété est particulièrement intéressante dans les régions à forte hygrométrie. Cependant, certains inconvénients techniques limitent encore leur adoption à grande échelle.

Leur viscosité relativement élevée complique la circulation du fluide dans les petits canaux des transformateurs, notamment à basse température, tandis que leur stabilité thermique reste inférieure à celle des esters synthétiques ou des fluides silicones, ce qui restreint leur utilisation dans des conditions extrêmes, comme les régions désertiques ou les applications à forte charge continue.

Malgré ces limites, plusieurs études récentes menées au sein de l'Université de Batna ont mis en évidence les bénéfices concrets de ces fluides.

En particulier, il a été observé que l'usage d'esters naturels permet une réduction notable des décharges partielles dans le système isolant, ce qui contribue à prolonger la durée de vie des matériaux solides, en particulier les papiers celluloses utilisés dans l'isolation interne [6].

De plus, l'expérimentation de transformateurs pilotes fonctionnant à l'ester naturel, installés dans des zones humides et semi-humides, a permis de valider leur compatibilité avec les composants traditionnels et de confirmer leur fiabilité en conditions réelles.

Dans le contexte algérien, l'intégration de ces fluides dans les réseaux de distribution situés en milieux urbains sensibles, comme les centres hospitaliers, les universités ou les zones résidentielles, pourrait représenter une avancée stratégique majeure.

Elle permettrait non seulement d'améliorer la sécurité des installations, mais aussi de répondre aux engagements environnementaux croissants en matière de réduction des impacts écologiques des infrastructures énergétiques.

Un exemple de l'huile a base végétale : Huile FR3 (de Cargill)

Origine:

L'huile FR3 est une huile diélectrique **100 % naturelle**, fabriquée à partir d'esters d'origine végétale (généralement à base d'huile de soja).

Propriétés techniques :

- **Rigidité diélectrique élevée** (> 35 kV)
- **Point éclair élevé** (> 300 °C), donc très sécuritaire contre les incendies
- **Bonne biodégradabilité** (> 97 % en 21 jours selon test OECD 301)
- **Haute stabilité thermique** pour fonctionnement à long terme
- **Capacité d'absorber l'humidité** bien supérieure aux huiles minérales

Avantages environnementaux :

- Non toxique
- Rapidement biodégradable
- Produit à faible empreinte carbone
- Compatible avec les exigences des normes environnementales (REACH, RoHS)

Applications :

- Transformateurs de distribution et de puissance
- Zones sensibles : écoles, hôpitaux, tunnels, sous-stations urbaines, etc.

Normes associées :

- Conforme à la norme **IEC 62770** (fluides diélectriques à base d'esters naturels)
- Testé selon **IEEE C57.147**

Exemple : Huile NYTRO BIO 300X

NYTRO BIO 300X est une huile isolante à base d'ester naturel développée par Nynas, spécialement conçue pour les transformateurs immergés.

Ce fluide est biodégradable, non toxique et offre une excellente performance thermique et diélectrique, tout en répondant aux exigences environnementales strictes.

Elle présente une tension de claquage élevée, une forte résistance à l'oxydation, ainsi qu'un point d'éclair supérieur à 300 °C, ce qui la rend particulièrement adaptée aux installations urbaines et sensibles au risque incendie.

Grâce à sa compatibilité avec les matériaux cellulosiques, elle prolonge la durée de vie de l'isolation solide en réduisant le vieillissement thermique.

Ce fluide est conforme à la norme IEC 62770, et est souvent utilisé dans les transformateurs écologiques ou dans les zones protégées où les fuites doivent avoir un impact minimal sur l'environnement.

Tableau 1 : Propriétés physico-chimiques du NYTRO BIO 300X comparées à d'autres liquides [7].

