



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة وهران 2 محمد بن أحمد  
Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed  
-----  
معهد الصيانة و الأمن الصناعي  
Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle

**Département de Maintenance en Electromécanique**

## **MÉMOIRE**

Pour l'obtention du diplôme de Master

**Filière :** Electromécanique  
**Spécialité :** Electromécanique Industrielle

### **Thème**

**L'impact des cartons des transformateurs  
de puissance sur le phénomène d'électrification**

Présenté et soutenu publiquement par :

**AMAMRA HOUCINE**

**DAMINE YASSER**

Devant le jury composé de :

| <b>Nom et Prénom</b>   | <b>Grade</b> | <b>Etablissement</b>      | <b>Qualité</b>   |
|------------------------|--------------|---------------------------|------------------|
| <b>SENHADJI Salima</b> | <b>MAA</b>   | <b>Univ Oran 2 (IMSI)</b> | <b>Président</b> |
| <b>TALHI Mama</b>      | <b>MAA</b>   | <b>Univ Oran 2 (IMSI)</b> | <b>Encadreur</b> |
| <b>ABDI Ghezail</b>    | <b>MCB</b>   | <b>Univ Oran 2 (IMSI)</b> | <b>Examineur</b> |

**Juin 2017**



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

# *Remerciements*

*Tout d'abord on remercie le bon Dieu Puissant de la bonne santé, la volonté et de la patience qu'il nous a donnée tout au long de notre étude.*

*Nous remercions Très sincèrement M : talhi notre encadreur de ce travail, pour ses conseils pertinents, et ses orientations judicieuses ; sa patience et diligence, et par ses suggestions lesquelles grandement ont facilité ce travail.*

*Nous tiens à exprimer notre gratitude aux membres de jury qui ont bien voulu examiner ce travail.*

*Notre profonde gratitude à tous les enseignants du département électromécanique, qui ont encouragé à donner le meilleur d'eux même en nous assurant une formation aussi meilleure que possible.*

*Un remerciement spécial aux étudiants de master 2 électromécanique.*

***houcine & yasser***

# Dédicace

***A** mon très cher père*

« *Damine Abed El-Malek* »

***A** qui j'accorde une grande reconnaissance, et respect et je tiens à être à la hauteur de l'amour et le soutien que vous m'avez toujours donné.*

***Q**ue dieu le tout puissant vous préserve et procure santé et longue vie.*

***A** ma très chère mère,*

***N**ulle dédicace n'est susceptible de vous exprimer ma profonde affection, mon immense gratitude pour tout ce que vous étiez pour moi.*

***A** tous mes frère et sœurs.*

***A** toute ma famille et mes amies que je ne pourrai énumérer et comptes beaucoup pour moi, ainsi qu'à tous ce qui m'aiment.*

***A** mon binôme houcine .*

*je dédie ce modeste travail.*

*Je vous aime.*

*Damine yasser*

# Dédicace

**A**vant toute chose je loue Allah de m'avoir donné la force et le courage d'aboutir à ce travail.

**A** celle que le miséricordieux a béni et a mis sous Ces pieds le paradaient.

**A** la femme la plus courageuse , sensible ,généreuse ,

**A** celle qui a su me donner amour et joie de vivre , à celle qui a toujours montrée affection et compréhension à mon égard, ma mère que j'aime

**A** l'homme de courage et de force à celui qui a toujours été présent , qui m'appris les vraies valeurs de la vie à celui qui m'a soutenu en toutes circonstances, mon père qui j'aime

**A** tous mes frères et sœurs

**A** toute ma famille

**A** tous mes amis , pour leurs présences et encouragements ,durant les moments difficiles.

**A** tous les personnels de l'IMSI

**A** mon binôme yasser

*Amamra houcine*

# Liste des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Liste des abréviations

Nomenclature

Introduction générale..... 1

## Chapitre I Généralités sur les transformateurs de puissance

I.1 Introduction..... 2

I.2 Le rôle d'un transformateur..... 3

I.3 Constitution générale d'un transformateur..... 4

I.4 Les transformateurs haute tension..... 5

I.4.1 Le transformateur de type «cuirassé»..... 6

I.4.2 Le transformateur de type «colonne»..... 6

I.5 Le système d'Isolation des transformateurs..... 7

I.5.1 Isolation solide..... 7

I.5.1.1 Papier et carton isolants..... 9

I.5.1.2 Caractéristiques d'électriques du papier..... 10

I.5.1.3 Caractéristiques physiques et mécaniques du carton..... 11

I.5.2 Huile isolante..... 13

I.5.2.1 Caractéristiques diélectriques de l'huile isolante..... 13

I.5.2.2 Les différents types de liquides isolants..... 15

I.5.3 Vieillessement..... 16

I.5.3.1 Vieillessement du papier..... 16

I.5.3.1 Vieillessement de l'huile..... 18

I.6 Conclusion ..... 18

## Chapitre II Phénomène d'électrisation par écoulement dans les transformateurs de puissance

II.1 Introduction..... 19

II.2 Phénomène d'électrisation..... 20

|  |    |
|--|----|
| II.2.1 Phénomène d'électrisation par frottement.....                               | 20 |
| II.2.2 Phénomène d'électrisation par contact.....                                  | 21 |
| II.3 Electrification par écoulement dans les transformateurs de puissance.....     | 22 |
| II.3.1 Description du phénomène.....   | 22 |
| II.3.2 Paramètres influents sur le phénomène d'électrification par écoulement..... | 24 |
| II.3.3 Dispositifs de mesure du phénomène d'électrification par écoulement.....    | 27 |
| II.3.4 Système du disque en rotation.....  | 30 |
| II.4 Conclusion.....   | 33 |

### **Chapitre III Présentation du logiciel ANSYS CFX**

|   |    |
|---|----|
| III.1 Introduction .....                                  | 34 |
| III.2 La simulation numérique sur logiciel ANSYS CFX..... | 34 |
| III.2.1 Module ICEM.....                                  | 34 |
| III.2.2 Module CFX-Pre.....                               | 37 |
| III.2.3 Module CFX-Solve.....                             | 39 |
| III.2.4 Module CFX-Post.....                              | 39 |
| III.3 Conclusion.....                                     | 41 |

### **Chapitre IV Simulation numérique Résultat et interprétation**

|  |    |
|--|----|
| IV.1 Introduction.....   | 42 |
| IV.2 Modélisation de la dispositif du disque en rotation.....              | 43 |
| IV.2.1 Conception du dispositif.....                                       | 43 |
| IV.2.2 Elaboration de la géométrie des éléments de disque en rotation..... | 43 |
| IV.2.3 Elaboration du maillage de système disque en rotation.....          | 45 |
| IV.3 Simulation numérique de système.....                                  | 47 |
| IV.3.1 Objectif.....   | 47 |
| IV.3.2 Définition physique et condition aux limites.....                   | 47 |
| IV.3.3 Condition aux limites.....  | 47 |
| IV.4 Résultats et interprétations.....                                     | 47 |
| IV.4.1 Caractéristiques des isolants.....                                  | 47 |
| IV.4.2 Influence de vitesse de rotation.....                               | 48 |



|   |    |
|---|----|
| IV.4.3 Etude de l'influence de température..... | 52 |
| IV.4.4 Influence d'état du surface.....         | 53 |
| IV.4.4.1 Influence de l'épaisseur.....          | 53 |
| IV.4.4.2 Influence de rugosité.....             | 55 |
| IV.5 Conclusion.....                            | 56 |
| Conclusion générale.....                        | 57 |
| <b>Bibliographie</b>                            |    |

## Liste de figure

|   |    |
|---|----|
| <b>Figure I.1</b> Schéma de principe d'un transformateur monophasé.....   | 3  |
| <b>Figure I.2</b> Transformateur à cuve radiateur.....  | 4  |
| <b>Figure I.3</b> Transformateur cuirassé.....  | 6  |
| <b>Figure I.4</b> Transformateur a colonne.....   | 7  |
| <b>Figure I.5</b> Motif élémentaire d'une cellulose.....  | 9  |
| <b>Figure I.6</b> glucose présents dans les hémicelluloses.....   | 10 |
| <b>Figure I.7</b> Calcul de $\tan\delta$ (facteur de dissipation).....  | 11 |
| <b>Figure I.8</b> Image MEB : coupe d'un carton TIV neuf d'épaisseur 3 mm, grossissement 40×.....                 | 13 |
| <b>Figure I.9</b> Mécanisme de formation de HMF à partir du glucose.....  | 17 |
| <b>Figure II.1</b> les expériences d'électrisation par frottement.....  | 21 |
| <b>Figure II.2</b> électrisation par contact.....   | 21 |
| <b>Figure II.3</b> Processus d'électrisation par écoulement dans un transformateur haute tension.....             | 22 |
| <b>Figure II.4</b> Détérioration d'un carton due à des décharges partielles dans un transformateur colonne.....   | 23 |
| <b>Figure II.5</b> – Galette présentant des arborescences en partie inférieure.....                               | 24 |
| <b>Figure II.6</b> Le Ministatic Tester.....  | 28 |
| <b>Figure II.7</b> Le dispositif de mesure ECT du LEA.....  | 29 |
| <b>Figure II.8 a.</b> Représentation vectorielle des vitesses des fluides près du disque.....                     |    |
| <b>b.</b> Schéma rationalise résultante (ou le débit modèle) à disque rotatif.....                                | 30 |
| <b>Figure II.9</b> -Cellule- type CIGRE- pour la mesure de l'électrisation statique d'un couple carton-huile..... | 31 |
| <b>Figure II.10</b> –Dispositif de mesure des charges électrostatiques sur cellule CIGRE.....                     | 32 |
| <b>Figure III.1</b> Géométrie simulée.....  | 34 |
| <b>Figure III.2</b> Créer un point.....   | 35 |
| <b>Figure III.3</b> Créer une surface.....  | 35 |
| <b>Figure III.4</b> Créer le volume.....  | 36 |
| <b>Figure III.5</b> Nommer les surfaces.....  | 36 |
| <b>Figure III.6</b> Générer le maillage dans tout le volume.....  | 37 |
| <b>Figure III.7</b> Importer le maillage.....   | 38 |
| <b>Figure III.8</b> Enregistrer le Pre-Processing.....  | 38 |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Figure III.9</b> <i>Créer le domaine de calcul.....</i>  | <b>38</b> |
| <b>Figure III.10</b> <i>Définition des conditions aux limites.....</i>  | <b>39</b> |
| <b>Figure III.11</b> <i>lancer le calcul.....</i>   | <b>39</b> |
| <b>Figure III.12</b> <i>Créer des champs de vitesse.....</i>  | <b>40</b> |
| <b>Figure III.13</b> <i>Comment tracer une courbe ?.....</i>  | <b>40</b> |
| <b>Figure IV.1</b> <i>Coupe du modèle 'disque en rotation' représente le domaine étudié.....</i>                | <b>42</b> |
| <b>Figure IV.2</b> <i>Géométrie d'une coupe de système disque de rotation à l'ICEM CFD.....</i>                 | <b>44</b> |
| <b>Figure IV.3</b> <i>Génération des points et des arcs en 3D.....</i>  | <b>45</b> |
| <b>Figure IV.4</b> <i>Génération des surfaces en 3D.....</i>  | <b>45</b> |
| <b>Figure IV.5</b> <i>Génération de maillage.....</i>   | <b>46</b> |
| <b>Figure IV.6</b> <i>La configuration de vitesse de rotation du disque dans le CFX Pre à 200 tr /min.....</i>  | <b>49</b> |
| <b>Figure IV.7</b> <i>La configuration de la rugosité de disque de carton à 35 <math>\mu</math>m.....</i>       | <b>49</b> |
| <b>Figure IV.8</b> <i>Contour de vitesse de l'huile pour une rotation de 200 tr/min.....</i>                    | <b>50</b> |
| <b>Figure IV.9</b> <i>évolution de courant en fonction de vitesse de rotation.....</i>                          | <b>51</b> |
| <b>Figure IV.10</b> <i>évolution de courant en fonction de vitesse de rotation pour chaque température.....</i> | <b>52</b> |
| <b>Figure IV.11</b> <i>évolution de courant en fonction de température.....</i>                                 | <b>53</b> |
| <b>Figure IV.12</b> <i>Géométrie et contour de vitesse pour une épaisseur de 10 mm et w=200 tr/min.....</i>     | <b>53</b> |
| <b>Figure IV.13</b> <i>Géométrie et contour de vitesse pour une épaisseur de 15 mm et w=200 tr/min.....</i>     | <b>54</b> |
| <b>Figure IV.14</b> <i>évolution de courant en fonction de vitesse de rotation pour chaque épaisseur.....</i>   | <b>54</b> |
| <b>Figure IV.15</b> <i>évolution de courant en fonction d'épaisseur.....</i>                                    | <b>55</b> |
| <b>Figure IV.16</b> <i>évolution de courant en fonction de la rugosité.....</i>                                 | <b>56</b> |

## Liste des tableaux

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Tableau I.1</b> <i>Listes de quelques facteurs d'influence importants et de modes de fonctionnement relatifs à l'isolation des matériels électriques.....</i> | <b>8</b>  |
| <b>Tableau I.2</b> <i>Données techniques du carton Transformer board TIV d' épaisseur 3 mm..</i>   | <b>12</b> |
| <b>Tableau I.3</b> <i>Composition typique des bruts pétroliers (en %) [9].....</i>   | <b>15</b> |
| <b>Tableau IV.1</b> <i>Dimensions de la géométrie utilisé par défaut.....</i>  | <b>43</b> |
| <b>Tableau IV.2</b> <i>Les propriétés physico-chimique d'une huile minérale neuve à une température de 20°C.....</i>   | <b>48</b> |
| <b>Tableau IV.3</b> <i>Les propriétés physico-chimique d'un papier carton neuf.....</i>  | <b>48</b> |
| <b>Tableau IV.4</b> <i>Les différentes contraintes de cisaillements obtenus par la simulation.....</i>   | <b>50</b> |
| <b>Tableau IV.5</b> <i>Les différentes contraintes de cisaillement obtenu par la simulation....</i>  | <b>52</b> |
| <b>Tableau IV.6</b> <i>Les différentes contraintes de cisaillement obtenu par la simulation.....</i>   | <b>54</b> |
| <b>Tableau IV.7</b> <i>Les différentes contraintes de cisaillement obtenu par la simulation.....</i>   | <b>55</b> |

## Liste des abréviations

|             |   |
|-------------|---|
| <b>HT</b>   | <b>H</b> aute <b>T</b> ension   |
| <b>BT</b>   | <b>B</b> ase <b>T</b> ension  |
| <b>OIP</b>  | <b>O</b> il <b>I</b> mpregnated <b>P</b> aper                         |
| <b>RIP</b>  | <b>P</b> apier <b>I</b> mprégné de <b>R</b> ésine                     |
| <b>CEI</b>  | <b>C</b> ommission <b>E</b> lectrotechnique <b>I</b> nternationale    |
| <b>PCB</b>  | <b>P</b> olychlorobiphényles  |
| <b>MEB</b>  | <b>M</b> icroscope <b>é</b> lectronique à <b>B</b> alayage            |
| <b>PDMS</b> | <b>P</b> oly <b>d</b> iméthylsiloxane                                 |
| <b>UV</b>   | <b>U</b> ltra <b>V</b> iolet  |
| <b>ASTM</b> | <b>A</b> merican <b>S</b> ociety for <b>T</b> esting <b>M</b> aterial |
| <b>NTU</b>  | <b>U</b> nité <b>N</b> éphélométrique de <b>T</b> ubidité             |
| <b>EDL</b>  | <b>D</b> ouble <b>C</b> ouche <b>E</b> lectrique                      |
| <b>ECT</b>  | la <b>T</b> endance de la <b>C</b> harge <b>E</b> lectrostatique      |
| <b>LEA</b>  | <b>L</b> aboratoire d' <b>E</b> tudes <b>A</b> érodynamiques          |
| <b>PTEE</b> | <b>P</b> olytétrafluoroéthène   |
| <b>CFD</b>  | <b>C</b> omputational <b>F</b> luid <b>D</b> ynamics                  |
| <b>CAO</b>  | <b>C</b> onception <b>A</b> ssistée par <b>O</b> rdinateur            |

---

## Nomenclature

|              |  |
|--------------|--|
| $I_c$        | Courant capacitive   |
| $I_s$        | Courant d'accumulation   |
| $\delta d$   | Épaisseur  |
| $I$          | Courant d'électrisation  |
| $\delta$     | L'épaisseur laminaire de couche inférieure                                 |
| $\omega$     | La vitesse angulaire   |
| $\nu$        | La viscosité du liquide  |
| $\rho$       | La densité du liquide  |
| $\sigma$     | La conductivité du liquide   |
| $\epsilon_0$ | Le constant diélectrique de l'espace libre                                 |
| $\epsilon_r$ | Le constant diélectrique de liquide  |
| $\tau_w$     | La contrainte cisaillement   |
| $\tau$       | La période de relaxation de la charge                                      |
| $q_w$        | La densité de charge de volume à l'interface                               |
| $q_0$        | La densité de charge de volume dans le liquide                             |
| $D_m$        | <i>le coefficient de diffusion moléculaire</i>                             |
| $V$          | Le volume de liquide dans le récipient de mesure                           |
| $R_1$        | Le rayon du disque   |
| $\lambda$    | La profondeur de pénétration de charge dans la couche inférieure laminaire |
| $Re$         | Nombre de Reynold  |
| $S_d$        | La surface du disque   |
| $S_c$        | La surface du récipient  |
| $A$          | Rapport de la densité de charge  |

### Introduction générale

De nos jours, le transformateur de puissance joue un rôle essentiel dans le transport de l'énergie électrique. Il se compose d'un ensemble de bobines de cuivre gainées par le papier, des écrans en carton permettant le support mécanique des bobinages et l'isolation électrique entre les différentes phases du transformateur et un liquide diélectrique qui permet l'évacuation de la chaleur. Le bon fonctionnement des transformateurs de puissance repose en grande partie sur leur isolation électrique et sur le contrôle de leur température.

La surface des cartons est soumise à un écoulement d'huile. Lorsque l'huile est en contact avec les constituants celluloses, des charges électriques apparaissent à l'interface : l'huile se trouve chargée positivement, le carton négativement. L'écoulement d'huile entraîne les charges positives alors que la surface du carton conserve les charges négatives. Ce phénomène est appelé l'électrisation statique ou encore électrisation par écoulement. L'huile ne reste pas longtemps chargée car son écoulement permet aux charges positives de se relaxer, une fois en contact avec une partie métallique à la masse (cuve du transformateur par exemple). En revanche, le carton étant très isolés, il accumule les charges négatives. Une accumulation trop importante de charges à la surface peut engendrer des potentiels de surface élevés, capables d'initier des charges électriques (décharges partielles) vers des points de potentiels moins élevés. Ces charges, plus ou moins importantes, détériorent les propriétés diélectriques de l'huile et du matériau cellulosique, et sont considérés comme responsables de claquage destructifs observés en partie inférieures des bobinages.

Ce mémoire est organisé comme suit :

Le chapitre 1 présente des généralités sur les transformateurs de puissance : son rôle, les différents types du transformateur ainsi que la structure interne de ces équipements. Les systèmes d'isolation et la dégradation seront aussi présentés.

Le chapitre 2 traite le phénomène d'électrisation par écoulement ; une brève description d'électrisation statique par écoulement sera exposée ainsi que les paramètres influent sur ce phénomène. Nous présentons aussi les différents modèles proposés par des chercheurs pour mesurer le courant statique.

Le chapitre 3 est consacré à la présentation du logiciel **ANSYS CFX**.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons les résultats de simulation de l'influence de plusieurs paramètres sur le courant d'électrisation. Pour la simulation nous avons utilisé le dispositif à disque rotatif.

Enfin nous finissons notre travail avec une conclusion générale.

# **Chapitre I**

## **Généralités sur les transformateurs de puissance**



## **Chapitre II**

# **Phénomène d'électrisation par écoulement dans les transformateurs de puissance**

## **Chapitre III**

# **Présentation du logiciel**

## **ANSYS CFX**

# **Chapitre IV**

**Simulation numérique**

**Résultat et interprétation**

## I.1 Introduction :

Dans ce chapitre, nous présentons de manière générale les transformateurs de puissance. Nous présentons ensuite de manière plus spécifique l'isolation liquide et solide utilisées dans les transformateurs de puissance.

Les transformateurs de puissance sont des organes vitaux des réseaux de transport et de distribution de l'énergie électrique. Ils sont utilisés pour adapter le niveau de tension aux besoins de l'utilisation.

Ils sont des machines électriques statiques dont la fonction est d'élever ou d'abaisser la tension d'un circuit électrique parcouru par un courant électrique à distance. En effet, les tensions de fonctionnement des machines génératrices n'excèdent pas une vingtaine de kilovolts en courant alternatif.

Or le transport de grandes puissances sur des distances notables ne peut être réalisé de façon économique que s'il est effectué à très haute tension, soit plusieurs centaines de kilovolts. Il est donc nécessaire d'installer, à proximité immédiate des groupes générateurs, des transformateurs « éleveurs » de tension. On devra trouver des appareils « abaisseurs » aux points de fourniture de l'énergie électrique, les tensions normales d'utilisation étant comprises entre quelques centaines et quelques milliers de volts. Il existe d'autres types de transformateurs employés principalement pour des mesures de grandeurs électriques. Leur principe de fonctionnement est tout à fait identique à celui des transformateurs de puissance, mais leurs caractéristiques peuvent avoir des ordres de grandeur tout à fait différents.

Le transformateur permet d'obtenir le changement de la valeur efficace d'une tension alternative avec un excellent rendement. Pour des raisons d'isolation et de transfert de chaleur, les transformateurs rencontrés dans le domaine de l'énergie électrique contiennent généralement de l'huile minérale. Ils peuvent être classifiés selon les quatre catégories décrites ci-après :

Les transformateurs de distribution : sont classés dans cette catégorie, les transformateurs ayant une puissance maximale égale à 2500 KVA en triphasé ou 833 KVA en monophasé

\_ Les transformateurs de moyenne puissance, les transformateurs dont la puissance supérieure à 2500 KVA et au maximum égale à 100 MVA en triphasé ou 33,3 MVA en monophasé.

\_ Les transformateurs de puissance sont les transformateurs dont la puissance est supérieure à 100 MVA.

## I.2 Le rôle d'un transformateur :

D'une manière simplifiée, un transformateur est composé d'un noyau magnétique (acier doux au silicium) sur lequel sont disposés deux enroulements en cuivre : l'enroulement branché sur la source d'énergie est le « primaire » et l'enroulement branché vers les récepteurs est le « secondaire ».

Les deux enroulements ont un nombre de spires (tours) différents : le plus grand est l'enroulement « haute tension (HT) » et le plus petit, l'enroulement « basse tension (BT) ».

Le transformateur est un appareil statique à induction électromagnétique, à deux enroulements ou plus, destiné à transformer un système de tension(s) et courant(s) alternatifs, en un système de tension(s) et courant(s) de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme, en vue de transférer une puissance électrique [1]. Il effectue cette transformation avec un excellent rendement.

