

**Sujet de thèse**  
**École doctorale EEA de Lyon**

*Merci de compléter l'ensemble des rubriques et de lire les notes de bas de page.*

<b>Etablissement d'inscription :</b> Ecole Centrale de Lyon <sup>1</sup>
<b>École doctorale :</b> ED 160 EEA de Lyon dirigée par Mr Delachartre Philippe
<b>Intitulé du doctorat :</b> Génie Electrique <sup>2</sup>
<b>Sujet de la thèse :</b> Etude du comportement des diélectriques liquides sous contraintes électriques composées, application à l'isolation des transformateurs HVDC
<b>Unité de recherche :</b> Ampère <sup>3</sup> , dirigée par Christian Vollaire
<b>Directeur/trice de thèse :</b> Mr VOLLAIRE Christian
<b>Co-directeur/trice de thèse (le cas échéant)<sup>4</sup> :</b>
<b>Co-directeur/trice de thèse en entreprise (le cas échéant) :</b>

<sup>1</sup> A impérativement choisir dans la liste suivante : Ecole Centrale de Lyon, INSA de Lyon, Université Claude Bernard Lyon 1

<sup>2</sup> A impérativement choisir dans la liste suivante : Automatique // Electronique, Micro et Nano-électronique, Optique et Laser // Génie Electrique // Ingénierie pour le vivant Traitement du signal et de l'Image)

<sup>3</sup> A impérativement choisir dans la liste suivante : Laboratoire Ampère, CITI, CREATIS, INL, LAGEP, LGEF

<sup>4</sup> Un/une co-encadrant-e n'est pas nécessairement co-directeur/trice de thèse puisque pour remplir ce rôle, il est nécessaire d'être habilité à diriger des recherches (pour plus de précision, voir le règlement intérieur de l'ED EEA, section 3.

## Collaboration(s)/partenariat(s) extérieur(s) éventuels<sup>5</sup> :

### Domaine et contexte scientifiques :

Les futurs réseaux électriques à courant continu (HVDC) permettront de transporter l'énergie électrique sur de longues distances avec un minimum de pertes. Les transformateurs HVDC sont des éléments clés dans les réseaux HVDC. Le système d'isolation électrique de ces transformateurs est constitué d'une isolation mixte solide-liquide. Contrairement aux transformateurs de puissance traditionnels ou le système d'isolation est soumis à une contrainte de champ AC à une fréquence de 50 Hz, la contrainte sur le système d'isolation dans les transformateurs HVDC est très particulière : superposition des champs AC et DC, harmoniques (taux de distorsion dépassant 40 %), inversement de polarité... Les mécanismes de vieillissement sous ces contraintes spécifiques sont méconnus, à fortiori sur des huiles végétales, d'où l'intérêt majeur d'étudier les phénomènes liés à la dégradation de l'isolation en développant des techniques spécifiques de mise sous contraintes, de caractérisation pour participer à la définition des règles de dimensionnement.

D'autre part, l'utilisation de nouveaux matériaux à faible impact sur l'environnement comme substituts aux huiles minérales dans les transformateurs HT en raison de leur faible biodégradabilité et leur impact sur les sources aquatiques est devenue une nécessité. Parmi les substituts, les esters synthétiques et naturels qui sont avantageux pour leur haute biodégradabilité, leur non-toxicité et leur meilleure garantie de sécurité incendie.

La compréhension de l'effet des contraintes électriques composées sur le comportement de ces liquides innovants est donc d'un grand intérêt et présente de nombreux verrous.

**Mots-clés** : Huile minérale, ester synthétique et naturel, décharges partielles, claquage, tensions composées

### Objectifs de la thèse :

Au sein du Laboratoire Ampère, le/la doctorant(e) étudiera le comportement des systèmes d'isolation mixte constitués des diélectriques liquides et solides sous contraintes de tensions combinées. Un premier objectif sera d'étudier des solutions d'isolation pour les composants des réseaux d'énergie à base d'isolants liquides avec faible impact environnemental. Par conséquent, nous nous focalisons sur l'étude des esters naturels et synthétiques.

---

<sup>5</sup> Hors contrats doctoraux fléchés UMI par l'établissement, les sujets de thèse en cotutelle ne sont pas acceptés.

