

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République algérienne démocratique et populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique  
المركز الجامعي لعين تموشنت  
Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent  
Institut de Technologie  
Département de Génie Electrique



Projet de fin d'études  
Pour l'obtention du diplôme de Master en :  
Domaine : SCIENCE ET TECHNOLOGIE  
Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Commandes électriques  
Thème

*Modélisation d'une traversée de connexion  
Haute Tension*

**Présenté Par :**

- 1) Otsmani Miloud
- 2) Zenasni Rabah

**Devant le jury composé de :**

Mr. AYACHE. Z	M.A.A	C.U.B.B (Ain Témouchent)	Président
M <sup>elle</sup> TOUHAMI. A	M.A.A	C.U.B.B (Ain Témouchent)	Examinatrice
Mr. ZELMAT.S	M.C.A	C.U.B.B (Ain Témouchent)	Encadrant

*Année universitaire 2018/2019*

## *Remerciements*

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

*Je tiens à remercier infiniment notre encadrant Monsieur, **Zémat Samir** pour sa patience et ses conseils précieux qui nous ont été très utiles. Permettez-nous, Monsieur de vous exprimer notre reconnaissance et nos remerciements les plus sincères.*

*on remercie également le jury qui m'a honoré en acceptant de juger et d'enrichir ce modeste travail.*

*Et finalement mes remerciements sont destinés aussi à toute ma famille, et tous mes amis pour leur aide et leur soutien.*

# *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire*

*A mes chers parents ma mère et mon père*

*Pour leurs patience, leur amour leur soutien et leur encouragement*

*A mes frères et mes sœurs*

*Mohamed, chakib, Manel, Cherrifa*

*A mes amies et mes camarades,*

*Mohamed, Boucif, Fouad, Yacine, Amine*

*Sans oublier tout*

*les professeurs que se soit du primaire, du moyen, du secondaire ou de l'enseignement  
supérieur.*

*ZENASNI Rabah*

# Dédicaces

Je dédie ce modeste travail

À mes chers parents qui ont veillé à mon bonheur durant toute ma vie

Je les remercie pour leurs aides ;

À mes chers frères ;

À tout les membres de ma fabuleuse famille ;

À tout mes amis et mes collègues sans exception ;

À tous ceux qui par un geste, un sourire a contribué à l'élaboration de

cet œuvre

# Sommaire

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## Chapitre I : Présentation des transformateurs de puissance

I.1. Introduction.....	3
I.2 Rappels théoriques.....	3
I.3 Technologie de construction.....	4
I.3.1 Technologie Cuirassé.....	6
I.3.2 Technologie Colonne.....	7
I.4 Matériaux isolants dans les transformateurs.....	8
I.4.1 Isolation liquide .....	8
I.4.2 Les isolants solides (papier/carton).....	9
I.5 Conclusion.....	10

## Chapitre II :la traversée

Introduction.....	12
II.1 Définition et rôle des traversées.....	12
II.2. Construction .....	14
II.2. 1. Construction solide.....	14
II.2. 2. Construction à répartition capacitive.....	15
II. 3. Répartiteur de champ électrique.....	17
II.4. Technologie pour l'isolation des traversées.....	18
II.4.1. En papier imprégné d'huile OIP.....	18
II.4.2. En papier enduit de résine RBP.....	19
II.4.3. En papier imprégné de résine RIP.....	19
II.4.4. Résine Synthétique Imprégnée (RIS) :.....	21
II.4.5. Isolation supplémentaire.....	22
II.5.. Défaillance des traversées.....	22
II.5.1. Différence de facteur de perte / tan delta («Tip-up»).....	23
II.5.2. Facteur de perte à fréquence variable.....	23
II.5.3. Réponse diélectrique de fréquence (DFR).....	23

## Chapitre III : Présentation du modèle de simulation

Introduction.....	25
III.1 Présentation du logiciel Flux 2D.....	26
III.2 Modèle « sans traversée ».....	27
III.2.1 Géométrie du modèle.....	27
III.2.2 Maillage.....	28
III.2.3 Paramètres physiques.....	29
III.3 Modèle avec partie intérieur de la traversée .....	30

III.3.1 Géométrie du modèle.....	30
III. 3.2 Maillage.....	31
III.3.3 Paramètres physiques.....	31
III.4 Modèle avec traversée (partie intérieur + partie extérieur).....	33
III.4.1 Géométrie du modèle.....	33
III. 4.2 Maillage.....	35
III.4.3 Paramètres physiques.....	35
III.5 Modèle avec traversée complète.....	37
III.5.1 Géométrie du modèle.....	37
III. 5.2 Maillage.....	38
III.5.3 Paramètres physiques.....	39
III.6.Conclusion.....	40

## **Chapitre IV : Analyse des résultats**

Introduction.....	42
IV.1. Configuration sans traversée.....	42
IV.1.2. Répartition des lignes équipotentiels.....	42
IV.1.3. Dégradé de champ électrique.....	42
IV.2. Configuration avec traversée (partie intérieur).....	44
IV.2.1. Répartition des lignes équipotentiels.....	44
IV.2.2. Dégradé de champ électrique.....	44
IV.3. Configuration avec traversée (partie intérieur+partie extérieur ).....	46
IV.3.1. Répartition des lignes équipotentiels.....	46
IV.3.2. Dégradé de champ électrique.....	46
IV.4. Configuration avec traversée (partie intérieur+partie extérieur+isolateur ).....	48
IV.4.1. Répartition des lignes équipotentiels.....	50
IV.4.2. Dégradé de champ électrique.....	50
IV-5. Comparaison entre les cas étudiés.....	51
Conclusion générale.....	54

## Introduction générale

Le transformateur de puissance est certainement le dispositif qui a permis l'essor puis la domination des réseaux alternatifs pour le transport, la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique. C'est est un élément indispensable à l'interconnexion des différents réseaux d'énergie.

Dans un transformateur, les traversées ont pour but d'assurer la liaison électrique entre les extrémités des enroulements primaire et secondaire, d'une part, et les lignes d'arrivée et de départ (du réseau électrique) d'autre part à travers le couvercle ; d'où le nom de traversées. Elles permettent ainsi de lier les enroulements du transformateur aux lignes électriques sans risque de décharge électrique entre les phases et la cuve du transformateur qui est à la terre.

Le travail présenté dans ce mémoire est une étude simulation qui a pour but de montrer l'intérêt et la nécessité d'utiliser une traversée pour relier le bobinage du transformateur au réseau électrique.

Ce mémoire a été donc organisé en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, on présente des généralités sur les transformateurs ; ses principaux éléments, les différentes technologies de construction ainsi que les matériaux utilisés dans son système d'isolation.

Le second chapitre présente la traversée de connexion, son rôle ainsi que les différents types qui existent sur les réseaux électriques.

Le troisième chapitre, consiste à présenter les différents modèles étudiés avec le logiciel de simulation Flux 2D. On y montre la géométrie du modèle, son maillage ainsi que les paramètres physiques utilisés dans les quatre cas traité dans le cadre de ce travail.

Enfin, le quatrième chapitre présente les principaux résultats de ces simulations.



CHAPITRE

I

## I.1. Introduction

Un transformateur électrique est un convertisseur qui permet de modifier les valeurs de la tension et de l'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative en un système de tension et de courant de valeurs différentes mais de même fréquence et de même forme .ses principaux composants sont un noyau ferromagnétique sur lequel sont bobinés deux enroulements.



**Figure I.1 :** Transformateur de puissance

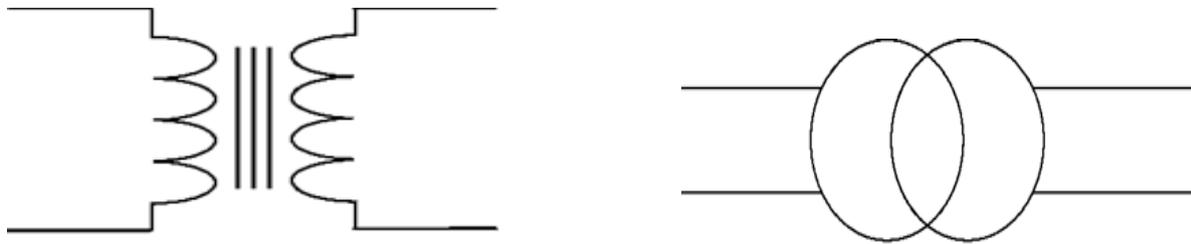
## I.2. Rappels théoriques

Le transformateur est constitué de circuit magnétiques en tôles feuilletées et généralement de deux bobinages, un primaire à spires  $N_1$  et un secondaire à  $N_2$  spires. Si on applique une tension alternative sinusoïdale au primaire, il apparait dans le circuit magnétique un flux également sinusoïdal de même fréquence que celle de  $U_1$ . Ce flux induira à son tour dans le secondaire une tension sinusoïdale  $U_2$  de même fréquence. La valeur de cette tension  $U_2$ , dépendra du rapport des nombres de spires des bobinages.

Un transformateur est donc caractérisé par un rapport de transformation à vide.

$$\mathbf{k} = N_2 / N_1 = U_2 / U_1. \quad (\text{I-1})$$

La figure I.2 présente les deux symboles utilisés pour représenter le transformateur. Sur celui de gauche, les trois barres verticales symbolisent le noyau magnétique qui permet au flux magnétique de passer du bobinage primaire au bobinage secondaire [1]



**Figure I.2 :** Symboles du transformateur [6]

Il existe des pertes de puissance dans un transformateur en charge, qui sont :

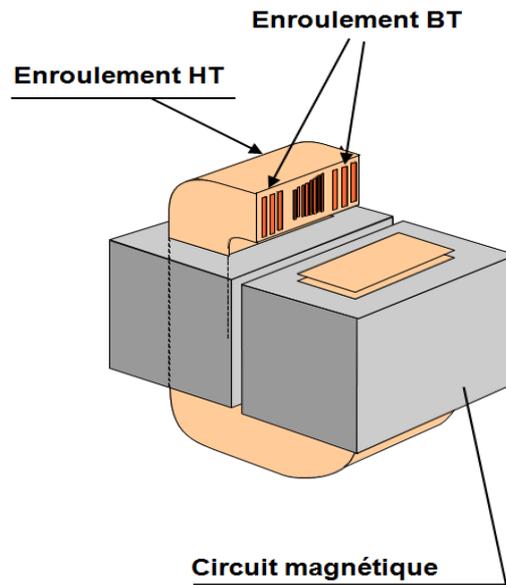
- Les pertes à vide qui apparaissent, secondaire ouvert, dès que le transformateur est magnétisé.
- Les pertes dues à la charge (secondaire débitant sur une impédance) : les bobinages primaire et secondaire sont constitués de conducteurs, ayant une résistance ohmique, et sont donc le siège de pertes par effet joule proportionnelles au carré de l'intensité.

### **I.3 Technologie de construction**

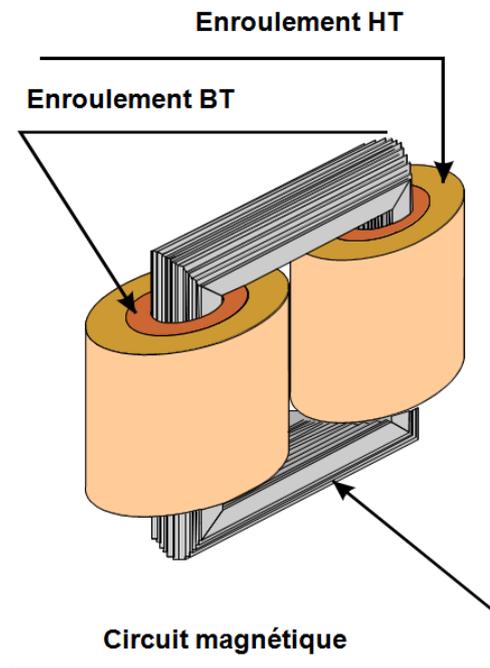
Il existe deux type de transformateurs selon la technologie utilisée pour la réalisation du bobinage. La technologie cuirassée et la technologie colonne appelée en anglais « shell type » et « core type » respectivement.

La technologie dite « cuirassé » consiste à disposer les bobines au centre du circuit magnétique, par contre dans la technologie « colonne », c'est les bobines qui sont disposées autour du circuit magnétique en forme de colonne.

Les figures I.3 et I.4 présentent la disposition du bobinage dans chacune de ces deux technologies.



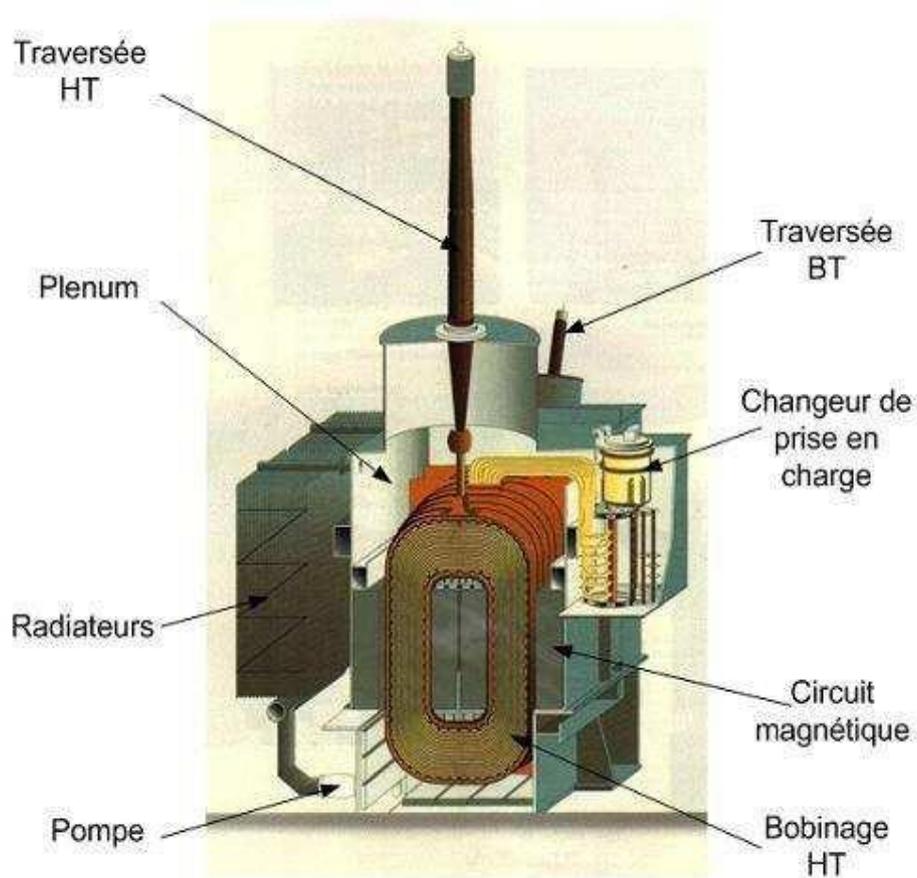
**Figure I.3:** Disposition du bobinage et du circuit magnétique dans un transformateur cuirassé



**Figure I.4 :** Disposition du bobinage et du circuit magnétique dans un transformateur colonne

### I.3.1 Technologie Cuirassé

La technologie Cuirassé est généralement consacrée aux appareils de grande puissance en très haute tension (au-delà de 220 kV et jusqu'à 800 kV) ainsi qu'aux appareils complexes tels que les déphaseurs. C'est une technologie dont la conception est proprement inverse par rapport à celle de la colonne du fait que les enroulements sont en forme de bobines rectangulaires à axe horizontal. Le circuit magnétique de section rectangulaire est constitué de tôles posées à plat. Du fait que la cuve assure le calage du circuit magnétique et les enroulements, ces transformateurs sont utilisés dans des réseaux de transport et de répartition où les sursensions transitoires sont fréquentes.[1]



**Figure I.5.** Vue intérieure d'un transformateur de puissance cuirassé [5].

Vue le procédé de fabrication du cuirassé on relève que les chemins de retour du flux magnétique à travers le circuit magnétique sont externes et entourent les bobinages ainsi que grâce à son excellent arrangement de l'écrantage magnétique, le transformateur cuirassé

correspond particulièrement bien à la fourniture de basse tension et fort courant, comme par exemple dans le cas de transformateurs de fours à arcs.

**Avantage du cuirassé :**

- Une résistance naturelle aux efforts de court-circuit
- Une très grande flexibilité sur les impédances, permettant d'atteindre des valeurs particulièrement faibles
- Une compacité certaine, conduisant à un poids et des dimensions réduits, donc à de moindres contraintes d'encombrement, de transport et de génie civil
- Des besoins en matières premières réduits, notamment en ce qui concerne l'huile, et donc un meilleur respect de l'environnement.[1]

### **I.3.2 Technologie Colonne**

Le transformateur à colonnes est constitué de deux enroulements concentriques par phase. Ces enroulements sont montés sur un noyau ferromagnétique qui se referme à ses extrémités par des culasses généralement de sections circulaires afin d'assurer une bonne canalisation du flux magnétique dans cette technologie, ce sont les enroulements qui entourent le circuit magnétique. Ce sont généralement des appareils haute tension en moyenne puissance (50 à 230 kV, 15 à 200 MVA)

La constitution des enroulements est de spires qui se différencient en nombre selon la haute et la basse tension respectivement primaire/secondaire. Ils sont alors donc divisés en plusieurs brins disposés en parallèle. Le cuivre ou l'aluminium sont principalement les métaux qui forment les conducteurs des enroulements pour les puissances les plus importantes. Ces matériaux sont ainsi préférés à d'autres pour leurs bonnes conductivités thermiques des appareils haute tension en moyenne puissance (50 à 230 kV, 15 à 200 MVA).

Le chemin de retour du flux magnétique passe dans les jambes du circuit magnétique qui est entouré concentriquement par les enroulements principaux, comme sur la figure ci-dessous.[1]

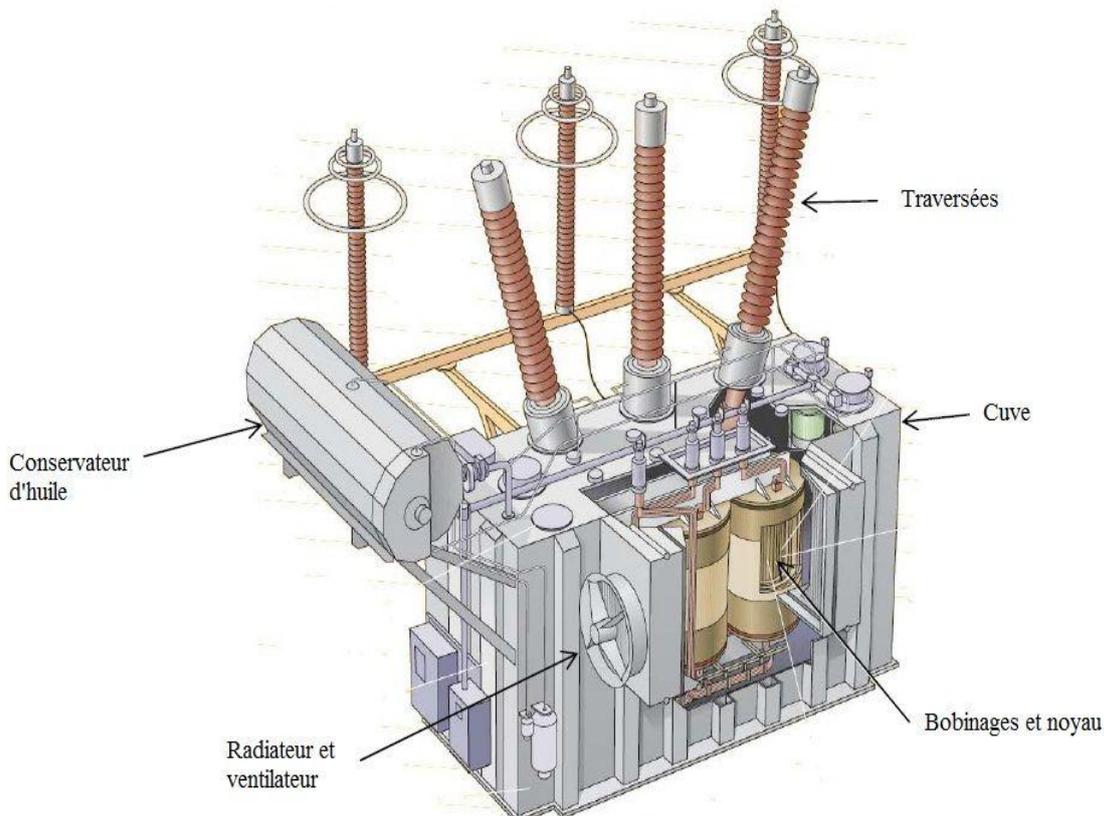


Figure I.6 : Vue intérieure d'un transformateur type colonne. [9].

## I.4 Matériaux isolants dans les transformateurs

On peut classer les matériaux isolants utilisés dans les transformateurs de puissance en deux catégories : les isolants solides et les isolants liquides.[1]

### I.4.1 Isolation liquide

Les liquides isolants sont utilisés comme imprégnant d'isolations très divers : transformateurs (de puissance, de distribution solides ou comme produits de remplissage de matériels électriques de traction, de four, de mesure...), réactances, condensateurs, câbles, traversées, disjoncteurs, changeurs de prise, etc.