Property	Unit	NYTRO LYRA X	NYTRO BIO 300 X	SYNTHETIC ESTER
Specification	-	IEC 60296	IEC 60296	IEC 61099
Biodegradability	-	Inherently	Readily, OECD 301	Readily, OECD 301
Bio-Based carbon content	%	0%	>99%	≈50%
Density at 20°C	kg/dm^3	0.868	0.785	0.968
Viscosity at 40°C	mm^2/s	9.5	3.7	27
Viscosity at -30°C	mm^2/s	780	55	≈4500
Pour point	°C	-54	-60	-56
Flash point, PM	°C	146	145	260
Interfacial tension	mN/m	>43	>43	<30

III.5 Esters synthétiques : performance et durabilité

Les esters synthétiques représentent une génération avancée de fluides diélectriques, développés pour répondre aux exigences croissantes de performance et de longévité dans les transformateurs de puissance.

Contrairement aux esters naturels, ces fluides ne sont pas issus directement de matières premières végétales, mais sont obtenus à travers des procédés industriels sophistiqués, permettant une maîtrise fine de leur structure moléculaire.

Ce contrôle permet d'optimiser leurs propriétés physico-chimiques, notamment en matière de stabilité thermique, de résistance à l'oxydation et de comportement diélectrique dans des conditions extrêmes [8].

L'un des avantages les plus remarquables des esters synthétiques est leur capacité à fonctionner à des températures élevées sans dégradation significative.

Cette robustesse thermique se traduit par une durée de vie prolongée du fluide et, par extension, des composants isolants solides du transformateur.

De plus, leur performance électrique reste stable même en présence d'humidité, un atout essentiel dans les environnements où la maîtrise parfaite de l'étanchéité n'est pas toujours garantie.

Ces caractéristiques en font des candidats idéaux pour les transformateurs de puissance soumis à des charges variables, des cycles thermiques fréquents ou des environnements climatiques sévères.

Une étude approfondie menée à l'École Nationale Polytechnique d'Alger a mis en évidence la capacité des esters synthétiques à supporter des températures de fonctionnement supérieures à 150 °C sans perte notable de leur rigidité diélectrique ni altération de leur comportement isolant, même après un vieillissement accéléré en laboratoire [9].

Cette propriété ouvre la voie à une miniaturisation des équipements ou à une augmentation de la puissance sans compromettre la sécurité, ce qui constitue un enjeu crucial pour les réseaux électriques modernes à forte densité de consommation.

Néanmoins, malgré ces performances impressionnantes, les esters synthétiques présentent également certaines limites.

Leur coût de production plus élevé que celui des esters naturels peut constituer un frein à leur adoption généralisée, notamment dans les pays en développement ou dans les projets à budget restreint.

Par ailleurs, bien qu'ils soient généralement plus sûrs que les huiles minérales classiques, leur biodégradabilité reste inférieure à celle des fluides d'origine végétale, ce qui peut poser des problèmes en cas de fuite ou de déversement accidentel dans les milieux sensibles.

Face à ces enjeux, plusieurs recherches récentes explorent la voie des formulations hybrides, combinant des esters synthétiques avec des composants issus de sources renouvelables.

L'objectif est de marier la haute stabilité thermique et la durabilité des esters synthétiques avec les qualités écologiques des esters naturels, notamment leur biodégradabilité et leur faible impact toxicologique.

Ces solutions pourraient à terme offrir un compromis intéressant, en particulier pour les transformateurs destinés aux zones à la fois sensibles sur le plan environnemental et exigeantes en matière de performance électrique.