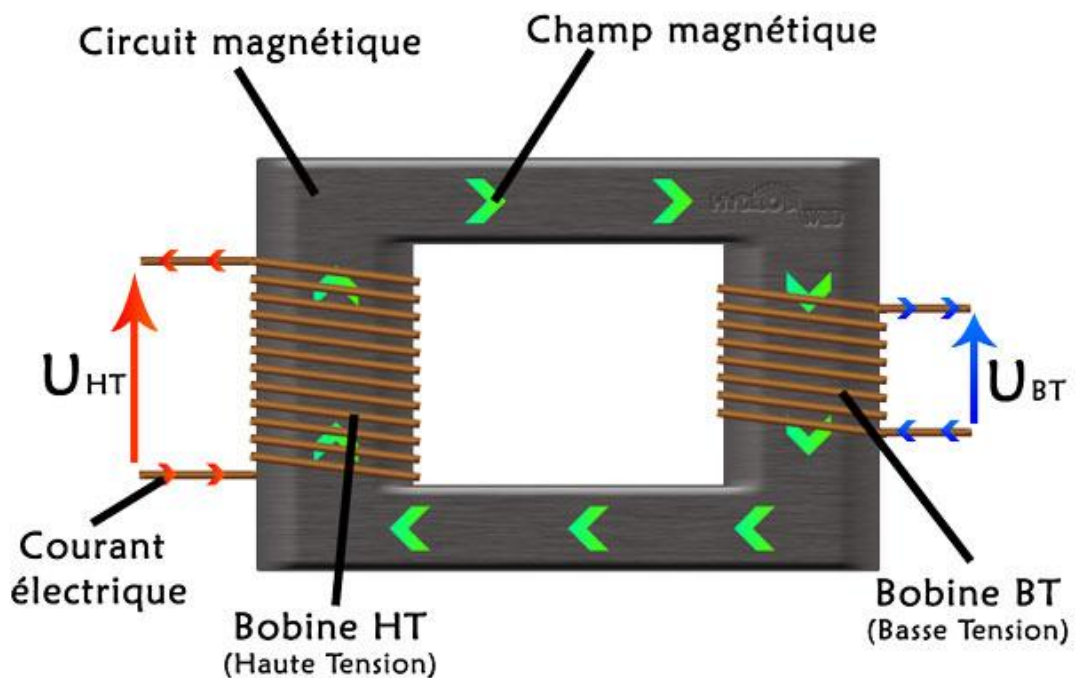
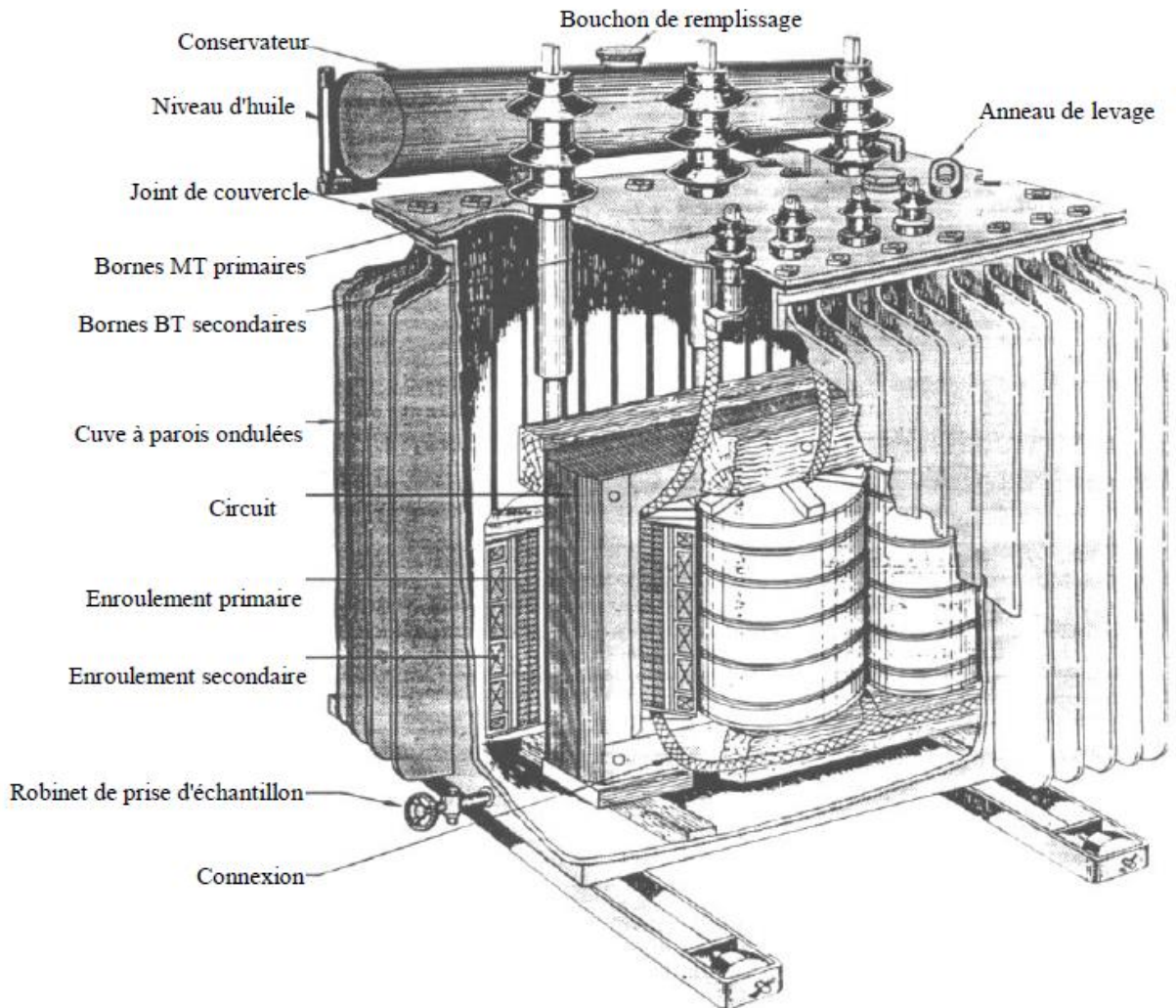


Figure I.1 Schéma de principe d'un transformateur monophasé.

### I.3 Constitution générale d'un transformateur :

Le transformateur de puissance **figure I.2**, se compose d'un circuit magnétique et d'un circuit électrique.



**Figure I.2** Transformateur à cuve radiateur.

Les transformateurs de puissance rencontrés dans la pratique sont refroidis à l'huile et de construction triphasée. Pour des raisons d'encombrement (poids et dimension) et de transport, on les trouve en unités monophasées.

Les principaux organes du transformateur sont :

1- Les bornes de traversées basses et hautes tensions : Elles sont caractérisées par la technologie de l'isolation : les traversées en papier imprégné d'huile (OIP); les traversées en papier enduit de résine «limitées aux basses tensions» et les traversées en papier imprégné de résine (RIP ou ERIP) «technologie dominante de nos jours».

Elles permettent le transit de la puissance.

2- La cuve constituée de tôles d'acier : Les parois de la cuve sont, selon les modèles, à ailettes ou rigides équipées de radiateurs amovibles. L'étanchéité doit être parfaite, la cuve est testée sous vide pour contrôler ce point.

3- Le noyau magnétique : Il est constitué de tôles d'acier au silicium à grains orientés. L'empilage et l'assemblage des tôles doivent être réalisés de manière à ce que le transformateur ait les meilleures performances possibles du point de vue électrodynamique, électrique et acoustique.

4- Les enroulements : Sous forme de (feuillard, rond, méplat) de cuivre ou d'aluminium, ils sont montés sur le noyau. Les formes de bobinages, les sections et les nombres de spires sont conditionnés par les contraintes à maîtriser en termes électriques, thermiques et mécaniques. Chaque bobine est munie de canaux de refroidissement permettant d'assurer la circulation de l'huile et les échanges thermiques.

5- Le conservateur d'huile : Réservoir métallique en général, en acier, il est situé au-dessus de la cuve du transformateur. Il joue un rôle de vase d'expansion pour l'huile. Les variations de température de l'huile impliquent des variations du volume. Le conservateur permet au niveau d'huile de varier sans affecter la pression dans le transformateur, ni découvrir (mettre à nu) les parties actives.

6- Le changeur de prise en charge ou hors charge : Il permet au transformateur de faire varier son rapport de conversion en jouant sur le nombre de spires de ses enroulements primaires ou secondaires. Cela permet de régler le niveau de tension du réseau électrique.

7- L'armoire (ou coffret) de commande : elle comporte tous les dispositifs de protection et les alarmes de déclenchement.

8- Le fluide diélectrique : huile minérale, huile synthétique ou huile végétale.

9- Les isolants solides : papiers et cartons à base de fibres cellulosiques et/ou de fibres d'aramide.

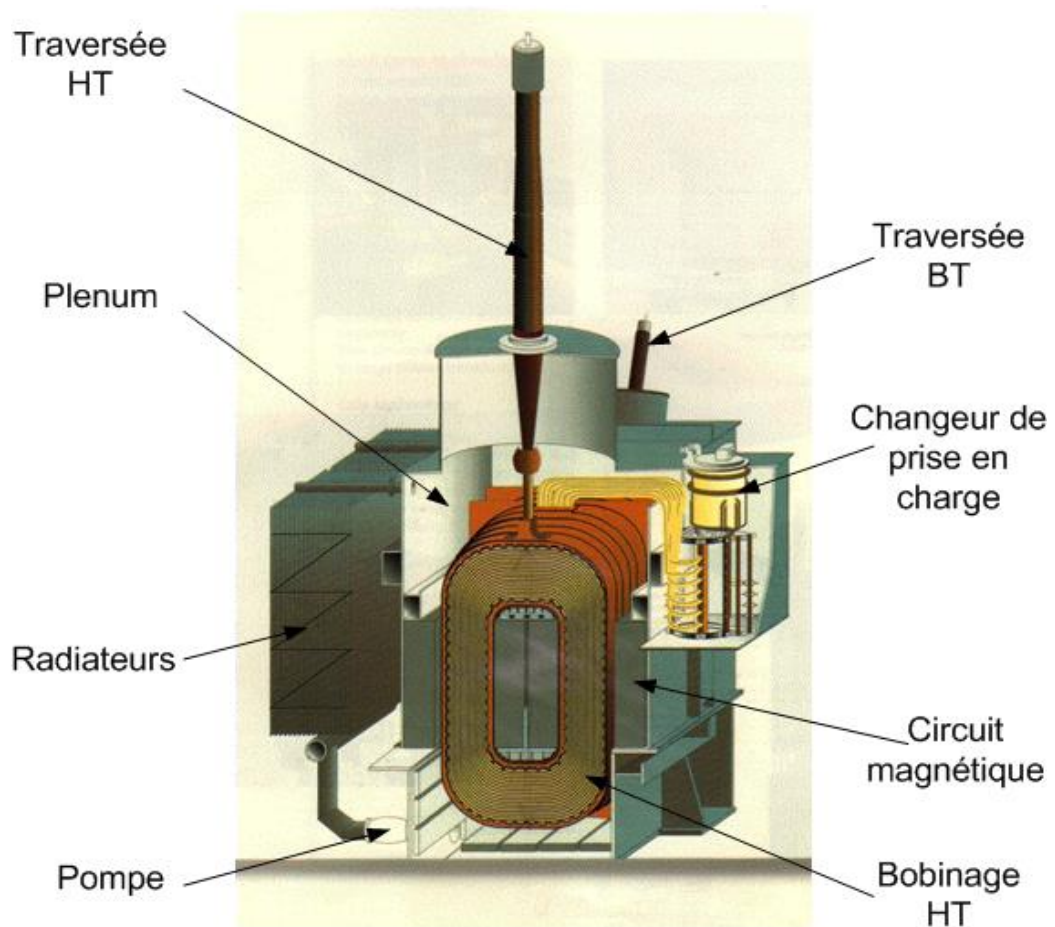
#### **I.4 Les transformateurs à haute tension :**

Il existe deux technologies de transformateur utilisées dans la haute tension : la technologie « cuirassé » et la technologie « colonne ». Le principe de fonctionnement est identique dans les deux cas, seul le procédé de fabrication diffère. Ces transformateurs sont refroidis par circulation forcée d'huile minérale.

#### I.4.1 Le transformateur de type «cuirassé» :

Le transformateur cuirassé est constitué d'enroulements en forme de galettes rectangulaires. Des écrans isolants en fibre de cellulose (carton dont l'épaisseur varie suivant la contrainte diélectrique) sont placés entre chaque galettes. Ces écrans en carton sont munis de cales matérialisant les canaux de circulation de l'huile minérale. Autour des bobines à axe horizontal est placé le circuit magnétique, formé d'un empilage de tôles.

Ce type de transformateur est illustré par les schémas et la photographie de **figure I.3**



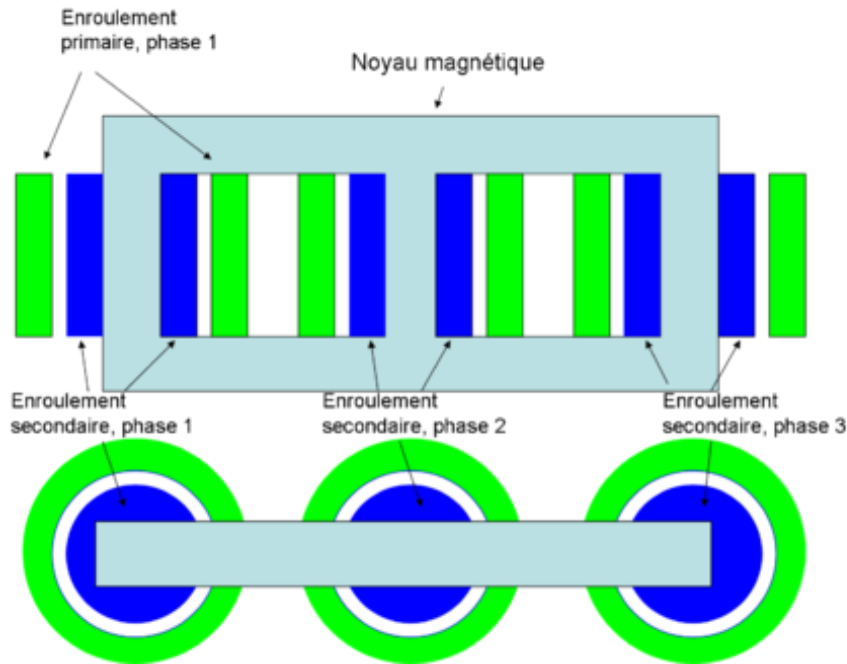
**Figure I.3** Transformateur cuirassé.

#### I.4.2 Le transformateur de type «colonne» :

Le transformateur de type colonne est constitué d'un circuit magnétique en colonne verticales autour desquelles sont placés les bobinages cylindriques recouverts d'isolants en fibre de cellulose. Des photographies d'un transformateur colonne en cours d'assemblage sont données **figure I.4**. Sur la première, on distingue les trois colonnes d'un transformateur



triphase [2]. Sur la deuxième, un opérateur est en train d'enrouler le fil de cuivre guipé autour d'une des colonnes en cours de fabrication.



**Figure I.4** Transformateur à colonne.

## I.5 Le système d'Isolation des transformateurs :

L'isolation des parties actives des transformateurs de puissance est réalisée à l'aide de papier, de carton et d'huile (minérale ou synthétique). Ce système d'isolation qui est le maillon le plus faible dans le transformateur, représente la partie la plus importante du transformateur à entretenir et exige pour ce faire une attention particulière [3].

### I.5.1 Isolation solide :

Les isolants solides jouent parfois le rôle d'un support mécanique des conducteurs et doivent donc transmettre les efforts électromagnétiques qui s'exercent pendant le fonctionnement. En outre, ils ont à supporter, et souvent à transmettre par conduction au dispositif de réfrigération, la chaleur dégagée dans les différentes parties de l'appareil (conducteurs, circuits magnétiques et isolants). Toutes ces contraintes (diélectriques, mécaniques et thermiques), influencent la tenue des isolants. Cependant, il y a d'autres influences du matériel intéressé liées à son environnement; telles que l'action de l'humidité et de l'oxygène atmosphériques, ainsi que l'action du rayonnement ultra-violet (UV) et des pollutions industrielles...

**Le tableau I.1** [4, 6] résume quelques facteurs d'influence importants et des modes de fonctionnement relatifs à l'isolation des matériels électriques.

Ces facteurs peuvent accélérer le vieillissement; on les appelle alors facteurs de vieillissement; comme ils permettent aussi de constater l'état d'une isolation sans accroître son état de dégradation; ils sont aussi appelés facteurs de diagnostic. Pour ces derniers, il existe des procédures de diagnostic qui ont été répertoriées [5],

| Contraintes électriques   | Environnement   |
|---|---|
| Tension de service<br>Surtensions ( régime transitoire)<br>Fréquence<br>Décharges partielles<br>Cheminement<br>Contournement<br>Décharges rampantes           | Air<br>Oxygène<br>Hydrogène<br>Azote<br>Gaz inertes<br>Hexafluorure de soufre<br>Pollutions industrielles<br>Rayonnement ultraviolet<br>Radiations nucléaires           |
| Contraintes mécaniques  | Vide  |
| Vibrations électrodynamiques<br>Chocs électrodynamique<br>Chocs mécaniques<br>Flexion<br>Pression<br>Tension<br>Compressions répétées<br>Torsion              | Lubrifiants solvants<br>Liquides isolants<br>Eau<br>Acides, base<br>Poussière semi-conductrice<br>Poussière et sable<br>Moisissures<br>Rongeurs<br>Termites<br>humidité |
| Contraintes thermiques  | Mode de fonctionnement  |
| Température maximale<br>Température ambiante basse<br>Température élevée<br>Gradient de température<br>Vitesse d'évolution de la température (choc thermique) | Continu<br>De courtes durées<br>Intermittent<br>Stockage et transport   |

**Tableau I.1** Listes de quelques facteurs d'influence importants et de modes de fonctionnement relatifs à l'isolation des matériels électriques

### I.5.1.1 Papier et carton isolants :

Le papier et le carton (ou pressboard) sont des matériaux isolants bon marché, possédant 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 [7].

Les trois constituants principaux du papier kraft sont la cellulose (90%), les hémicelluloses (1.5 à 3%) et les lignines (2 à 4.5%).

#### • Cellulose :

La cellulose peut être caractérisée par son degré de polymérisation moyen qui est le nombre moyen de motifs glucose par chaîne de cellulose.

Dans l'industrie électrique, la détermination du degré de polymérisation moyen (DP<sub>v</sub>) de la cellulose se fait généralement par une méthode viscosimétrique après dissolution de la cellulose dans la cupriéthylène diamine [8]. Cette détermination se fait également par diffusion de la lumière, ou par chromatographie par perméation de gel.

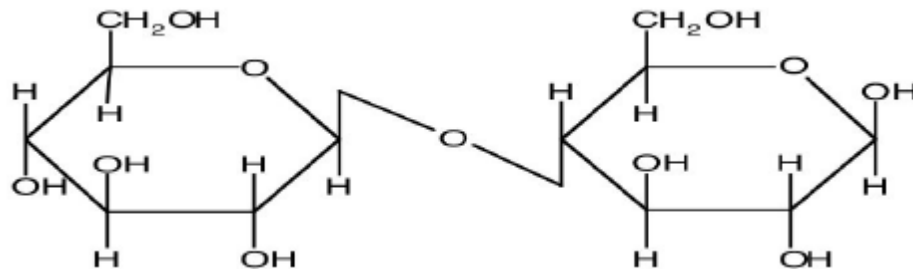


Figure I.5 Motif élémentaire d'une cellulose

#### • Les hémicelluloses :

Les hémicelluloses sont des hétéro-polysaccharides contenant des monosaccharides de type variés (avec 6 ou 5 atomes de carbone). Ils sont partiellement liés aux molécules de cellulose et de lignine liaison hydrogène. Les glucoses présents dans ces polymères, hétérogènes en composition et en structure, sont décrits dans la **figure I.6**.

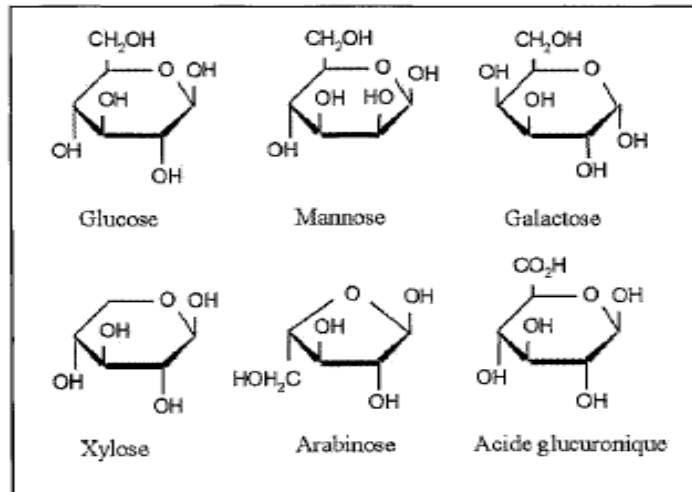


Figure I.6 glucose présents dans les hémicelluloses.

• **Les lignines :**

Les lignines sont des polymères tridimensionnels irréguliers constitués de motifs phénylpropane. Ces polymères, incrustés dans les polysaccharides (cellulose et hémicellulose) pariétaux du bois, jouent un rôle de ciment.

La lignine résiduelle contenue dans la pâte après traitement Kraft est difficile à éliminer (inaccessibilité physique, liaison lignines-hydrates de carbone) sans provoquer des coupures dans les chaînes de cellulose, et par conséquent une dépolymérisation importante de la cellulose [6].

**I.5.1.2 Caractéristiques d'électriques du papier :**

Pour caractériser les propriétés diélectriques du papier isolant, trois facteurs peuvent être étudiés : la permittivité relative, la rigidité diélectrique et le facteur de dissipation diélectrique ( $\tan \delta$ ).

• **Permittivité relative :**

La permittivité relative  $\epsilon_r$  est définie comme le rapport entre la capacité d'un condensateur rempli du diélectrique en question  $C_x$ , et la capacité du même condensateur à vide  $C_0$  [9].

$$\epsilon_r = C_x / C_0 \quad (I.1)$$

La permittivité relative de cellulose pure est de 5,9 [6].

• **La rigidité électrique et la tension de claquage :**

La rigidité diélectrique d'un milieu représente la valeur maximale du champ électrique (V/m) que le milieu peut supporter sans que se produise une dégradation irréversible nommée claquage. La rigidité du milieu est définie d'après l'équation I.2 :

$$r = U_C / d \quad (I.2)$$

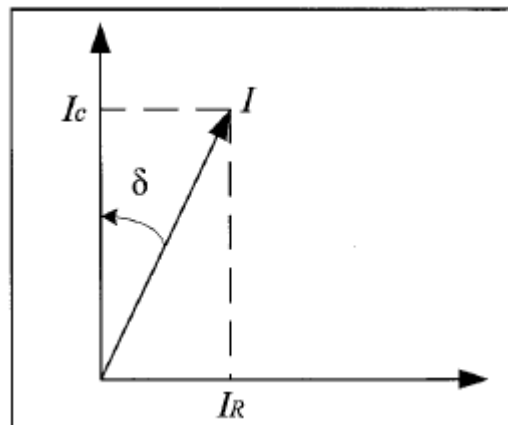
Où  $d$  est l'épaisseur de l'isolant placé entre deux électrodes d'un condensateur plan et  $U_C$  sa tension de claquage.

La tension de claquage d'un matériau dépend d'un grand nombre de facteurs dont la mise en œuvre et la présence d'impuretés (eau, gaz, particules...). Les solides ont généralement une tension de claquage supérieure à celle des liquides, et les liquides ont une tension de claquage très supérieure à celle des gaz.