Leur rôle principal est d'éliminer l'air et les autres gaz de façon à améliorer la tenue diélectrique de l'isolation (la rigidité diélectrique des liquides est très nettement supérieure à celle des gaz. Cependant, dans beaucoup d'applications, ils servent à la fois à améliorer les propriétés diélectriques et à évacuer la chaleur d'un assemblage, comme dans le cas des transformateurs, par exemple. Les liquides sont également utilisés pour leur pouvoir

extincteur d'arcs électriques (dans les chambres de coupure des commutateurs en charge et de certains disjoncteurs), en raison de leur pouvoir lubrifiant pour les matériels renfermant des pièces en mouvement (sélecteurs de prises, pompes immergées) et, dans certains cas, pour améliorer la résistance au feu (transformateurs de distribution). Cependant, l'utilisation de liquides peut présenter des dangers, liés à leur toxicité ou à celle de leurs produits de dégradation, vis-à-vis des personnes (particulièrement en cas de feu) et vis-à-vis de l'environnement (en cas de fuite).

Les transformateurs dits « immergés » utilisent de l'huile pour l'isolation de la partie active. Il existe différents types et qualités d'huiles (minérales, silicones, ester synthétique, végétale):

Le tableau I-1 rassemble les différents types d'huile qui existent sur le marché ainsi que les principales qualités recherchées pour les transformateurs.

Propriété recherché	Huile minérale	Ester naturel	Ester synthétique	Silicone
Haute résistance diélectrique	oui	oui	oui	oui
Faible viscosité	oui	non	non	non
Point d'écoulement à basse température	oui	non	oui	oui
Faible oxydation	oui	non	oui	oui
Possibilité de raffinage	oui	non	non	non
Risque d'incendie faible	non	oui	oui	oui
Stabilité à l'hydrolyse	oui	non	oui	oui
Solubilité dans l'eau	non	oui	oui	non
Biodégradable en faible quantité	non	oui	oui	non
Prix	bas	moyen	élevé	élevé

**Tableau I-1** : Propriétés des différents types d'huile diélectriques [4]

#### I.4.2 Les isolants solides (papier/carton)

Dans les transformateurs de puissance, l'isolation est constituée du complexe huile/papier. Les défaillances électriques de ces appareils sont dues, généralement, au système d'isolation. Depuis l'utilisation en 1891 des premiers papiers et cartons imprégnés d'huile minérale, l'isolation papier/huile est toujours d'actualité. Le complexe papier/huile semble encore avoir de belles années en perspective principalement dans la filière des transformateurs de puissance haute et très haute tension. Le vieillissement des isolants est le résultat d'une détérioration graduelle due à des réactions physiques et chimiques affectant la tenue

mécanique et diélectrique du système d'isolation. La détérioration du papier est normalement associée à la pyrolyse, à l'oxydation et à l'hydrolyse qui se produisent dans le matériau. Ces réactions entraînent la rupture des macromolécules de cellulose et réduisent le degré de polymérisation moyen. Le papier et du carton e sont des matériaux isolants très économiques, Ayant de surcroît d'excellentes caractéristiques diélectriques. Ils sont constitués de fibres de cellulose, extraites de la pulpe du bois ou des fibres du coton. Selon leur mode de fabrication, ils possèdent des caractéristiques mécaniques et électriques particulières expliquées principalement par la densité, la longueur et la diversité des fibres de cellulose. Les trois constituants principaux du papier kraft sont la cellulose (90%), les hémicelluloses (1.5 à 3%) et les lignines (2 à 4.5%).[1]



**Figure 1.7 :** Carton diélectrique et papier d'isolation des spires de bobine.[6]

## I.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les transformateurs de puissance et leur constitution, principe de fonctionnement ainsi que les types de technologie de construction. On a également présenté les caractéristiques de leur isolants (huile diélectrique, papier carton).

Dans le chapitre suivant, on présentera un des principaux accessoires des transformateurs qui sont les traversées de connexion utilisées pour relier le bobinage du transformateur au réseau électrique.



CHAPITRE

II

## Introduction

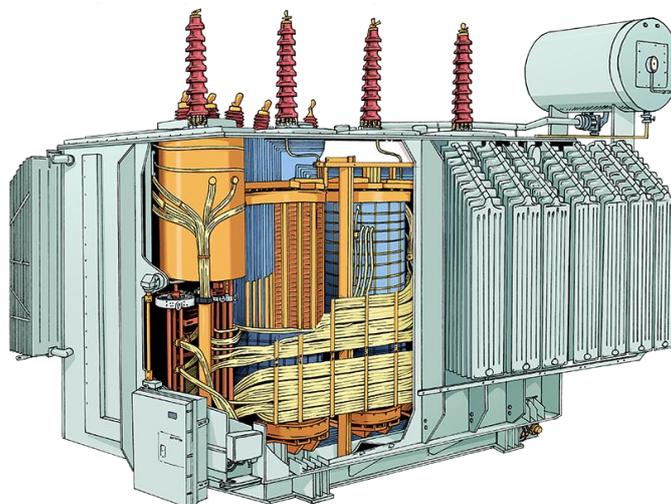
Les traversées de connexion appelées aussi « Bushing » en anglais sont des éléments de connexions électriques considérées comme isolateurs qui assurent les liaisons électriques entre les enroulements et les circuits électriques extérieurs. Les premières traversées furent créées avec les premiers transformateurs en 1890. Les traversées influençant le champ électrique furent inventées en 1908 par Westinghouse. La même année ASEA (actuellement ABB) développa une technologie similaire. La technologie du papier imprégné d'huile date des années 1920, celle du papier imprégné de résine des années 1950. On présentera dans ce chapitre les principales caractéristiques et constituants des traversées de connexion, notamment celles utilisées dans les transformateurs de puissance.

### I.1 Définition et rôle des traversées

Une traversée de transformateur est une structure isolante qui facilite le passage d'un conducteur transportant du courant à travers la cuve du transformateur.

Les traversées ont pour but d'assurer la liaison électrique entre les extrémités des enroulements primaire et secondaire, d'une part, et les lignes d'arrivée et de départ (du réseau électrique) d'autre part à travers le couvercle ; d'où le nom de traversées. Elles permettent ainsi de lier les enroulements du transformateur aux lignes électriques sans risque de décharge électrique entre les phases et la cuve du transformateur qui est à la terre.

Leurs fonctions sont principalement : l'isolement de la connexion par rapport à la cuve, la résistance aux efforts mécaniques, une bonne répartition du champ électrique et une fixation étanche et robuste sur le couvercle.



**Figure II.1 :** Vue intérieure d'un transformateur électrique.

Les traversées peuvent être classées en trois types selon le milieu dans lequel sont placées leurs deux extrémités (Figure II.2) :

➤ Type Huile/Air :

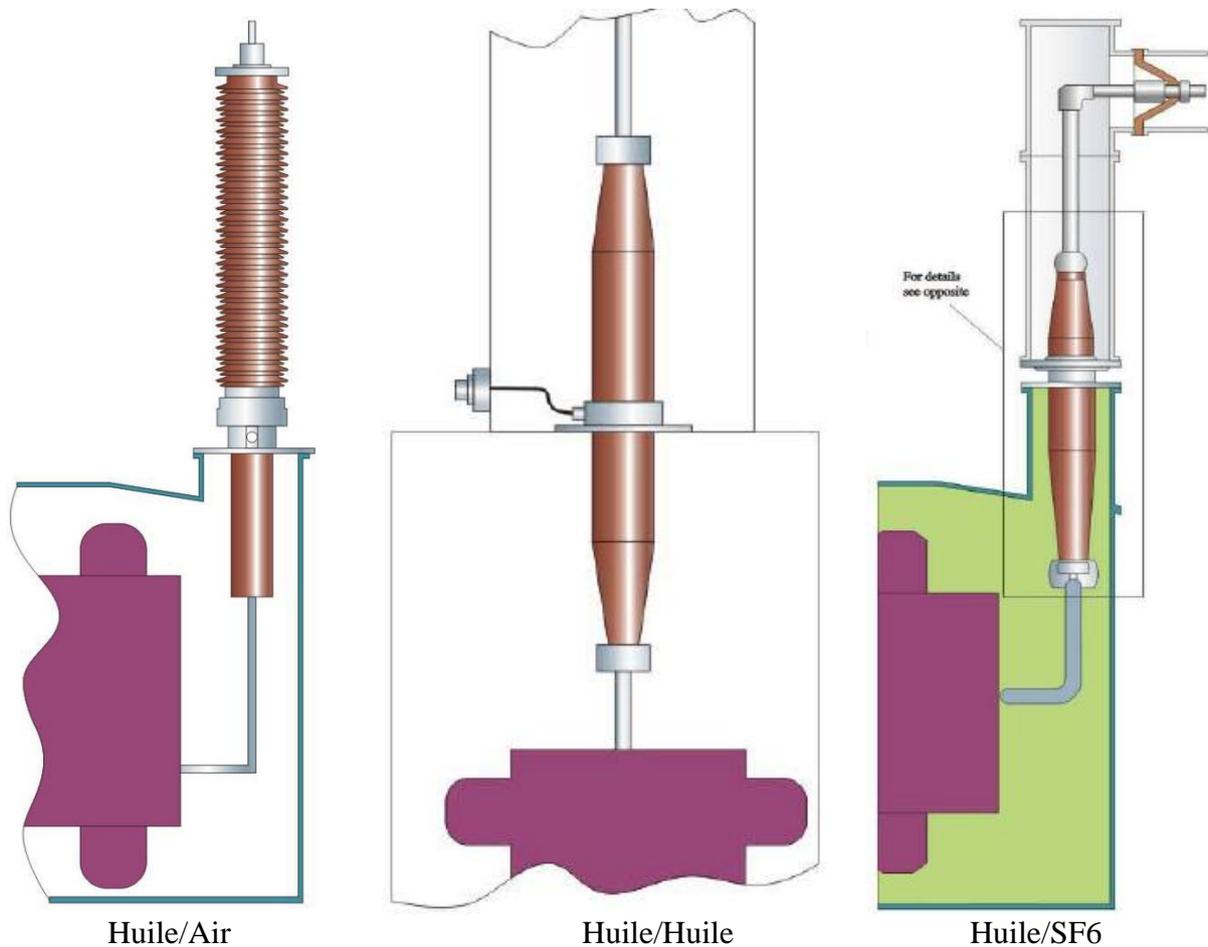
C'est les traversées les plus connues. La partie intérieure de la traversée est immergée dans l'huile du transformateur. La partie extérieure se trouve dans l'air.

➤ Type Huile/Huile :

La partie intérieure de la traversée est immergée dans l'huile du transformateur. La partie extérieure se trouve dans l'huile d'une autre conduite cylindrique.

➤ Type Huile/SF<sub>6</sub> :

La partie intérieure de la traversée est immergée dans l'huile du transformateur. La partie extérieure se trouve dans un caisson rempli de gaz isolant, généralement du SF<sub>6</sub>



**Figure II.2** : Différents types de traversées de connexion

## II.2. Construction

Les deux types de construction de traversées sont solides ou en pièces à répartition capacitive (ce type est parfois appelé condensateur). Les traversées utilisées pour des enroulements basse tension sont souvent de type solide avec un isolant en porcelaine ou polyépoxyde. Les traversées à répartition capacitive, destinées à des niveaux de tension plus élevés, sont utilisées pour les enroulements de transformateurs à haute tension.

### II.2. 1 Construction solide

Ces traversées sont en général réservées pour des tensions de service inférieure ou égale à 36kV. Elles sont constituées par un isolateur exécuté en porcelaine d'une seule pièce qui reçoit en son axe une tige métallique en cuivre ou en aluminium, aux extrémités de laquelle peuvent être brasées ou serties. Dans les traversées de type solide, l'huile minérale électrique est souvent utilisée entre le conducteur et l'isolant, qui peut être contenue dans la traversée ou partagée avec le transformateur.

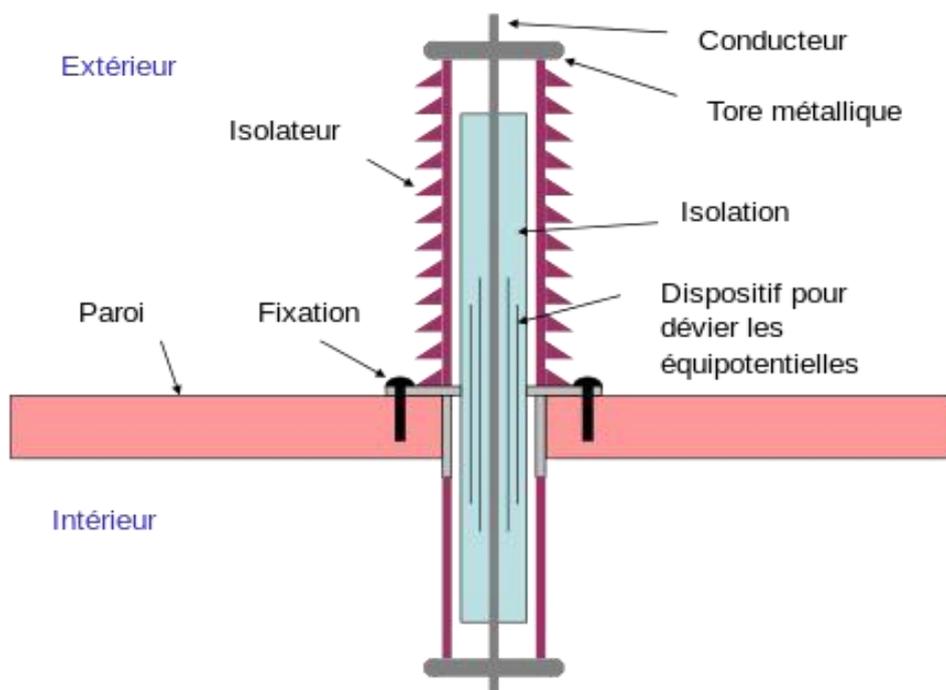


**Figure II.3 :** Traversée en construction de type solide

## II.2. 2 Construction à répartition capacitive

Ces les traversées les plus répandues et sont en général réservées pour des tensions de service supérieures à 36kV. A l'inverse d'une construction solide, dans une traversée à répartition capacitive, des couches conductrices sont insérées à des intervalles radiales prédéterminées avec l'isolation qui sépare le centre conducteur de l'isolation de la traversée. Ces insertions de conducteurs créent des éléments capacitifs qui lient le centre de la traversée au sol. Leur but est de contrôler le champ de tension autour du centre conducteur pour que la tension soit distribuée plus uniformément à travers le système d'isolation de la traversée.

L'isolation typiquement utilisée dans une traversée à répartition capacitive est du papier imprégné d'huile ou de papier et du papier enduit de résine. Les traversées à répartition capacitive utilisent aussi de l'huile minérale, souvent contenue dans la traversée.



**Figure II.4:** Schéma de principe d'une traversée de connexion à répartition capacitive[8]

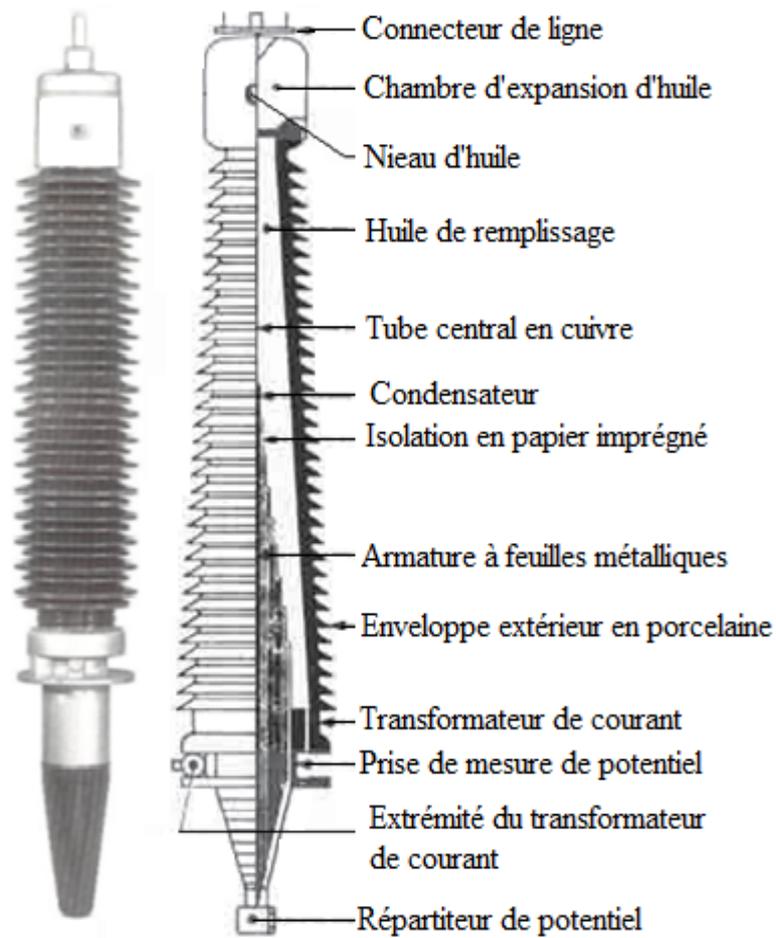


Figure II.5 : Demi-coupe d'une traversée à condensateur.



Figure II.6: Réalisation du corps condensateur d'une traversée [ 12].

Ces traversées sont alors dites de type condensateur (figure II.4). Elles se composent d'un tube central en cuivre, sur lequel sont enroulées des couches de papier avec interposition de couches métallisées constituant les armatures d'un condensateur. Ce système d'armatures coaxiales répartit convenablement la tension appliquée entre le tube support et la bride de fixation, reliée à la masse, frettée sur le corps isolant. L'ensemble est appelé fuseau isolant. La partie de ce fuseau, extérieur à la cuve du transformateur, est placée dans une porcelaine, constituée d'une seule pièce ou de plusieurs éléments assemblés et remplie d'huile.

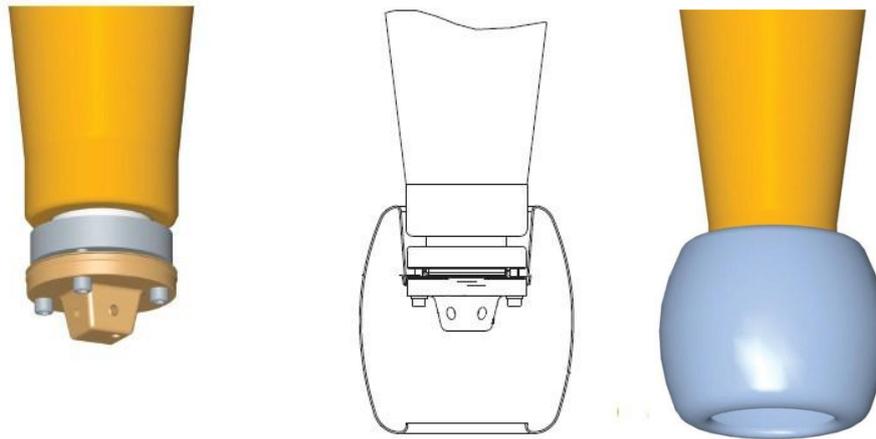
Le profil extérieur des ailettes et la longueur de la porcelaine dépendent, pour une tension donnée, des lignes de fuites imposées par les conditions d'altitude et de pollution atmosphérique du site d'implantation.

La traversée est à huile indépendante, la qualité d'huile étant d'ailleurs le plus souvent différente de celle du transformateur. La tête de la traversée constitue en général une chambre d'expansion d'huile, le pied de la traversée est le plus souvent équipé d'un répartiteur de potentiel, dont la forme peut également dépendre de l'implantation de la traversée dans le transformateur.

Enfin, ces traversées à condensateur sont, de très haute tension, équipées de prises de tension capacitatives qui permettent, notamment en usine, de faire dans de bonnes conditions la mesure du niveau de décharges partielles du transformateur et, sur le site, de vérifier le bon état de la traversée.

### **II. 3. Répartiteur de champ électrique**

Au niveau de l'extrémité intérieure de la traversée, on trouve un répartiteur de champ électrique qui est appelé dans le jargon industriel (le ballon). Ce répartiteur de champ électrique est généralement fabriqué en métal (aluminium) qui est recouvert d'une peinture époxy isolante ou bien d'une couche de carton comprimé d'une épaisseur très mince (environ 3mm). Le champ électrique peut être très élevé au niveau de la connexion intérieure entre la borne de traversée et les câbles du bobinage. Il peut provoquer un claquage entre la borne de connexion de traversée et la cuve du transformateur à la masse. Ceci à cause des aspérités de boulons au niveau de la connexion entre la borne et le bobinage électrique et qui favorisent le renforcement du champ électrique par effet de pointe. Donc on peut dire que le rôle du ballon ou répartiteur de champ électrique est de cacher les aspérités de la plage de connexion et ses boulons et d'assurer l'uniformité des lignes du champ électrique [1].