Un exemple de l'huile ester synthétique Exemple : MIDEL 7131

Type : Huile diélectrique **à base d'ester synthétique**

Fabricant : M&I Materials (Royaume-Uni)

Application : Transformateurs de distribution et de puissance, spécialement dans les environnements sensibles (zones urbaines, tunnels, métros, plateformes offshore)

Avantages de MIDEL 7131

- **Non inflammable** selon UL classification
- **Excellente stabilité à l'oxydation** (meilleure que les esters naturels)
- **Très bon comportement à basse température** (adaptée aux climats froids)
- **Faible viscosité** → meilleure circulation dans les circuits de refroidissement

- **Haute rigidité diélectrique** et performance thermique

Domaines d'utilisation

- Transformateurs à remplissage total (distribution et puissance)
- Postes en espace clos
- Applications ferroviaires et offshore
- Installations sensibles à l'incendie (aéroports, data centers)

III.6 Huiles de silicone : robustesse et fiabilité en conditions extrêmes

Les huiles de silicone, principalement composées de polydiméthylsiloxane (PDMS), représentent une catégorie de fluides isolants particulièrement adaptée aux environnements hostiles.

Grâce à leur structure moléculaire stable et linéaire, ces huiles présentent une exceptionnelle résistance thermique et une inertie chimique remarquable, ce qui les rend extrêmement fiables dans les applications où les contraintes de température, d'humidité ou de pollution chimique sont élevées.

Leur plage de fonctionnement thermique très étendue, allant de températures très basses à plus de 180 °C, permet une utilisation continue sans perte significative de performance.

Ces fluides sont particulièrement prisés dans les transformateurs de traction, les équipements ferroviaires, ainsi que dans les installations exposées à des atmosphères corrosives ou soumises à des cycles thermiques sévères.

Contrairement aux huiles minérales classiques, les huiles de silicone conservent une viscosité stable et une rigidité diélectrique constante quelles que soient les conditions d'exploitation, ce qui assure une isolation fiable et durable même après un vieillissement prolongé.

Une étude technique approfondie menée à l'Université de Boumerdès a montré que les huiles de silicone maintiennent une rigidité diélectrique stable et une faible perte diélectrique même après plusieurs centaines d'heures de vieillissement accéléré, simulant des conditions d'exploitation intensives [10].

Cette stabilité est renforcée par leur faible inflammabilité, un critère déterminant pour les installations situées en milieu urbain dense, où les risques d'incendie doivent être strictement maîtrisés.

Cela les rend également particulièrement adaptées aux postes électriques souterrains ou intégrés dans des infrastructures sensibles telles que les hôpitaux ou les centres de données.

Cependant, ces qualités techniques s'accompagnent de limites notables. Le coût de production et de mise en œuvre élevé des huiles de silicone constitue un frein majeur à leur déploiement à grande échelle, notamment dans les pays à budget énergétique contraint.

De plus, leur biodégradabilité quasi nulle pose un enjeu environnemental important, notamment en cas de fuite ou d'accident. Cela nécessite des précautions supplémentaires en termes de confinement, de recyclage et de traitement en fin de vie.

Ainsi, les huiles de silicone ne sont généralement utilisées que dans des cas d'usage spécifiques, où la priorité est donnée à la fiabilité à long terme, à la sécurité incendie et à la résistance aux conditions extrêmes, même si cela implique des coûts initiaux plus élevés.

Des travaux de recherche en cours explorent la possibilité d'améliorer leur profil environnemental sans compromettre leurs performances, mais à ce jour, leur domaine d'application reste ciblé et stratégique.

Un exemple de l'huile silicone huile silicone DC 561

Type : Fluide diélectrique **à base de silicone (polydiméthylsiloxane)**

Fabricant : Dow Corning (aujourd'hui Dow Inc.)

Utilisation : Transformateurs dans des environnements à **haut risque d'incendie** ou à **température extrême**, tels que :

- Stations souterraines
- Métros
- Plateformes pétrolières
- Zones confinées ou sensibles

Avantages de l'huile silicone (ex. DC 561)

- Ininflammable : point éclair très élevé
- Excellente stabilité thermique et chimique
- Insensible à l'humidité
- Grande longévité
- Utilisable dans des températures extrêmes

Inconvénients

- Coût élevé
- Non biodégradable
- Moins courante que les huiles minérales ou esters

III.7 Autres fluides émergents : nano-huiles et fluides composites

Dans le sillage des avancées technologiques récentes, de nouveaux types de fluides diélectriques émergent, porteurs de perspectives prometteuses pour l'amélioration des performances des transformateurs de puissance. Parmi ces innovations, les nano-huiles représentent un domaine de recherche en plein essor.