• **Le facteur de dissipation diélectrique ( $\tan\delta$ ) :**

La qualité de l'isolation peut être évaluée grâce à la mesure du facteur de dissipation. Plus le facteur de dissipation est faible, moins il y a des pertes dans l'isolant donc moins il y a d'énergie dissipée sous forme de chaleur. À une fréquence donnée, par exemple 50 ou 60 Hz, le comportement de l'isolant peut être représenté par un circuit équivalent constitué par un condensateur idéal avec une résistance en parallèle. Un condensateur idéal n'a pas de perte et le déphasage entre la tension et le courant est de  $90^\circ$  degré. Dans un système réel, ce déphasage est de  $90^\circ$  degré moins l'angle  $\delta$  (**figure I.7**). Le facteur de dissipation est défini comme étant la tangente de cet angle  $\delta$ ; appelé aussi « $\tan\delta$ ». Autrement dit, le facteur de dissipation est le rapport entre courant traversant la résistance  $I_R$  et le courant traversant le condensateur idéal  $I_C$ .

$$\tan\delta = I_R / I_C \quad (I.3)$$



**Figure I.7** Calcul de  $\tan\delta$  (facteur de dissipation).

**I.5.1.3 Caractéristiques physiques et mécaniques du carton :**

Les caractéristiques mécaniques des cartons de transformateurs sont déterminées par le choix de la matière première, les traitements pendant la fabrication, et la préparation des

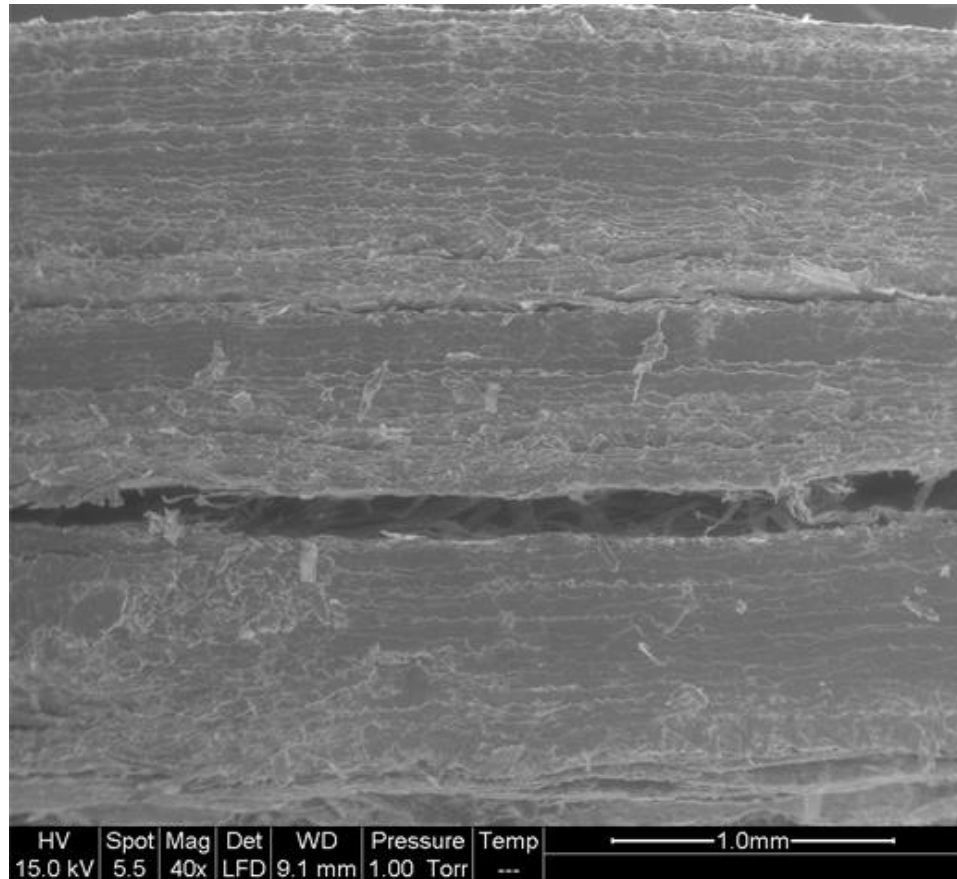
plaques (Moser 1979). Le **tableau I.2** présente quelques valeurs typiques des propriétés des cartons Weidmann TIV données par le constructeur. Les tests de mesure de ces caractéristiques sont effectués dans les laboratoires de la société Weidmann, selon les normes IEC 641-2 et 243-1.

| Propriétés  | Valeurs |
|---|---------|
| Densité apparente (g/cm <sup>3</sup> )                      | 1.19    |
| Résistance à la traction, sens machine (N/mm <sup>2</sup> ) | 130     |
| Résistance à la traction, sens travers (N/mm <sup>2</sup> ) | 95      |
| Elongation, sens machine (%)                                | 5       |
| Elongation, sens travers (%)                                | 5       |
| Rétrécissement, sens machine (%)                            | 0.3     |
| Rétrécissement, sens travers (%)                            | 0.4     |
| Rétrécissement, épaisseur (%)                               | 3.9     |
| Taux d'humidité (%)   | < 6     |
| Absorption d'huile (%)                                      | 13      |

**Tableau I.2** Données techniques du carton Transformer board TIV d'épaisseur 3 mm.

Le carton TIV a fait l'objet de caractérisations approfondies lors de projets postdoctoraux réalisés au LGP2 (Onic 2000 ; Bertrand et Charvet 2001). Dans le but de fabriquer des cartons à l'échelle du laboratoire, la connaissance des propriétés de carton TIV devait être complétée. La porosité du carton a été mesurée par la méthode de porosimétrie au mercure dont le principe est rappelé dans la partie Matériel et Méthodes.

Le résultat de cette mesure est calculé suivant un modèle de pore cylindrique et donne un diamètre modal de 0,72  $\mu\text{m}$  en moyenne. La porosité est de 20,2 % (Onic 2000). Une image du carton TIV prise au microscope électronique à balayage (MEB) (**Figure I.8**) permet de voir les différentes couches de papier, et la faible porosité du matériau. En effet, peu de pores sont visibles. Le morceau de carton analysé présente un décollement entredeux couches. Celui-ci s'est créé lors de la coupe du matériau. La coupe a été réalisée avec une lame de cutter neuve, par pression progressive en vue de couper l'échantillon le plus proprement possible. Cependant, le carton TIV étant très difficile à couper, il est souvent abimé lors de la préparation des échantillons pour l'analyse MEB.



**Figure I.8** Image MEB : coupe d'un carton TIV neuf d'épaisseur 3 mm, grossissement 40× [10].

### I.5.2 Huile isolante :

Les huiles sont utilisées pour l'isolation des équipements électriques depuis la fin du 19ème siècle [9]. À ce jour, l'huile constitue encore un composant important dans les installations électriques et les transformateurs de puissance en particulier.

#### I.5.2.1 Caractéristiques diélectriques de l'huile isolante :

Les performances des diélectriques liquides sont caractérisées de plusieurs façons, notamment par la mesure de leur conductivité électrique et par leur tenue au claquage [9]. Le comportement des liquides au vieillissement (stabilité thermique, à l'oxydation et à l'hydrolyse) doit également être pris en compte. Lorsque le liquide est avant tout un fluide de transfert thermique, les propriétés prépondérantes seront principalement la viscosité et la capacité thermique [9].

#### La permittivité relative :

Comme le papier isolant, la permittivité relative de l'huile est définie par l'équation (I.1). La permittivité est une caractéristique intrinsèque d'un produit. Elle dépend

essentiellement de la structure chimique et caractérise la polarité de la molécule. Dans les chaînes hydrocarbonées, les dipôles sont de faible polarité.

La permittivité des hydrocarbures est faible et voisine de 2 [9]. La présence d'hétéroatomes (oxygène, chlore...), en créant des dipôles de forte intensité, confère aux molécules une permittivité élevée. La permittivité décroît légèrement avec la température et la fréquence du courant. La permittivité des huiles minérales est de l'ordre de 2,2 à 25°C [10].

#### **Conductivité électrique et facteur de dissipation ( $\tan \delta$ ) :**

La conductivité électrique d'un liquide isolant est due à la présence des charges libres positives et négatives (des ions ou électrons). Sous l'effet du champ électrique, ces ions se déplacent provoquant ainsi un courant de conduction. La conductivité  $\sigma$  s'exprime en S/m (siemens par mètre). Elle est inversement proportionnelle à la résistivité  $\rho$  :

$$\sigma = 1 / \rho \quad (I.4)$$

Sous tension alternative sinusoïdale de fréquence  $f$ , les pertes par conduction sont caractérisées par la tangente de l'angle de perte  $\delta$ , ou facteur de dissipation, le déphasage entre courant et tension étant  $\pi/2 - \delta$  tel que [6] :

$$\tan \delta = \sigma / (\epsilon \epsilon_0 \omega) \quad (I.5)$$

La conductivité d'un produit neuf est en général beaucoup plus faible que celle d'un produit en service, puisque celui-ci récupère des impuretés au contact des matériaux solides contenus dans l'équipement. De même, le vieillissement du produit, qu'il soit thermique, dû à une oxydation, à une hydrolyse, ou à tout autre processus, conduit systématiquement à la formation de sous-produits qui contribuent également à l'augmentation de la conductivité. Ainsi, si une huile minérale neuve a fréquemment une valeur de  $\tan \delta$  à 90 °C inférieure à 10<sup>-4</sup>, une huile dans un transformateur peut avoir une valeur de  $\tan \delta$  à 90 °C supérieure à 1. La présence d'eau n'affecte pas le  $\tan \delta$  d'un liquide si sa concentration est inférieure au seuil de saturation. Par contre, en présence d'une phase aqueuse non soluble, la conductivité d'un liquide augmente fortement à la suite du mouvement des gouttes d'eau sous l'effet du champ électrique [9].

#### **La rigidité diélectrique :**

La rigidité diélectrique (V/m) est le champ électrique minimal qui provoque le claquage d'un matériau. Le claquage d'un liquide conduit à la décomposition de ses molécules par rupture des liaisons chimiques entre les atomes. La présence d'eau n'affecte pas la rigidité d'un liquide tant que la concentration reste inférieure à 50 - 60 % de la saturation. Par contre,



lorsque la teneur en eau dépasse cette valeur, on observe une chute drastique de la tension de claquage.

### I.5.2.2 Les différents types de liquides isolants :

#### Les huiles minérales :

Les huiles minérales sont des hydrocarbures obtenues à partir du raffinage du pétrole brut et sont constituées exclusivement d'atomes de carbone (C) et d'hydrogène (H). La composition d'une huile minérale est définie par sa teneur en carbone paraffinique (Cp), en carbone naphhténique (Cn) et en carbone aromatique (Ca). La densité, la viscosité et le comportement à basse température (point d'écoulement, point trouble) d'une huile minérale sont influencés par sa teneur en carbones Cp et Cn. La résistance à l'oxydation, les propriétés de gassing et la rigidité en impulsion des huiles minérales sont améliorées par la présence de carbones aromatiques.

Les huiles minérales sont classées en fonction de la teneur en carbone paraffinique (Cp), en carbone naphhténique (Cn) et en carbone aromatique (Ca), ce classement donne dans le tableau suivant.

| Types d'hydrocarbures | Type de brut pétrolier |       |             |
|-----------------------|------------------------|-------|-------------|
|                       | Paraffinique           | Mixte | Naphténique |
| Paraffinique          | 60                     | 40    | 20          |
| Mixte                 | 25                     | 40    | 65          |
| Naphténique           | 15                     | 20    | 15          |

**Tableau I.3** Composition typique des bruts pétroliers (en %) [9].

#### Les huiles de synthèse :

Lorsque pour une application donnée, les propriétés requises ne peuvent pas être satisfaites par les huiles minérales, elles sont remplacées par les huiles synthétiques. C'est en particulier le cas lorsqu'il s'agit :

- D'améliorer la résistance au feu dans le cas des transformateurs (les huiles de silicone ont un point de feu presque deux fois plus élevé que les huiles minérales, de l'ordre de 300°C au lieu de 150 °C, ce qui réduit le risque d'explosion des transformateurs de puissances).
- De rechercher une meilleure stabilité thermique et chimique.
- De la recherche de grandes performances diélectriques (câbles et condensateurs).

Cependant le coût des huiles de silicone est également nettement supérieur à celui de l'huile minérale (d'un facteur environ 8) et la viscosité à haute température est supérieure à celle des autres huiles [11].

Il existe quatre types principaux d'huiles de synthèse [9]:

- Les hydrocarbures aromatiques ;
- Les hydrocarbures aliphatiques tels les polyoléfines ;
- Les esters (phtalates, esters de pentaerythritol) ;
- Les silicones.

**Les huiles végétales ou esters naturels :**

Les huiles végétales ou esters naturels sont obtenus par trituration (broyage et pression) des graines (soja, maïs, colza, tournesol, ricin, palmiste, etc.....). Elles sont constituées de triglycérides (R-COO-R') [12].

Au niveau de ses qualités, elle est écologique, très biodégradable, peu inflammable (point de combustion supérieur à 300°C) et possède une grande solubilité de l'eau (Teneur en eau = 200 mg/kg). Ces propriétés permettent d'augmenter la tension de claquage et de ralentir le vieillissement de la cellulose.

Concernant ses défauts, son point d'écoulement aux alentours de 20°C, elle est très visqueuse et surtout elle s'oxyde très vite [12].

**I.5.3 Vieillesse :**

Les défaillances électriques des transformateurs de puissance sont dues, généralement, au système d'isolation [13].

Il est généralement admis que la durée de vie de l'isolation papier/huile dépend essentiellement de l'affaiblissement des caractéristiques mécaniques du papier, et non de la dégradation des propriétés diélectriques de l'huile. Dans un transformateur, si d'autres causes de défaillance n'apparaissent pas, la fragilisation du papier risque d'entraîner le claquage sous l'effet de court-circuit ou d'arc électrique [6].

**I.5.3.1 Vieillesse du papier :**

Le papier, habituellement utilisé dans les isolations papier/huile, est composé en majorité de cellulose; ce dernier est formé de longues chaînes comprenant environ 1200 anneaux de glucose reliés par des ponts « oxygène ».

Selon la température atteinte, il peut se produire [6] :

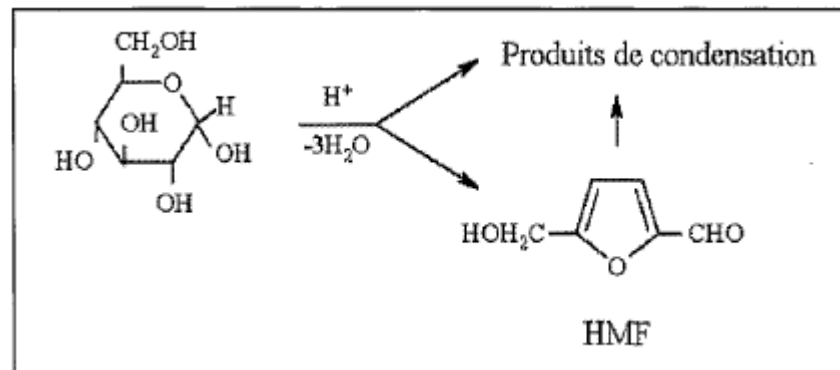
la pyrolyse qui entraîne la décomposition de la cellulose, avec production de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, H<sub>2</sub> principalement; ce phénomène n'affecte sensiblement les qualités mécaniques qu'au-dessus de 150°C [6,14];

- l'oxydation qui consiste en l'attaque des anneaux de glucose par l'oxygène; elle provoque une dépolymérisation. Les produits formés sont des aldéhydes et des acides, mais aussi des

gaz tels que CO, CO<sub>2</sub> et H<sub>2</sub>; l'hydrolyse qui est la réaction de l'eau avec les ponts oxygène et qui provoque la rupture de chaîne sans formation de produits libres.

Dans le cas des températures au dessous de 140°C, il est difficile de distinguer les trois mécanismes précédents. La dégradation du papier est due à l'action combinée de l'oxygène ou de l'eau, catalysée par la température.

Les trois mécanismes, cités ci-dessus, conduisent à la formation des sucres suite à la scission de la chaîne cellulosique. L'analyse des sucres dans l'huile d'imprégnation (seule partie accessible) pourrait constituer un moyen de diagnostic de l'état de l'isolation solide. Malheureusement, cela n'est pas possible à cause de la faible solubilité des sucres dans l'huile. Sous l'influence de l'humidité et des acides, le glucose se dégrade, suivant le mécanisme indiqué à la figure 2-3, en 5-hydroxyméthyl-2-furfural (HMF). Ce dernier décompose à son tour en d'autres dérivés furaniques (relatif au furanne, composé de la série des furfuranes dérivant du furfural, de formule C<sub>4</sub>H<sub>4</sub>O) tels que le 2-acétyl-furan, et le HMF. En raison de leur solubilité partielle dans l'huile, ces produits constituent à l'heure actuelle les seuls traceurs caractéristiques de la dégradation du papier [6]. Parmi les composés furaniques, le 2-furaldehyde est le plus abondant; sa concentration dans l'huile est liée au degré de polymérisation moyen (DP<sub>v</sub>) et par conséquent à la rigidité physique de l'isolation solide.



**Figure I.9** Mécanisme de formation de HMF à partir du glucose

La cellulose représente l'élément principal qui constitue le papier isolant avec une proportion d'environ 90%. La dégradation du papier est fortement influencée par la rupture et le raccourcissement des chaînes de cellulose.

Le nombre moyen d'unités monomères de glucose (figure I.9) dans la cellulose du papier peut être exprimé en DP<sub>v</sub> (degré de polymérisation moyen), qui est pour un papier kraft neuf d'environ 1000-1200. Pour un papier prétraité, le DP<sub>v</sub> est diminué progressivement (environ 850-950). Un DP<sub>v</sub> en dessous de 500 unités fera en sorte que la résistance à la

traction commence à diminuer d'une façon linéaire. Pour une valeur moyenne de DPv inférieure à 200, le papier devient très fragile [15].

### **I.5.3.1 Vieillessement de l'huile :**

#### **• Impact de l'oxygène :**

On désigne par oxydation l'ensemble des réactions chimiques complexes et lentes au cours desquelles les hydrocarbures réagissent avec l'oxygène.

Les produits de dégradation issus de l'oxydation de l'huile entraînent un changement de couleur [16] et une apparition des dépôts accompagnée d'une augmentation de la viscosité.

Le résultat principal de ces réactions d'oxydation est la production de boues. L'oxydation de l'huile est une fonction croissante de la température et de la concentration en oxygène.

De plus, elle peut être catalysée par certains métaux comme le cuivre, le fer, le plomb, ou par des composés corrosifs présents dans l'huile comme des sulfures.

Les principaux facteurs qui influencent l'oxydation sont [16]:

- la température;
- l'oxygène;
- les métaux catalyseurs.

Les effets de l'oxydation se reflètent non seulement sur les propriétés physicochimiques (acidité, coloration ...), mais aussi sur les propriétés électriques (conductivité, facteurs de dissipation) [17]. De plus, l'oxydation de l'huile entraîne une dégradation plus rapide du papier cellulose. Cette détérioration est accélérée par les produits de dégradation de l'huile, notamment les acides et les produits polaires qui sont absorbés par le papier. La formation des boues augmente la viscosité de liquide isolant, ce qui entraîne une moins bonne efficacité thermique des huiles.

### **I.6 Conclusion :**

Ce chapitre a permis de montrer que le bon état de fonctionnement et la durée de vie des transformateurs qui représentent les composants stratégiques des réseaux électriques repose de façon générale sur la qualité de son isolation papier/huile, mais plus principalement sur son isolation solide (papier). Les contraintes électriques, thermiques, chimiques et environnementales auxquelles sont soumis les transformateurs en service entraînent la dégradation graduelle de leur isolation.

La dégradation de l'isolation papier/huile suggère la diminution du rendement des transformateurs, car entraînant une augmentation du facteur de dissipation diélectrique.

## **II.1 Introduction :**

Le phénomène d'électrisation Statique est connu depuis l'antiquité. La méthode d'électrisation la plus simple, déjà connue par Thalès de Milet six cents ans avant J.-C., consistait à mettre en contact (éventuellement à frotter) deux corps isolants de nature différente :

De l'ambre avec de la laine, par exemple. Lorsqu'on les sépare, un des deux corps gagne des électrons - il se charge négativement ; l'autre en perd- il se charge positivement. Depuis la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, le phénomène d'électrisation statique a été observé lors de l'écoulement de liquides isolants dans des conduites. Ce phénomène d'électrisation statique peut également être appelé «électrisation par écoulement». Le phénomène a tout d'abord été remarqué dans l'industrie pétrolière. Des explosions se produisirent après remplissage d'avions ou de bateaux restés en potentiel flottant [18].

Les solutions adoptées ont été de rendre les hydrocarbures plus conducteurs et de mettre à la terre les canalisations et les réservoirs. C'est à partir des années 70 que le phénomène d'électrisation par écoulement a été suspecté être la cause d'avaries de transformateurs.

Malgré de nombreuses études, ce problème reste à l'heure actuelle encore mal compris et mal maîtrisé. Les explosions et les incendies engendrés par des phénomènes électrostatiques (accumulation de charges et décharges) touchent également de nombreux procédés industriels (silos, transports de produits chimiques inflammables...). De ce fait, de nombreux produits et procédés doivent être testés vis à vis du risque électrostatique [19 ; 20].

## **II.2 Phénomène d'électrisation :**

Un phénomène d'électrisation observable dans la vie courante, est le phénomène de la décharge électrique que l'on subit parfois en descendant de la voiture. Les frottements de nos vêtements avec les sièges de la voiture nous électrisent, et lorsque l'on touche une partie métallique de la voiture en descendant on ressent une légère décharge électrique, Un corps frotté, capable d'attirer des corps légers, est dit corps électrisé.

Tous les corps s'électrisent, on dispose de plusieurs moyens pour le faire:

- par frottement;
- par contact avec un corps déjà électrisé.

### **II.2.1 Phénomène d'électrisation par frottement :**

Elle s'explique par l'arrachement mécanique des électrons de l'un des corps neutre frottés et par leur transfert sur l'autre. Le sens du transfert dépend de l'affinité électronique relative des deux corps.

On peut classer les corps dans un ordre tel que, lorsqu'on frotte l'un sur l'autre, deux entre deux, celui qui précède l'autre sur la liste s'électrise positivement. Ces séries sont appelées "série triboélectriques".

#### **Exemples:**

Poil de Lapin, Verre, Mica, Poil de Chat, Soie, Bois, Ambre, Résine, Soufre, Ebonite, Celluloïd.

On voit par exemple que, frotter sur la Laine ou de la Soie, le Verre s'électrise positivement, l'Ebonite négativement.

#### **Expérience : utilisation d'un pendule électrostatique**

- Toucher la petite boule d'aluminium avec le doigt.
- Approcher une tige de verre non frottée de la boule d'aluminium.
- Frotter ensuite la tige de verre avec de la laine, puis approchée cette tige frottée de la boule d'aluminium sans la toucher.
- Refaire toutes les étapes de la manipulation, en remplaçant la tige de verre par la tige de plastique frottée avec du nylon, puis par la tige d'ébonite frottée avec une peau de chat, et enfin avec une tige métallique.

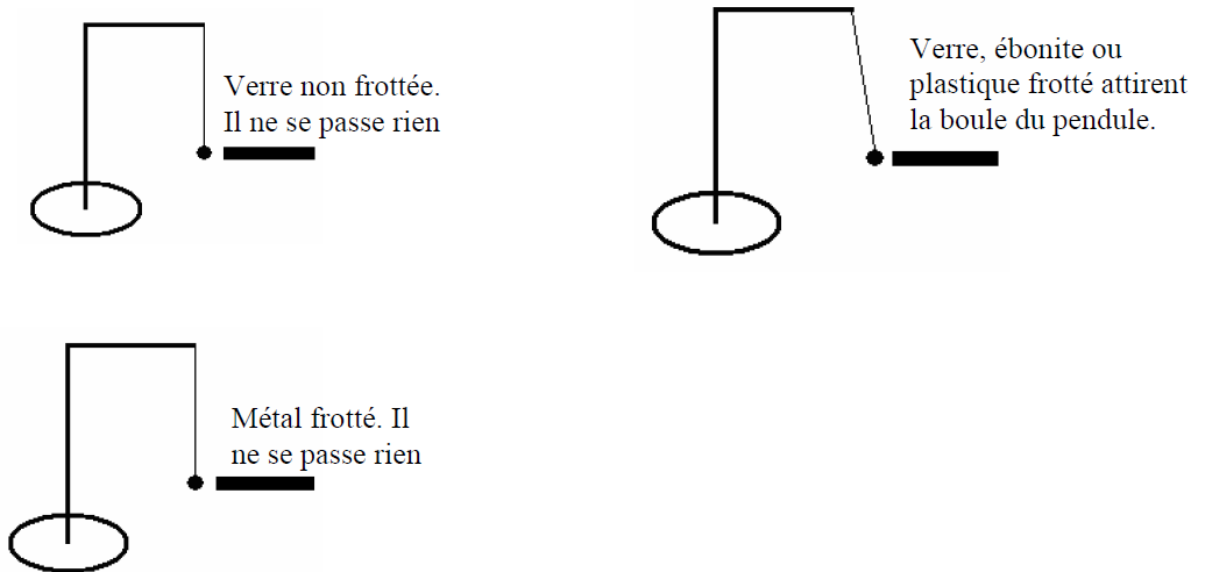


Figure II.1 les expériences d'électrisation par frottement.

**Résultat de l'expérience :**

- On peut donc électriser le plastique, l'ébonite et le verre par frottement. Par contre le métal ne peut pas être électrisé par frottement.

**II.2.2 Phénomène d'électrisation par contact :**

Reproduire les expériences précédentes avec la tige de verre et celle en PVC, en approchant doucement la tige frottée jusqu'à venir toucher la boule d'aluminium du pendule.

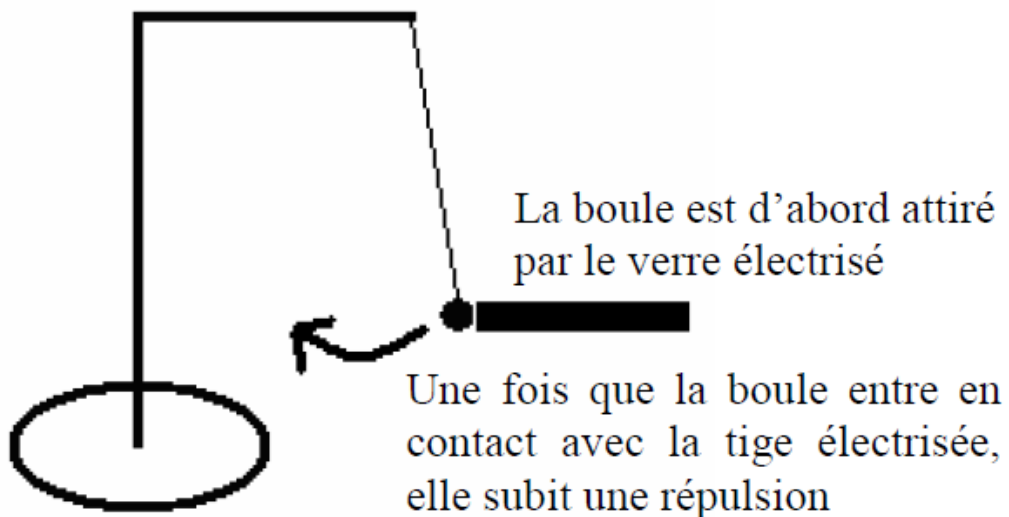


Figure II.2 électrisation par contact.