**Figure II.7 :** Répartiteur de champ électrique à l'extrémité de la traversée[1]

## II.4 Technologie pour l'isolation des traversées

Ils existent principalement trois technologies les traversées en papier imprégné d'huile (OIP), les traversées en papier enduit de résine (RBP) et les traversées en papier imprégné de résine (RIP). Par ailleurs, les traversées peuvent être conçues pour être installées en plein air, ou en intérieur. Dans les trois cas, un faible niveau de décharges partielles caractérise une bonne isolation.[8]

### II.4.1. En papier imprégné d'huile OIP

C'est la technologie historique, une bande de papier et des feuilles d'aluminium sont enroulées alternativement autour du conducteur avec une épaisseur différente. Les feuilles d'aluminium forment les conducteurs des capacités, les feuilles de papier l'isolant. Par la suite, le papier est imprégné d'huile, c'est-à-dire chauffé sous vide dans un bain d'huile, ainsi, les bulles d'air dans le papier sont chassées et remplacées par de l'huile qui a une forte rigidité diélectrique.

OIP est un terme utilisé pour les traversées qui utilisent du papier kraft ordinaire et dont le noyau du condensateur est saturé avec de l'huile minérale de qualité transformateur. Les traversées OIP peuvent également avoir des isolateurs supérieur et inférieur en d'autres types de matériaux tels que des enveloppes en époxy ou en fibres avec des polymères. La majorité des traversées OIP ont de la porcelaine comme isolateurs. [6]



**Figure II.8 :** Traversée de type OIP [13]

#### **II.4.2. En papier enduit de résine RBP**

RBP est un terme utilisé pour désigner une traversée constituée d'un papier kraft ordinaire enduit de résine, qui a été utilisée par Westinghouse sur des traversées à partir de 1941 de 15kV à 69 kV. Dans cette technologie, le conducteur est enrobé dans d'un mélange de phénoplaste et de papier. Leur haut niveau de décharges partielles les restreint aux basses tensions. Le papier était enroulé sur le conducteur de la traversée tandis que l'enrouleuse appliquait de la chaleur à la résine pour l'activer et le coller ensemble. Des feuilles d'aluminium étaient utilisées pour créer les couches de gradation de tension du noyau du condensateur. Une fois le bobinage terminé, la traversée était usinée sur un tour, puis le corps du condensateur était plongé dans un vernis et durci au four. Ce type de condensateur ne contenait que du papier sec. L'extrémité inférieure de la traversée contenant l'huile ne comportait pas d'isolant en porcelaine. Un isolant en porcelaine n'est utilisé que dans le côté air de la traversé. [7]

#### **II.4.3. En papier imprégné de résine RIP**

C'est la technologie dominante de nos jours. Elle utilise de l'époxy en lieu et place de l'huile pour l'imprégnation du papier, on chauffe sous vide l'ensemble de la même façon que dans la technologie OIP. De ce fait l'isolation est solide contrairement à l'isolation liquide OIP. L'avantage de cette technologie est tout d'abord l'absence d'huile ; les risques de fuite, de

pollution et d'incendie sont donc éliminés. La traversée est alors totalement étanche ce qui évite que l'humidité n'entre.



**Figure II.9 :** Traversée de type RIP [15]

La technologie du condenseur est relativement récente mais en général, on a commencé à passer de la technologie du condenseur OIP à la technologie RIP à partir de 1980. La technologie RIP utilise un papier dans le noyau du condenseur, qui est enroulé avec des feuilles d'aluminium pour répartir la tension. Une fois que le noyau de papier est enroulé pour fabriquer le condenseur, il est inséré dans un cylindre en métal dans lequel le cylindre est complètement rempli de résine époxy sous vide. Ce processus crée un corps de noyau de condenseur sans vide qui devient complètement solide une fois le processus de durcissement terminé. Le corps du condenseur est ensuite usiné à ses dimensions finales et équipé d'une bride de montage. La traversée de noyau RIP peut utiliser un isolant supérieur en porcelaine ou un isolant en silicone à enveloppe en fibre enroulée ou le silicium appliqué directement sur le condenseur. Bien que le corps du condenseur RIP soit sans vide et sans décharge partielle pendant le service, le corps du condenseur situé à l'extrémité inférieure est exposé et doit être stocké correctement pour ne pas absorber d'humidité. [7]

**II.4.4 Résine Synthétique Imprégnée (RIS) :**

La dernière technologie de notre industrie est très similaire à la technologie RIP, à l'exception du matériau isolant utilisé pour abriter les gradients de tension de la feuille d'aluminium. Le noyau du condenseur RIS utilise un maillage synthétique au lieu du papier pour permettre la pénétration de la résine et devenir un corps de condenseur totalement vide et totalement encapsulé sans décharge partielle. Le synthétique est la réponse au problème de stockage RIP car le corps synthétique est plus tolérant lorsqu'il est soumis à l'humidité. Les traversées de type RIP ont le papier exposé lorsque l'usinage du corps du condenseur est terminé. Les traversées RIS sont plus souples pour le stockage car le corps du condenseur est totalement encapsulé avec de la résine époxy et il n'existe aucun processus d'usinage permettant de dégager l'isolation du corps du noyau du condenseur. Les traversées RIS n'ont pas d'isolant inférieur et l'isolant côté air de l'extrémité supérieure est en silicone extrudé ou moulé directement sur le noyau du condenseur RIS.[7]



**Figure II.10 :** modèle d'une traversée RIS [14]

### II.4.5 Isolation supplémentaire

Pour les traversées de très haute tension, l'isolation influençant le champ est beaucoup plus courte que la longueur totale de l'isolateur, pour isoler l'espace entre cet isolateur et le conducteur on utilise en général du SF6 sous pression à la place de l'air. Dans d'autres variantes, le SF6 est confiné à la partie proche de la fixation. Auparavant ce rôle était souvent joué par de l'huile minérale. Cependant celle-ci a le défaut de pouvoir s'enflammer ou de fuir.[8]

### II.5 Défaillance des traversées

Les défaillances de traversées se produisent par deux modes importants qui sont : l'entrée de l'eau libre provoquant en l'occurrence l'ionisation critique à la partie inférieure de la traversée. Le vieillissement du système papier-huile, avec l'augmentation excessive des pertes diélectriques, ce qui conduira à l'instabilité thermique. Cependant, la traversée du côté HT reste l'un des composants du transformateur le plus sensible, responsable de plus de 30% de défaillance sur le transformateur. Les défaillances des traversées sont donc souvent considérées comme la première cause des défauts de transformateurs, l'état des traversées est donc d'une grande importance pour les transformateurs. Les défaillances classiques des traversées sont l'entrée d'humidité, le foudroiement, le court-circuit des couches de répartition capacitive, une mauvaise utilisation de la traversée, du soufre corrosif, une mauvaise connexion entre l'enveloppe du sol et la bride, et une mauvaise connexion des prises. Les tests électriques suivants fournissent des informations sur l'état des traversées. [6]



**Figure II.11** : Prise de mesure de capacité et tan delta

➤ **Tan delta / Facteur de perte / Capacité**

Les tests Tan delta, facteur de perte évaluent l'état du système d'isolation de la traversée. Les tests C1 et C2 doivent être réalisés sur une traversée à répartition capacitive. Un test C1 vérifie l'état de l'isolation principale de la traversée, alors que le C2 est utilisé pour vérifier l'isolation des sections de prise de la traversée et l'enveloppe périphérique du noyau et les matériaux de remplissage extérieurs. Souvent, C2 sert à détecter une arrivée d'humidité ou d'autres contaminants qui s'accumulent autour de la bride du fait d'un joint de prise défectueux par exemple.[11]

Une hausse de la capacité C1 peut ainsi indiquer un court-circuit des couches de répartition capacitive, un diagnostic qui implique le remplacement immédiat de la traversée.[11]

➤ **Différence de facteur de perte / tan delta**

Ce test vérifie que le facteur de perte évolue en fonction de la tension. Il peut être utile pour détecter des connexions défectueuses ou localiser des défauts et peut également détecter des conséquences du vieillissement lorsqu'il est combiné au DFR. [11]

➤ **Facteur de perte à fréquence variable**

Ce test collecte les mesures du facteur de perte opérées à travers diverses fréquences incluses dans une mesure DFR (ex. 15Hz – 500 Hz). Les contaminants conducteurs sont facilement repérables à basse fréquence (15 Hz et moins) alors que des problèmes tels qu'un desserrement du terminal et une décharge partielle seront détectés à des plus hautes fréquences (500 Hz). Dans un diagnostic de traversée, une grande dépendance avec la température est un indicateur fort de détérioration de l'isolation de la traversée. Comparer cette dépendance avec les données de correction de température du fabricant de la traversée indiquera si la traversée est bonne ou non. Des mesures DFR peuvent également être utilisées pour évaluer l'humidité dans les traversées.[11]

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, on a présenté les différents types de traversées ainsi que les principales technologies de leur réalisation. Ils sont considérés comme pièces accessoires dans les transformateurs mais relèvent d'une grande importance dans son bon fonctionnement. Le chapitre suivant présentera différents modèles d'une traversée HT qui sera simulée par éléments finis afin d'évaluer les contraintes électriques.



**CHAPITRE**

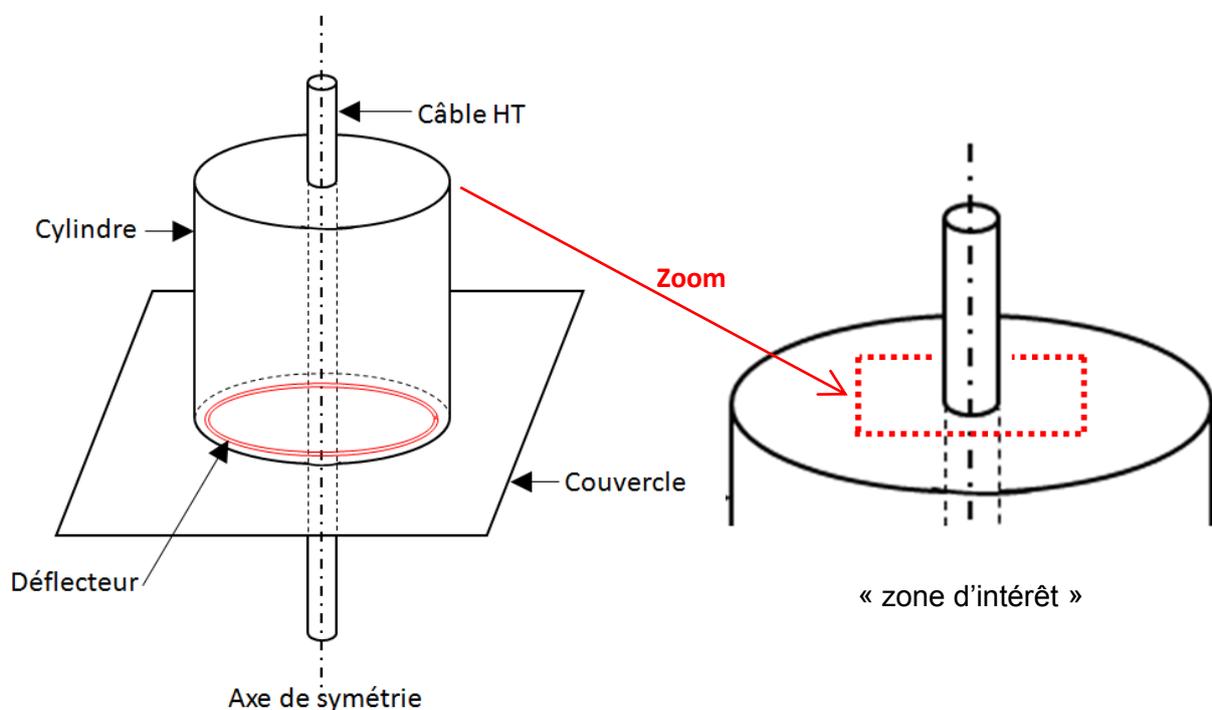
**III**

## Introduction

La traversée a pour rôle de relier électriquement l'intérieur du transformateur (bobinage immergé dans l'huile) avec l'extérieur du transformateur (lignes électriques aériennes). Notre travail consiste à présenter la problématique posée par un tel passage entre deux milieux différents (huile/air) où un conducteur haute tension passe à travers une paroi métallique reliée à la masse (le couvercle du transformateur).

Dans ce chapitre, on va présenter les différents modèles de simulation considérés dans notre étude. Il s'agit d'une vue en axisymétrie représentant un exemple théorique dans lequel, un câble HT (420kV) passerait à travers un cylindre ( $\phi = 1$  mètre) placé sur le couvercle d'un transformateur. La zone de jonction (ou de soudure) du cylindre avec le couvercle crée une arête (angle droit) qui peut accentuer le champ électrique dans l'huile. Pour réduire cet effet de pointe, on place un répartiteur de champ électrique qu'on appellera par la suite « déflecteur ». Ce déflecteur se présente sous la forme d'un tube fermé sur lui-même (tel un anneau) qui est placé en vis-à-vis de l'arête pour la « cacher ».

Dans notre étude, on s'intéresse uniquement à ce qui se passe au niveau de la zone indiquée dans la figure III-1, notée « zone d'intérêt ».



**Figure III.1:** Vue globale du modèle étudié « sans traversée » [3].

Quatre principaux cas ont été traités dans ce travail :

D'abord une configuration « sans traversée », purement théorique dans laquelle seul un câble électrique est utilisé pour relier l'intérieur à l'extérieur du transformateur afin de mettre en évidence la problématique d'un tel cas.

Les autres configurations ; « avec traversée » dans lesquelles le câble sera remplacé progressivement par un dispositif qui sera complété au fur et à mesure avec une traversée complète telle qu'on la connaît en pratique.

### III.1 Présentation du logiciel Flux 2D

Flux2D est un logiciel de simulation numérique détenu par la société française CEDRAT dont sa conception ( par le biais des éléments finis) est de calculer des états magnétiques, électriques ou thermiques des dispositifs en régimes permanents, transitoires et harmoniques, puisqu'il est doté des fonctionnalités d'analyse multiparamétriques étendues, les couplage circuit et cinématique. Ce qui nécessite la résolution de diverses équations : équations de maxwell, de la chaleur, loi de comportement des matériaux.

La figure III.2 montre un schéma de principe adopté dans le logiciel Flux 2D et les différentes étapes à suivre pour les études de simulation.

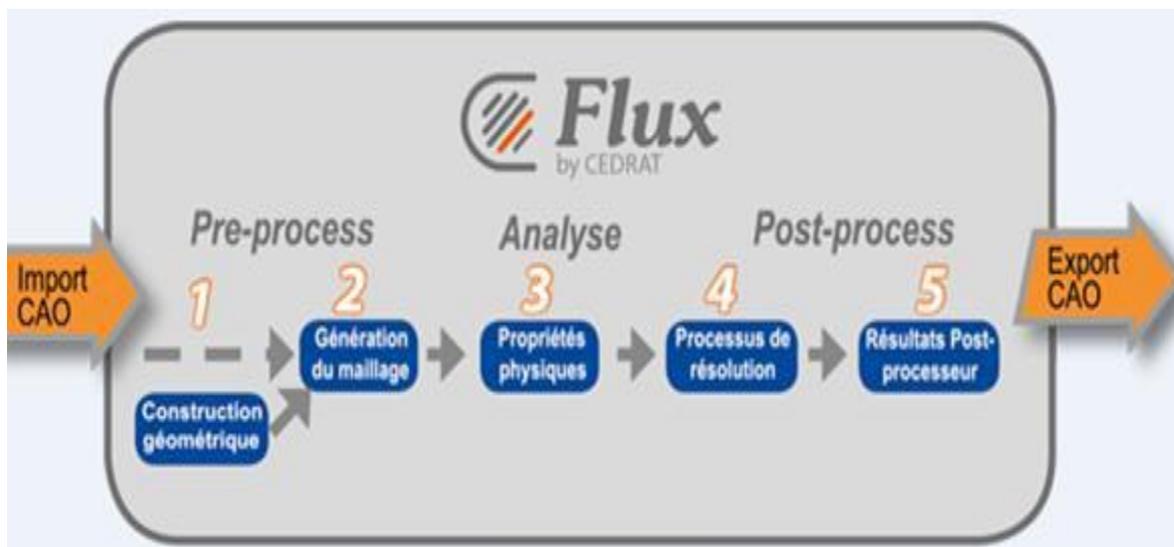
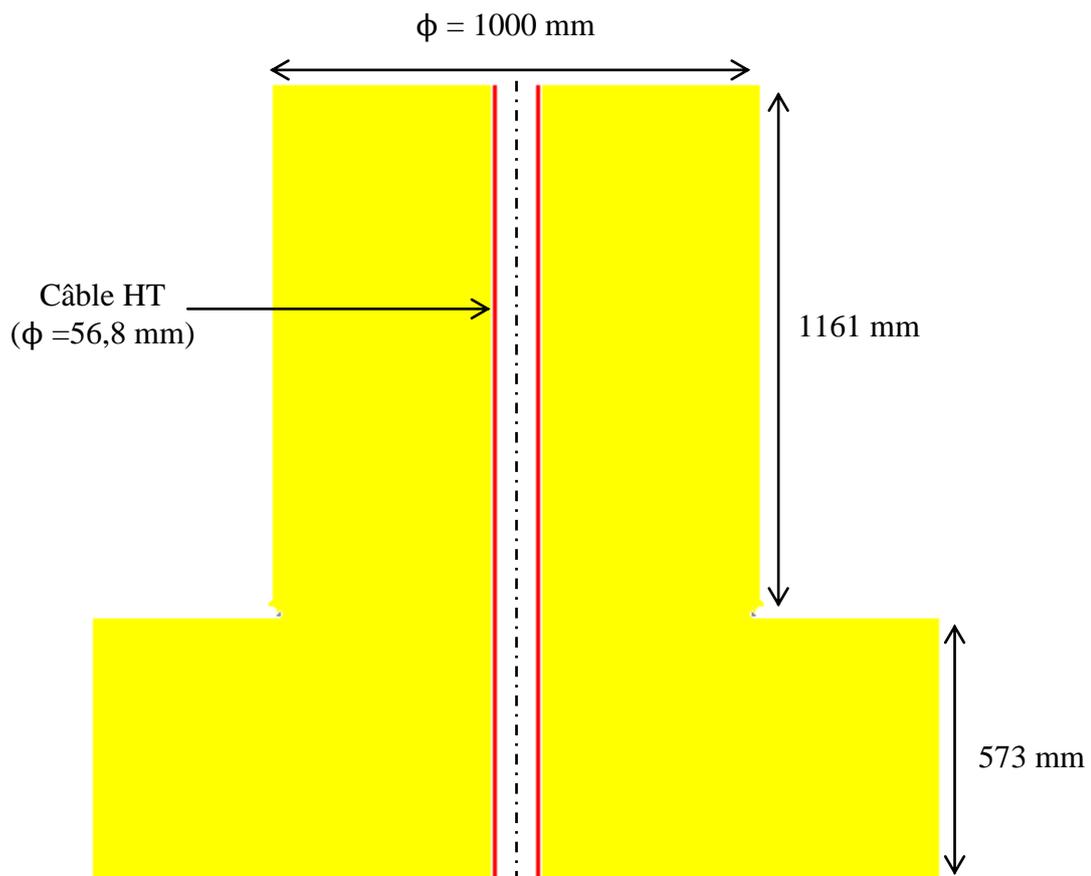


Figure III.2: Les étapes du processus de simulation

### III.2 Modèle « sans traversée »

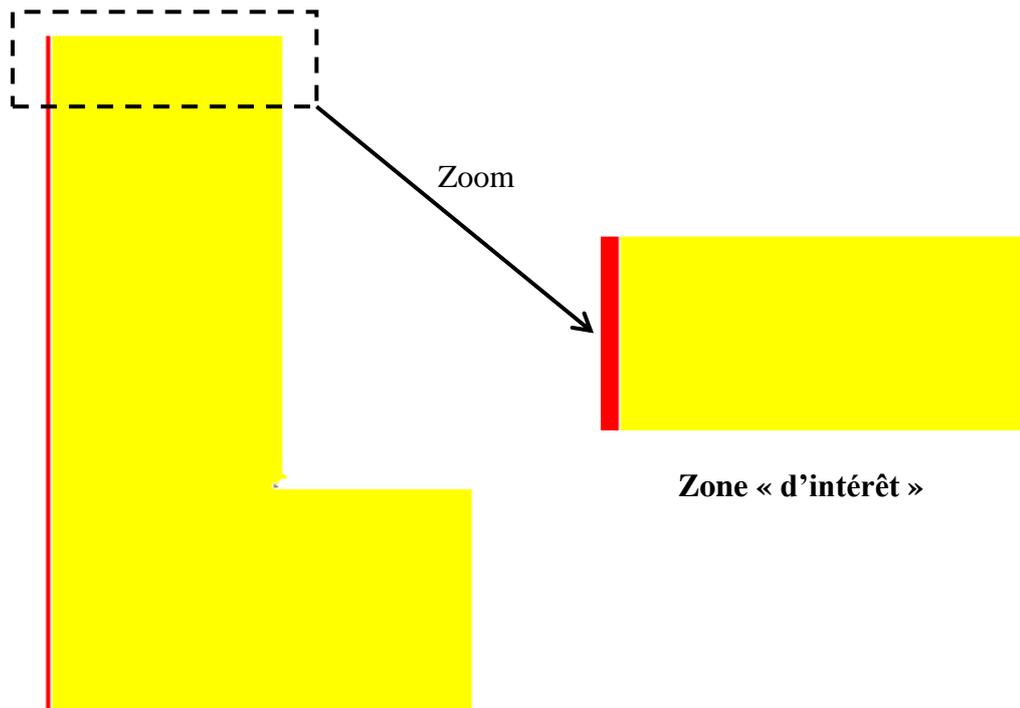
Dans cette configuration (purement théorique), un câble électrique est utilisé pour relier l'intérieur à l'extérieur du transformateur. Le diamètre de ce câble est de 56,8mm et est constitué d'un conducteur en cuivre de 32,8mm de diamètre, isolé avec une épaisseur de 12mm de papier isolant. Le modèle utilisé montre uniquement la partie intérieure du transformateur. La figure III.3 présente une vue en coupe de la vue globale présentée précédemment dans la figure III.1