Ces fluides sont obtenus en dispersant des nanoparticules métalliques ou non métalliques (comme le dioxyde de titane TiO_2, l'alumine Al_2O_3 ou encore le graphène) dans une huile de base, qu'il s'agisse d'un ester naturel, d'une huile minérale ou d'un autre fluide isolant. L'objectif est d'améliorer les propriétés électriques et thermiques de l'huile, tout en maintenant sa stabilité d'utilisation.

Des études expérimentales menées à l'Université de Sétif et à l'USTHB ont permis de mettre en évidence des améliorations significatives sur plusieurs plans.

Les résultats obtenus ont montré que l'ajout contrôlé de nanoparticules entraîne une augmentation notable de la rigidité diélectrique, une réduction des décharges partielles ainsi qu'une amélioration de la conductivité thermique, favorisant une meilleure dissipation de la chaleur au sein du transformateur [11].

Ces effets bénéfiques sont attribués à la capacité des nanoparticules à modifier localement les lignes de champ électrique et à absorber une partie de l'énergie générée par les phénomènes transitoires ou les défauts d'isolation.

Cependant, malgré ces performances prometteuses, l'utilisation industrielle des nano-huiles reste encore limitée en raison de défis technologiques non résolus.

Parmi les plus importants figurent la stabilité colloïdale des dispersions, qui tend à diminuer avec le temps, entraînant une agglomération des nanoparticules et une perte d'uniformité.

De plus, les méthodes de production, de mélange et de contrôle de la concentration des nanoparticules nécessitent des équipements sophistiqués et des protocoles rigoureux, ce qui alourdit les coûts de fabrication.

D'autres préoccupations concernent également la toxicité potentielle de certaines nanoparticules, notamment en cas de fuite ou de contamination environnementale.

En parallèle, les chercheurs s'intéressent de plus en plus aux fluides composites, qui consistent à combiner plusieurs types d'huiles ou à intégrer des additifs spécifiques dans une matrice huileuse afin d'optimiser les propriétés globales du fluide.

L'idée est d'exploiter la synergie entre différents composants pour améliorer à la fois la stabilité thermique, la performance électrique et l'empreinte écologique du fluide final.

Par exemple, certains mélanges testés associent des esters naturels à faible viscosité avec des huiles synthétiques à haute stabilité thermique, dans le but de créer un compromis équilibré entre performance et durabilité.

Ces solutions hybrides et nanotechnologiques restent pour l'instant au stade de la recherche appliquée ou du développement pilote, mais elles dessinent les contours de la prochaine génération de fluides isolants, adaptée aux exigences croissantes des réseaux intelligents, des énergies renouvelables et des environnements contraints.

Leur développement futur dépendra de l'optimisation des procédés de fabrication, de la réduction des coûts et de l'évaluation environnementale complète de leur cycle de vie.

III.8 Comparaison technico-économique des huiles disponibles

L'évolution des fluides isolants utilisés dans les transformateurs de puissance s'accompagne d'une diversification croissante des profils techniques et économiques de chaque type d'huile.

Dans ce contexte, il devient essentiel de procéder à une analyse comparative rigoureuse afin d'évaluer les avantages et les limites de chaque solution, en fonction de plusieurs critères clés: performance électrique et thermique, sécurité incendie, impact environnemental, coût d'acquisition et d'exploitation, ainsi que durée de vie opérationnelle.

Les huiles minérales, longtemps dominantes sur le marché en raison de leur coût très faible et de leur disponibilité à grande échelle, apparaissent aujourd'hui de plus en plus dépassées sur le plan environnemental.