L'objectif sera d'étudier l'effet des contraintes composées (AC + DC, DC + pulsé et AC + pulsé) sur les mécanismes de pré-claquage (streamers, décharges partielles) et de claquage de ces isolants.

### **Verrous scientifiques :**

Il s'agit de comprendre les phénomènes de claquage dans l'huile minérale et les esters (naturel et synthétique) soumis à des tensions composées en vue de leur intégration dans les composants haute tension des lignes de transport des réseaux HVDC, particulièrement les transformateurs associés au convertisseurs HVDC. Les verrous scientifiques sont les suivants :

- 1) Identifier les contraintes de champ électrique auxquelles sont soumis les isolants dans les dispositifs présents sur les réseaux HVDC (association transformateur - redresseur / onduleur non autonome par exemple)
- 2) Dimensionner un système expérimental capable de reproduire ces contraintes sur des échantillons de matériaux isolants (cellule avec système pointe plan par exemple)
- 2) Etudier et quantifier les phénomènes à l'origine de la dégradation de l'isolation dans les transformateurs HVDC à l'échelle de laboratoire.
- 3) Comprendre les phénomènes de pré-claquage (initiation des streamers, décharges partielles, propagation des streamers) et de claquage dans les isolants liquides et les systèmes d'isolation liquide-solide sous tensions composées (DC + AC + harmoniques ...).
- 4) Etudier l'effet de ces contraintes sur les phénomènes d'électrisation statique (résultant de la circulation du liquide isolant et du contact avec l'isolation solide, le carton en particulier), phénomène dont les conséquences sur le composant et le système dont il fait partie peuvent être graves (mise à feu du transformateur par exemple).

### **Contributions originales attendues :**

Contrairement aux gaz, les mécanismes de pré-claquage (streamers, décharges partielles) et de claquage dans les liquides sont beaucoup moins clairs. Jusqu'à présent, une théorie complète de la dégradation dans un liquide n'existe pas encore et parfois un mécanisme possible proposé dans une expérience est incompatible avec les observations dans une autre expérience. Par conséquent, la compréhension de la physique sous-jacente des décharges dans divers liquides reste un sujet d'actualité dans la communauté scientifique.

Dans le cadre de cette thèse, une des contributions originales sera la mise au point d'un banc expérimental pour la caractérisation des phénomènes de décharges partielles et de claquage des huiles minérales et des esters naturels et synthétiques sous contraintes

composées DC+AC pour les transformateurs HVDC. Nous proposons également d'étudier des contraintes électriques auxquelles les systèmes d'isolation peuvent être soumis dans des conditions opérationnelles particulières. Il s'agit de la superposition des champs DC + AC + harmoniques. Ces études devraient permettre d'envisager la conception de nouveaux composants (transformateurs et condensateurs de puissance, traversées ...) compacts et à coût de fabrication et impact environnemental réduits et leur intégration dans les composants des réseaux actuels ainsi que les réseaux HVDC du futur.

Des contributions originales sont aussi attendues sur les aspects instrumentation notamment sur la mesure de décharges partielles (DP). Outre le fait que ces mécanismes soient peu connus sous les contraintes rencontrées sur les réseaux HVDC (connectés ou non sur les réseaux HVAC), la détection et la mesure quantitative des DP est un point dur. Nous envisageons d'utiliser les compétences du laboratoire en CEM et en électromagnétisme pour contourner ces problèmes (amélioration du rapport signal / bruit, mesures des DP au travers des émissions EM RF qui sont engendrées lors de l'apparition de ces DP).

#### **Programme de recherche et démarche scientifique proposée :**

Ce projet de recherche comportera plusieurs étapes :

- Une étude bibliographique sur l'état de l'art : Le (la) candidat(e) étudiera les travaux antérieurs sur les nouvelles technologies d'isolation liquide dans les composants des réseaux, notamment sur les diélectriques liquides avec faible impact environnemental. L'étude bibliographique comportera également l'étude de la mise en œuvre des contraintes composées à l'échelle du laboratoire.
  
- Etude des caractéristiques diélectriques des isolants liquides : Il s'agit d'étudier viscosité, la teneur en eau, la conductivité, la permittivité et pertes diélectriques des différents isolants liquides (huile minérale, ester naturel et synthétique). Cette étude permettra de définir un protocole de préparation et de test.
  