**Figure III.3:** Coupe verticale pour le cas « sans traversée »

#### III.2.1 Géométrie du modèle

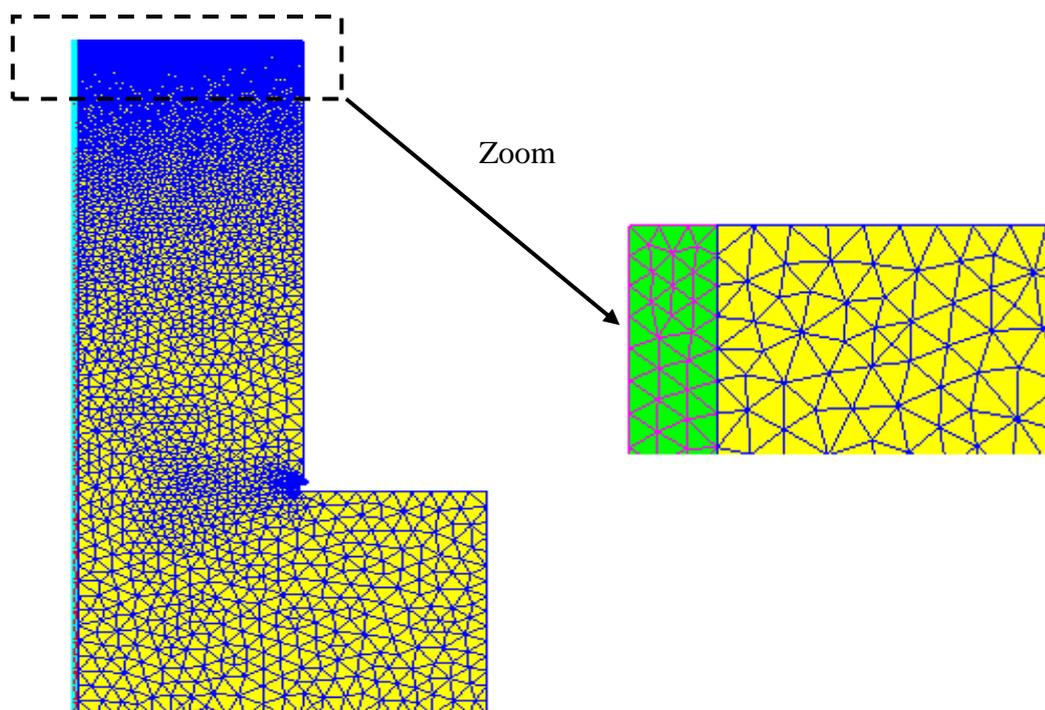
La géométrie du modèle étant symétrique par rapport à l'axe central du cylindre, notre étude peut se résoudre à l'utilisation d'une demi-vue comme indiqué dans la figure III.4. La figure montre aussi un agrandissement (zoom) de la zone qui nous intéresse qui se trouve en haut du cylindre.



**Figure III 4:** Géométrie du modèle étudié avec un zoom sur la zone d'intérêt.

### III.2.2 Maillage

La figure ci- dessous montre le maillage réalisé sur géométrie du modèle. La zone la plus intéressante pour nos calculs a été maillée assez finement afin d'avoir des résultats plus précis. Cette zone se trouve en bas de la traversée au niveau de la plage de connexion comme le montre la figure III.5.



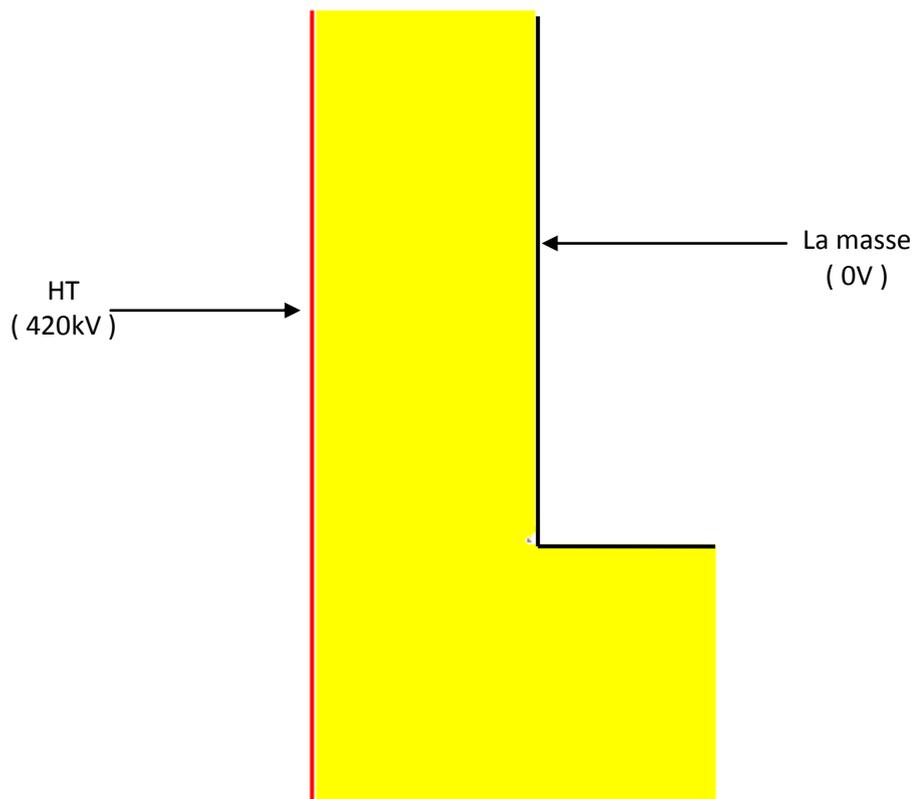
**Figure III 5:** Vue sur le maillage global de la géométrie du câble

### III.2.3 Paramètres physiques

La figure III.6 montre la dernière étape avant la résolution du modèle. Elle consiste à affecter des matériaux aux différentes zones du modèle, appelées dans flux « régions surfaciques » et des potentiels aux différentes lignes de la géométrie, appelées dans flux « régions linéiques » (HT en rouge, la masse en noir). La permittivité relative des matériaux utilisés est présentée dans le tableau III.1.

Matériau	Permittivité relative
Huile du transformateur	2.2
Papier huilé (Papier d'isolation du câble)	4.5

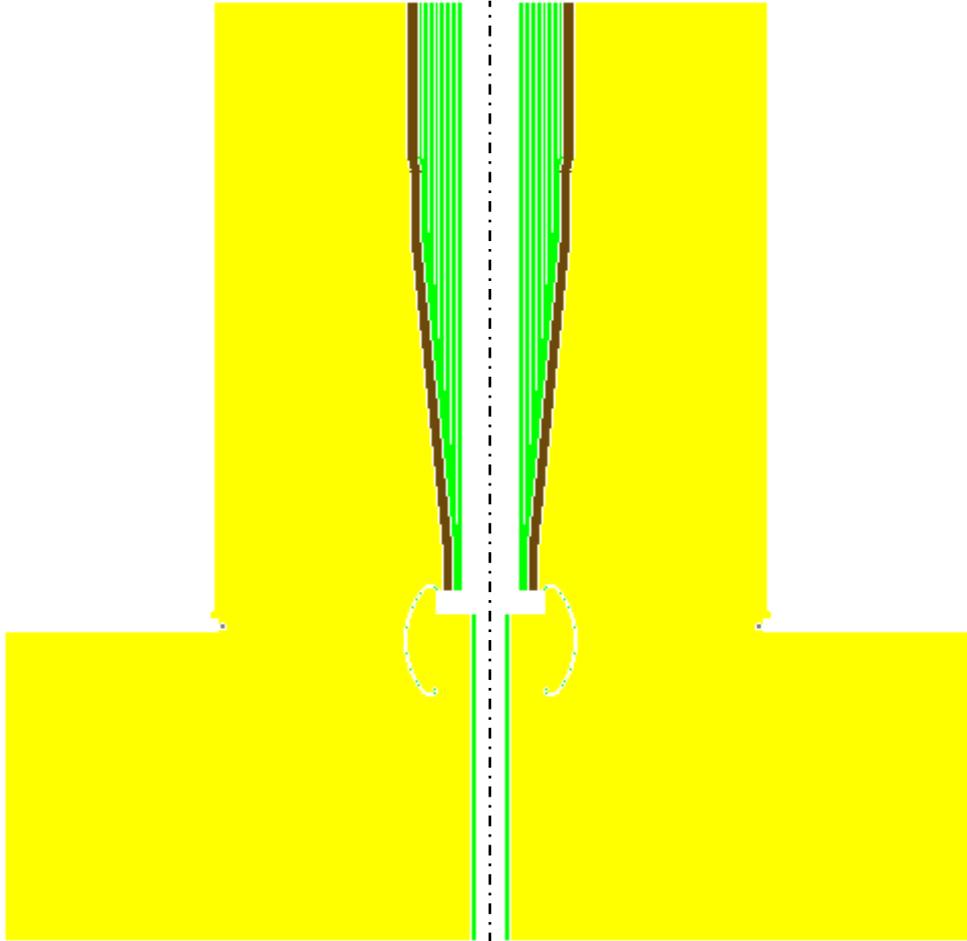
**Tableau III.1:** Matériaux affectés aux faces du model (régions surfaciques).



**Figure III.6:** Matériaux affectés aux régions surfaciques sans traversée

### III.3 Modèle avec partie intérieur de la traversée

Dans cette configuration, on remplace le câble HT (présenté précédemment dans la figure III.4) par la partie intérieure de la traversée immergée dans l'huile du transformateur. La figure III.7 présente une coupe 2D de ce modèle.

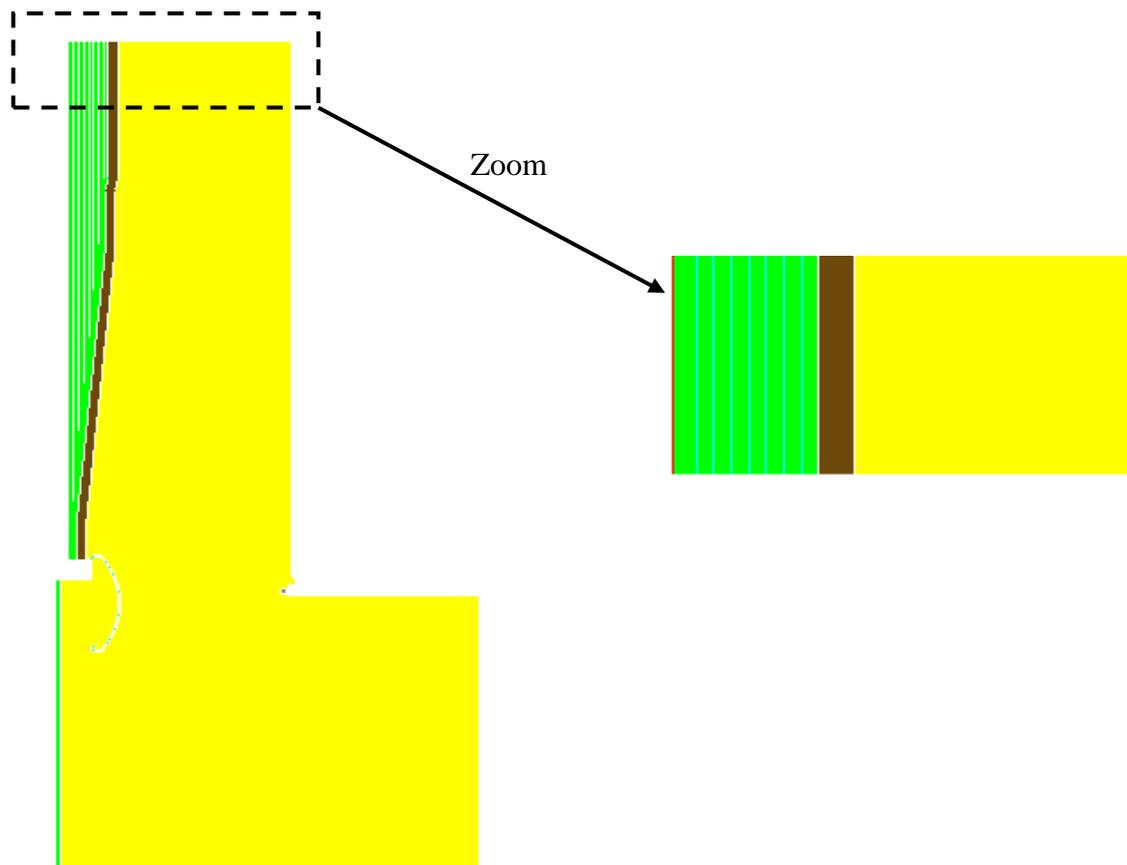


**Figure III-7:** Coupe 2D pour le cas « avec traversée » (partie intérieur).

#### III.3.1 Géométrie du modèle

La géométrie du modèle étant symétrique par rapport à l'axe central de la traversée, notre étude peut se résoudre à l'utilisation d'une demi-vue comme indiqué dans la (figure III.8).

La figure montre aussi un agrandissement (zoom) de la zone qui nous intéresse qui se trouve en haut du cylindre.



**Figure III 8:** Géométrie du modèle étudié (cas « avec traversée » partie intérieur).

### III. 3.2 Maillage

La figure III.9 présente le maillage réalisé sur la coupe droite de la traversée. Comme pour le premier cas, la zone la plus intéressante présente un maillage plus fin pour obtenir résultats plus précis de nos calculs.

### III.3.3 Paramètres physiques

Pour compléter la résolution du modèle, on affecte des matériaux aux différentes faces du modèle (régions surfaciques) et des potentiels aux régions linéiques. La permittivité relative des matériaux utilisés est présentée dans le tableau III.2

Partie du modèle	Matériau	Permittivité relative
Enveloppe de la traversée	Epoxy	6
Huile du transformateur	Huile	2.2
Huile de traversée	Huile	3.4
Isolation du câble	Papier huilé	4.5

**Tableau III.2:** Matériaux utilisées dans le cas « avec traversée - partie intérieur ».

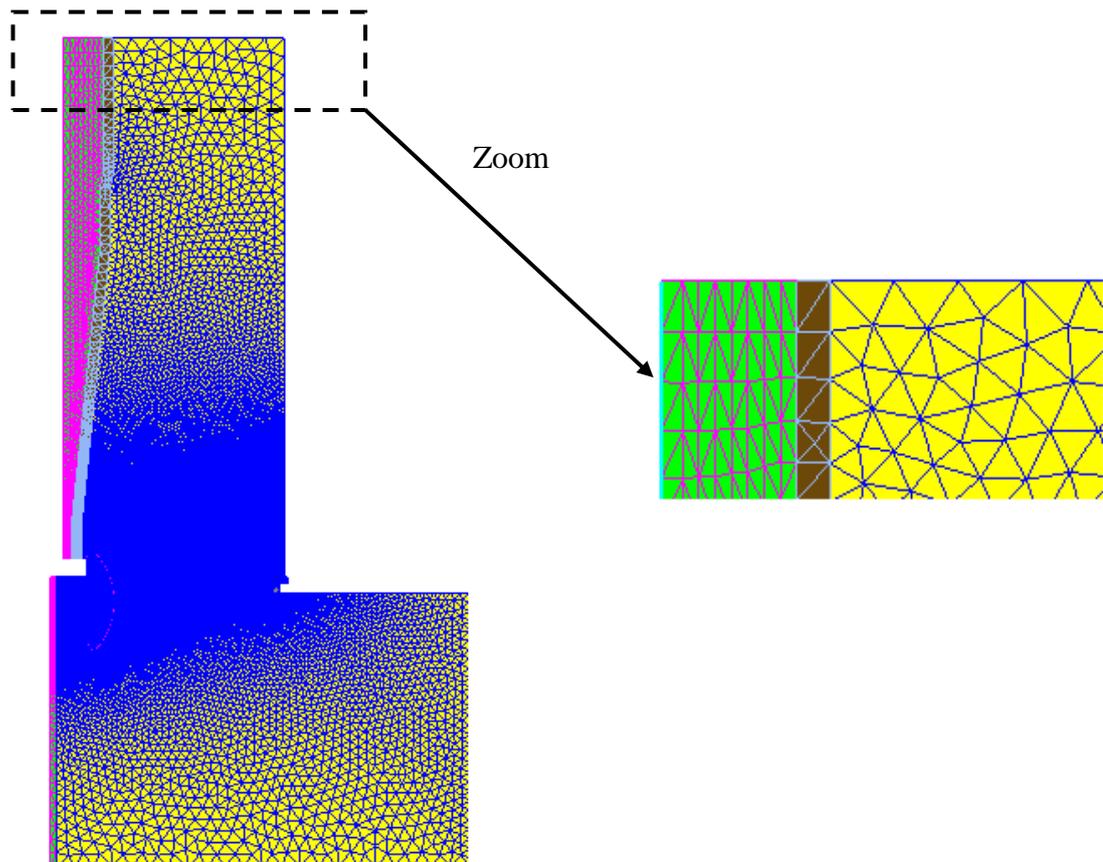


Figure III.9 : Maillage global de la géométrie et zoom sur la zone d'intérêt.