Leur faible biodégradabilité, leur toxicité potentielle en cas de fuite, ainsi que leur point de feu relativement bas en font des fluides à usage restreint, surtout dans les zones sensibles ou réglementées.

Elles continuent toutefois d'être utilisées dans les réseaux anciens ou dans des installations secondaires où les contraintes environnementales sont moindres.

À l'inverse, les esters naturels se positionnent comme une alternative écologiquement responsable, offrant une biodégradabilité supérieure à 95 %, une faible toxicité et un point de feu élevé, garantissant une sécurité accrue contre les incendies.

Leur coût, bien que plus élevé que celui des huiles minérales, reste acceptable pour de nombreuses applications.

Néanmoins, leur viscosité élevée nécessite une conception adaptée du système de refroidissement, ce qui peut limiter leur intégration dans certains types de transformateurs, notamment de grande puissance ou à refroidissement passif.

Les esters synthétiques représentent une solution haut de gamme, se distinguant par une excellente stabilité thermique et chimique à long terme, une résistance accrue à l'humidité, et des performances constantes en conditions sévères. Leur principal inconvénient reste leur prix élevé, ce qui les réserve souvent à des applications critiques où la fiabilité sur plusieurs décennies est indispensable. Toutefois, leur durabilité permet souvent de compenser leur coût initial sur le long terme.

Les huiles de silicone, quant à elles, sont principalement utilisées dans des scénarios extrêmes, notamment en présence de températures élevées, d'humidité constante ou d'environnements corrosifs. Bien qu'elles offrent une longévité exceptionnelle et une très faible inflammabilité, leur biodégradabilité quasi nulle et leur coût très élevé limitent leur emploi à des cas très spécifiques où la sécurité prime sur les considérations économiques.

Enfin, les nano-huiles et fluides composites, encore au stade de la recherche appliquée, suscitent un fort intérêt en raison de leur potentiel d'amélioration significative des propriétés diélectriques et thermiques.

Les essais réalisés en laboratoire, notamment à l'USTHB et à l'Université de Sétif, ont montré des résultats encourageants, mais leur manque de stabilité colloïdale, les incertitudes réglementaires et les coûts de fabrication élevés freinent encore leur adoption à l'échelle industrielle [12].

Leur avenir dépendra largement de la capacité des chercheurs à maîtriser leur formulation et à valider leur comportement en conditions réelles d'exploitation.

Un tableau comparatif synthétique, rassemble les principales données techniques et économiques pour chaque type de fluide : viscosité cinématique, point de feu, biodégradabilité, coût moyen au litre, espérance de vie moyenne, etc. Ce tableau constitue un outil d'aide à la décision pour les ingénieurs et exploitants, en fonction des priorités spécifiques de chaque projet (durabilité, écologie, sécurité ou coût).

Tableau 2 : Tableau comparatif des fluides isolants selon leurs propriétés techniques (viscosité, point de feu, biodégradabilité) et économiques (coût, durée de vie), facilitant le choix selon les priorités du projet.

Ester synthétique	Huile végétale (naturelle)	Huile minérale	Critère
mm²/s 32–20	mm²/s 40–30	mm²/s 12–8	Viscosité cinématique (à 40°C)
C° 300 <	C° 300 <	C° 150 ~	Point de feu
Élevée (~ 90 %)	Très élevée (> 95 %)	Faible	Biodégradabilité
€ 6–5	€ 4–3	€ 1,5–1	Coût moyen au litre
ans 35–30	ans 25–20	ans 30–20	Espérance de vie moyenne
Excellente résistance	Bonne résistance	Sensible	Comportement à l'humidité
Moyen à faible	Faible (écologique)	Élevé (polluant)	Impact environnemental
Installations intérieures	Zones sensibles / éco-projets	Réseaux standards	Utilisation recommandée

III.9 Perspectives de recherche et d'industrialisation

À mesure que les exigences environnementales, économiques et techniques évoluent, les perspectives de recherche dans le domaine des fluides isolants prennent une importance stratégique.