- Etude des phénomènes de pré-claquage et de claquage de ces mélanges sous contraintes électriques normalisées : Il s'agit d'étudier les contraintes conventionnelles à savoir AC, DC, LI, SI. Le test des isolants liquides se fera dans des configurations qui favorisent le renforcement du champ électrique pour générer des défauts d'isolation. L'étude de la phase de pré-claquage consistera à étudier les phénomènes de génération et de propagation des streamers à l'aide des techniques électriques et optiques. Nous proposons

également d'étudier les phénomènes de décharges partielles (tension d'apparition, nombre de décharges, charge moyenne) et finalement la tension de claquage.

- Etude des phénomènes de décharges partielles, de pré-claquage et de claquage dans les isolants liquides sous contraintes électriques composées : Cette étape nécessite la mise au point de bancs expérimentaux particuliers pour la superposition de tensions, et d'adapter l'appareillage de mesure pour ces conditions.
- Simulation numérique des phénomènes physiques subjacents : il s'agit de simuler le champ électrique, la charge d'espace et les phénomènes de décharges dans les configurations réelles du système étudié, ceci afin de comprendre les phénomènes prépondérants à l'oeuvre. Le recalage des modèles à partir des mesures expérimentales sera un atout majeur de ces recherches (compétences expérimentales et en simulation numérique multiphysique sont une spécificité d'Ampère qu'il convient de valoriser).
- L'étape finale sera la synthèse de cette étude et la rédaction de la thèse.

**Encadrement scientifique :**

- **Description du comité d'encadrement :** [à compléter avec le rôle dans l'encadrement scientifique (en termes de compétences scientifiques, etc.) et le pourcentage d'implication du directeur de thèse<sup>6</sup> et des autres membres du comité<sup>7</sup>]

Nom Prénom	Labo / Equipe	Compétences scientifiques	Taux d'encadrement %
Mr VOLLAIRE Christian	Ampère Energie Electrique	Electronique de puissance, Electromagnétisme	30
Mr Zouaghi Ayyoub	Energie Electrique	Ingénierie Haute Tension, matériaux diélectriques, électrostatique et décharges	70

- Le comité d'évaluation de l'HCERES ayant demandé à l'école doctorale de limiter la taille du comité d'encadrement à deux membres (directeur de thèse compris), il est impératif de ne proposer des comités d'encadrement de taille plus importante que si cela est absolument nécessaire<sup>8</sup> et **de le justifier soigneusement.**

- **Intégration au sein du (ou des) laboratoire(s)** (Département/Equipe(s) impliquée(s)) (**pourcentage du temps travail au sein de ce ou ces laboratoire(s)**) :

100 % à Ampère et au département Energie Electrique

<sup>6</sup> Le directeur de thèse doit être un HdR rattaché à l'ED EEA ou en passe de le devenir avant juin de l'année en cours ou bénéficier d'une dérogation du Conseil Scientifique lors du dépôt du sujet de thèse.

<sup>7</sup> Dans le cas d'un comité d'encadrement réparti sur plusieurs établissements, la plus grande partie de l'encadrement est effectuée par des membres de l'établissement. Si l'encadrement de la thèse implique des membres hors de l'ED EEA, la part de l'encadrement des membres ED doit être très supérieure à 50%.

<sup>8</sup> Un certain nombre de commissions type CNU ne reconnaissent un co-encadrement qu'au-delà d'un certain pourcentage. Souvent l'encadrement est considéré comme effectif si > 30%.

**Financement de la thèse :** Contrat doctoral de l'établissement d'inscription

**Profil du candidat recherché (prérequis) :**

Le (la) candidat(e) devra avoir une formation ou une expérience en mesure physique. Un goût avéré pour la mesure et l'instrumentation est indispensable. Une formation initiale en génie électrique serait appréciable. Le candidat devra faire preuve de curiosité. En effet, la thèse nécessite de mettre en œuvre des compétences dans plusieurs domaines de la physique, génie électrique et matériaux. Cette double compétence pourra être facilement mise en avant par le candidat à l'issue de sa thèse. Un bon niveau d'anglais serait apprécié.