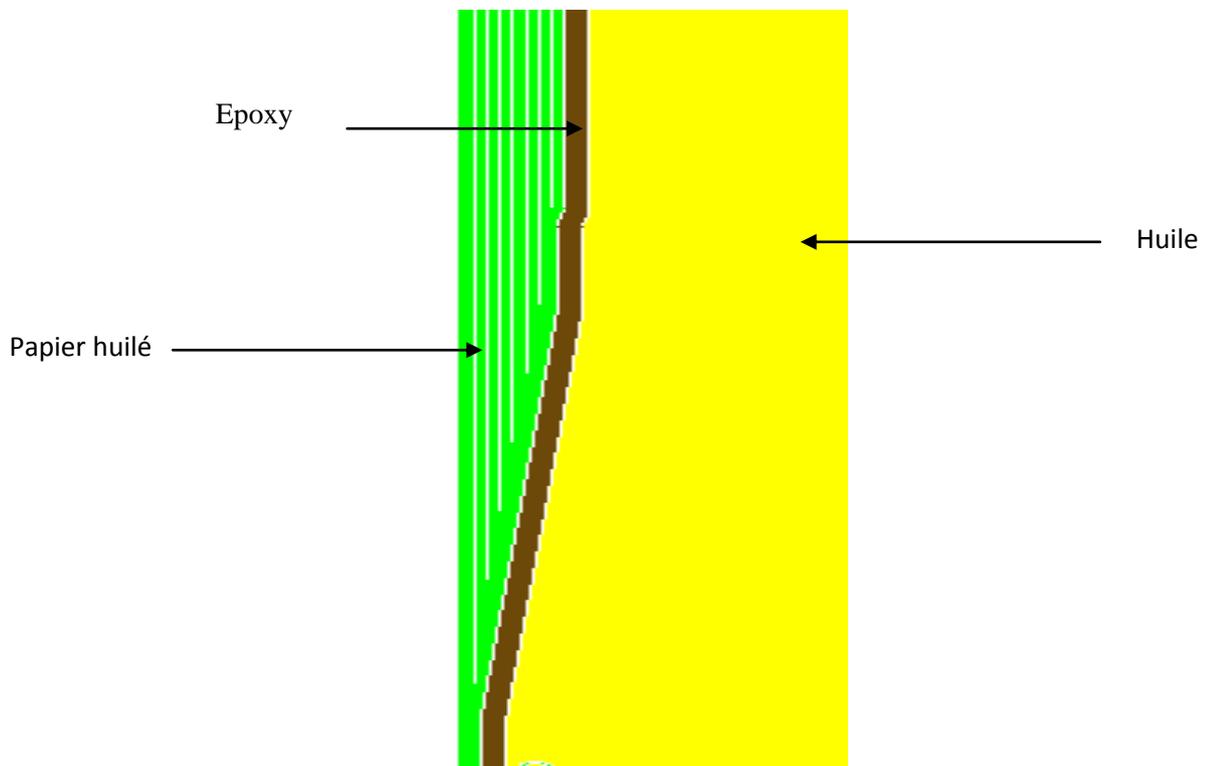


Figure III.10: Matériaux affectés aux régions superficielles avec traversée (partie intérieure)

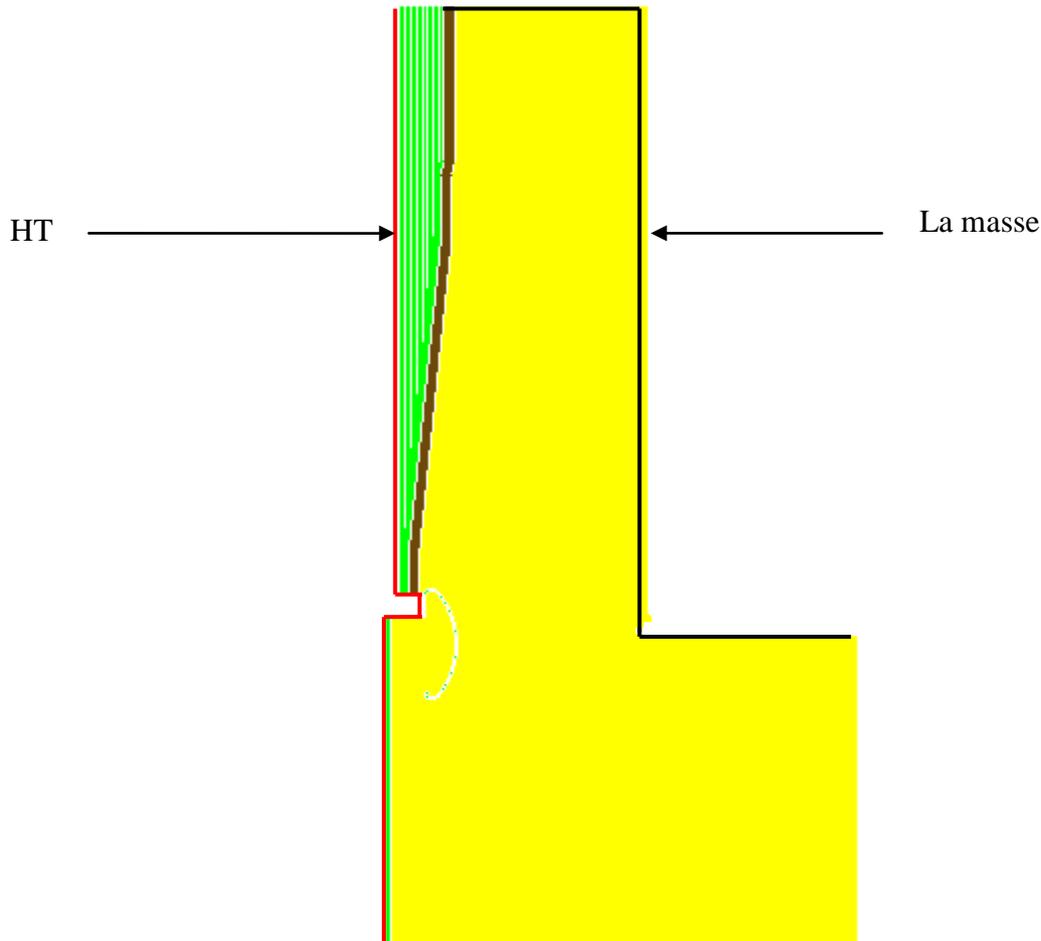


Figure III.11 : Potentiels affectés aux régions linéiques (la HT et la masse)

### III.4 Modèle avec traversée (partie intérieur + partie extérieur)

Dans cette configuration, on complète le modèle précédant en rajoutant la partie extérieure dans l'air et le corps condensateur de la traversée est prolongé à l'extérieur du cylindre. La figure III.7 présente une coupe 2D de ce modèle.

#### III.4.1 Géométrie du modèle

La géométrie du modèle étant symétrique par rapport à l'axe central de la traversée, notre étude peut se résoudre à l'utilisation d'une demi-vue comme indiqué dans la figure III.12. La figure montre aussi un agrandissement (zoom) de la zone qui nous intéresse qui se trouve en haut du cylindre.

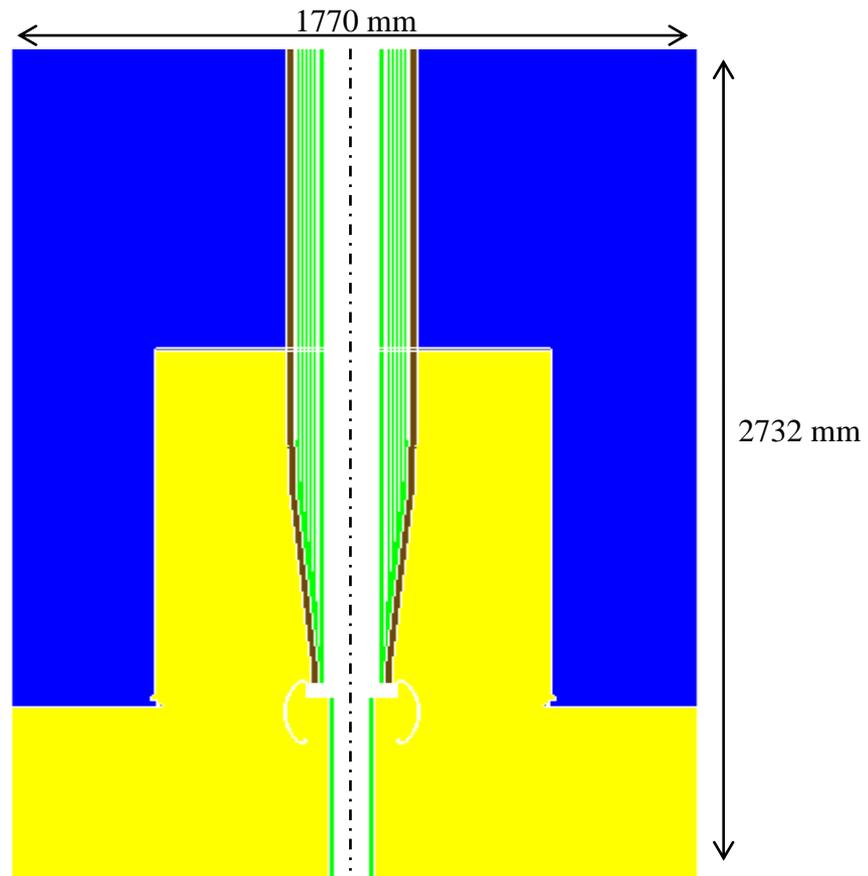


Figure III.12 : Coupe 2D pour le cas « avec traversée partie intérieure et extérieure ».

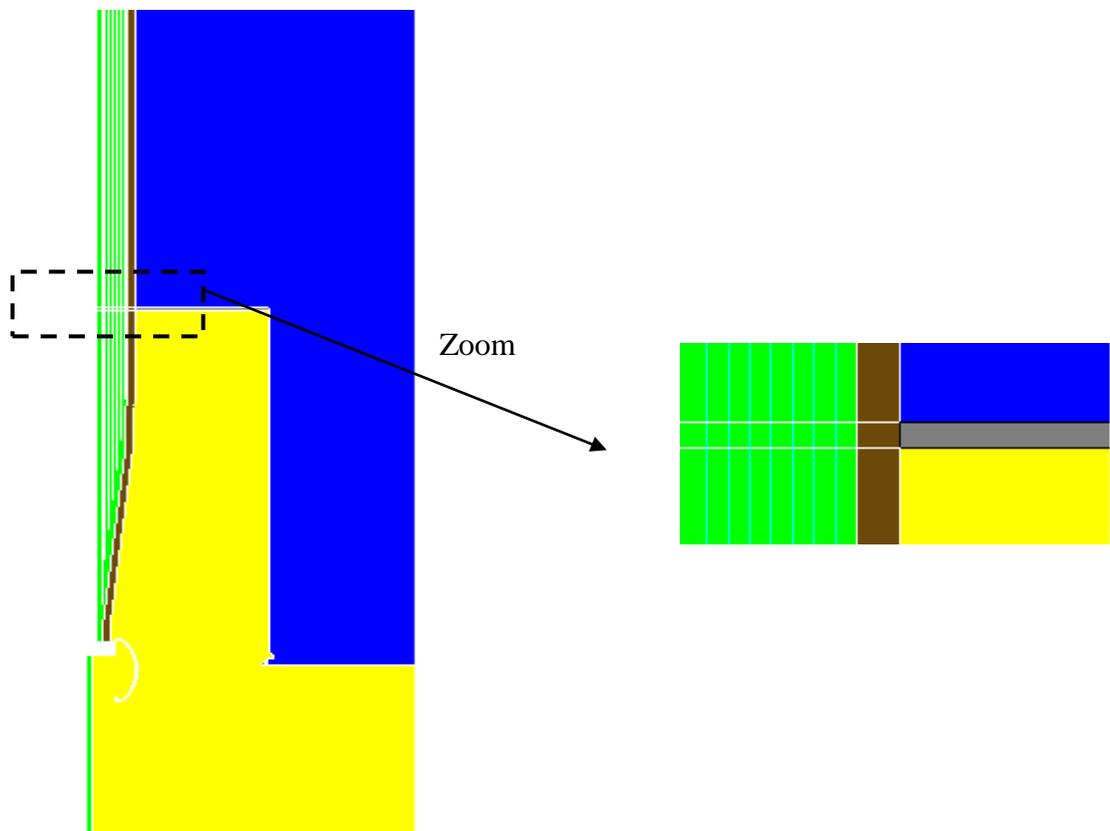
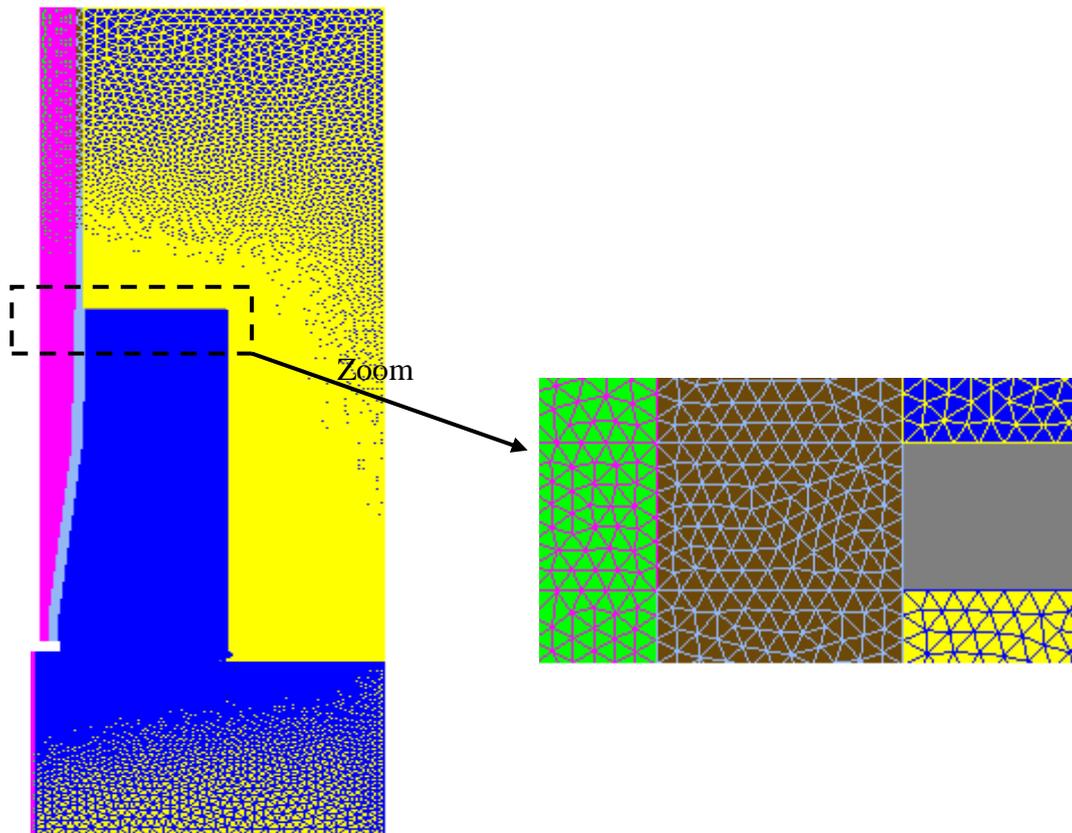


Figure III.13: Géométrie du modèle - cas « avec traversée partie intérieure et extérieure ».

### III. 4.2 Maillage

La figure suivante présente le maillage réalisé sur la coupe droite de la traversée. La zone la plus intéressante présente un maillage plus fin pour obtenir résultats plus précis de nos calculs.



**Figure III.14** : Vue sur le maillage global de la géométrie dans la partie intérieure de la traversée

### III.4.3 Paramètres physiques

Pour compléter la résolution du modèle, on affecte des matériaux aux différentes faces du modèle (régions surfaciques) et des potentiels aux régions linéiques. La permittivité relative des matériaux utilisés est présentée dans le tableau III.3.

Partie du modèle	Matériau	Permittivité relative
Enveloppe de la traversée	Epoxy	6
Huile du transformateur	Huile	2.2
Huile de traversée	Huile	3.4
Isolation du câble	Papier huilé	4.5
Milieu extérieur	Air	1

**Tableau III.3:** Matériaux utilisés dans le cas « avec traversée - partie intérieure ».

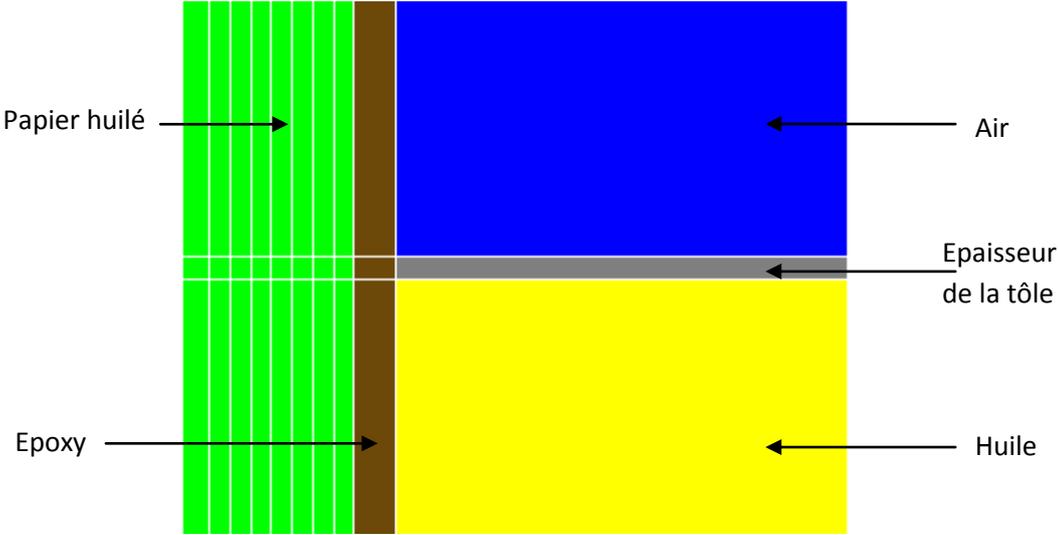


Figure III.15: Matériaux affectés aux régions surfaciques

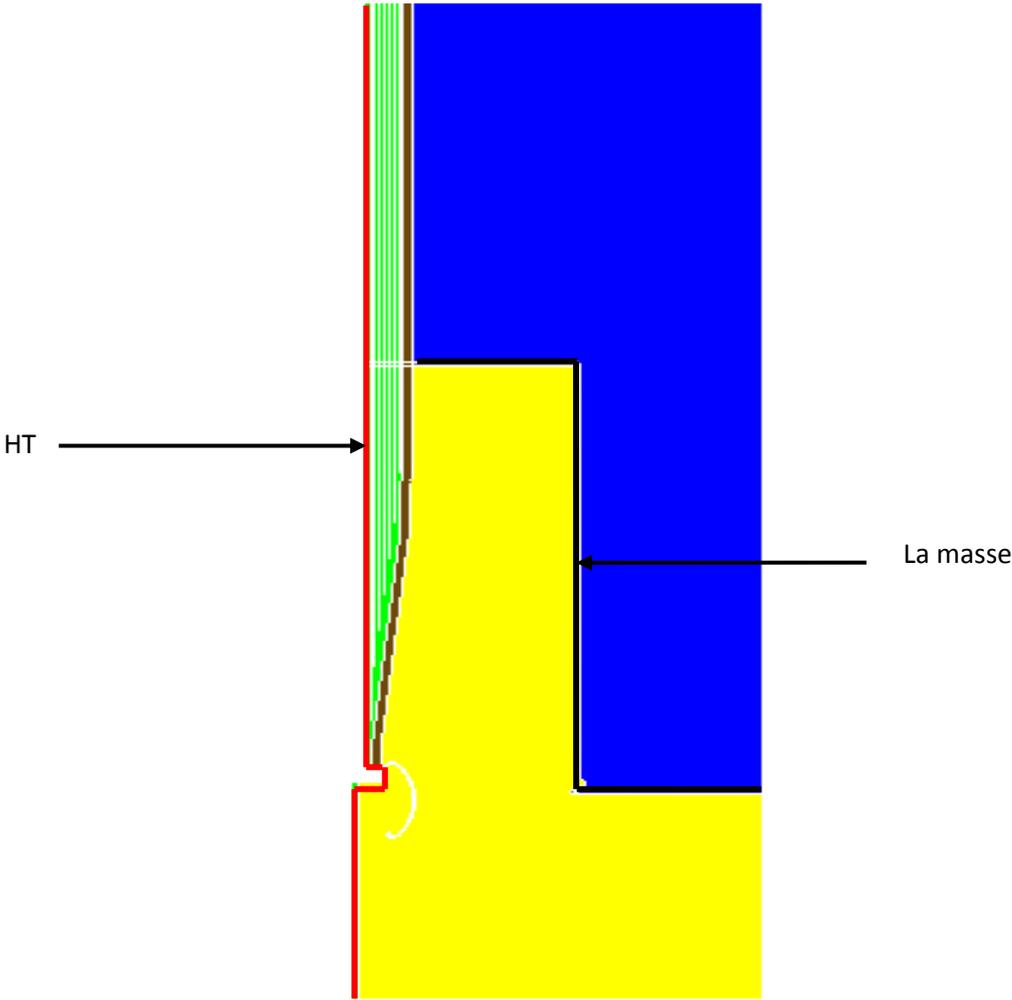


Figure III.16 : Potentiels affectés aux régions linéiques (la HT et la masse)

### III.5 Modèle avec traversée complète

Dans cette configuration, on complète le modèle précédant en rajoutant l'isolateur en porcelaine de la partie extérieure de la traversée. Ainsi, notre modèle représente assez fidèlement le cas réel qu'on trouve en pratique dans l'installation des transformateurs de puissance. La figure III.7 présente une coupe 2D de ce modèle. Les dimensions globales de la géométrie sont identiques au cas précédent.