L'une des priorités majeures des années à venir consistera à optimiser les formulations existantes, tant du point de vue de la performance que de la durabilité, tout en cherchant à réduire les coûts de production pour permettre une adoption plus large, notamment dans les pays en développement.

Cette optimisation concerne particulièrement les nano-huiles, qui, bien que prometteuses, souffrent encore de limites liées à la stabilité colloïdale, à l'uniformité des mélanges et à la reproductibilité industrielle de leurs propriétés.

Parallèlement, l'harmonisation normative jouera un rôle crucial dans la transition vers des fluides plus sûrs et écologiques.

L'émergence attendue de normes spécifiques au sein de la Commission Électrotechnique Internationale (CEI), ainsi que l'adoption progressive de directives européennes en matière de sécurité environnementale, pourrait accélérer l'industrialisation de ces nouveaux fluides en fixant des référentiels clairs pour les fabricants et les exploitants.

Une telle évolution normative contribuerait également à renforcer la confiance des acteurs du marché envers ces technologies encore récentes.

Dans le contexte algérien, les enjeux sont à la fois techniques et structurels. La mise en place de programmes pilote visant le remplacement progressif des huiles minérales par des

alternatives écologiques, en particulier dans les transformateurs urbains et périurbains, pourrait offrir un laboratoire d'expérimentation à grande échelle.

Ce type d'initiative permettrait non seulement de tester la compatibilité des nouveaux fluides avec les installations existantes, mais aussi de collecter des données en conditions réelles, indispensables à l'évaluation des performances à long terme.

Il est également fondamental de renforcer la collaboration entre les acteurs de la recherche, de l'industrie et des institutions publiques. En ce sens, un réseau national intégré associant des universités techniques (telles que celles de Batna, Boumerdès, USTHB), des opérateurs industriels comme Sonelgaz ou GRTE, et des centres de recherche spécialisés en matériaux et en énergie, permettrait de développer des solutions adaptées aux réalités climatiques, économiques et réglementaires propres à l'Algérie [12].

Une telle synergie pourrait également ouvrir la voie à la création de filières locales de production d'esters naturels, en valorisant les ressources agricoles du pays (soja, tournesol, colza), contribuant ainsi à réduire la dépendance aux importations tout en soutenant l'économie nationale.

Enfin, les efforts futurs devront inclure une évaluation complète du cycle de vie des fluides, intégrant les aspects de production, d'utilisation, de recyclage et de fin de vie. Seule une approche holistique permettra de faire des choix éclairés, conciliant performance technique, sécurité, et responsabilité environnementale à long terme.

III.10 Conclusion

Les nouvelles huiles utilisées dans les transformateurs de puissance représentent une réponse stratégique aux défis de performance, de sécurité et de durabilité environnementale.
Les esters naturels et synthétiques, les huiles de silicone et les nano-huiles offrent des alternatives crédibles aux fluides minéraux, à condition d'en maîtriser les coûts, la stabilité et la compatibilité avec les infrastructures existantes.
La recherche algérienne s'est déjà illustrée par plusieurs travaux novateurs dans ce domaine, et il est impératif de soutenir ces efforts pour assurer une transition énergétique sûre et durable.

Ce chapitre démontre qu'un avenir sans huiles minérales est techniquement possible et écologiquement souhaitable.

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'étude des huiles utilisées dans les transformateurs de puissance met en lumière l'importance capitale de ces fluides dans le fonctionnement fiable, sûr et durable des équipements électriques.

De simples vecteurs d'isolation et de refroidissement, elles sont devenues des composants stratégiques, dont les propriétés influencent directement la longévité, l'efficacité énergétique et la sécurité des transformateurs.