**Résultat de l'expérience :**

-Quand un corps électrisé A touche un corps non électrisé B, le corps B s'électrise. On constate alors que A et B se repoussent, C'est ce que l'on appelle l'électrisation par contact.

### II.3 Electrification par écoulement dans les transformateurs de puissance :

Dans le cas des cartons et papiers isolants pour transformateur imprégnés d'huile minérale, il a été observé dans la plupart des cas que le carton se charge négativement et l'huile positivement. Déterminer la nature et la provenance des porteurs de charge a été le principal axe de recherche adopté dans ces travaux.

#### II.3.1 Description du phénomène :

L'huile du transformateur arrive quasiment neutre en bas de cuve et se charge progressivement positivement au fur et à mesure de son passage dans les veines de refroidissement en carton jusqu'au plenum supérieur, zone où le temps de résidence important permet la relaxation des charges via la cuve vers la terre (figure II.3). Au contact de l'huile en mouvement, les cartons se chargent progressivement négativement. Les charges accumulées dans des cartons très isolés peuvent conduire à des potentiels élevés et initier des décharges rampantes [21].

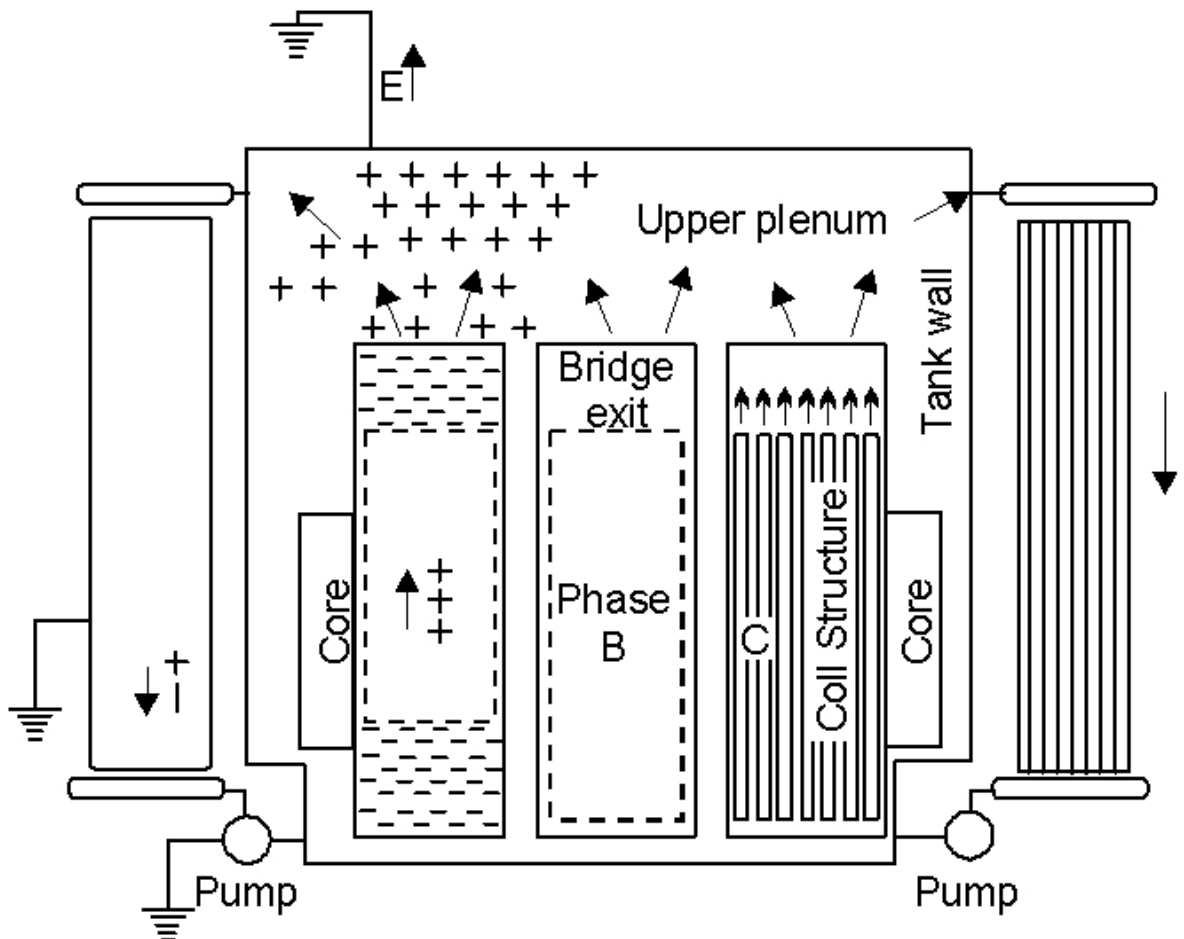


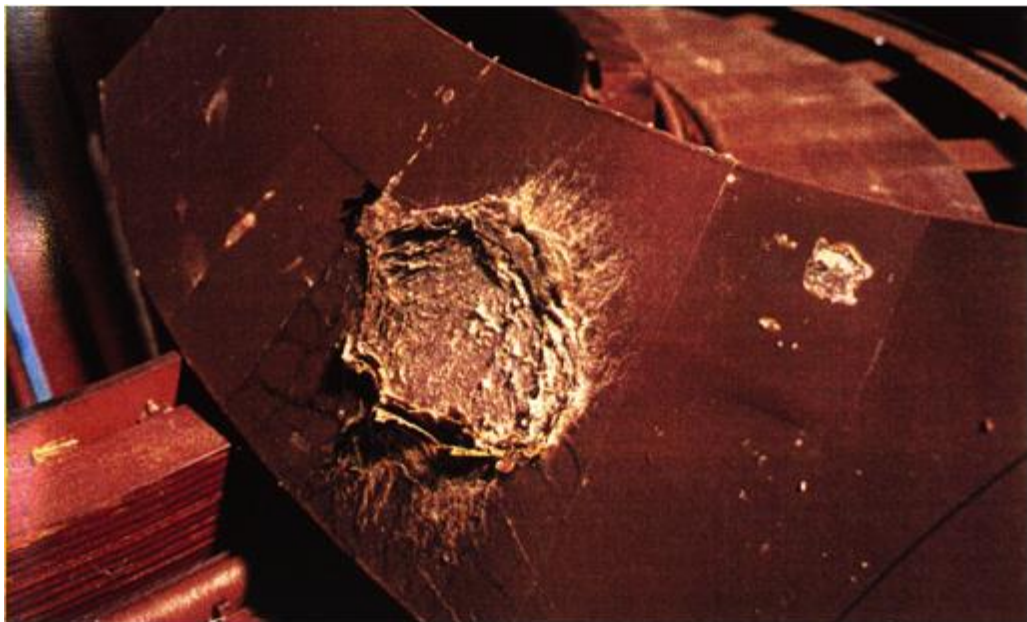
Figure II.3 Processus d'électrification par écoulement dans un transformateur haute tension.

Les arborescences constatées sur les appareils avariés correspondent aux zones décharges à fort champ, à impédance de fuite importante (partie très isolée à potentiel flottant)

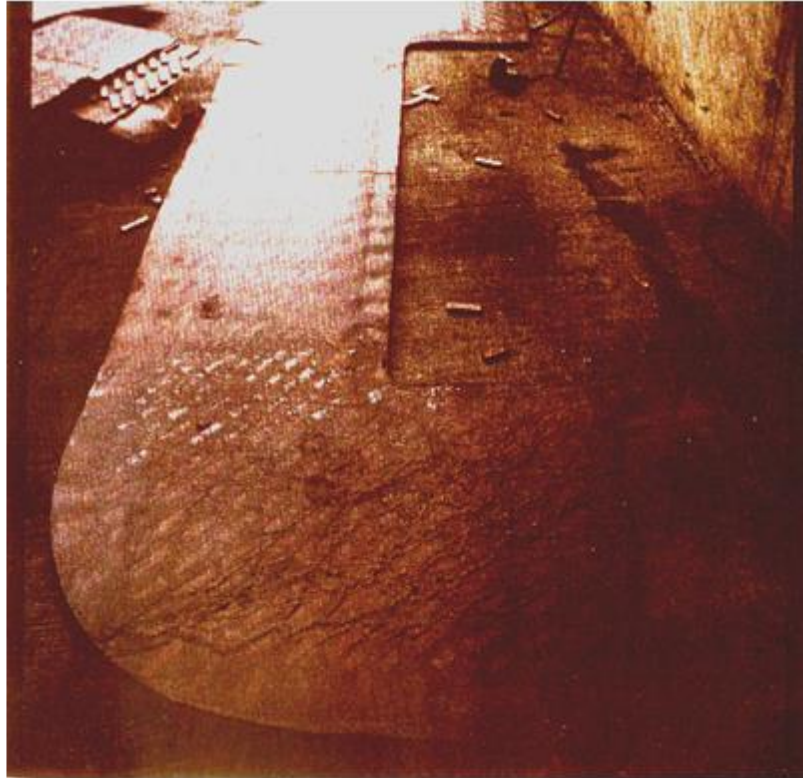


et où l'écoulement est fortement perturbé par les chicanes de distribution des flux d'huile. Les arborescences électriques sont des structures filamenteuses ramifiées constituées de microcanaux creux susceptibles de se propager sur des distances de plusieurs millimètres en volume et en sub-surface d'isolant. Le diamètre interne des filaments peut varier du micron à quelques centaines de microns en fonction de la nature des isolants et des conditions de développement de l'arborescence. Les arborescences constituent une dégradation permanente des matériaux et sont étroitement associées au claquage.

Les deux types de transformateurs (cuirassé et colonne) ont été victimes de phénomènes d'électrisation par écoulement. La figure II.4 montre une pièce en carton provenant d'un transformateur colonne. Ce carton a été détérioré par une succession d'activité électrique due à un jet d'huile impactant. De plus, dans le cas des transformateurs cuirassés, il a été constaté que la partie inférieure des cartons entre galettes (cf. figure II.5) est la zone principalement affectée par les décharges rampantes. On peut en effet supposer que les charges accumulées dans cette zone conduisent, sous l'effet de la montée du potentiel, à des décharges partielles en direction du circuit magnétique référencé à la terre. Par contre, les parties internes aux bobinages, présentant une impédance de fuite plus faible via les cales et les conducteurs, sont quasiment épargnées par ce phénomène.



**Figure II.4** *Détérioration d'un carton due à des décharges partielles dans un transformateur colonne [21].*



**Figure II.5** – Galette présentant des arborescences en partie inférieure [21].

### **II.3.2 Paramètres influents sur le phénomène d'électrification par écoulement :**

Les différentes études menées dans les pays touchés par le phénomène ont permis de déterminer les différents facteurs ayant une influence sur l'électrification par écoulement dans les transformateurs de puissance [21].

#### **La vitesse d'écoulement de l'huile :**

Des études menées au Japon ont montré que la tendance à la charge («charging tendency») augmente lorsque le débit d'huile augmente [22]. D'autres montrent que les conditions d'écoulement (régime laminaire ou turbulent) ont aussi un fort impact sur le courant d'écoulement («streaming current») [23 ; 24].

Les études effectuées au LEA montrent également que la charge accumulée dans le carton augmente quand la vitesse d'huile augmente [24].

#### **La nature de l'huile :**

Suivant leur nature (paraffinique, naphthénique...) mais aussi suivant différents facteurs (nature du brut, procédés de raffinage, additifs...) la tendance à la charge varie d'une huile à une autre. La viscosité de l'huile a aussi une grande influence. De plus, une huile neuve aura une tendance à la charge très faible par rapport à une huile usagée. Cela s'explique par le fait qu'une huile usagée contient beaucoup plus d'impuretés provenant de la dégradation du matériau cellulosique et de l'huile, qu'elle est plus visqueuse, etc.

**La conductivité de l'huile :**

Dans l'industrie pétrolière, la conductivité du fluide est considérée comme un des paramètres les plus influents sur le phénomène d'électrisation, et le plus facilement contrôlable pour en atténuer les effets [18]. Il a été remarqué que le courant d'écoulement augmente avec la conductivité dans un premier temps, puis passe par un maximum et diminue [25]. Cette tendance s'explique par le fait que le courant d'écoulement est une fonction de la densité volumique de charge à la paroi et de la vitesse de convection de ces charges.

On rappelle que l'épaisseur de la couche diffuse est :

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{\epsilon D}{\sigma}} \quad (II.1)$$

Pour un profile de vitesse donné (régime laminaire), si la conductivité  $\sigma$  est très grande, l'épaisseur de la couche diffuse est petite, les charges sont concentrées à la paroi, là où la vitesse est faible. La densité volumique de charge à la paroi est grande, mais leur vitesse de convection est petite, ce qui donne un courant d'écoulement petit. Si la conductivité est très faible, l'épaisseur de la couche diffuse est grande. Les charges, peu nombreuses, sont soumises à des vitesses élevées. La vitesse est grande mais la densité volumique de charge est faible, donc le courant est faible. Entre ces deux extrêmes, il existe une conductivité critique pour laquelle le courant est maximal.

**L'humidité :**

Des études ont été effectuées pour mesurer l'impact de l'humidité sur le phénomène d'électrisation mais celui-ci reste encore mal connu. Il a été cependant rapporté par [26] que la tendance à la charge de l'huile augmente quand le taux d'humidité de l'huile diminue.

**La température de l'huile :**

La température intervient directement sur la valeur de la viscosité, sur la conductivité électrique et sur le taux d'humidité. Une diminution de la viscosité peut entraîner une transition d'un régime laminaire à un régime turbulent. La relation entre la température et l'humidité dans l'huile et dans le carton est une donnée très importante mais très complexe. Plusieurs études ont proposé des courbes d'équilibre entre l'humidité de l'huile et celle du papier en fonction de la température [27 ; 28].

L'article de Du et al. [29] fait une synthèse des connaissances sur ce sujet. Des travaux proposant des méthodes de mesure de l'humidité dans les isolants des transformateurs ont été effectués au M.I.T. [30 ; 31]. Ces travaux avaient pour objectif de développer des capteurs pour la mesure en continue de l'humidité dans l'huile et dans les matériaux celluloseux.

Certaines mesures expérimentales rapportent que le courant d'écoulement global augmente avec la température de l'huile jusqu'à 40°C avant de décroître après un maximum situé entre 40 et 60°C [32]. Des études récentes effectuées au LEA concernant l'influence de la température sur le courant de génération de charge ne semblent pas confirmer cette tendance [33]. Le courant de génération de plusieurs huiles a été mesuré pour différentes températures comprises entre 25 et 70°C. Il apparaît que la génération de charge est une fonction croissante de la température.

**Le champ électrique :**

Il a été observé que les courants d'écoulement dans les transformateurs sont augmentés de manière significative lorsqu'un champ extérieur est appliqué à l'écoulement [24 ; 34]. Il semble probable que cela résulte d'une injection d'ions à l'interface solide-liquide et du changement de distribution de charge qui en résulte. En effet, une espèce initialement neutre d'un point de vue électrique peut se dissocier en des espèces chargées sous l'action d'un champ électrique. Ce phénomène peut concerner :

- l'isolant lui-même : les porteurs de charge résultent de la dissociation de la molécule de l'isolant et d'un transfert de proton et/ou d'électron par l'intermédiaire de liaison shydrogène. Ces mécanismes sont possibles dans les polymères contenant des ions ou des espèces susceptibles de s'ioniser ;
- des additifs et impuretés qui peuvent se dissocier, éventuellement suite à des réactions électrolytiques. Les charges électriques sont dans ce cas liées à une espèce non engagée dans des liaisons chimiques fortes avec l'isolant lui-même. Ces espèces se déplacent donc par migration à travers la structure par percolation de site en site.

Il faut cependant garder en mémoire que le phénomène d'électrisation par écoulement est apparu dans des transformateurs déconnectés des réseaux. La présence du champ électrique extérieur n'est donc pas un paramètre nécessaire pour que le phénomène se produise.

### **II.3.3 Dispositifs de mesure du phénomène d'électrisation par écoulement :**

Les dispositifs mis au point pour mesurer le phénomène d'électrisation par écoulement ne sont pas très nombreux et peu standardisé. Dans l'industrie, la méthode acoustique reste la plus utilisée pour détecter une activité électrique anormale des transformateurs.

D'autres dispositifs sont développés dans les laboratoires de recherche suivant le besoin des études. Deux familles de dispositifs sont cependant assez répandues : les dispositifs de mesure de la tendance à la charge électrostatique (ECT : Electrostatic Charging Tendency) et les boucles d'écoulement d'huile dans un canal de carton pour la mesure de la charge accumulée dans le carton.

#### **Mesure de la tendance à la charge électrostatique :**

##### **1- Le Ministatic Tester (Westinghouse Electric Corporation, 1984):**

Le principe de la mesure est de faire circuler un volume d'huile connu à travers un papier-filtre cellulosique maintenu dans un porte-filtre en acier inoxydable. Le débit préconisé est de 100 mL/min. Le test est réalisé avec le dispositif représenté sur la figure II.6.

Lors de l'écoulement de l'huile à travers le papier-filtre, des charges électriques sont créées à la fois dans l'huile et dans le papier. Le porte-filtre et le béccher collecteur sont chacun reliés à un micro-ampèremètre. Les charges mesurées au niveau du porte-filtre sont négatives, et celles mesurées dans le béccher sont positives. Cette mesure permet de comparer des huiles entre elles, vis à vis du risque d'électrisation par écoulement. Cela est fait indépendamment du matériau cellulosique du transformateur, le diagnostic portant sur l'huile.

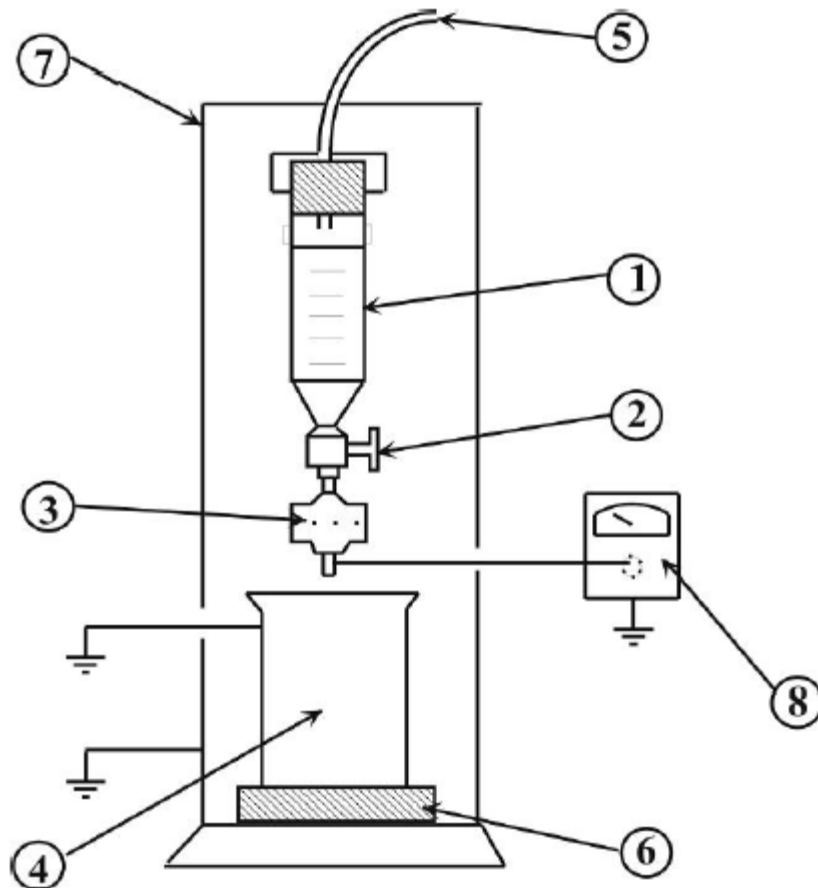


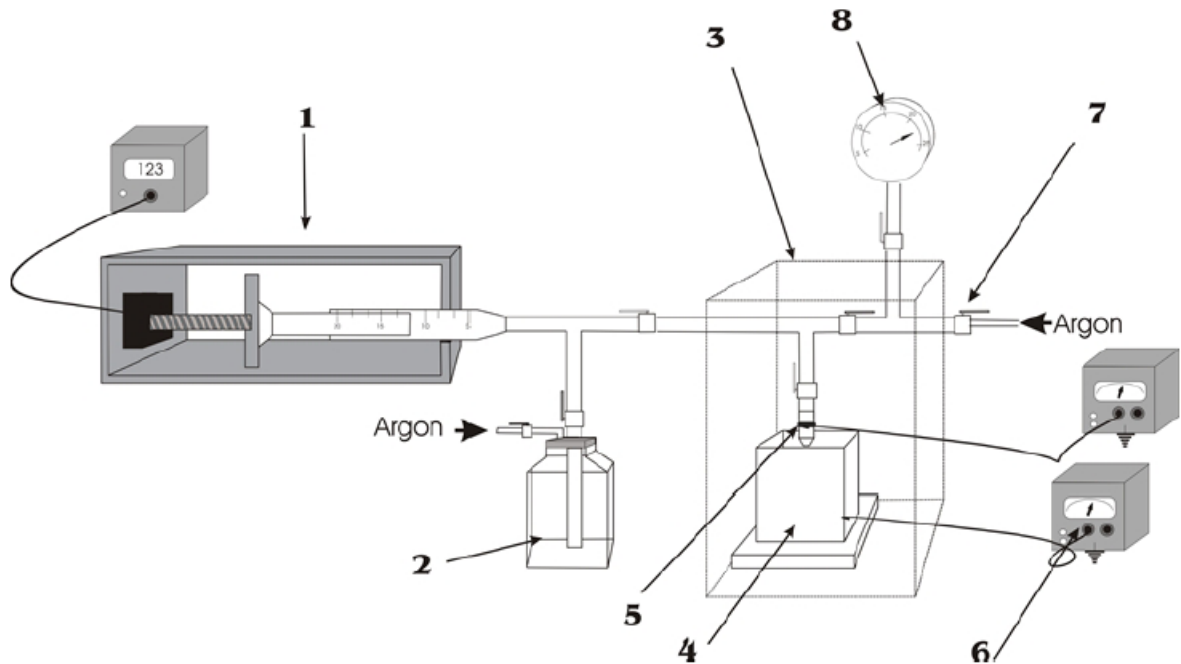
Figure II.6 Le Ministatic Tester.

- 1 Seringue 2 Robinet 3 Porte-filtre et filtre  
4 Récipient collecteur 5 Azote pressurisé 6 Support en Téflon  
7 Cage de Faraday 8 Pico-ampèremètre

Le protocole du Ministatic Tester ne tient pas compte d'un certain nombre de facteurs pouvant influencer la mesure d'ECT. Par exemple, l'huile est mise en contact avec l'air avant d'être injectée dans la bouteille, le débit d'injection est contrôlé par la pression d'argon imposée, ce qui ne permet pas d'avoir un débit totalement constant... Des modifications du Ministatic Tester ont été apportées par différents auteurs [35 ; 36]. Un dispositif de mesure ECT a été mis au point au LEA à Poitiers pour tenter d'améliorer le montage et le protocole du Ministatic Tester [35]. Il permet une répétabilité de mesure plus importante qu'avec le Ministatic Tester. De plus, il a été conçu pour que l'huile ne rentre pas en contact avec l'air ambiant au cours des manipulations.

**Le dispositif de mesure ECT du LEA :**

Le dispositif est présenté sur la figure II.7 [35] :



**Figure II.7** Le dispositif de mesure ECT du LEA.

- 1 Seringue et pousse-seringue
- 2 Bouteille d'huile à analyser
- 3 Cage de Faraday
- 4 Récipient collecteur
- 5 Porte-filtre et filtre
- 6 Pico-ampèremètres
- 7 Robinets
- 8 Manomètre

L'écoulement se fait grâce à un pousse-seringue automatisé programmable, qui assure un débit d'huile constant. Le débit préconisé est de 100 ml/min. Le volume d'huile d'une injection est 50 ml. Les charges générées sur le papier-filtre sont collectées sur le porte filtre en acier inoxydable et peuvent être mesurées grâce au pico-ampèremètre relié au porte-filtre. De même, les charges collectées dans le béccher de récupération sont mesurées [35].