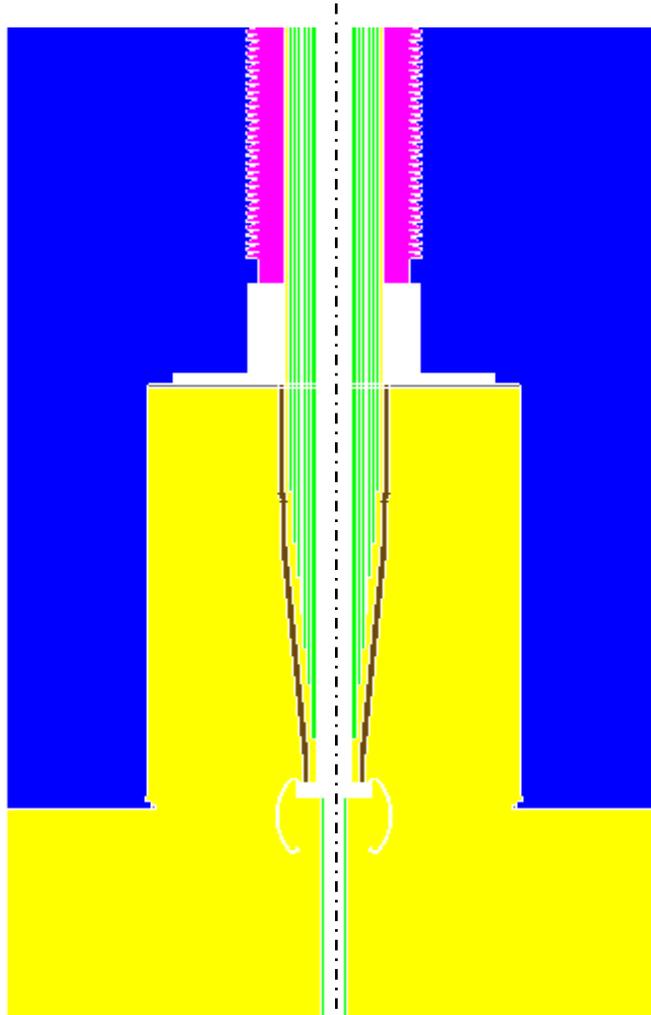
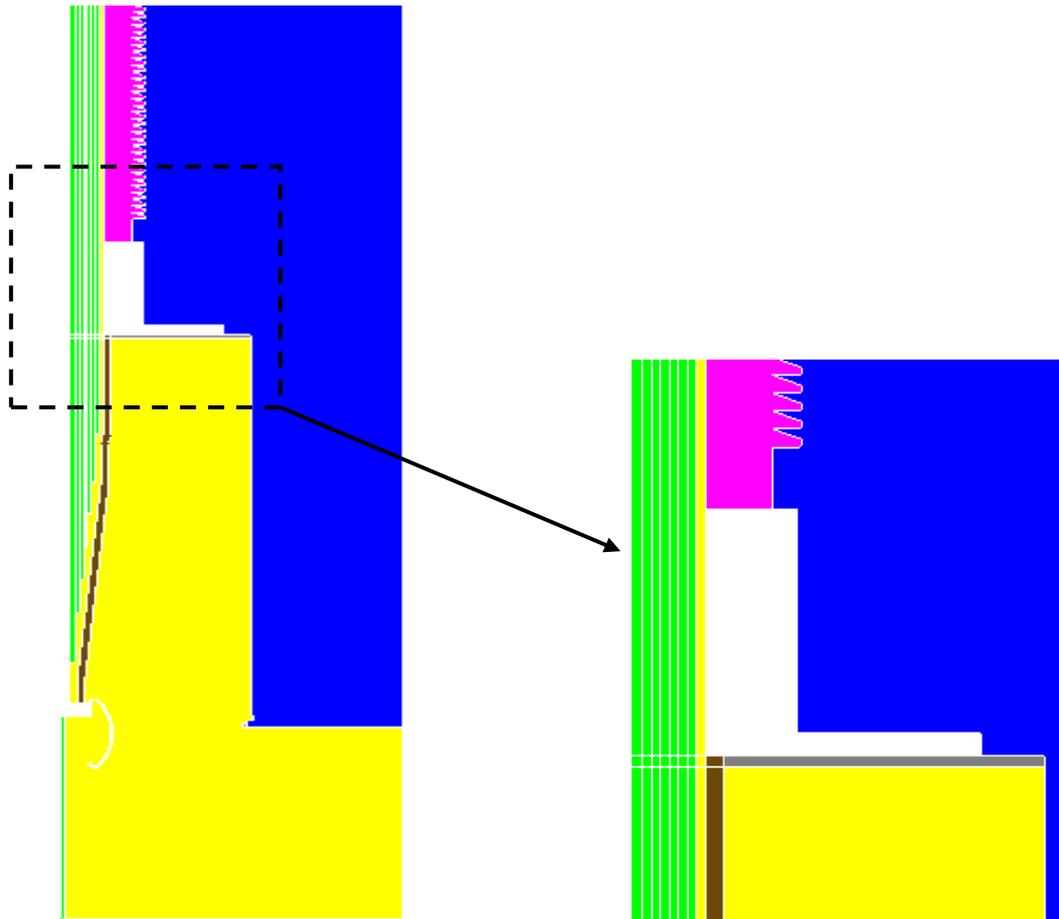


Figure III.17 : Coupe 2D pour le cas d'une traversée complète

#### III.5.1 Géométrie du modèle

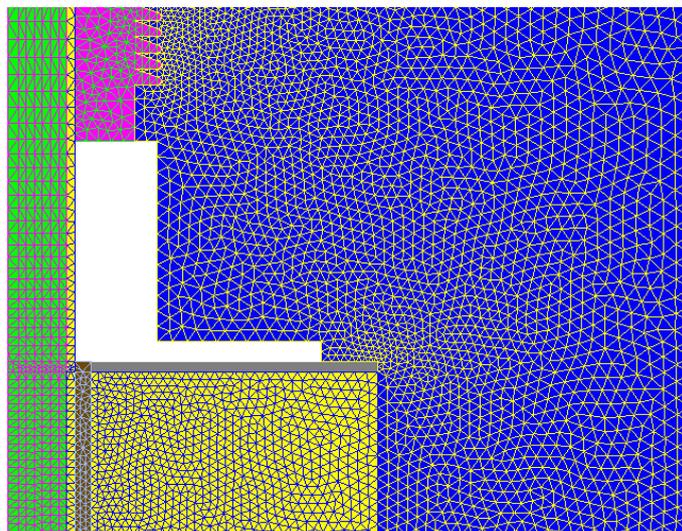
La géométrie du modèle étant symétrique par rapport à l'axe central de la traversée, notre étude peut se résoudre à l'utilisation d'une demi-vue comme indiqué dans la figure III.16.



**Figure III.18:** Géométrie du modèle étudié - cas avec traversée complète

### III. 5.2 Maillage

La figure suivante présente le maillage réalisé sur la coupe droite de la traversée. La zone la plus intéressante présente un maillage plus fin pour obtenir résultats plus précis de nos calculs.



**Figure III.19 :** Vue sur le maillage global de la géométrie dans la partie intérieure de la traversée.

### III.5.3 Paramètres physiques

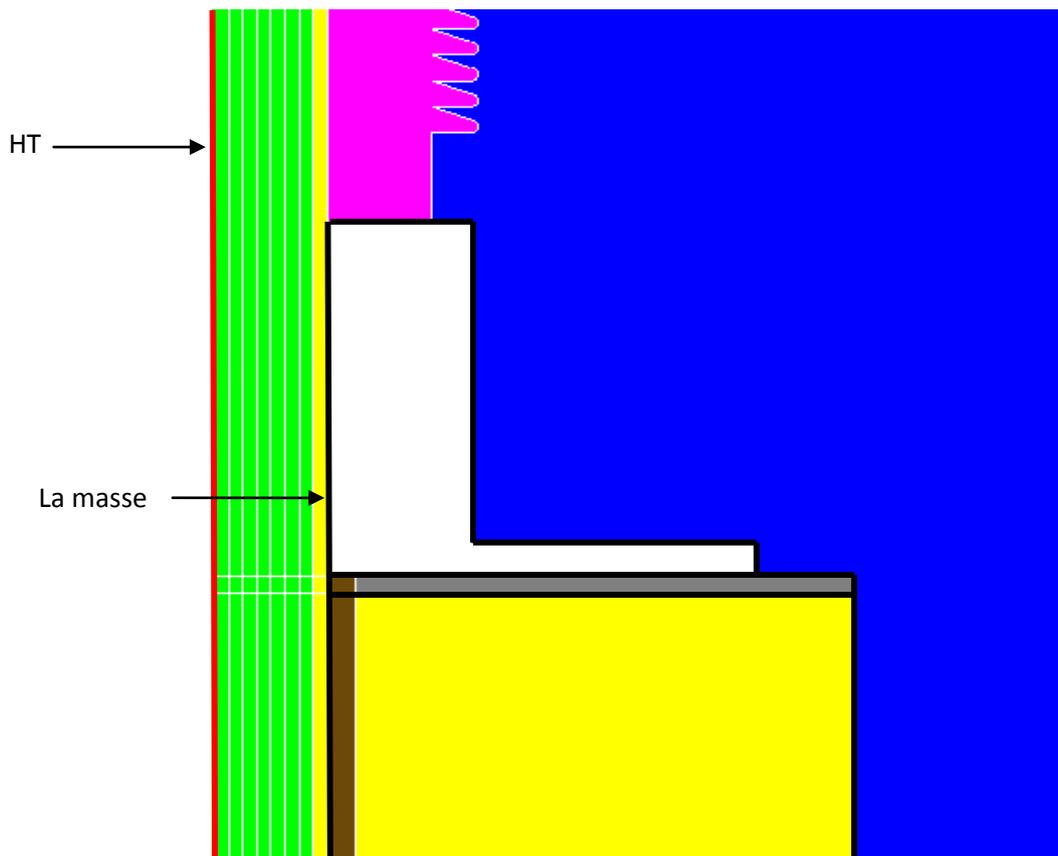
Pour compléter la résolution du modèle, on affecte des matériaux aux différentes faces du modèle (régions surfaciques) et des potentiels aux régions linéiques. La permittivité relative des matériaux utilisés est présentée dans le tableau III.4.

Partie du modèle	Matériau	Permittivité relative
Enveloppe de la traversée	Epoxy	6
Huile du transformateur	Huile	2.2
Huile de traversée	Huile	3.4
Isolation du câble	Papier huilé	4.5
Milieu extérieur	Air	1
Isolateur de traversée	Porcelaine	6.5

**Tableau III.4:** Matériaux utilisés dans le cas « avec traversée complète ».



**Figure III.20:** Matériaux affectés aux régions surfaciques



**Figure III.21 :** Potentiels affectés aux régions linéiques (la HT et la masse)

### Conclusion

Nous avons présenté détails de la simulation réalisée avec le logiciel Flux 2D. Les différentes configurations présentées serviront à calculer les contraintes électriques dans les différentes parties du modèle. Les résultats de ces calculs sont présentés dans le chapitre suivant.



CHAPITRE

IV

## Introduction :

Dans ce chapitre on va présenter et comparer les résultats de l'étude de simulation du model présenté dans la figure III-1 du chapitre précédent. On donnera l'analyse des résultats des quatre configurations étudiées obtenus par simulation à l'aide du logiciel FLUX 2D.

### IV.1 Configuration « sans traversée »

Dans cette configuration, le passage du câble HT à travers le cylindre (en haut du couvercle du transformateur) crée une arête qui accentue le champ électrique dans l'isolation papier du câble ainsi que dans l'huile au niveau de cette zone. La figure IV-1 présente une vue générale de la zone étudiée.

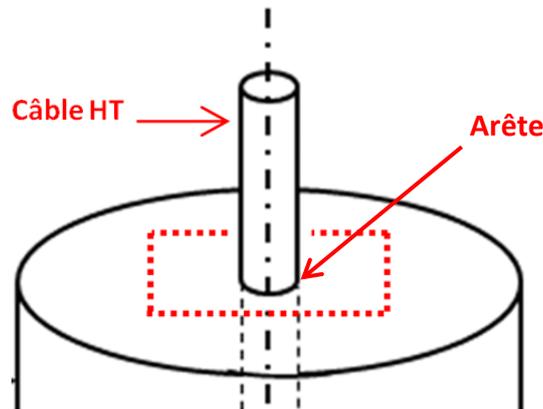


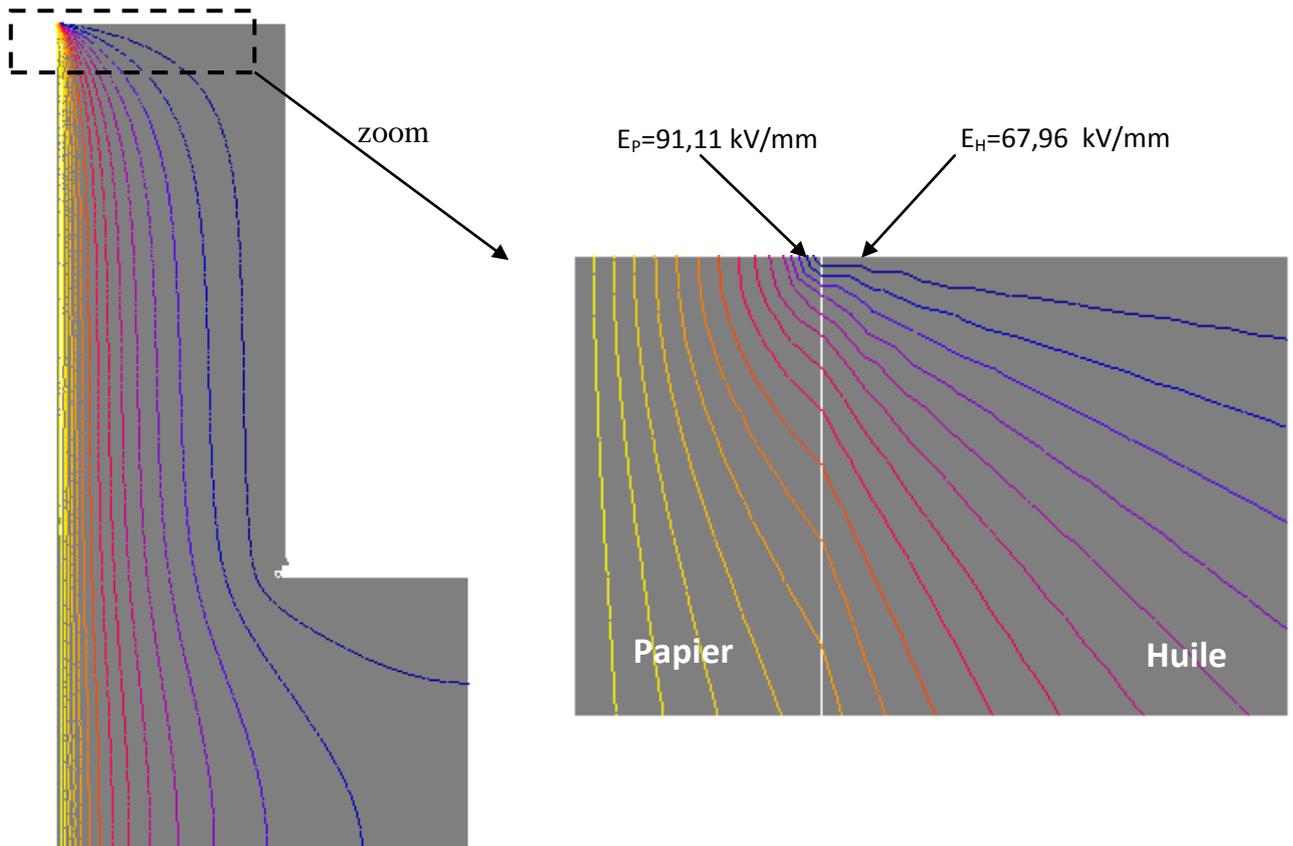
Figure IV.1 : Vue générale sur la zone étudiée – cas « sans traversée ».

#### IV.1.1 Répartition des lignes équipotentiels

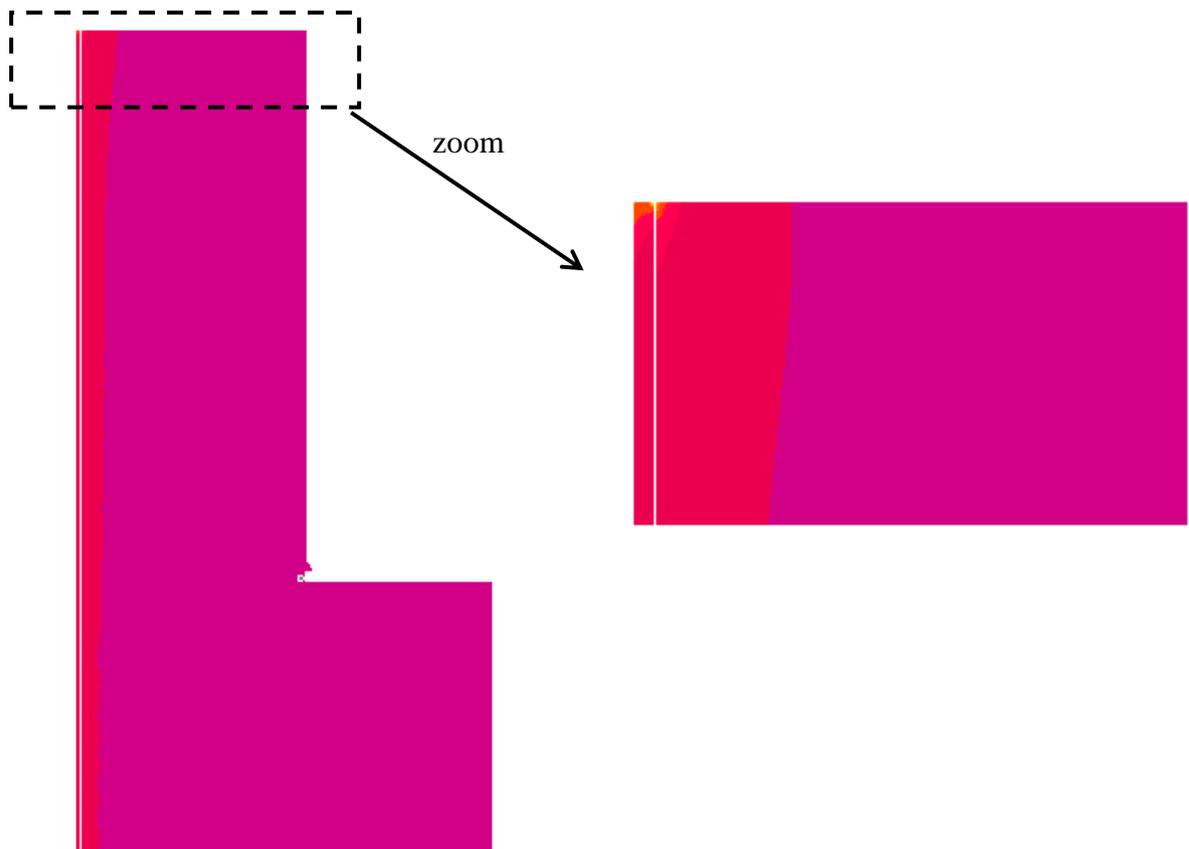
La figure IV-2 présente une vue agrandie de la zone de l'arête où on note une forte concentration des lignes équipotentiels. Ceci est dû à l'effet de pointe de l'arête formée par l'ouverture dans le cylindre qui permet le passage du câble. Cette concentration indique un fort champ électrique dans le papier de l'isolation du câble mais aussi dans l'huile au voisinage de cette arête.

#### IV.1.2 Dégradé de champ électrique

La figure IV-3 illustre bien les zones où règne un champ électrique intense, facilement identifiable à travers les couleurs « chaudes » du dégradé de champs au niveau de l'arête.



**Figure IV.2 :** Répartition des lignes équipotentielles dans le cas « sans traversée ».



**Figure IV.3. :** Dégradé de champ électrique dans l'huile au voisinage de l'arête

Les calculs réalisés avec Flux 2D ont permis de calculer la valeur maximale du champ électrique dans le papier huilé (imprégné d'huile) de l'isolation du câble ainsi que dans l'huile au voisinage de cette arête.

Ces valeurs sont indiquées sur le Tableau IV.1. Le champ électrique atteint une valeur très élevée égale à  $E_{\max} = 91,1 \text{ kV/mm}$ .

Champs électrique maximal (kV/mm)	
$E_p$ (Papier huilé)	$E_H$ (Huile)
91,11	67,96

**Tableau IV.1:** Valeurs maximales du champ électrique dans l'isolation du câble et dans l'huile.

## IV.2 Configuration avec traversée (partie intérieure)

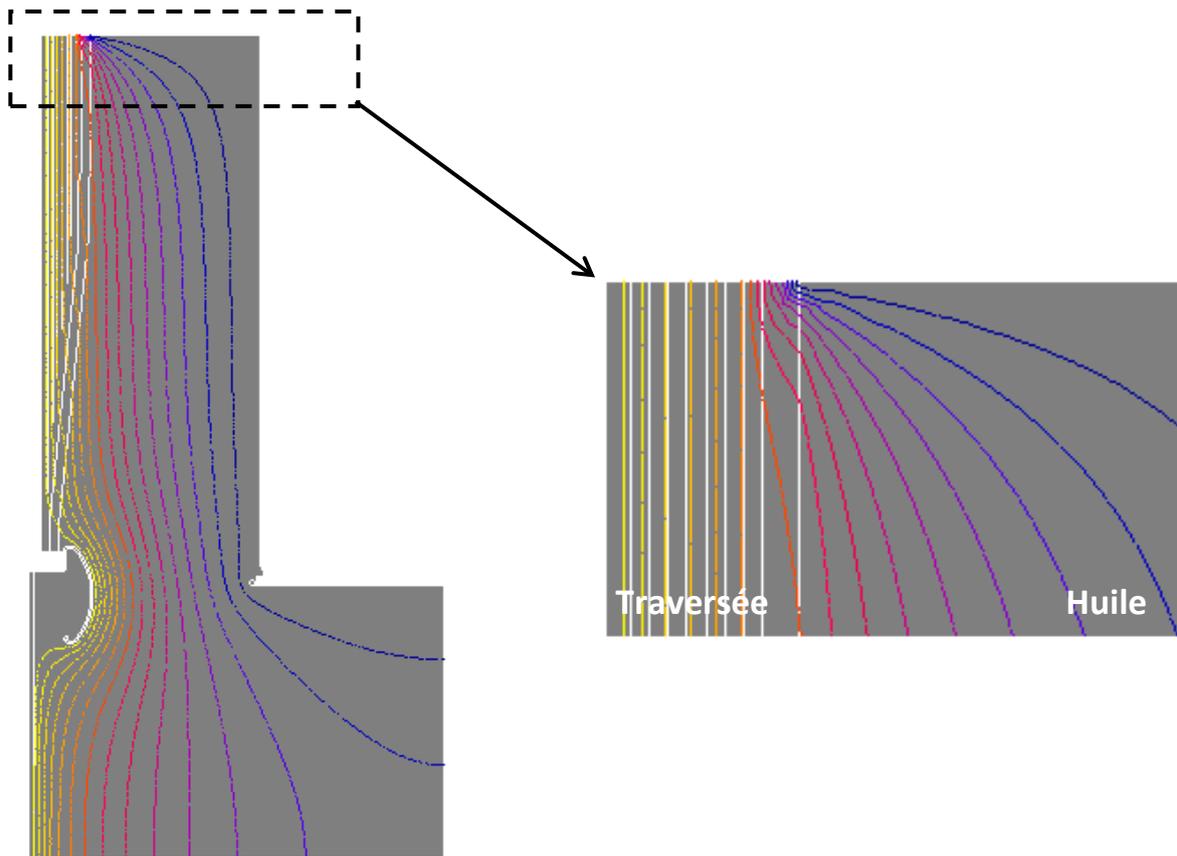
Afin de réduire les valeurs élevées du champ électrique rencontrées dans le cas précédent, le câble HT est remplacé par une traversée à répartition capacitive. Dans cette configuration, on va d'abord représenter seulement la partie intérieure de la traversée immergée dans l'huile du transformateur.