L'analyse menée dans ce mémoire a permis de comparer les différentes familles d'huiles – minérales, végétales, synthétiques, silicones et nano-modifiées – en fonction de leurs performances techniques, de leur comportement au vieillissement, de leur impact environnemental et de leur conformité aux normes en vigueur.

Le remplacement progressif des huiles minérales par des fluides plus écologiques et performants devient une nécessité à moyen terme, notamment dans les installations à haut risque ou situées en zones sensibles.

Les esters naturels apparaissent comme une alternative prometteuse, conjuguant bonnes performances diélectriques et respect de l'environnement, tandis que les esters synthétiques offrent une solution robuste pour les environnements les plus contraignants. Par ailleurs, les recherches menées en Algérie, en particulier dans les universités de Boumerdès, Batna, Sétif et à l'USTHB, témoignent d'une dynamique scientifique croissante visant à adapter les fluides isolants aux conditions locales de fonctionnement, notamment aux fortes températures, à l'humidité et à la variabilité des charges.

En conclusion, ce travail met en évidence l'importance de développer la recherche appliquée, la veille technologique et la normalisation à l'échelle nationale dans le domaine des huiles pour transformateur. Une stratégie intégrée, impliquant les universités, les industriels et les institutions réglementaires, est indispensable pour assurer une transition vers des transformateurs plus sûrs, plus durables et mieux adaptés aux exigences énergétiques futures du pays.

Références Bibliographiques

Bibliographique

CHAPITRE 01 :

[1] M. Benamar, « Étude et amélioration des performances des transformateurs de puissance en Algérie », Mémoire de Master, Université de Sétif 2, 2018.

[2] https://seniadz.net/

[3] F.Boudjemaa, « Analyse des défaillances des transformateurs de puissance dans le réseau électrique algérien », Mémoire de Master, Université de Batna, 2019.

[4] A. Djemai, « Méthodes de refroidissement et leur impact sur la durée de vie des transformateurs », Mémoire de Master, Université de Boumerdès, 2020.

[5] https://www.courstechinfo.be/

[6] N.Khelif, « Choix des matériaux pour transformateurs adaptés au climat aride en Algérie », Mémoire de Master, Université de Sétif, 2017.

[7] https://ww2.ac-poitiers.fr/electrotechnique

[8] S.Benali, « Typologie et comportement thermique des transformateurs de puissance en Algérie », Mémoire de Master, Université de Batna, 2021.

[9] https://fr.transformer-tester.com/

[10] L.Sahraoui, « Étude comparative entre huiles minérales et huiles végétales dans le refroidissement des transformateurs », Mémoire de Master, Université de Boumerdès, 2022.

[11] K.Bouzid, « Analyse des pannes et maintenance des transformateurs dans les régions du sud algérien », Mémoire de Master, Université de Tlemcen, 2018.

[12] S.Fethi, « Modèles prédictifs pour la maintenance conditionnelle des transformateurs par intelligence artificielle », Mémoire de Master, USTHB, Alger, 2021.

CHAPITRE 2 :

[1] M.Bouziane, « Étude des propriétés diélectriques des huiles utilisées dans les transformateurs de puissance », mémoire de master, USTHB, 2018.

[2] K.Laouar , « Caractérisation physico-chimique des huiles isolantes issues du raffinage local », Université de Boumerdès, 2019.

[3] R.Amrane , « Évaluation des huiles végétales estérifiées comme fluide isolant alternatif », Université de Batna 2, 2021.

[4] H.Amara , « Étude du comportement diélectrique des huiles isolantes usagées », Mémoire de Master, Université M'hamed Bougara de Boumerdès, 2020.

[5] M.Touati , « Influence du vieillissement thermique sur les caractéristiques des huiles minérales », USTHB, Département de Génie Électrique, 2017.

[6] Y.Boulahrouf, « Comparaison expérimentale entre une huile minérale et un ester végétal pour transformateurs de puissance », Mémoire de Master, Université de Batna 2, 2020.