Une série de cinq injections successives d'huile est effectuée sur un même papier filtre. La mesure du courant lors de la première injection d'huile n'est pas prise en compte, le papier-filtre n'étant pas encore imprégné d'huile. Les 4 mesures suivantes sont conservées et le courant moyen est calculé. La valeur du courant pour chaque courbe est relevée sur le palier de la courbe. Si le palier n'est pas très marqué, il faut alors prendre une valeur moyenne du courant. Il faut compter une heure pour analyser un couple huile-papier (test reproduit trois fois sur des disques provenant du même papier-filtre).

Le papier-filtre préconisé par Westinghouse est le papier Whatman 541, fabriqué à base de linters de coton blanchis. Ce type de papier-filtre est utilisé au LEA pour les tests ECT destinés au suivi des huiles vieilles. Cependant, ce type de papier ne représente pas la nature chimique exacte des papiers et cartons utilisés dans les transformateurs de puissance. En effet, ces derniers sont fabriqués à partir de pâte kraft. Les constituants chimiques de ces pâtes différentes, de par leur nature ou quantité, des constituants des linters de coton.

### II.3.4 Système du disque en rotation :

Ce système a été adopté par la CIGRE pour des mesures comparatives internationales des liquides isolants et des matériaux solides des transformateurs [37,38], De nombreux chercheurs ont employé le disque en rotation pour étudier la capacité de charge électrostatique des huiles de transformateur.

Le système de disque en rotation est un disque relié à la terre (le matériau employé est généralement électriquement conducteur, à savoir acier, laiton ou aluminium ou d'un métal revêtu d'un isolant) dans un réservoir d'huile. Les phénomènes de flux de convection forcée (pompage) sur la surface du disque vont prédominer comme si les ions sont dépouillés, ils sont transportés radialement à l'extérieur vers l'électrode de collecteur (cage de Faraday) qui contient l'huile. Figure II.8 [39] montre les configurations d'écoulement à un disque rotatif. Pour les doubles couches de cisaillement à produire, l'écoulement du fluide sur disque doit avoir lieu dans la double couche. Pour cela l'épaisseur de la double couche doit être plus grande que l'épaisseur de la sous-couche de diffusion (la couche stagnante) d'épaisseur  $\delta_d$ .

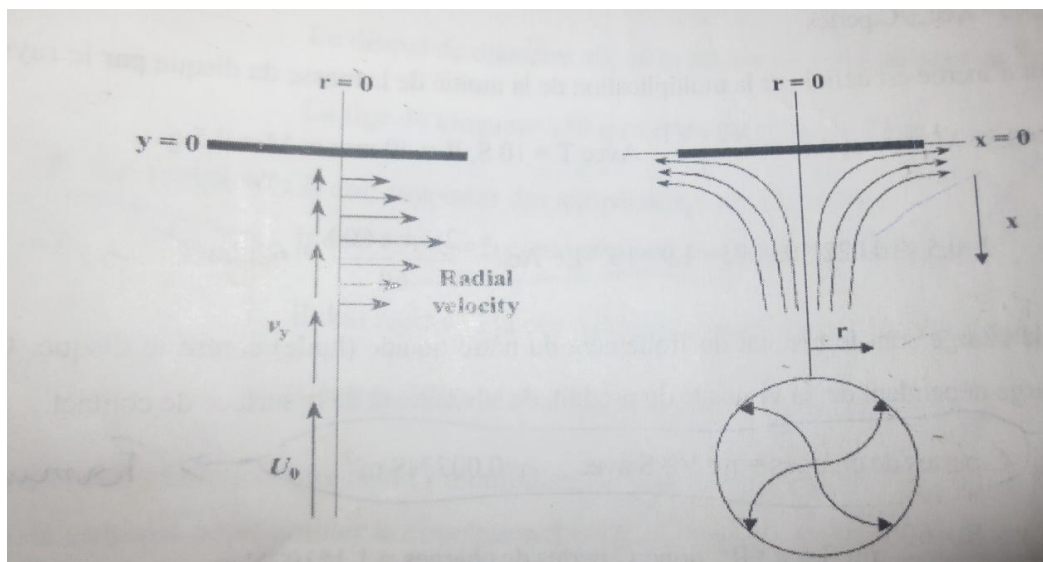


Figure II.8 a. Représentation vectorielle des vitesses des fluides près du disque.

b. Schéma rationalisé résultante (ou le débit modèle) à disque rotatif.



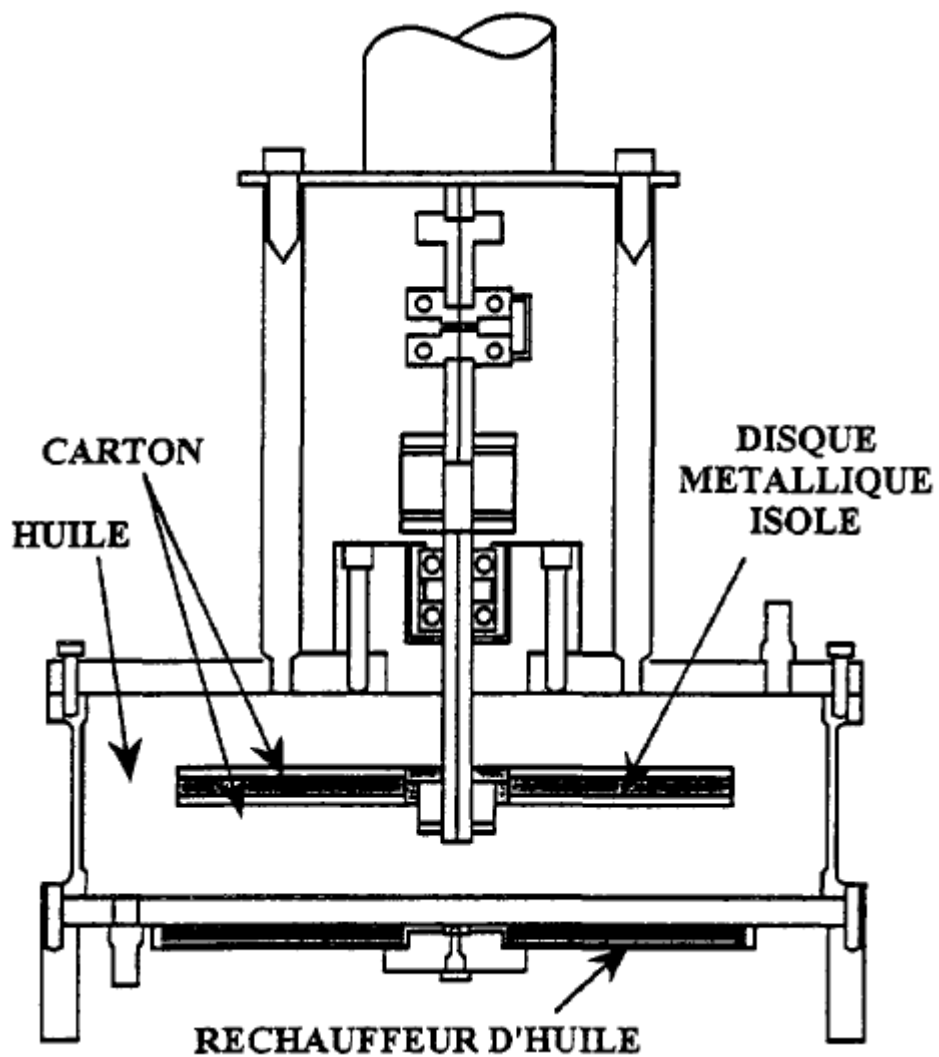


Figure II.9 -Cellule- type CIGRE- pour la mesure de l'électrification statique d'un couple carton-huile.

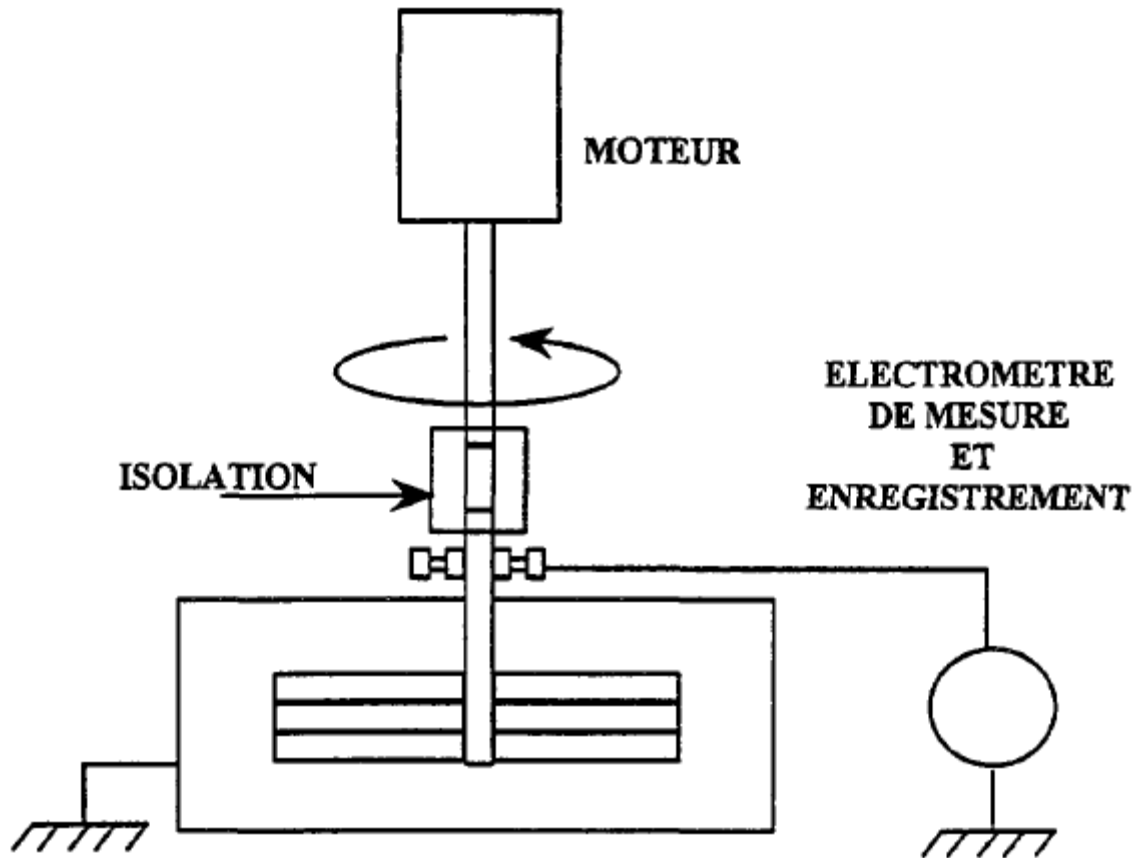


Figure II.10—Dispositif de mesure des charges électrostatiques sur cellule CIGRE.

Le modèle mathématique quantifiant le courant d'électrification autour d'un disque tournant en, métal et couvert d'isolant dans une enceinte.

Avec :

$$I = \frac{\sigma V q_w}{A \epsilon_r \epsilon_0} + \frac{D_m q_w}{\delta A} S_d - \frac{D_m q_w}{\delta} S_d \quad (II.2)$$

$$A = \frac{q_w}{q_0} = 1 + \frac{\delta V}{\lambda^2 S} \quad (II.3)$$

La profondeur de pénétration de charge dans la couche inférieure laminaire est décrite par la formule :

$$\lambda = \sqrt{D_m \tau} \quad (II.4)$$

La période de relaxation de la charge est exprimée comme fonction des propriétés du liquide :

$$\tau = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\sigma} \quad (II.5)$$

Le nombre de Reynolds de l'écoulement est déterminé dans l'équation suivante:

$$R_e = \frac{\omega R_1^2}{\nu} \quad (II.6)$$

La contrainte cisaillement :

$$\tau_W \approx 0.1 R_e^{-0.5} \rho (\omega R_1)^2 \quad (II.7)$$

L'épaisseur laminaire de couche inférieure est décrite par la dépendance :

$$\delta\sigma = \frac{11.7\nu}{\left(\frac{\nu}{D_m}\right)^{0.333} \sqrt{\frac{\tau\omega}{\rho}}} \quad (II.8)$$

$q_w$  est la densité de charge de volume à l'interface,

$q_0$  la densité de charge de volume dans le liquide,

$\varepsilon_0, \varepsilon_r$  le constant diélectrique de l'espace libre et constante diélectrique de liquide respectivement,

$\sigma$  la conductivité du liquide,

$D_m$  le coefficient de diffusion moléculaire,

$V$  le volume de liquide dans le récipient de mesure, le rayon du disque,

$S=S_d+S_c$  ou  $S_d$  et  $S_c$  sont la surface du disque et la surface du récipient respectivement

$\rho$  la densité du liquide,

$\nu$  la viscosité du liquide et la vitesse angulaire.

Pour la simulation, on a utilise le modèle du disque rotatif.

## **II.4 Conclusion**

Ce chapitre est consacré à la revue bibliographique sur le phénomène d'électrisation par écoulement dans les transformateurs de puissance. Après une description générale du phénomène et les paramètres influent sur le mécanisme d'électrisation, nous avons abordé les dispositifs disponibles pour mesurer le courant d'électrisation.

### III.1 Introduction :

Pour les simulations, le choix s'est porté sur le logiciel commercial CFX-développé par ANSYS. CFX est un logiciel général de simulation numérique des écoulements en mécanique des fluides et de transferts thermiques. Il permet de mettre en œuvre une simulation numérique complète, de la modélisation de la géométrie, au post-traitement, en passant par la génération du maillage et de calcul. CFX est particulièrement bien adapté aux machines tournantes qui forment l'objectif de notre expérience (un disque tournant dans un fluide) [40].

### III.2 La simulation numérique sur logiciel ANSYS CFX :

Pour bien comprendre l'utilisation du logiciel, on va étudier un exemple d'écoulement d'un fluide à travers une tuyère à élargissement brusque.

CFX est divisé en 4 modules à savoir : ICEM, CFX-pre, CFX-solver et CFX-post.

#### III.2.1 Module ICEM :

Le module ICEM est utilisé comme un logiciel de CAO traditionnel. La géométrie est construite à partir d'éléments tels que points, courbes, surfaces et volumes. C'est également ce module qui permet de générer un maillage s'appuyant sur la géométrie. L'utilisateur fixe les paramètres des mailles qu'il souhaite obtenir sur les éléments. Le maillage sert de support à une représentation discrète des variables continues [40]. Pour les mailles primitives, CFX utilise des formes géométriques comme il présente sur les figures suivantes :

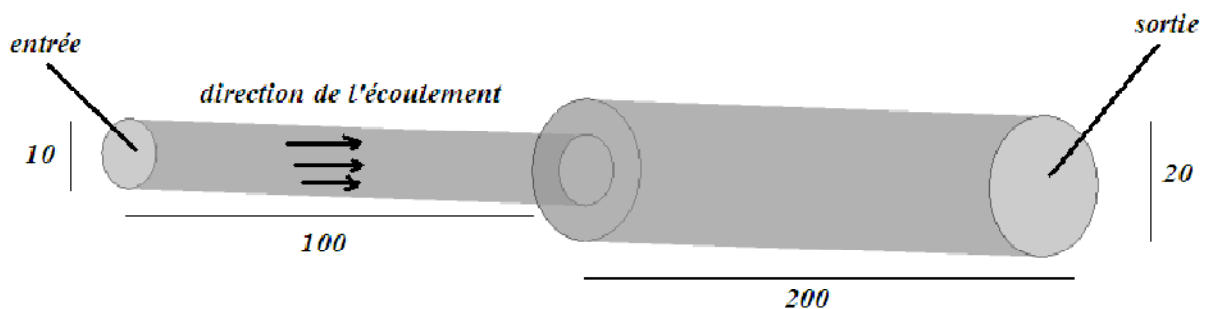


Figure III.1 Géométrie simulée.

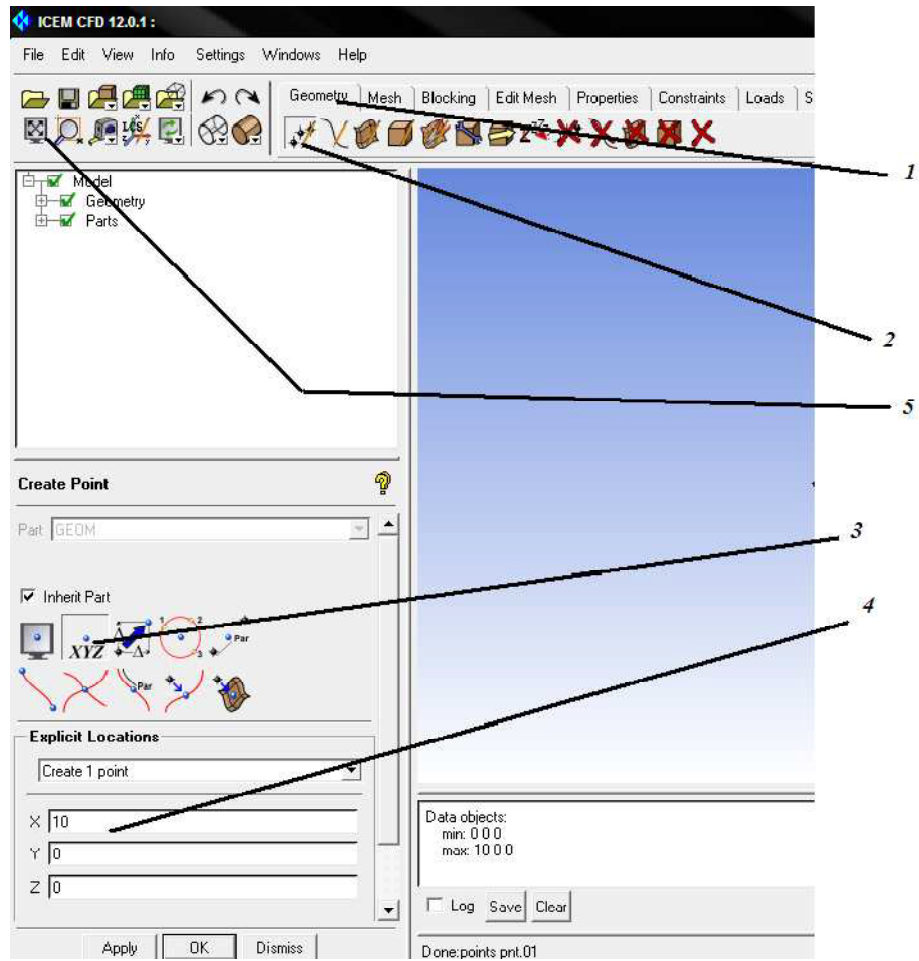


Figure III.2 Créer un point.

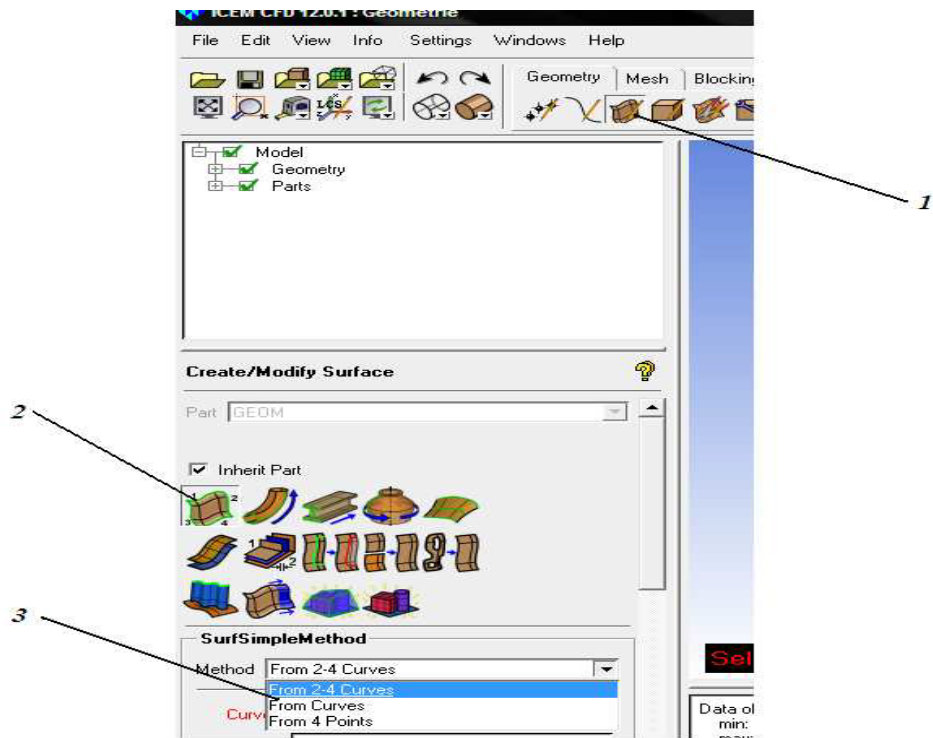


Figure III.3 Créer une surface.

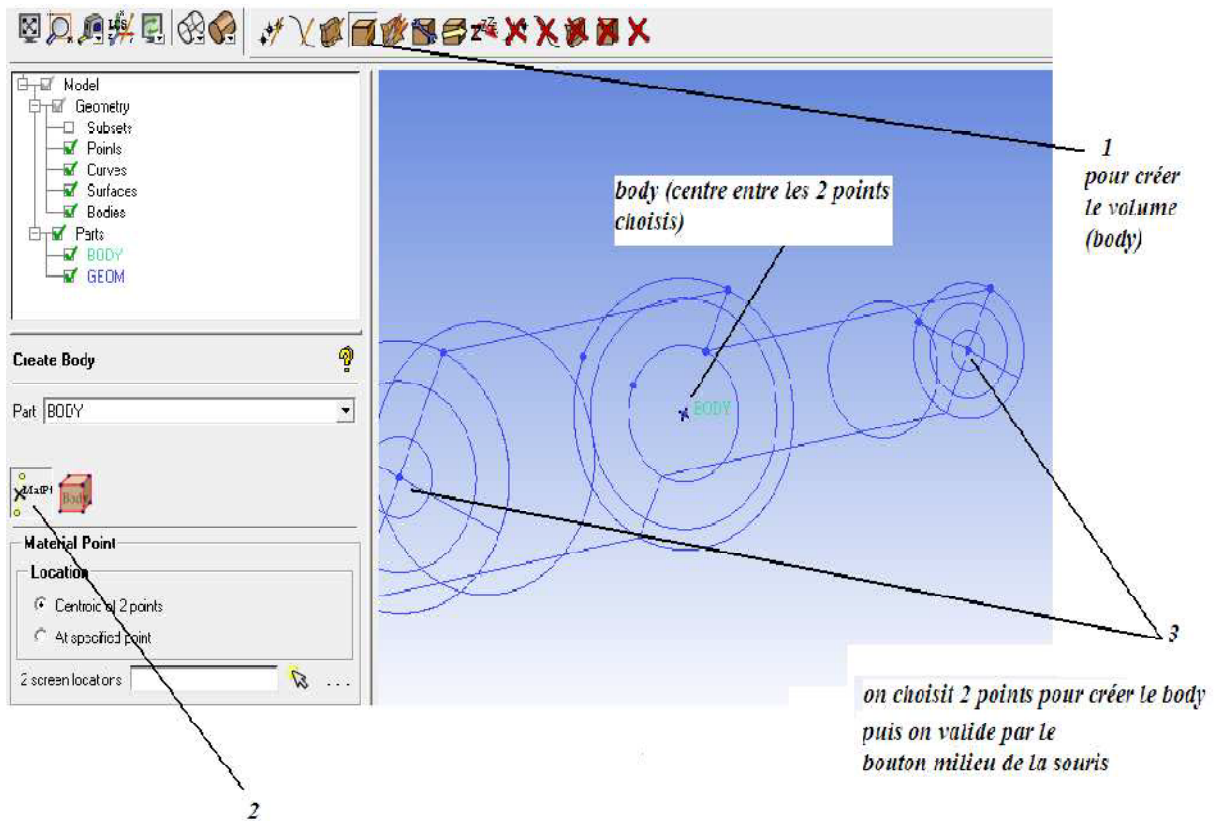


Figure III.4 Créer le volume.