### IV.2.1 Répartition des lignes équipotentiels

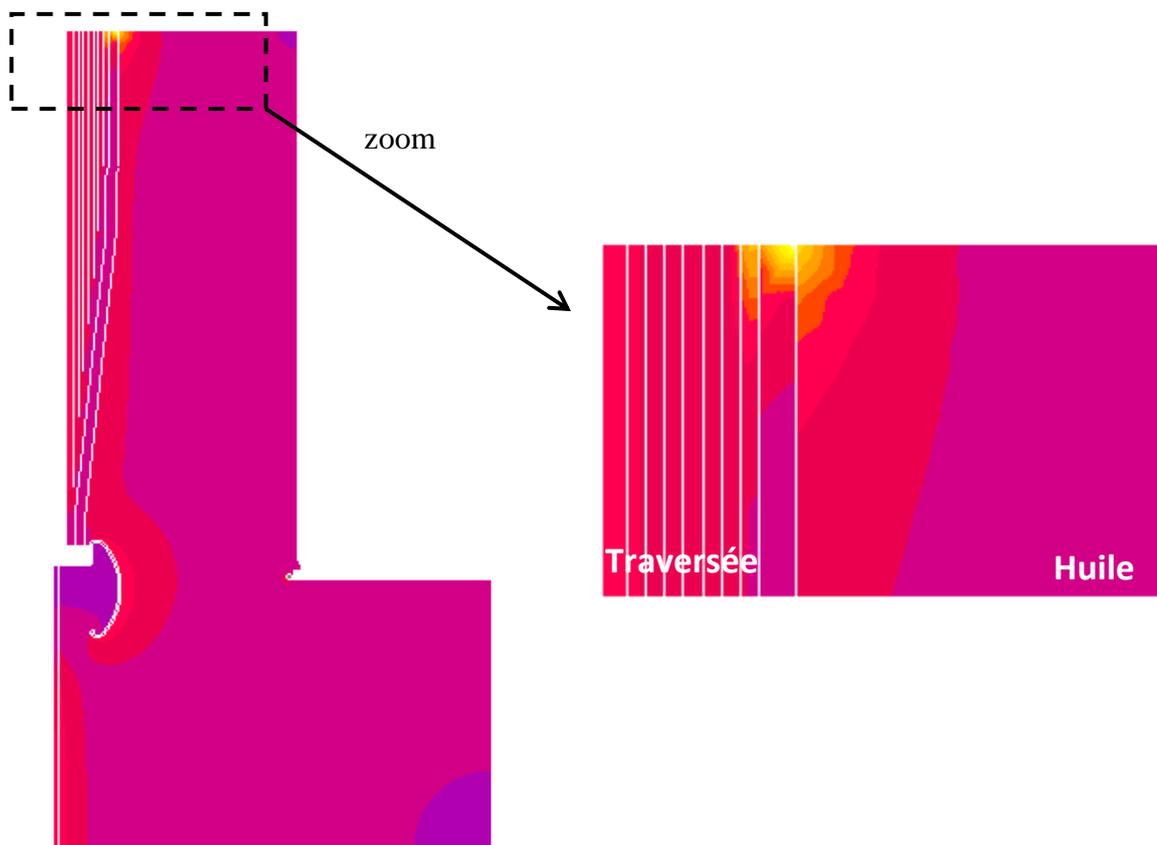
L'arête formée par l'ouverture dans le cylindre qui permet le passage de la traversée engendre une concentration des lignes équipotentiels qui se traduit par un fort champ électrique dans l'huile au voisinage de cette arête. Cette répartition est indiquée dans la Figure IV.4.

### IV.2.2 Dégradé de champ électrique

La figure IV.5 illustre bien les zones où règne un champ électrique intense, facilement identifiable à travers les couleurs « chaudes » du dégradé de champs.



**Figure IV.4 :** Répartition des lignes équipotentielles dans le cas « avec partie intérieure traversée ».

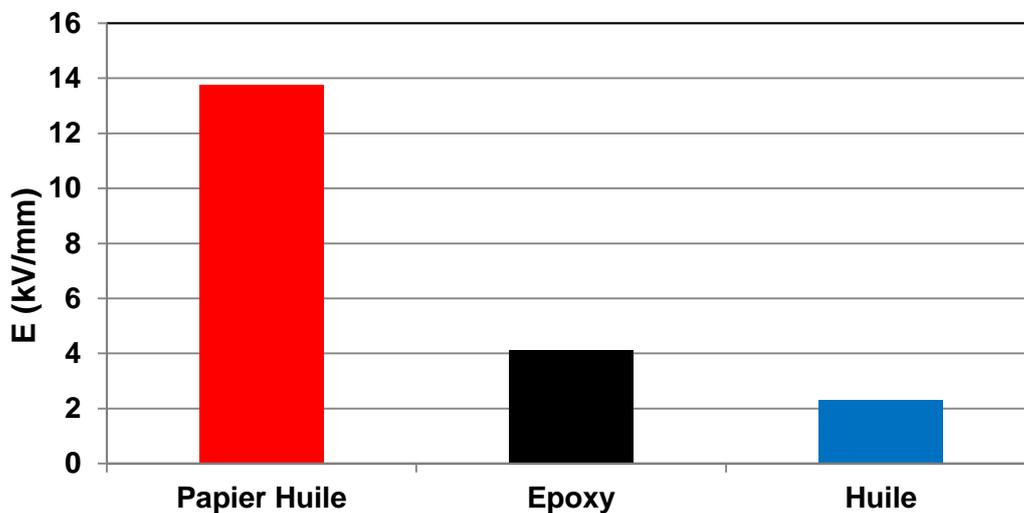


**Figure IV.5 :** Dégradé du champ électrique dans différents matériaux.

Les calculs réalisés avec Flux 2D ont permis d'obtenir les valeurs maximales dans les différents matériaux au niveau de la zone étudiée. Ces valeurs sont présentées dans le tableau IV-2 et la figure IV.6. On remarque que la valeur maximale du champ électrique est dans le papier huilé du corps condensateur de la traversée. On note également une baisse du champ électrique de l'huile autour de cette zone.

Champs électrique maximal (kV/mm)		
Papier huilé	Epoxy	Huile
13,78	4,13	2,30

**Tableau IV.2 :** Valeurs maximale du champ électrique dans les différents matériaux.



**Figure .IV.6:** Valeurs maximale du champ électrique dans les différents matériaux

### IV.3. Configuration avec traversée (partie intérieure+partie extérieure)

Dans cette configuration, on complète le modèle précédent en rajoutant la partie extérieure dans l'air et le corps condensateur de la traversée est prolongé à l'extérieur du cylindre.

#### IV.3.1 Répartition des lignes équipotentielles

La répartition des lignes équipotentielles est présentée dans la figure IV.7. Elles se resserrent fortement sur l'épaisseur de la paroi du couvercle. Ceci crée un renforcement du champ électrique important dans les matériaux au voisinage de cette arête.

#### IV.3.2 Dégradé de champ électrique

La figure.IV.8 illustre les zones où règne un champ électrique intense, facilement identifiable à travers les couleurs « chaudes » du dégradé de champs. On voit que le champ électrique est maximal dans le papier huilé à l'intérieur de la traversée.

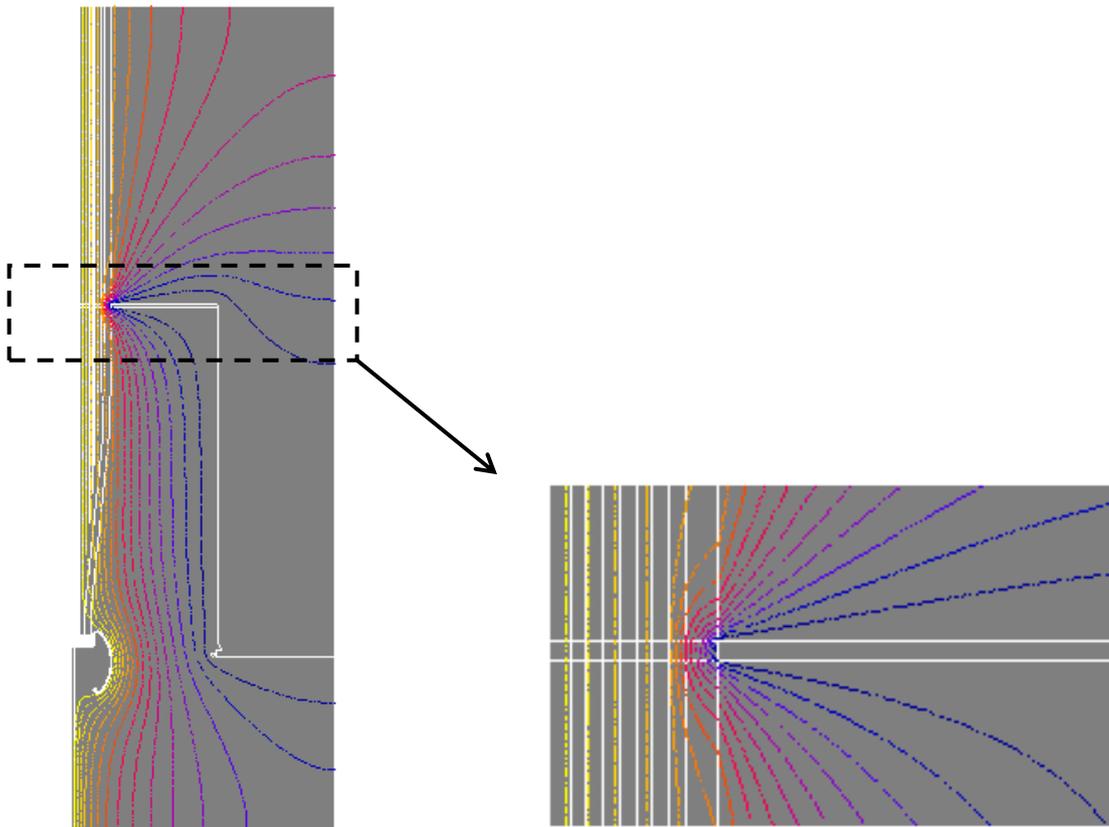


Figure IV.7 : Répartition des lignes équipotentielles dans différents matériaux

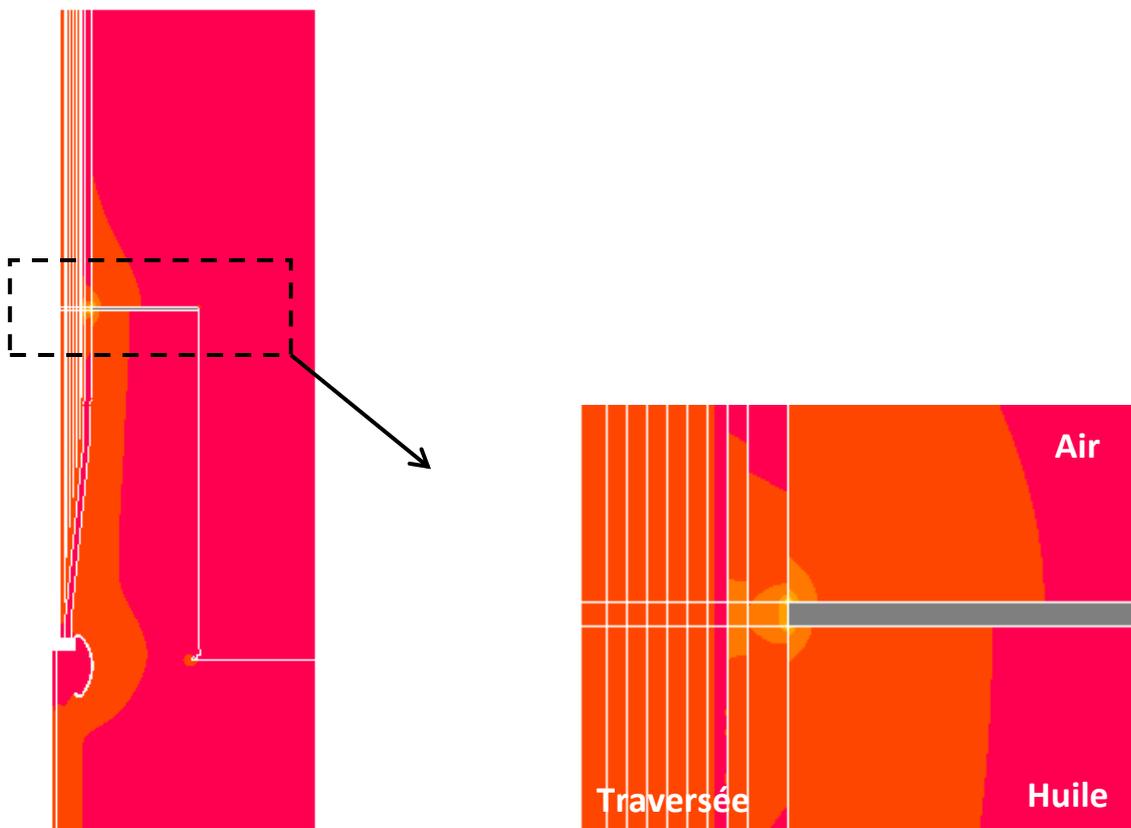


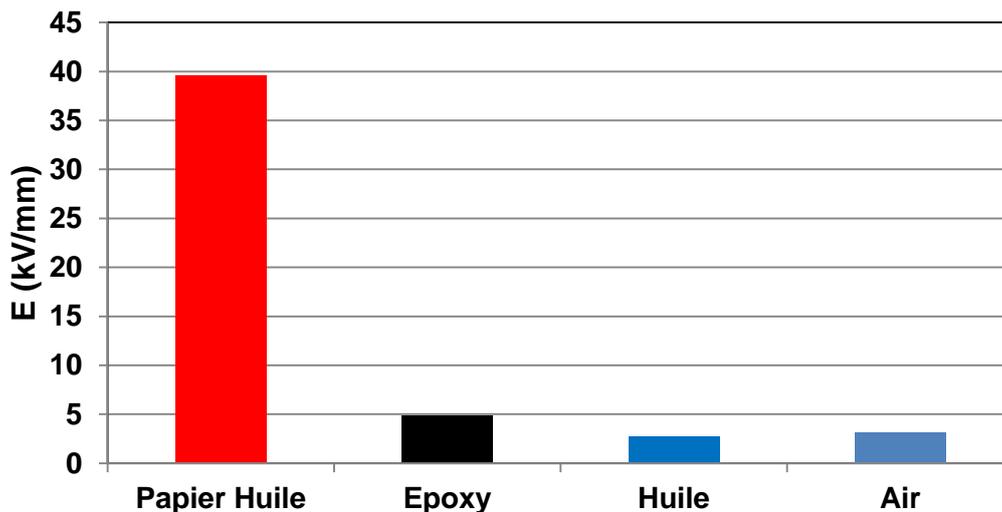
Figure IV.8 : Dégradé du champ électrique dans les différents matériaux

Les calculs réalisés avec Flux 2D ont permis d'obtenir les valeurs maximales dans les différents matériaux au niveau de la zone étudiée. Ces valeurs sont présentées dans le tableau IV-3. On remarque que la valeur maximale du champ électrique est toujours dans le papier huilé du corps condensateur de la traversée. On note également des valeurs du même ordre de grandeur que le cas précédent et ceci dans l'époxy de la traversée ainsi que l'huile autour.

Champs électrique maximal (kV/mm)			
Papier huilé	Epoxy	Huile	Air
39,60	4,87	2,73	3,12

**Tableau IV.3:** Valeurs maximales champ électrique dans les différents matériaux

Une comparaison des valeurs de champs électrique dans les différents matériaux de la partie intérieure et extérieure de la traversée est présentée dans la figure IV.9.



**Figure .IV.9:** Valeurs maximale du champ électrique dans les différents matériaux

#### IV.4 Configuration avec traversée (partie intérieur+ extérieure+isolateur)

Dans cette configuration, on complète le modèle précédent en rajoutant les isolateurs en porcelaine qui recouvre la partie extérieure de la traversée (coté air). Les figures suivantes montrent les résultats de simulation.

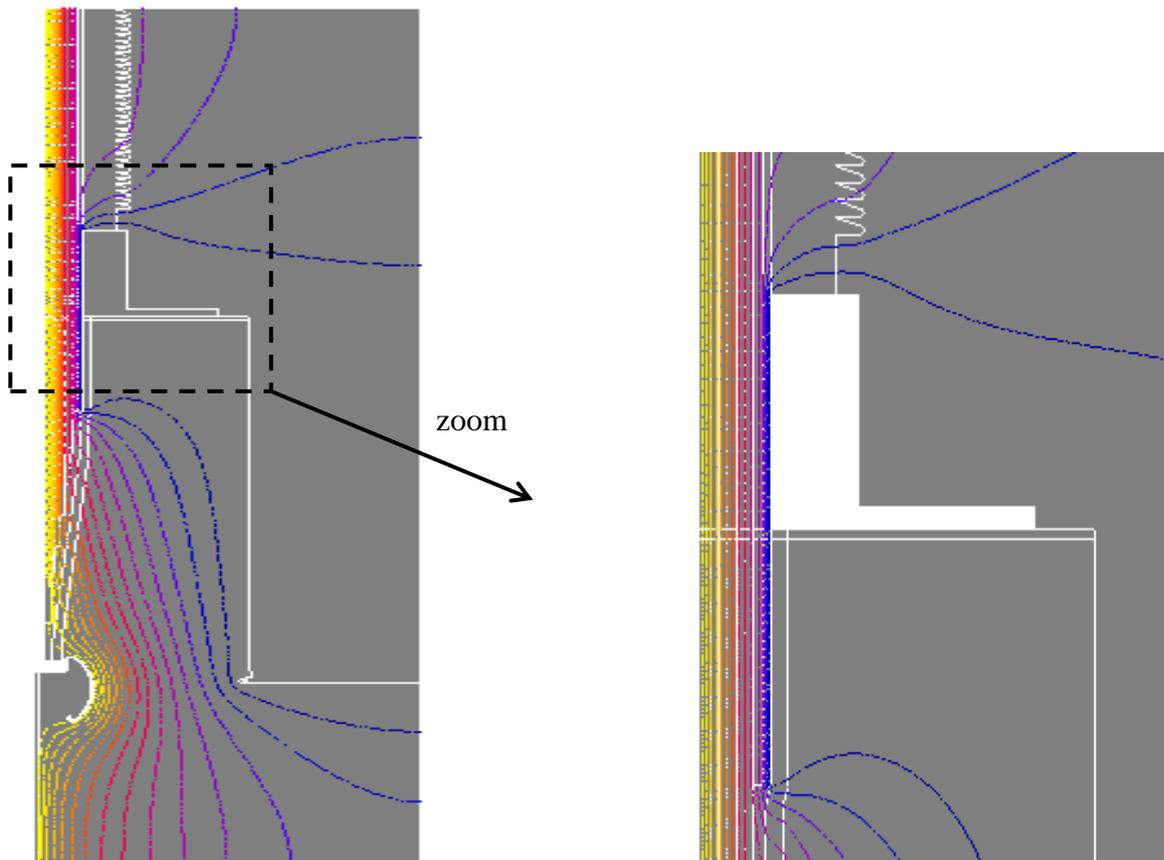


Figure IV.10 : Répartition des lignes équipotentielles dans les différents matériaux

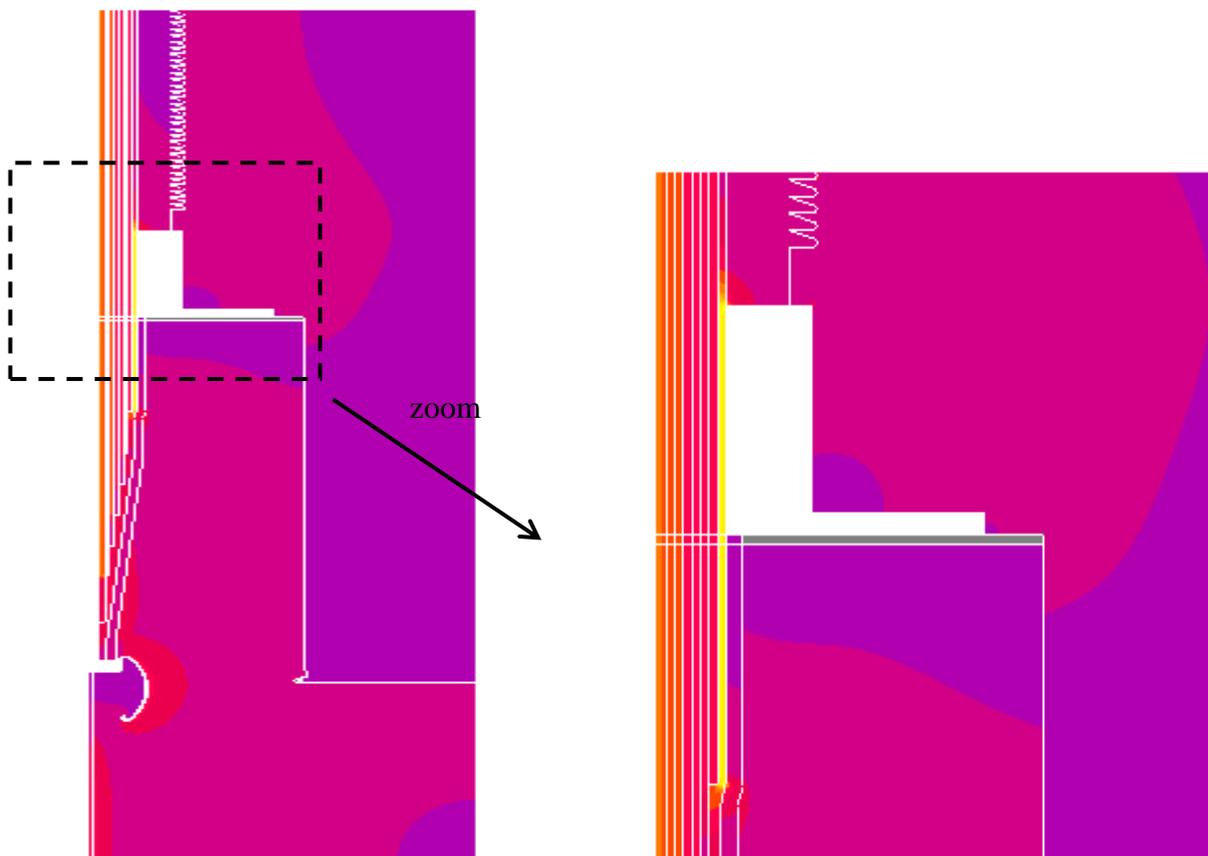


Figure IV.11 : Dégradé du champ électrique dans les différents matériaux.