[7] S.Mahfouf , « Étude comparative du vieillissement des huiles isolantes minérales et naturelles », USTHB, Département Génie Électrique, 2019.

[8] L.Benyahia , « Caractérisation physique des huiles isolantes minérales », Mémoire de Master, Université de Sétif, 2020.

[9] M.Douifi, « Analyse chimique des huiles de transformateurs vieillies : étude comparative entre huiles minérales et esters », Université de Boumerdès, 2019.

[10] R.Ghouli , « Évaluation des performances diélectriques des huiles isolantes en fonction du taux d'humidité », Université de Batna 2, 2021.

[11] A.Hamidi, « Étude de la tension de claquage des huiles usagées prélevées sur site », Université de Boumerdès, 2020.

[12] K.Bouterfa , « Diagnostic des huiles isolantes par chromatographie des gaz dissous », USTHB, 2018.

[13] A.Yahiaoui , « Étude des gaz dissous dans les huiles de transformateurs : méthode de diagnostic des défauts internes », Mémoire de Master, Université de Batna 2, 2020.

[14] M.Kaci , « Vieillissement accéléré des huiles minérales et estimation de leur durée de vie résiduelle », USTHB, 2019.

[15] F.Belmadi , « Comparaison du comportement thermique des huiles minérales et des huiles végétales dans les transformateurs », Université de Boumerdès, 2021.

[16] IEC 60296, Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear, 5e éd., International Electrotechnical Commission, Genève, 2020.

[17] IEC 62770, Fluids for electrotechnical applications – Unused natural esters for transformers and similar electrical equipment, 1re éd., International Electrotechnical Commission, Genève, 2013.

[18] ASTM D3487-21, Standard Specification for Mineral Insulating Oil Used in Electrical Apparatus, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2021.

[19] IEEE C57.104-2019, IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), New York, 2019.

[20] A.Kherbouche , « Étude comparative des performances thermiques et électriques de différentes huiles isolantes sous conditions climatiques algériennes », Mémoire de Master, Université de Boumerdès, 2020.

[21] M.Latreche, « Analyse de la compatibilité des huiles isolantes avec les isolants solides dans les transformateurs », USTHB, Département Génie Électrique, 2019.

CHAPITRE 03 :

[1] B. Messaoudi, "Étude des propriétés diélectriques des huiles isolantes minérales et alternatives", Mémoire de Master, USTHB, 2020.

[2] K. Zennaki, "Analyse du vieillissement des huiles minérales utilisées dans les transformateurs de puissance", Mémoire de Master, Université de Boumerdès, 2019.

[3] IEC 60296: Fluids for electrotechnical applications - Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear.

[4] S. Charef, "Comparaison des huiles isolantes pour transformateurs : étude expérimentale", Mémoire de Master, USTHB, 2021.

[5] R. Benhamadi, "Les esters naturels comme fluide isolant dans les transformateurs de puissance", Université de Batna, 2018.

[6] M. Djeridi, "Évaluation des performances des huiles végétales dans des transformateurs prototypes", Mémoire de Master, Université de Batna 2, 2020.

[7] NYNAS, Product Data Sheet - Nytro Bio 300x', (2020).

[8] A. Dahmane, "Étude des esters synthétiques pour l'isolation électrique", ENP Alger, 2022.

[9] H. Bouchareb, "Comportement thermique des huiles synthétiques sous contrainte", ENP Alger, 2021.

[10] F. Mansouri, "Vieillissement accéléré des huiles silicone dans les transformateurs urbains", Université de Boumerdès, 2020.

[11] Y. Amara, "Application des nanoparticules dans les huiles diélectriques", Université de Sétif 1, 2021.

[12] T. Maameri, "Comparaison technique et économique des huiles isolantes", Mémoire de Master, Université de Boumerdès, 2022.

[13] A. Lounis, "Perspectives de développement des huiles écologiques en Algérie", USTHB, 2023.