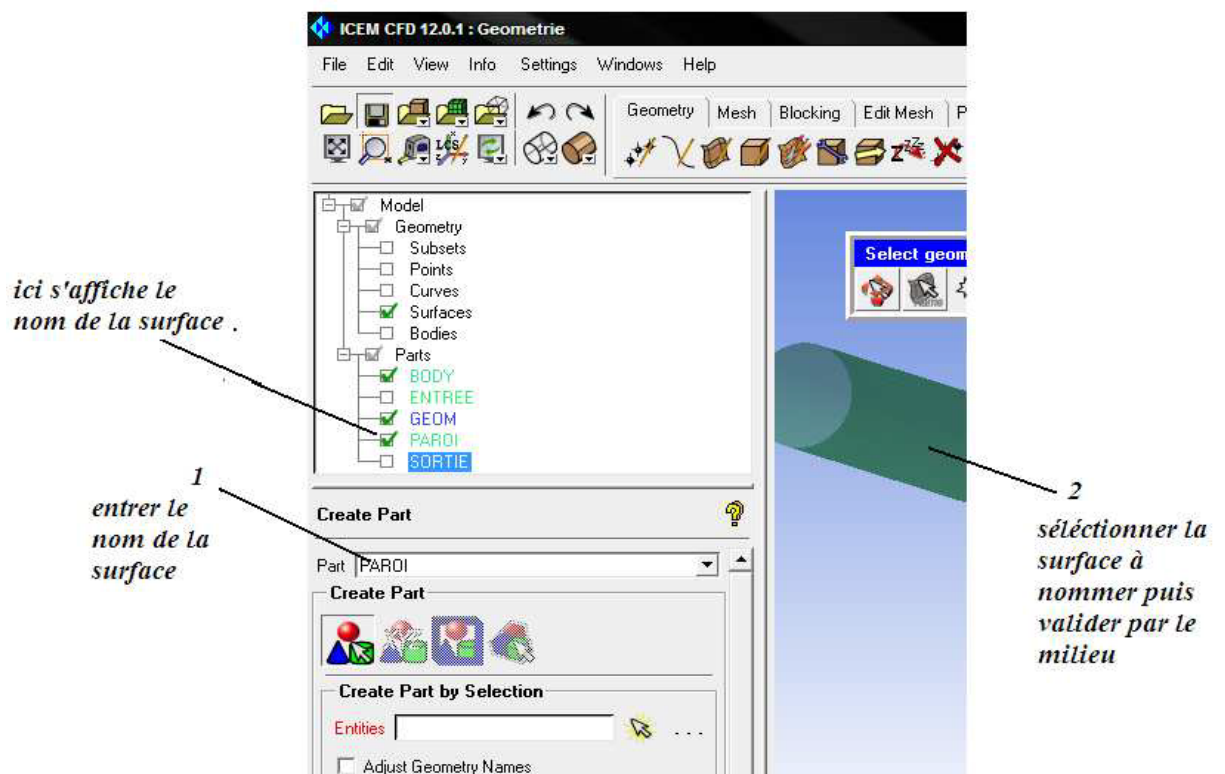
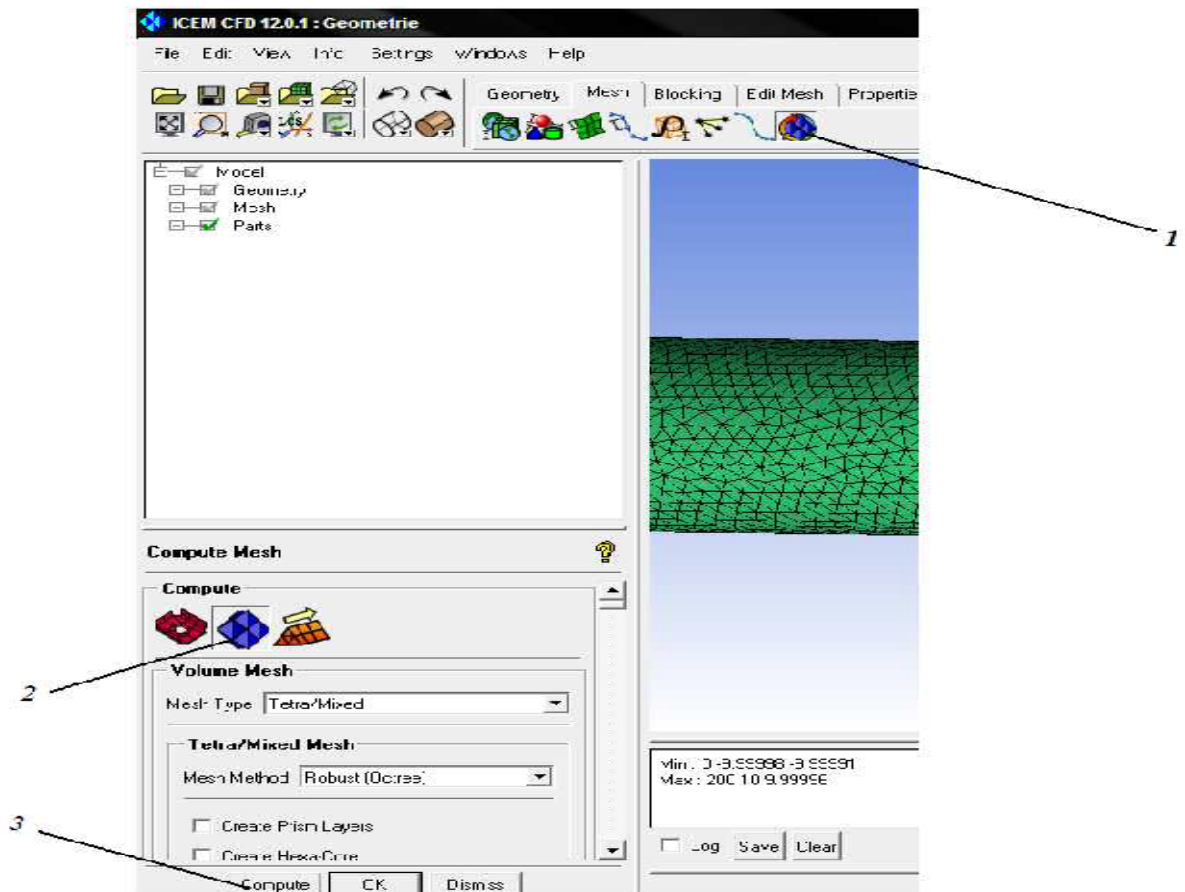


Figure III.5 Nommer les surfaces.



**Figure III.6** Générer le maillage dans tout le volume.

Une fois le maillage effectué, ICEM crée un fichier portant l'extension « .cfx », qui regroupe les informations relatives au maillage, exploitable par CFX-Pre.

### III.2.2 Module CFX-Pre :

Le module CFX-Pre permet de définir le problème physique comme les caractéristiques des fluides utilisés et la dynamique correspondante. Il permet également de fixer les conditions aux limites et initiales du problème, ainsi que les équations à résoudre, le type de résolution (régime permanent ou transitoire). Les paramètres régissant la convergence du calcul comme le pas de temps, le nombre d'itérations, le critère de convergence ainsi que la nature des fluides en présence sont par ailleurs fixés [40]. Une fois tous les paramètres définis, CFX-Pre génère un fichier « .def » qui contient toutes les informations nécessaires pour mener le calcul :

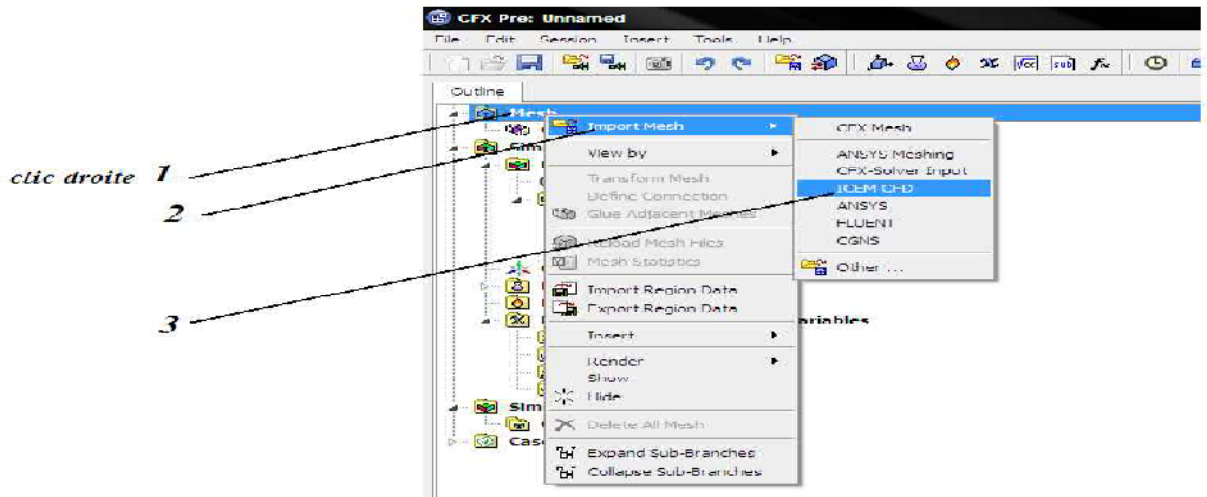


Figure III.7 Importer le maillage.

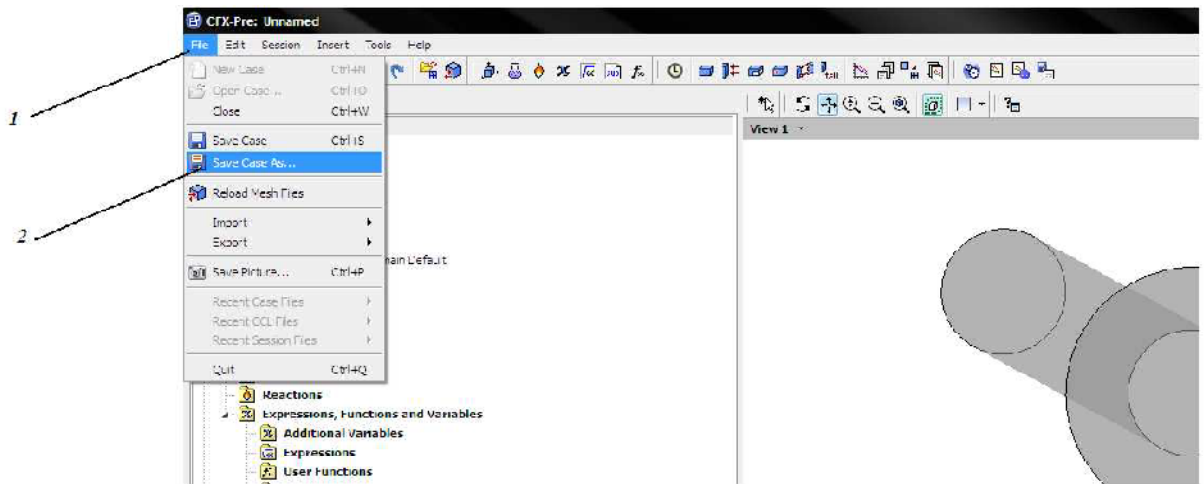


Figure III.8 Enregistrer le Pre-Processing.

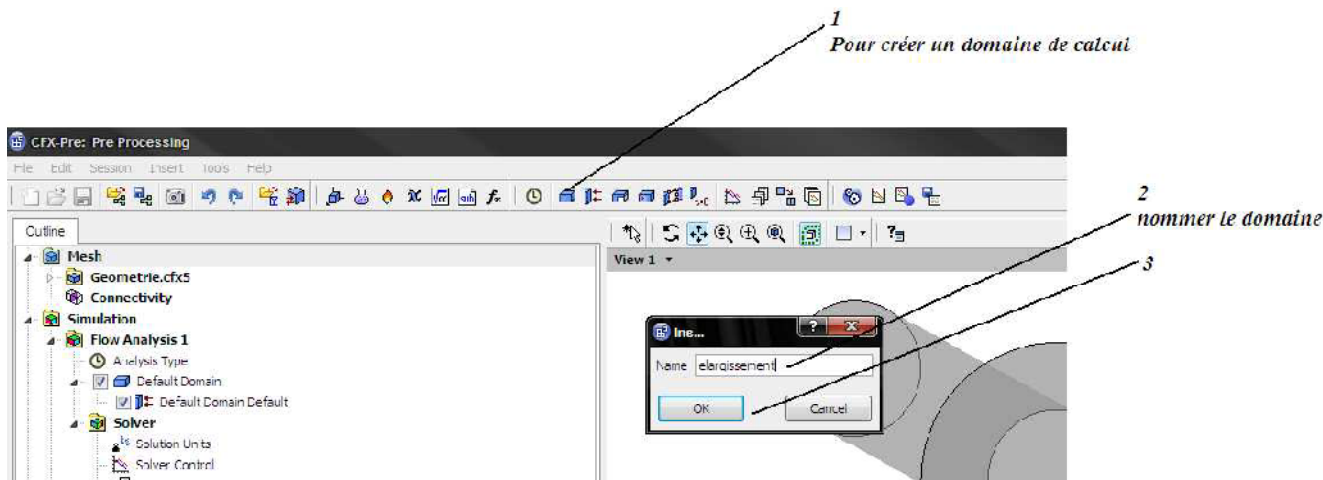


Figure III.9 Créer le domaine de calcul.



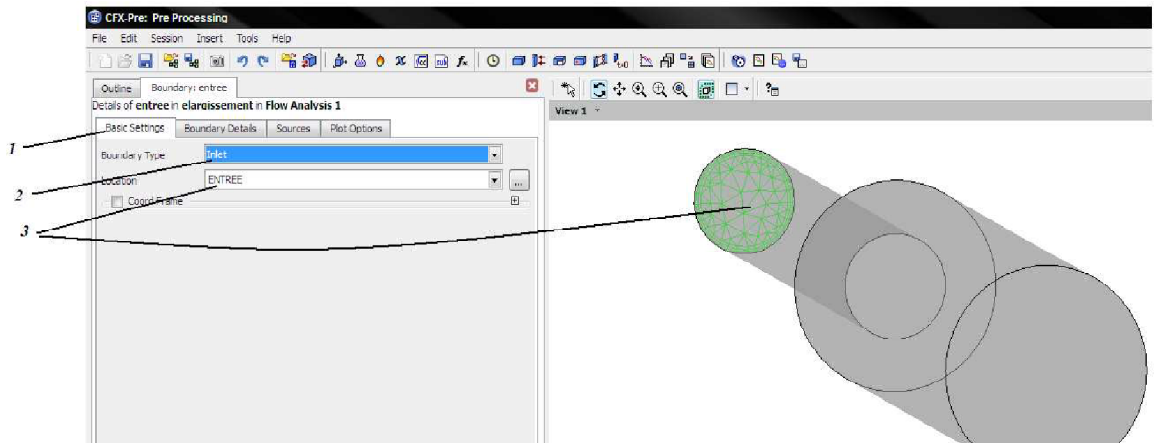


Figure III.10 Définition des conditions aux limites.

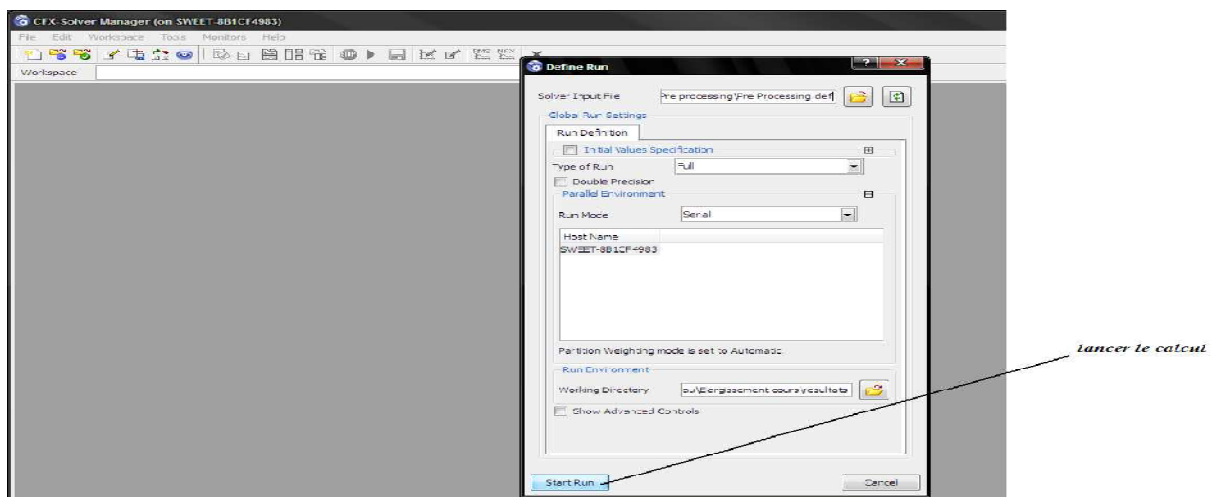


Figure III.11 lancer le calcul.

### III.2.3 Module CFX-Solve :

Le module CFX-Solver est le module qui effectue les calculs. Il est basé sur la méthode des volumes finis et l'intégration des équations de Navier-Stokes dans chaque maille, et dispose de modèles additionnels pour prendre en compte des phénomènes physiques comme la turbulence, le rayonnement thermique... [40].

### III.2.4 Module CFX-Post :

Le module CFX-post est un outil graphique permettant le traitement et la visualisation des résultats. Il permet d'appliquer des textures sur la géométrie, de visualiser des contours, des iso-surfaces, des lignes de courant [40], des champs de vitesse :

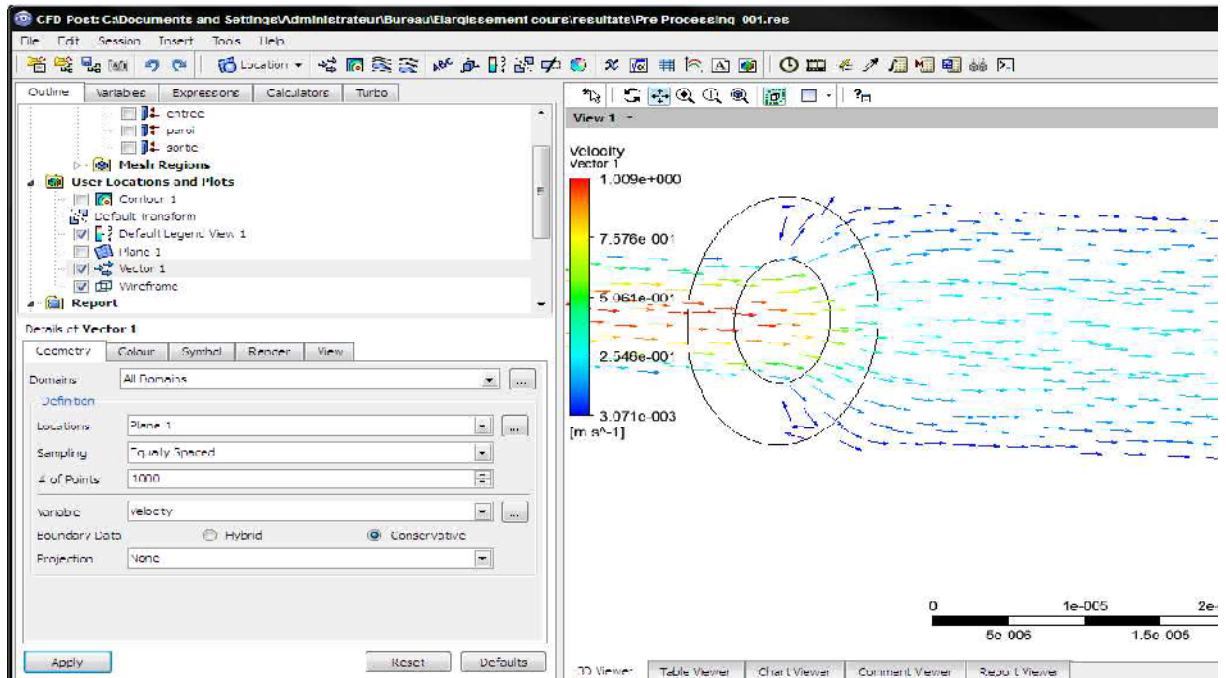


Figure III.12 Créer des champs de vitesse.

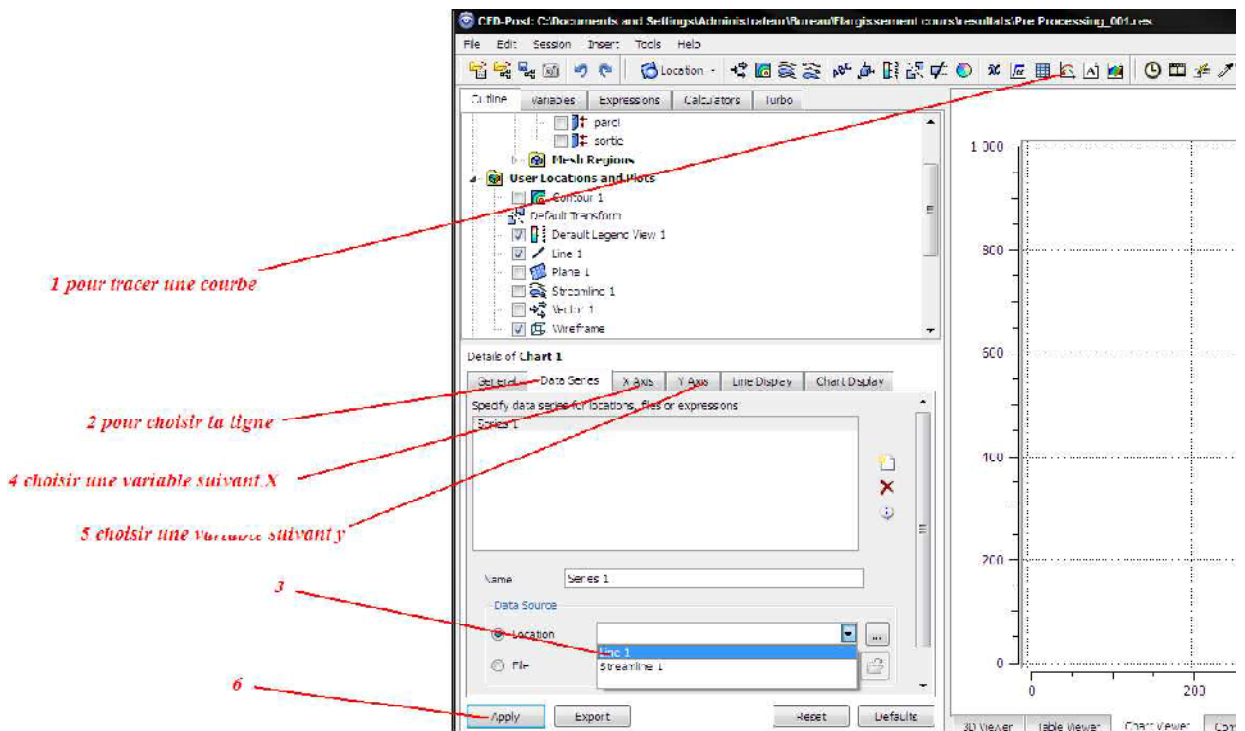


Figure III.13 Comment tracer une courbe ?

**III.3 Conclusion :**

ANSYS CFX est un logiciel qui permet de construire la géométrie, de définir le problème physique comme les caractéristiques des fluides utilisés et la dynamique correspondante, aussi ce logiciel est un outil graphique permettant le traitement et la visualisation des résultats. Il permet d'appliquer des textures sur la géométrie, de visualiser des contours, des iso-surfaces, des lignes de courant, des champs de vitesses....

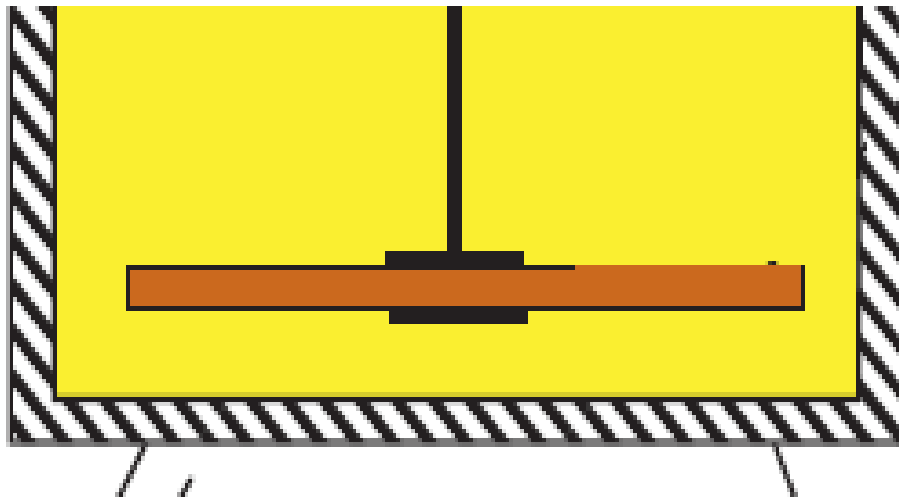
Il permet également l'exportation des résultats sous forme numérique, CFX est particulièrement bien adapté pour faire étudier et analyser notre expérience (un disque tournant dans un fluide).