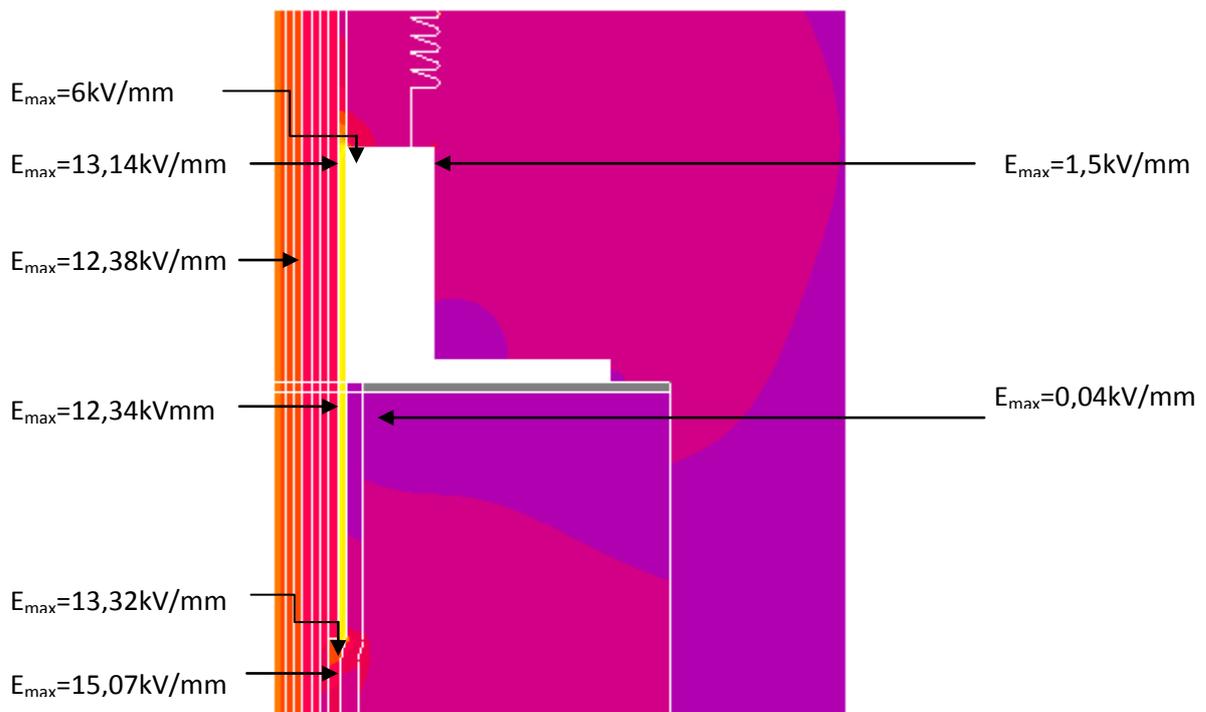
#### IV.4.1 Répartition des lignes équipotentielles

La répartition des lignes équipotentielles est présentée dans la figure VI.10. Elles se resserrent essentiellement à l'intérieur de la traversée. Ceci se traduit par un renforcement du champ électrique dans les matériaux concernés (huile de traversée et papier huilé).

#### IV.4.2 Dégradé de champ électrique

La figure IV-11 illustre bien les zones où règne un champ électrique intense, facilement identifiable à travers les couleurs « chaudes » du dégradé de champs.

Les calculs réalisés avec Flux 2D ont permis d'obtenir les valeurs maximales dans les différents matériaux au niveau de la zone étudiée. Ces valeurs sont présentées dans le tableau IV-4. On remarque que la valeur maximale du champ électrique est toujours à l'intérieur de la traversée, dans l'huile entre le corps condensateur et l'époxy de la traversée.



**Figure IV.12:** position du champ électrique électrique dans les différent matériaux.

Champs électrique maximal (kV/mm)				
Papier huilé	Epoxy	Huile de travsersée	Porcelaine	Air
12,38	13,32	15,07	5,92	1,5

**Tableau IV.4 :** Valeurs maximales du champ électrique dans les différents matériaux.

La valeur maximale du champ électrique pour chaque matériau est représenté la figure IV.13. Les valeurs les plus élevées se retrouvent dans les matériaux qui constituent la traversée. C'est dans l'huile de traversée qu'on trouve la valeur maximum. Par contre, dans l'huile dans le transformateur le champ est très faible car cette zone est protégée par le corps condensateur de la traversée.

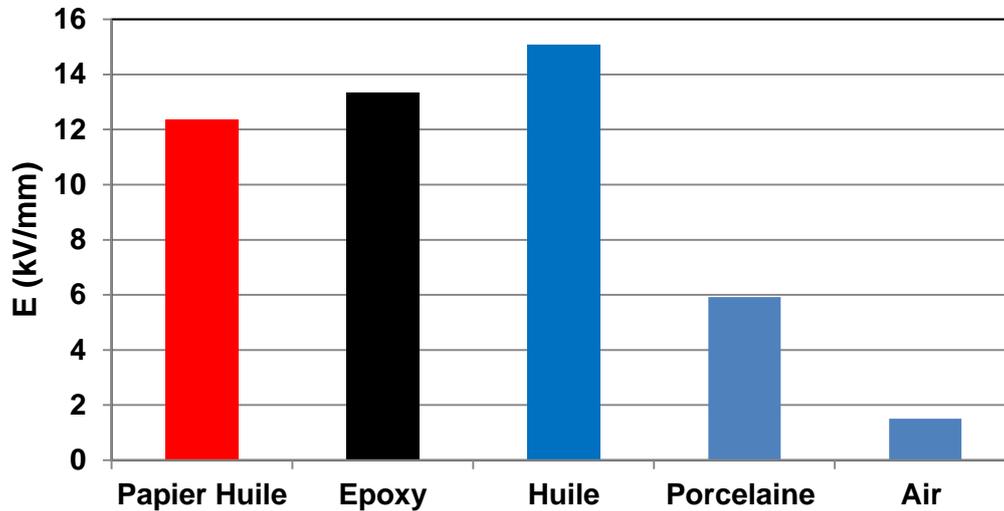
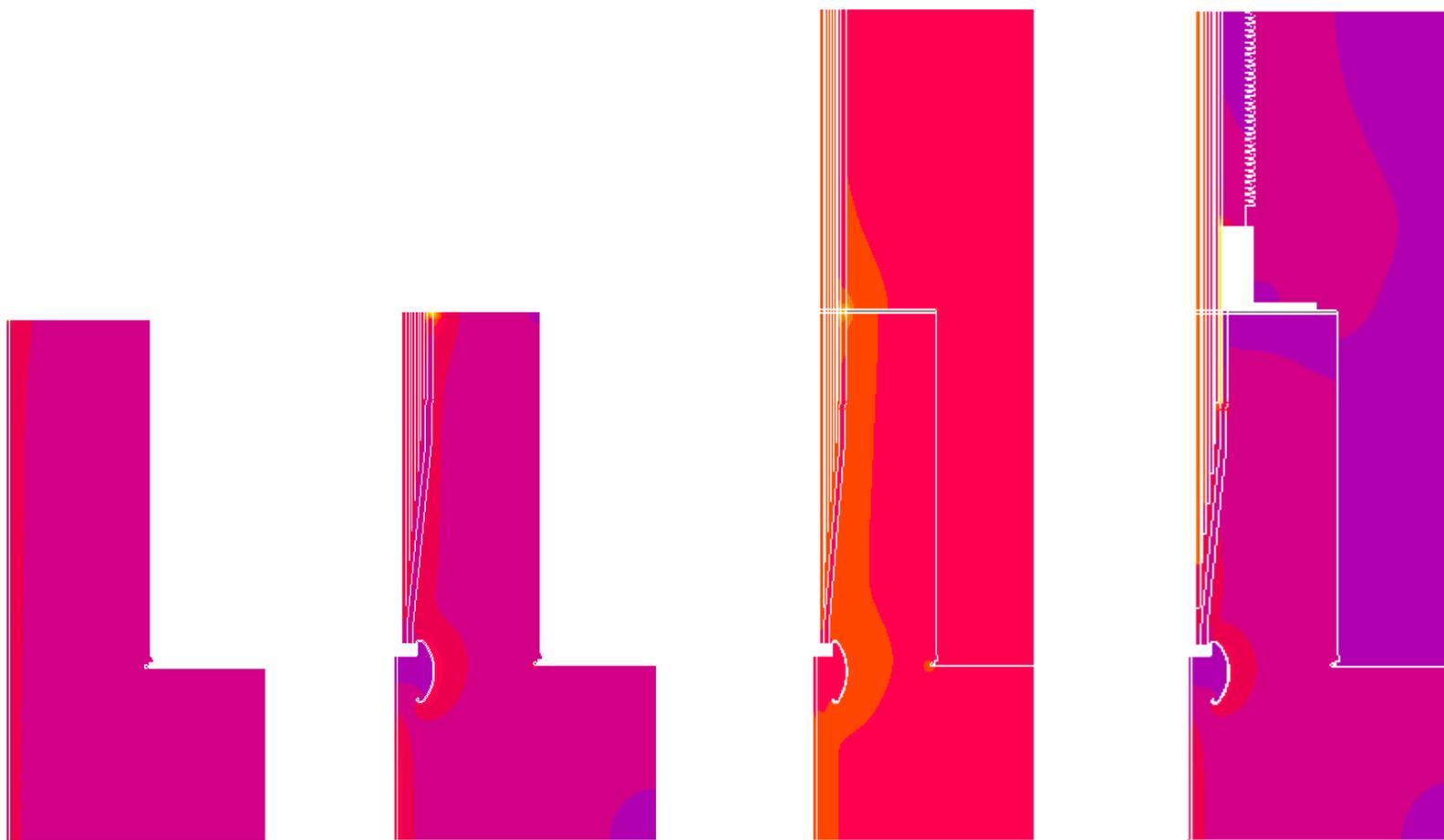


Figure IV.13: Valeurs maximales du champ électrique dans les différents matériaux

#### IV-5. Comparaison entre les cas étudiés

Afin de bien voir la différence entre les quatre configurations présentées précédemment, tous les résultats sont récapitulés dans le tableau IV.5. Il présente les valeurs maximales calculées dans chaque matériau et pour chaque cas étudié. Ces valeurs sont tracées dans la figure IV.14.

On voit que le cas le plus critique est le cas 1 dans lequel seul un câble HT est utilisé. Les valeurs de champ électriques atteignent des valeurs très élevées. Le cas 4 est celui qui est le plus proche des cas réels qu'on rencontre dans les réseaux électriques. Les valeurs de champs sont élevées dans certains matériaux mais les contraintes dans l'huile du transformateur deviennent négligeables.



Matériaux	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4
Papier Huile	91,11	13,78	39,60	12,38
Epoxy	---	4,13	4,87	13,32
Huile	67,96	2,30	2,73	15,07
Air	---	0,00	3,12	1,50
Porcelaine	---	---	---	5,92

**Tableau IV.5 :** Récapitulatif des valeurs maximales du champ électrique dans les différents matériaux (en kV/mm)

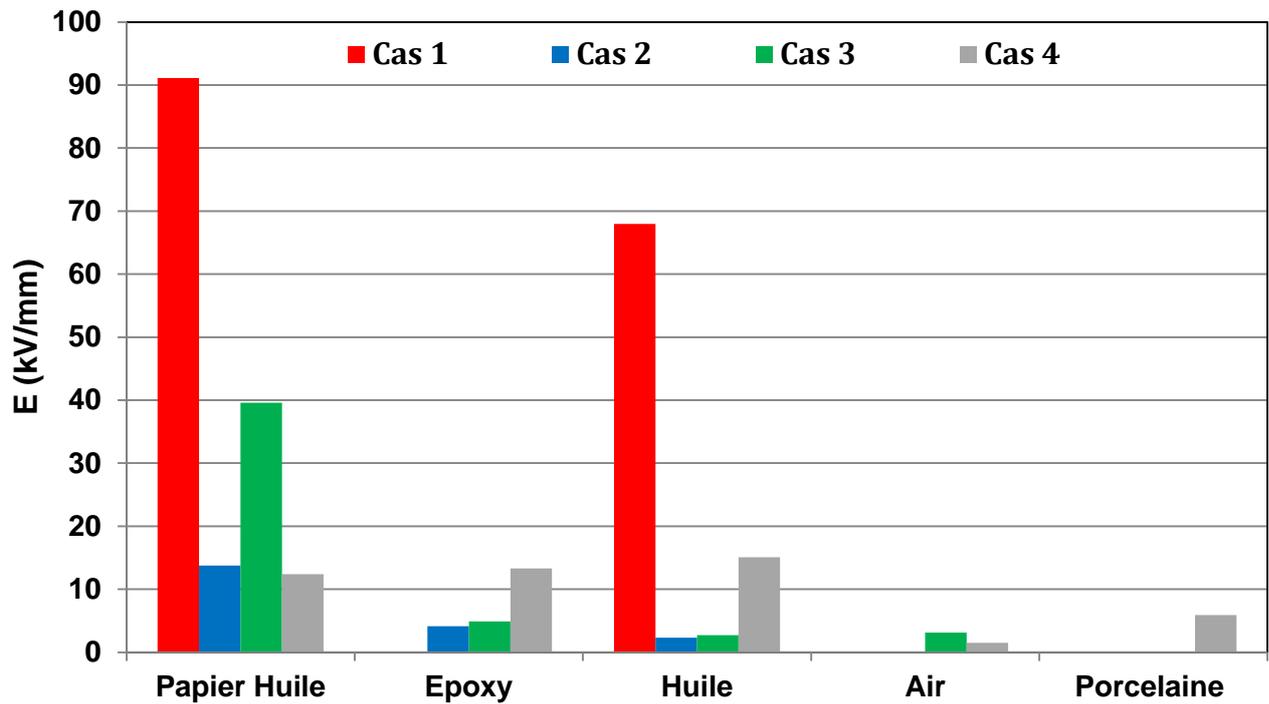


Figure IV.14 : Récapitulatif des valeurs maximales du champ électriques dans les différents matériaux.

### Conclusion :

Les résultats présentés dans ce chapitre ont montré la nécessité d'utiliser une traversée pour passer le courant de l'intérieur du transformateur vers l'extérieur. En effet, dans le cas où seul un simple câble est utilisé, les valeurs du champ électrique seraient trop élevées à cause de l'arête du couvercle du transformateur.

### Conclusion générale

Dans ce mémoire nous avons présenté une partie importante du transformateur, considérée comme « accessoires ». Il s'agit de la traversée qui relie le bobinage à l'intérieur du transformateur avec les lignes aériennes à l'extérieur. Le but de cette étude est de démontrer le rôle important de la traversée.

Afin de démontrer le rôle essentiel joué par la traversée de transformateur, on a établi un model de simulation avec le logiciel Flux 2D avec différentes configurations.

Ces configurations ont été traitées successivement afin de montrer progressivement l'intérêt et la nécessité d'avoir une traversée pour relier la partie intérieure du transformateur avec sa partie extérieure. Les calculs de champs électriques ont montré clairement que l'utilisation d'un câble électrique n'est pas satisfaisante pour raccorder le bobinage du transformateur avec les lignes aériennes. En effet, le champ électrique atteint des valeurs très élevées qui rend impossible une telle configuration.

Les autres configurations ont permis de mettre en évidence l'importance de quelques parties essentielles de la traversée, notamment son corps condensateur qui utilise le principe de la répartition capacitive du potentiel.

Les résultats de ce travail peuvent être utilisés pour compléter une étude détaillée qui permettrait de définir et optimiser la construction de la traversée afin de réduire les contraintes électriques.

### Bibliographie

- [1] YAGOUB Mohamed Islem, BENKRAMA Nedjib « Mise en évidence du rôle d'un répartiteur de champ électrique de traversée dans un transformateur de puissance », PFE Centre Universitaire d'Ain-Temouchent, 2014-2015
- [2] BOUCHAUI Lahcen «Diagnostic des transformateurs de puissance par la méthode d'analyse des gaz dissous : Application des réseaux de neurones mémoire de magister » UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF 2009/2010
- [3] Berrached Amina, Bouzouina Siham «Modélisation numérique du comportement haute fréquence d'un transformateur de puissance», PFE Centre Universitaire d'Ain-Temouchent, 2014-2015
- [4]. CHERIFI MOHAMED EL HABIB CHAIBI KOUIDER « Méthode de calcul de champ électrique pour l'isolation des transformateurs immergés », PFE Centre Universitaire d'Ain-Temouchent, 2014-2015
- [5]. HASKAR Houari, FAKIRE DJAMEL EDINE « effet de la pollution métallique sur l'isolation d'un conducteur électrique cas des transformateurs de puissance », PFE Centre Universitaire d'Ain-Temouchent, 2013-2014
- [6]. MAMMAR Asmaa Naziha, BOUBASSELA Soraya «*Optimisation de la position des traversées dans les transformateurs de puissance*», PFE Centre Universitaire d'Ain-Temouchent 2015/2016
- [7] Guide technique ABB : Traversée en papier imprégné de résine, huit-air, type GSB
- [8] Site web : [https://fr.wikipedia.org/wiki/Traversée isolée](https://fr.wikipedia.org/wiki/Traversée_isolée)
- [9] Cahiers Techniques Schneider « Protection des machines et des réseaux Industriels HT ». P. ROCCIA, Cahier Technique n° 113
- [10] Site web:  
<http://www.jst-transformers.en/fr/category/puissance/>
- [11] Site web : <https://megger.com>
- [12] Catalogue technique <http://www.trenchgroup.com/>
- [13]:AC bushing type GOB, documentation en ligne, site web :  
[https://new.abb.com/products/transformers/transformer-components/bushings/oil-impregnated-paper-\(oip\)/ac-bushings-type-gob](https://new.abb.com/products/transformers/transformer-components/bushings/oil-impregnated-paper-(oip)/ac-bushings-type-gob)

[14] O plus DRY bushings, documentation en ligne,site web

[https://new.abb.com/products/transformers/transformer-components/bushings/resin-impregnated-synthetic-\(ris\)/ac-bushings-type-o-plus-dry](https://new.abb.com/products/transformers/transformer-components/bushings/resin-impregnated-synthetic-(ris)/ac-bushings-type-o-plus-dry)

[15] : AC bushing type GSA-OA, documentation en ligne ,site web :

[https://new.abb.com/products/transformers/transformer-components/bushings/resin-impregnated-paper-\(rip\)](https://new.abb.com/products/transformers/transformer-components/bushings/resin-impregnated-paper-(rip))