**Objectifs de valorisation des travaux de recherche :**

Ces résultats seront principalement valorisés par des publications dans des revues internationales à comité de lecture (IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, Journal of Electrostatics, Energies, Journal of Physics D : Applied Physics...), et des communications dans des conférences nationales et internationales (SFE, ICDL, CEIDP...). Le (la) candidat(e) sera également encouragé(e) à présenter ses travaux dans les journées de GDR SEEDS « Matériaux diélectriques ».

Outre les aspects fondamentaux valorisés par des publications, différents aspects pourront faire l'objet de valorisation au travers de brevets :

- Banc expérimental qui permet de reproduire les contraintes spécifiques rencontrées dans les réseaux de distribution de nouvelle génération (vers un dispositif normatif ?)
- Amélioration du rapport signal sur bruit lors de la mesure de DP par courants
- Détection de DP par rayonnement EM RF (antennes spécifiques: présence du liquide isolant, champ électrique intense et possibilité de claquage ...).

**Compétences qui seront développées au cours du doctorat :**

Le (la) candidat(e) pourra acquérir des connaissances à la fois théoriques et pratiques dans l'ingénierie haute tension, les matériaux diélectriques et les phénomènes de décharges dans les liquides. Les compétences développées au cours de cette thèse seront : la caractérisation des matériaux diélectriques et plus particulièrement les liquides isolants, le développement des bancs de tests, les essais normatifs en haute tension, les nouvelles technologies dans le domaine de l'isolation, la caractérisation des décharges, parmi d'autres.

Les demandes de telles compétences sont pressantes, surtout dans les secteurs de la recherche et le développement dans le domaine de l'énergie et les composants des réseaux du futur.

### **Perspectives professionnelles après le doctorat :**

Industrie électrique haute tension, industrie des matériaux diélectriques (conception de transformateurs, condensateurs de puissance, extrémités de câbles imprégnés, fabricants de matériaux diélectriques/isolants), composants pour le transport et la distribution de l'énergie électrique.

### **Références bibliographiques sur le sujet de thèse :**

- [1] A. Beroual et al., "Propagation and structure of streamers in liquid dielectrics," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 14, no. 2, pp. 6–17, Mar. 1998, doi: 10.1109/57.662781.
- [2] A. Beroual, U. Khaled, P. S. Mbololo Noah, and H. Sitorus, "Comparative Study of Breakdown Voltage of Mineral, Synthetic and Natural Oils and Based Mineral Oil Mixtures under AC and DC Voltages," *Energies*, vol. 10, no. 4, Art. no. 4, Apr. 2017, doi: 10.3390/en10040511.
- [3] C. Perrier and A. Beroual, "Experimental investigations on insulating liquids for power transformers: Mineral, ester, and silicone oils," *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 25, no. 6, pp. 6–13, Nov. 2009, doi: 10.1109/MEI.2009.5313705.
- [4] C. Perrier, A. Beroual, and J.- Bessede, "Improvement of power transformers by using mixtures of mineral oil with synthetic esters," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 13, no. 3, pp. 556–564, Jun. 2006, doi: 10.1109/TDEI.2006.1657968.
- [5] U. Piovan, "Insulation systems for HVDC transformers: Present configurations, trends, challenges, solutions and open points," in *2013 IEEE International Conference on Solid Dielectrics (ICSD)*, Jun. 2013, pp. 254–257, doi: 10.1109/ICSD.2013.6619818.
- [6] Y. Sha, Y. Zhou, J. Li, and J. Wang, "Partial discharge characteristics in oil-paper insulation under combined AC-DC voltage," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.*, vol. 21, no. 4, pp. 1529–1539, Aug. 2014, doi: 10.1109/TDEI.2014.004273.
- [7] J. Rouabeh, L. M'barki, A. Hammami, I. Jallouli, and A. Driss, "Studies of different types of insulating oils and their mixtures as an alternative to mineral oil for cooling power transformers," *Heliyon*, vol. 5, no. 3, p. e01159, Mar. 2019, doi: 10.1016/j.heliyon.2019.e01159.
- [8] O. Lesaint, "Prebreakdown phenomena in liquids: propagation 'modes' and basic physical properties," *J. Phys. Appl. Phys.*, vol. 49, no. 14, p. 144001, Mar. 2016, doi: 10.1088/0022-3727/49/14/144001.