### IV.1 Introduction :

Le phénomène d'électrisation par écoulement représente un des phénomènes d'électrocinétique, il apparaît dès la mise en contact d'écoulement d'un fluide liquide et un solide.

L'objectif spécifique du présent travail est de mettre en évidence l'influence de certains paramètres sur le mécanisme de l'électrisation statique pour différents couples de matériaux solide/liquide utilisées dans l'isolation des transformateurs. Nous présentons également la technique permettant d'étudier les caractéristiques fondamentales de séparation de charges aux interfaces.

La technique est issue d'une synthèse entre les cellules de test utilisées dans l'industrie pétrolière et celle déjà utilisées dans le passé dans l'industrie électrotechnique. Elle est constituée d'un disque tournant recouvert de matériau solide (carton dans notre cas) et immergé dans une cuve rempli d'huile ; figure IV.1



**Figure IV.1** Coupe du modèle 'disque en rotation'

Plusieurs chercheurs ont procédé pratiquement à la quantification du courant d'électrisation par écoulement, ils n'ont pas utilisé de méthodes mathématiques afin de résoudre ce problème. D'autres ont utilisé les tests en laboratoires pour tirer des modèles mathématiques quantifiant le courant d'électrisation autour d'un disque tournant en métal et couvert d'un isolant en se basant sur les modèles de mécanique des fluides. Le modèle mathématique choisi dans notre étude est présenté par la formule suivante [41] :

$$I = \frac{\sigma V q_w}{A \epsilon_r \epsilon_0} + \frac{D_m q_w}{\delta A} S_d - \frac{D_m q_w}{\delta} S_d \quad (IV.1)$$

## IV.2 Modélisation du disque en rotation :

Dans cette étape, le disque en rotation immergé dans un récipient rempli d'huile est simulé à l'aide du module ICEM du logiciel CFX et par élaboration du maillage.

**Les paramètres géométriques utilisés par défaut, sont définis sur le tableau :**

| Paramètres             | Valeur |
|------------------------|--------|
| Diamètre de récipient  | 130 mm |
| Diamètre de disque     | 40 mm  |
| Épaisseur du récipient | 5 mm   |
| Épaisseur du disque    | 5 mm   |

**Tableau IV.1** Dimensions de la géométrie utilisée.

### IV.2.1 Conception du dispositif :

La création de la géométrie et le maillage sont faites par le module ICEM. Il permet la création de la géométrie en 2D ou 3D selon le modèle à l'échelle réelle. La géométrie est reconstituée à partir des informations géométriques données par le tableau IV.1 du disque en rotation utilisé dans le dispositif expérimental, Le logiciel simule le contact entre l'huile et le carton et Il élabore automatiquement le maillage selon des choix. La répartition et le raffinement sont exigés par l'utilisateur.

### IV.2.2 Elaboration de la géométrie des éléments du disque en rotation :

Le module ICEM est un outil puissant de conception doté de commandes qui facilitent la reconstitution de la géométrie réelle pour en faire un modèle virtuel.

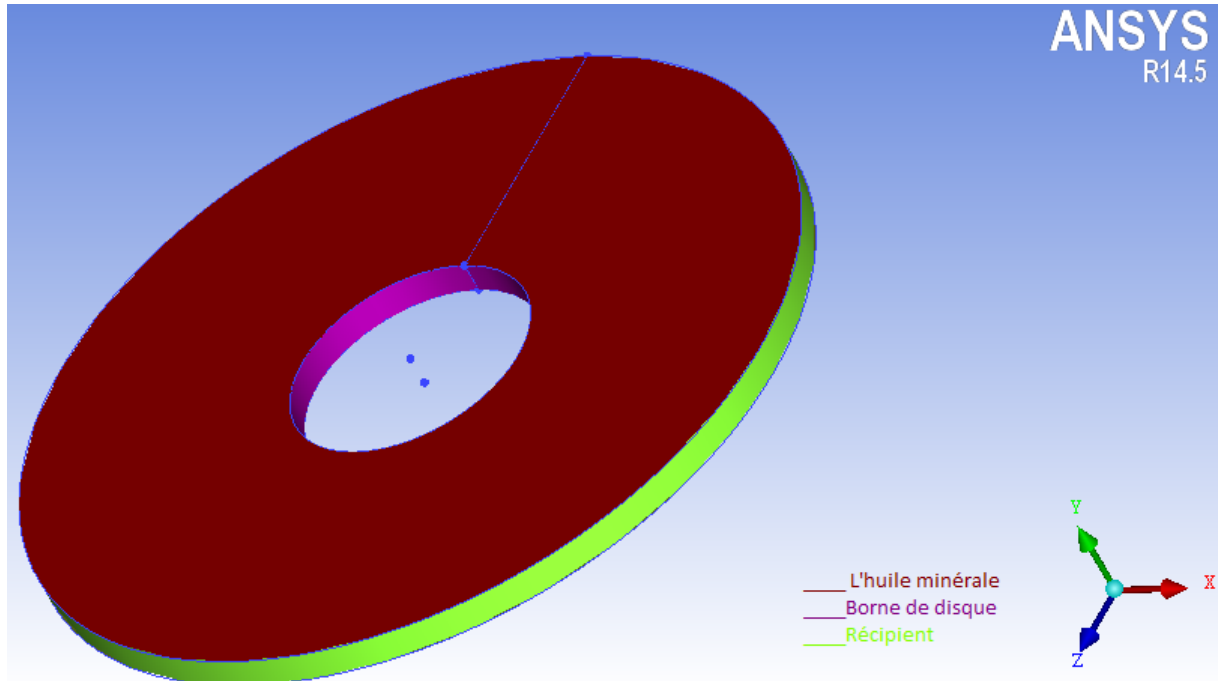
La géométrie est construite à partir des éléments tels que points, lignes, surfaces et volumes selon l'ordre suivant :

- 1- Création des points sur les contours à dessiner.
- 2- Dessin des lignes de contours représentant les profils du modèle réel;
- 3- Génération des surfaces représentatives du modèle ;
- 4- Création du volume fluide.
- 5- Définition des parties d'intérêts telles que entrée, sortie, symétrie, etc. ;
- 6- Il faut ajouter des interfaces entre les éléments fixes et mobiles.

Les éléments de système du disque en rotation sont :

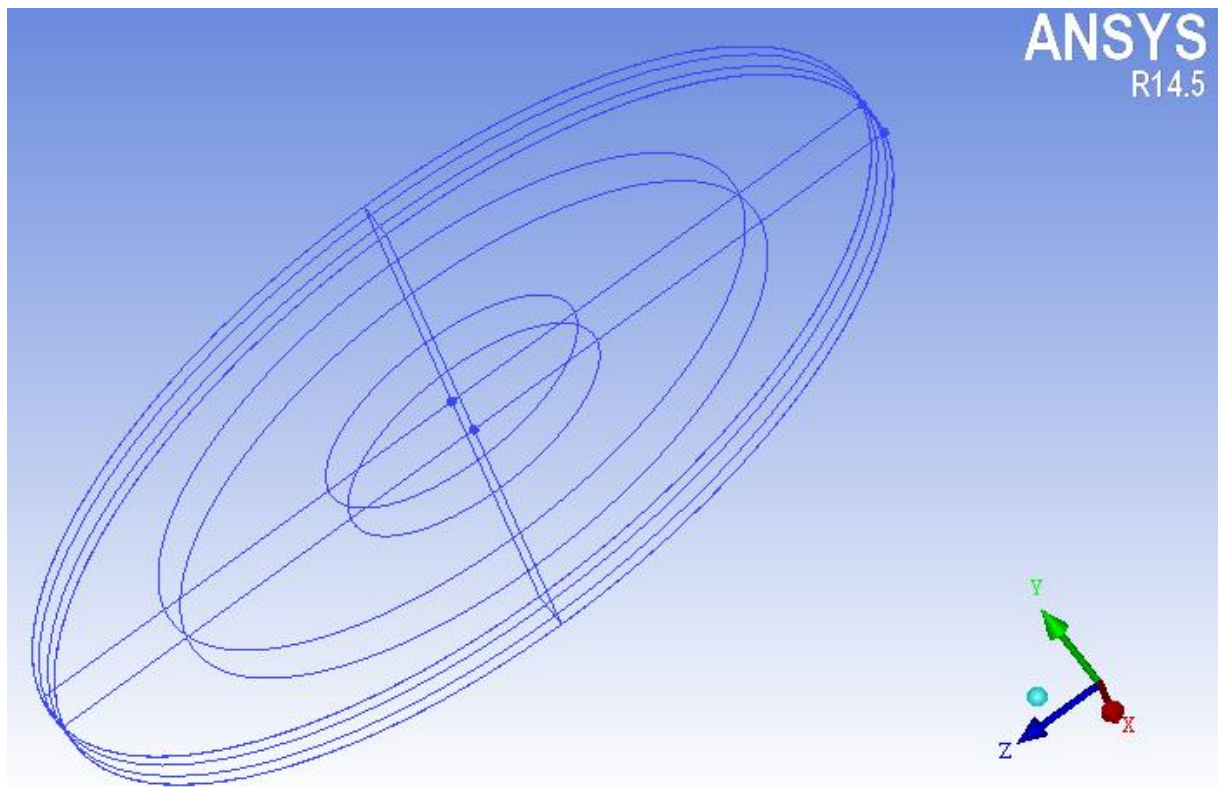
- deux plans symétriques suivant l'axe z (qui représente l'huile)

• deux borne rotatives (Wall) suivant l'axe y dont la première est située au milieu(représente le disque), la deuxième est située à l'extérieur (le récipient). Tous ces éléments sont montrés sur la figure VI.2.

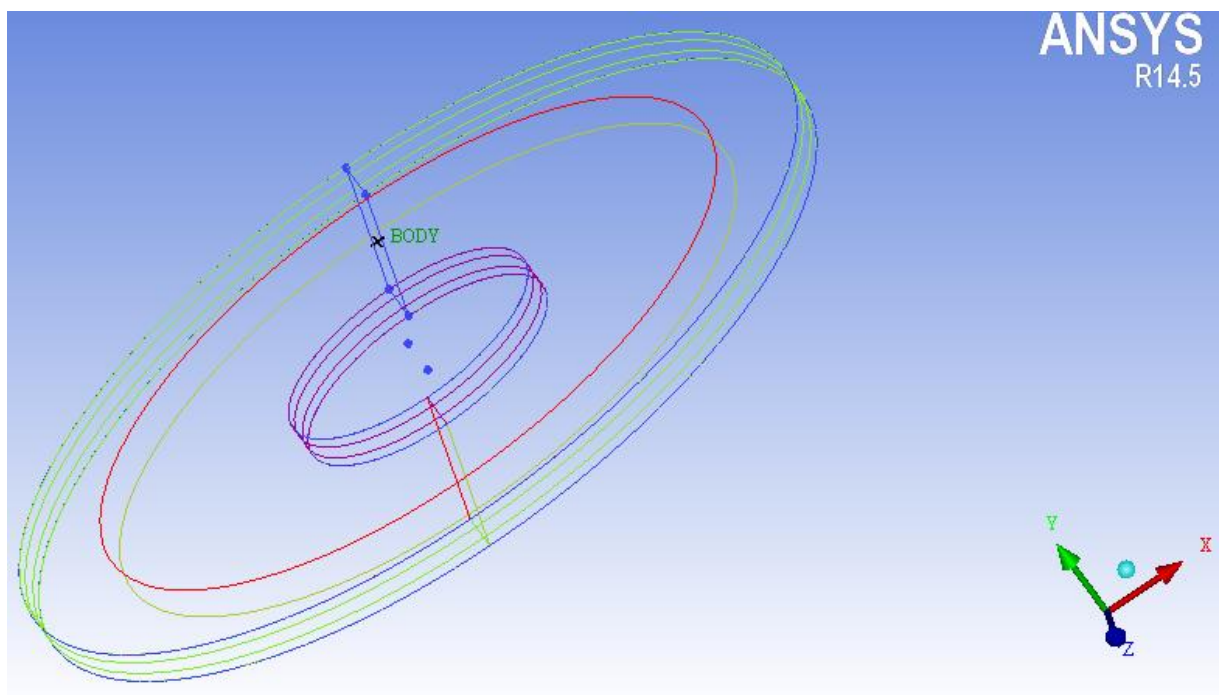


**Figure IV.2** Géométrie d'une coupe du disque en rotation à l'ICEM CFD.

La géométrie est obtenue à l'aide du logiciel ICEM CFD 14.5. Un fichier des données contenant les coordonnées cartésiennes des points nécessaires pour la création de la géométrie est importé. Ces points servent à créer des lignes ; à partir de ces points on peut générer les différentes surfaces. Pour donner un aspect tridimensionnel de la géométrie (3D), on doit déclarer un espace situé entre les surfaces comme étant un volume en créant un (BODY) à l'intérieur de cet espace. La géométrie est présente par les Figures IV.3 et IV.4.



**Figure IV.3** Génération des points et des arcs en 3D



**Figure IV.4** Génération des surfaces en 3D

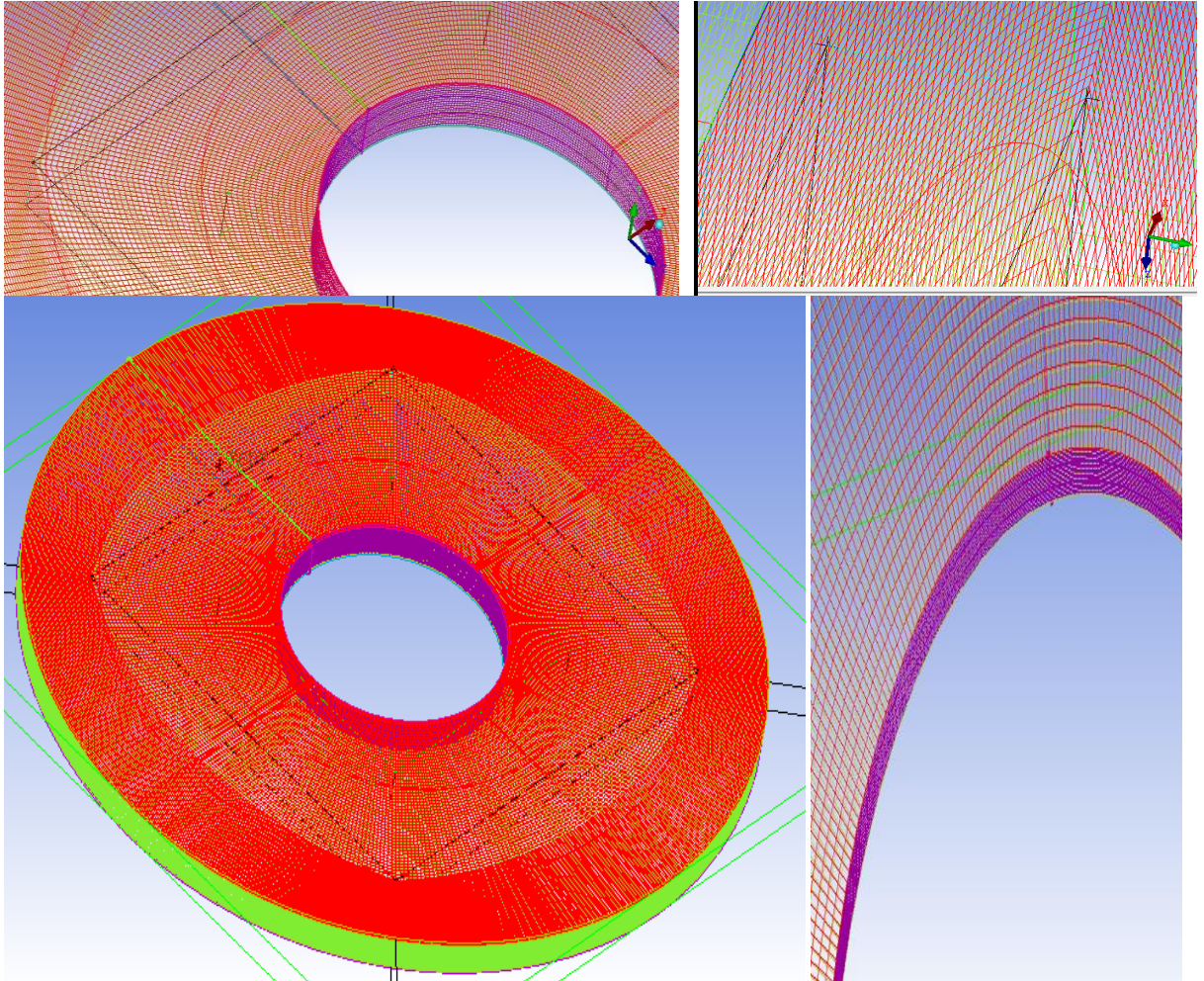
#### IV.2.3 Elaboration du maillage du disque en rotation :

Une des étapes primordiales et délicates en simulation numérique est le maillage. En effet, le maillage a des conséquences directes sur la convergence et la précision des résultats.

Un maillage de bonne qualité doit être bien reparti et assez raffiné pour déterminer précisément les champs d'écoulement, mais ceci dépendra des moyens informatiques disponibles.

Dans notre cas on a utilisé un maillage symétrique puisque les résultats obtenus seront plotés sur une ligne (c'est-à-dire le calcul se fait du borne du disque jusqu'au borne du récipient on passant par une des surfaces de symétries).

L'illustration des maillages du disque en rotation sous ICEM est représentée sur la figure IV.5



**Figure IV.5** Génération de maillage



### **IV.3 simulation numérique du disque en rotation :**

#### **IV.3.1 Objectif :**

L'objectif de cette simulation numérique est de valider la théorie développée par des études expérimentales pour certains paramètres d'influence sur le mécanisme de l'électrisation statique pour différents couples de matériaux solide /liquide utilisés dans l'isolation des transformateurs.

#### **IV.3.2 Définition physique et condition aux limites :**

Après l'importation de la géométrie et le maillage du modèle génère par ICEM, l'étape suivante est la définition physique du problème à l'aide du module CFX-Pré. Ce module est donné sous forme d'une bibliothèque, permettre la définition des conditions aux limites.

#### **IV.3.3 Condition aux limites :**

On définit la nature du fluide ; dans notre cas c'est l'huile à température de 20°C ; le régime de l'huile est stationnaire .Il reste a déterminer les conditions aux limites pour chaque surface du domaine de calcul.

Dans notre simulation, les conditions aux limites sont les suivantes :

- Paroi 1 : Wall représente la borne du récipient.
- Paroi 2 : Rotating Wall, représente la borne du disque en rotation.
- Les symétries (SYM1, SYM2) représentent les surfaces e l'huile.

### **IV.4 Résultats et interprétations :**

#### **IV.4.1 Caractéristiques des isolants :**

Notre système est constitué d'un disque tournant recouvert d'un solide (carton) et immergé dans une cuve rempli d'huile (huile minéral).le disque tourne à une vitesse constante Les propriétés physicochimiques et diélectriques du carton et de l'huile minérale sont mesurées dans les expériences faites à la chaire Isolime [42]. Le but de ces mesures est évaluer l'impact des réactions chimiques secondaires entre les radicaux libres.

Il est important d'utiliser les résultats réels pour valider nos résultats de simulations.

Les tableaux suivants relatent les mesures des propriétés physicochimiques des isolants [42]:

| Les caractéristiques de l'huile neuve                                | Les valeurs |
|--|-------------|
| La densité [kg/m <sup>-3</sup> ]                                     | 830         |
| La conductivité électrique (10 <sup>-12</sup> ) [S.m <sup>-1</sup> ] | 6.893       |
| La Viscosité dynamique (10 <sup>-3</sup> ) [pa.s]                    | 6.4         |
| La capacité (10 <sup>-10</sup> ) [F]                                 | 1.64        |
| Le facteur de dissipation (tan $\sigma$ )                            | 0.0020608   |
| La résistivité (10 <sup>11</sup> ) [ $\Omega$ ]                      | 1.45        |
| Particules insolubles (NTU)  | 0.9         |

**Tableau IV.2** Les propriétés physico-chimique d'une huile minérale neuve à une température de 20°C

| Les caractéristiques de carton neuve                              | Les valeurs |
|---|-------------|
| Teneur en eau (%)   | 0.3         |
| Conductivité électrique (10 <sup>-11</sup> ) [S.m <sup>-1</sup> ] | 3.617       |
| La résistivité (10 <sup>10</sup> ) [ $\Omega$ ]                   | 2.764       |
| La capacité (10 <sup>-11</sup> ) [F]                              | 7.323       |
| Le facteur de dissipation (tan $\sigma$ )                         | 0.016       |

**Tableau IV.3** Les propriétés physico-chimique d'un carton neuf

#### IV.4.2 Influence de vitesse de rotation :

La vitesse de rotation du disque est variée entre 100 tr/min et 400 tr/min avec un pas de 100 tr/min.

La surface de contact : le diamètre du disque est égale 40 mm, l'épaisseur est égale 5 mm, avec une rugosité de 35  $\mu\text{m}$  à l'interface. La température est égale 20°C. Ces valeurs sont indiquées par les conditions aux limites.

Les figures IV.6 IV.7 et IV.8 montrent successivement la variation de la vitesse et le contour de vitesse de l'huile, ainsi que la rugosité du carton.

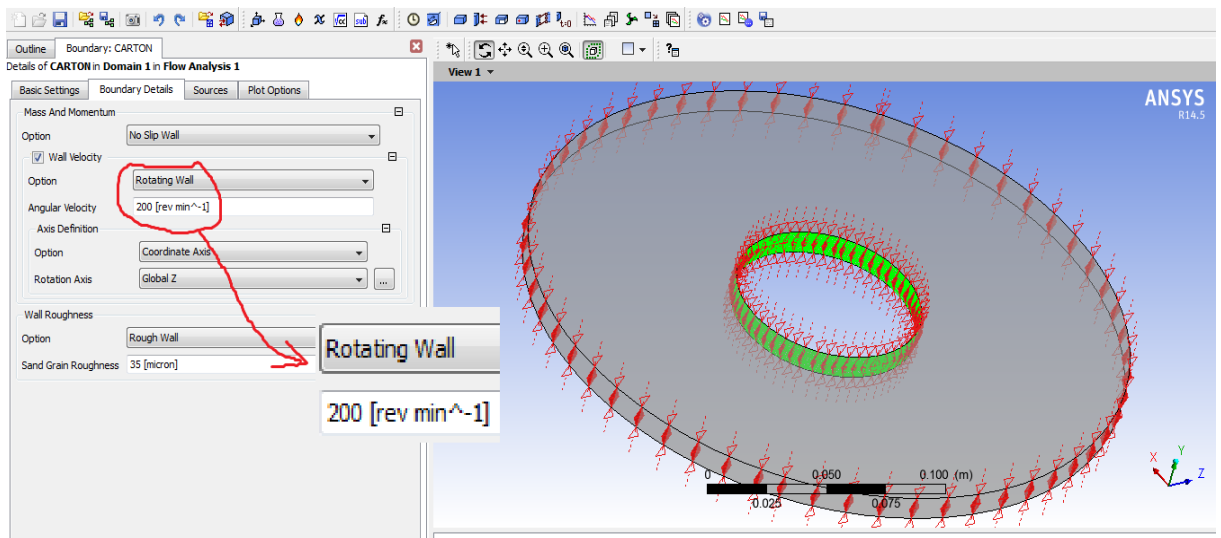


Figure IV.6 La configuration de vitesse de rotation du disque dans le CFX Pre à 200 tr /min.

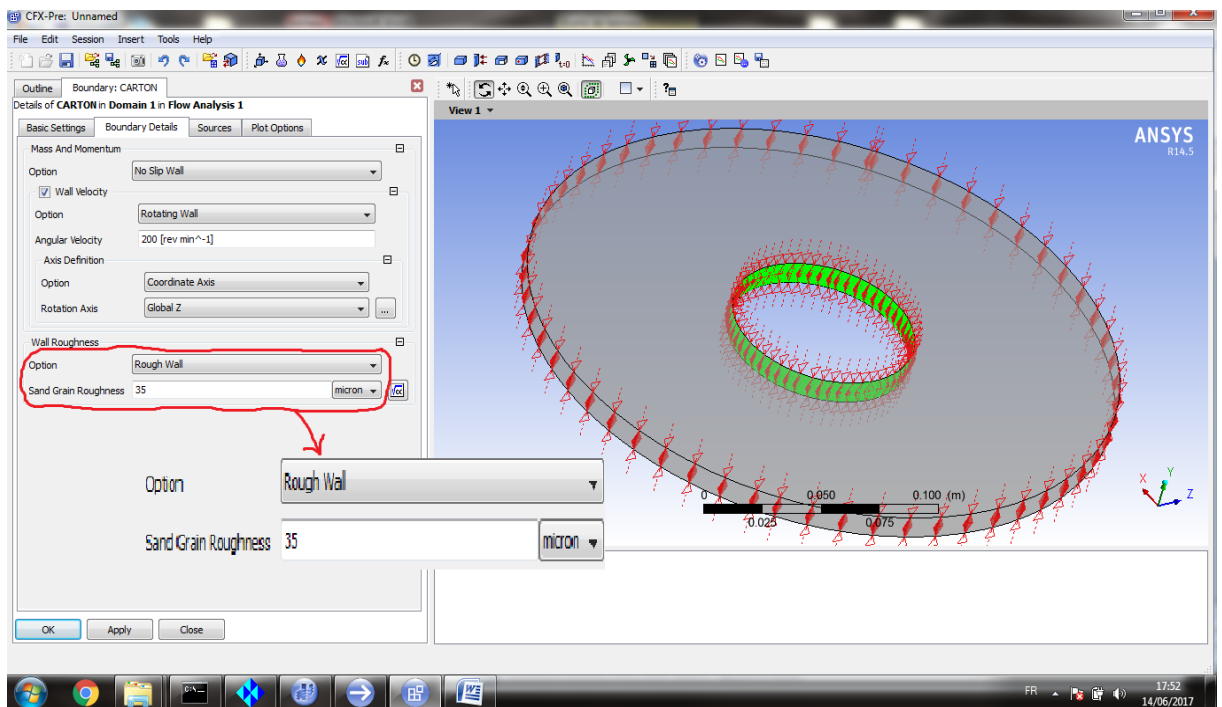
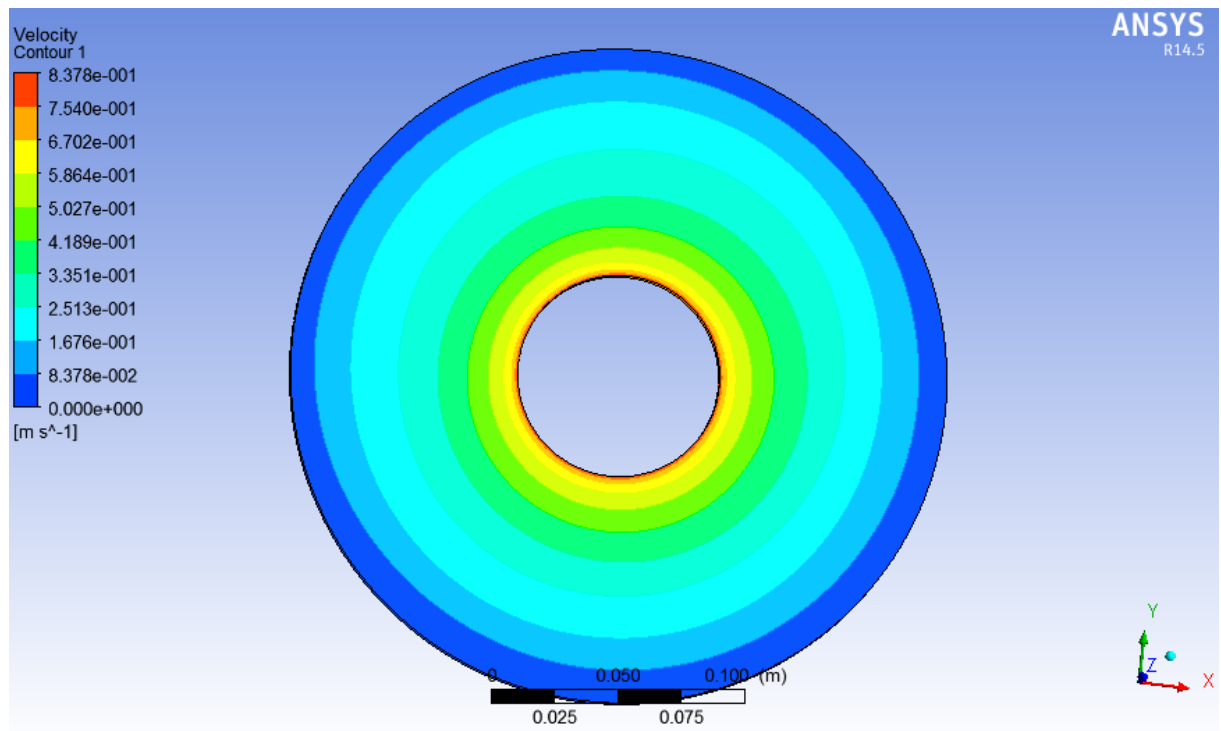


Figure IV.7 La configuration de la rugosité de disque de carton à 35  $\mu\text{m}$ .



**Figure IV.8** Contour de vitesse de l'huile pour une rotation de 200 tr/min.

Pour les autres vitesses de rotations on répète la même procédure ; la vitesse près des parois est reliée à la contrainte de cisaillement exercée sur la paroi, **le tableau IV.3** donne les résultats de calcul de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de rotation.

| La vitesse de rotation tr/min | La contrainte de cisaillement pour E=5mm |
|-------------------------------|--|
| 100                           | 0.020                                    |
| 200                           | 0.112                                    |
| 300                           | 0.182                                    |
| 400                           | 0.234                                    |

**Tableau IV.4** Les différentes contraintes de cisaillements obtenus par la simulation

Les différentes contraintes de cisaillements obtenus par la simulation sont utilisées pour calculer le courant d'électrisation d'après l'équation (IV.1) à l'aide de ces équations empiriques :

$$A = \frac{q_w}{q_0} = 1 + \frac{\delta V}{\lambda^2 S} \quad (IV.2)$$

L'épaisseur laminaire de couche inférieure est décrite par la dépendance :

$$\delta\sigma = \frac{11.7\nu}{\left(\frac{\nu}{D_m}\right) 0.333 \sqrt{\frac{\tau\omega}{\rho}}} \quad (IV.3)$$

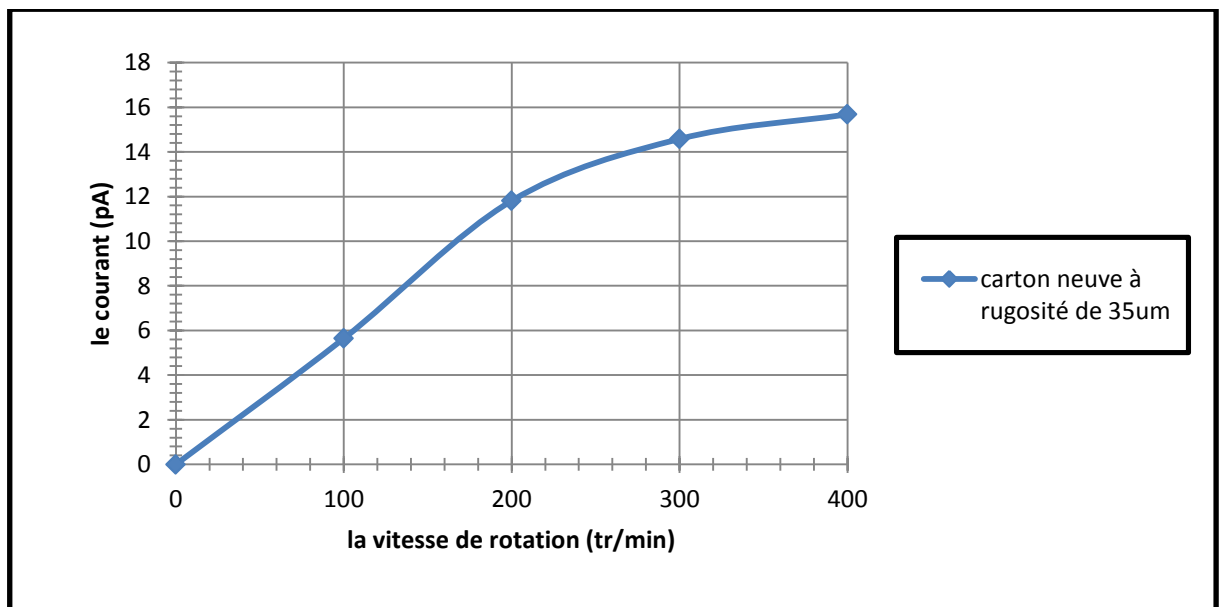
La période de relaxation de la charge est exprimée comme fonction des propriétés du liquide :

$$\tau = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{\sigma} \quad (IV.4)$$

La profondeur de pénétration de charge dans la couche inférieure laminaire est décrite par la formule :

$$\lambda = \sqrt{D_m \tau} \quad (IV.5)$$

La Figure VI.9 donne l'évolution de courant en fonction de la vitesse à T=20°C, la rugosité est égale 35 µm.



**Figure IV.9** évolution de courant en fonction de vitesse de rotation

On remarque sur cette figure pour des variables (0 tr/min à 400 tr/min) que Le courant d'électrisation augmente avec l'augmentation de la vitesse de rotation, cette augmentation est très importante pour des valeurs élevés de la vitesse (400 tr/min). En absence de l'écoulement de l'huile, on n'aura pas d'électrisation vu que les deux isolants seront en équilibre (vitesse nulle). Le signe du courant est positif. Des études effectuées à l'université de Poitiers [43] et à la chaire ISOLIME [42], [44] (université du Chicoutimi à Québec) ont montré clairement

l'existence du phénomène de génération des charges, négatives dans le carton ou papier, positive dans l'huile

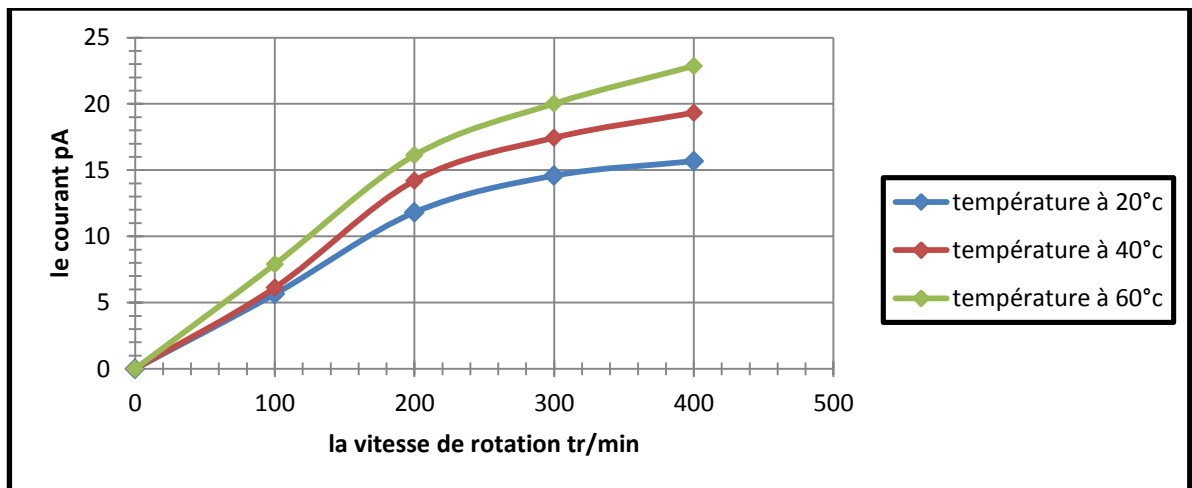
#### IV.4.3 L'influence de température de l'huile :

La température de l'huile est variée entre 20°C et 60°C, la rugosité est égale 35 µm, L'épaisseur du disque est maintenu constant pour toutes les températures utilisées est égale 5 mm ,Le tableau suivant montre les résultats de calcul de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de rotation pour chaque température.

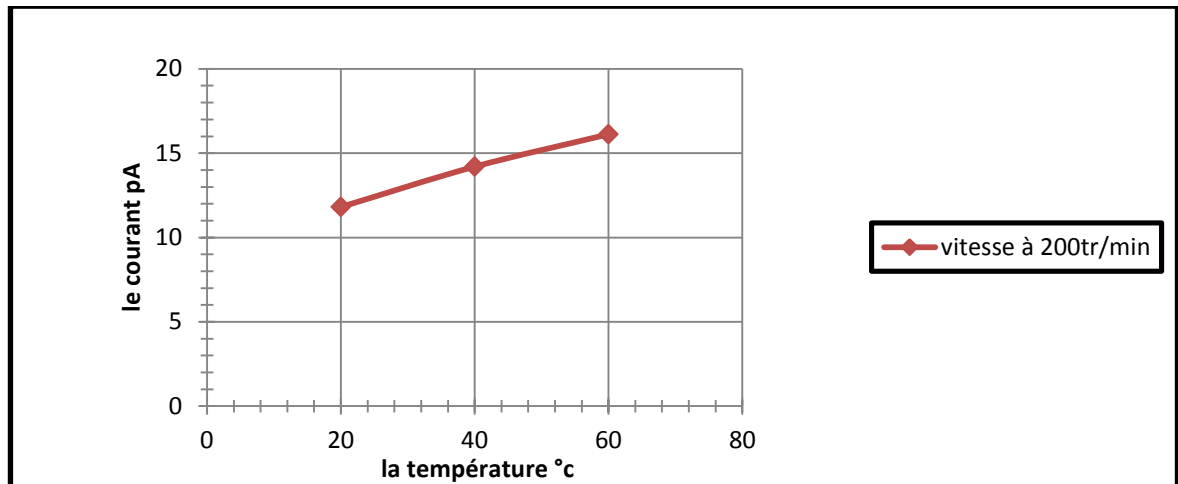
La figure IV.10 donne l'évolution du courant en fonction de la vitesse de rotation pour différentes valeurs de température : L'évolution du courant en fonction de la température pour une égale vitesse de 400 tr/min est donnée sur la figureIV.11.

| La vitesse tr/min | La contrainte de cisaillement pour T=20°C | La contrainte de cisaillement pour T=40°C | La contrainte de cisaillement pour T=60°C |
|-------------------|---|---|---|
| 100               | 0.020                                     | 0.037                                     | 0.058                                     |
| 200               | 0.112                                     | 0.186                                     | 0.249                                     |
| 300               | 0.182                                     | 0.321                                     | 0.401                                     |
| 400               | 0.234                                     | 0.377                                     | 0.482                                     |

**Tableau IV.5** Les différentes contraintes de cisaillements obtenus par la simulation



**Figure IV.10** évolution de courant en fonction de vitesse de rotation pour chaque température



**Figure IV.11** évolution de courant en fonction de température

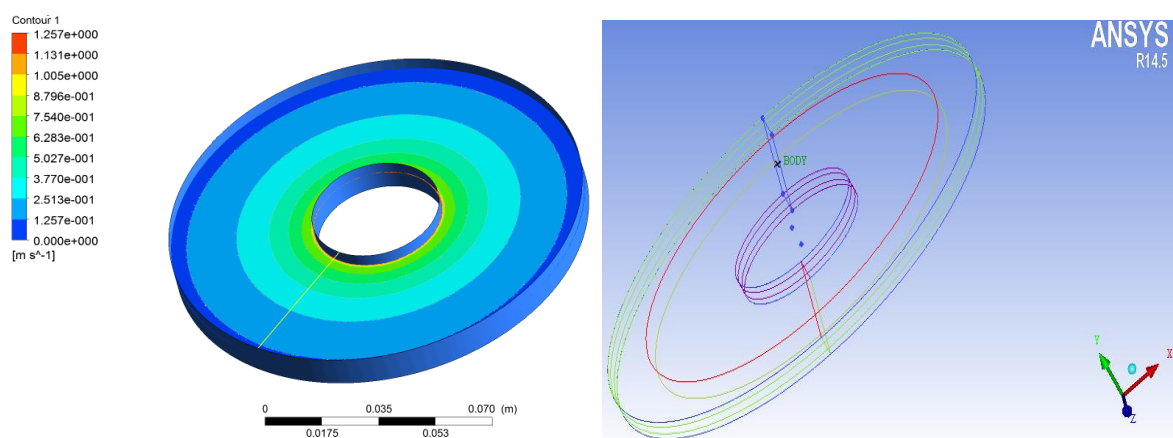
On constate sur ces figures que la croissance des courants d'électrisation est quasiment linéaire en fonction de la température. Une fois de plus, la température joue un rôle capital dans le dévalent de tous les phénomènes accélérant les processus de dégradation et vieillissement des isolants diélectriques. Cette augmentation du courant d'électrisation est due aux effets de la température sur la viscosité, la conductivité et sur le taux d'humidité du diélectrique.

#### IV.4.4 Influence d'état du surface :

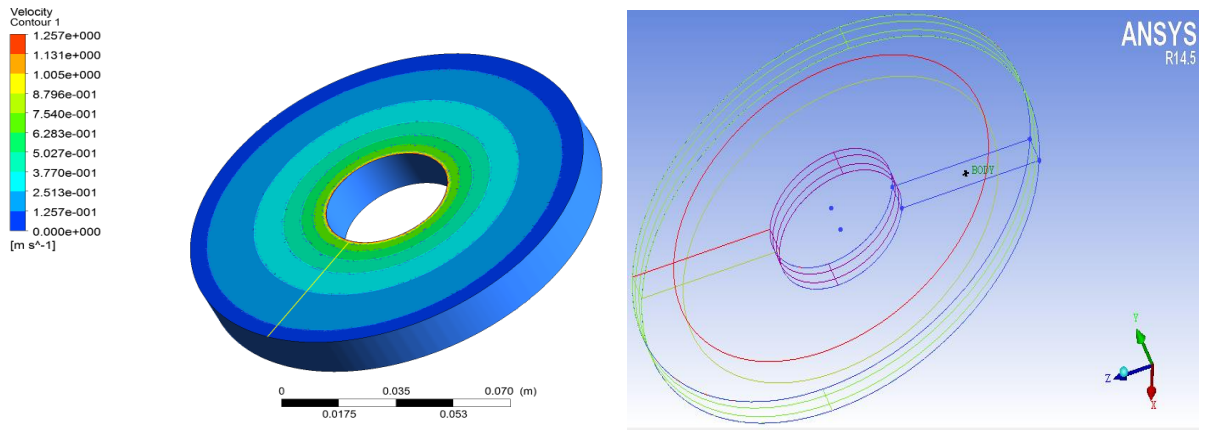
##### IV.4.4.1 Influence de l'épaisseur :

L'épaisseur du disque en rotation est varié entre 5 mm et 15mm, le diamètre du disque est maintenu constant est égale 40 mm, la rugosité de 35  $\mu\text{m}$  sur l'interface carton/huile.

Les figures IV.12 et IV.13 montrent successivement les différentes géométries utilisées dans la simulation pour une vitesse de 200 tr/min :



**Figure IV.12** Géométrie et contour de vitesse pour une épaisseur de 10 mm et  $w=200$  tr/min



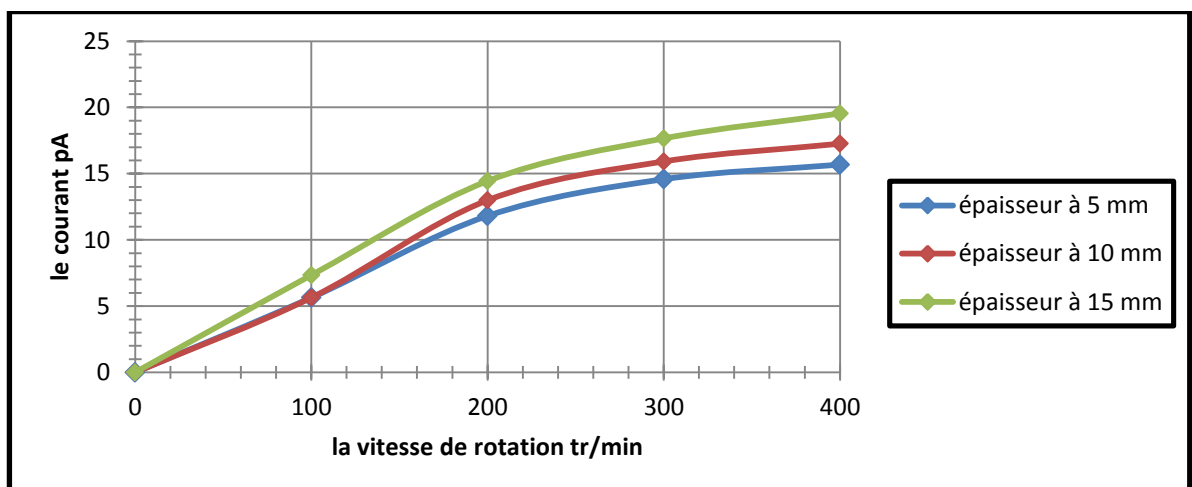
**Figure IV.13** Géométrie et contour de vitesse pour une épaisseur de 15 mm et vitesse 200 tr/min

Le tableau suivant montre les résultats de calcul de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de rotation à chaque épaisseur (rugosité est égale  $35\mu\text{m}$ ,  $T=20\text{ }^\circ\text{C}$ ) :

| La vitesse tr/min | La contrainte de cisaillement pour E= 5mm | La contrainte de cisaillement pour E=10mm | La contrainte de cisaillement pour E=15mm |
|-------------------|---|---|---|
| 100               | 0.020                                     | 0.020                                     | 0.059                                     |
| 200               | 0.112                                     | 0.118                                     | 0.126                                     |
| 300               | 0.182                                     | 0.193                                     | 0.205                                     |
| 400               | 0.234                                     | 0.269                                     | 0.308                                     |

**Tableau IV.6** Les différentes contraintes de cisaillement obtenu par la simulation

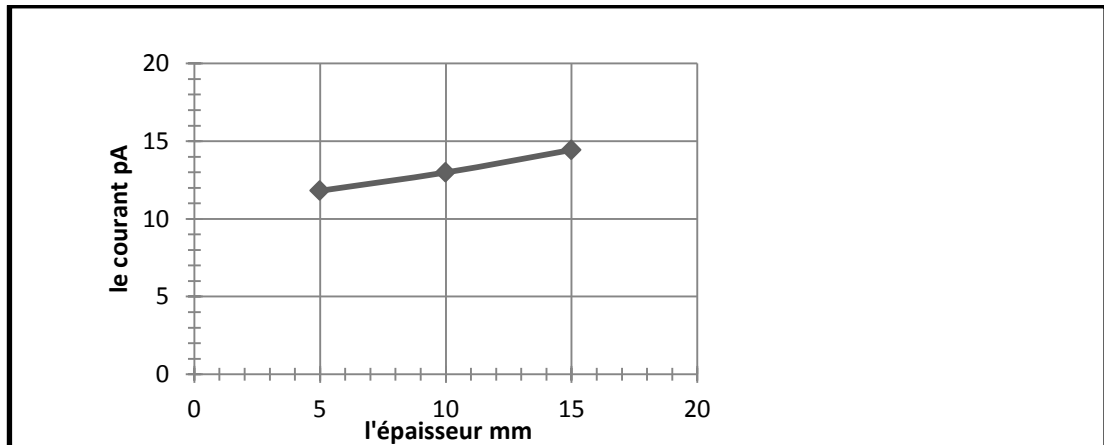
La figure VI.14 donne l'évolution du courant en fonction du vitesse pour chaque épaisseur :



**Figure IV.14** évolution de courant en fonction de vitesse de rotation pour chaque épaisseur



L'évolution du courant en fonction d'épaisseur est donnée sur la figure IV.15. d'après la courbe de courant en fonction de vitesse, pour une vitesse de 200 tr/min par exemple le courant passe d'une valeur de 11(pA) pour le disque à épaisseur 5mm à 13(pA) pour le disque à épaisseur 10 mm à 14.5(pA) pour le disque à épaisseur 15mm.



**Figure IV.15** évolution de courant en fonction d'épaisseur

On peut observer sur ces figures que l'épaisseur affecte l'électrification statique. Cette influence est importante pour des valeurs d'épaisseur élevées ( $e=5$  mm –  $I=11$  pA,  $e=15$  mm –  $I=14.5$  pA). Plus la section de l'interface l'huile - papier est élevée, plus l'accumulation de charge est importante. L'ECT est affectée par l'épaisseur de l'isolation solide [45].

#### IV.4.4.2 Influence de rugosité :

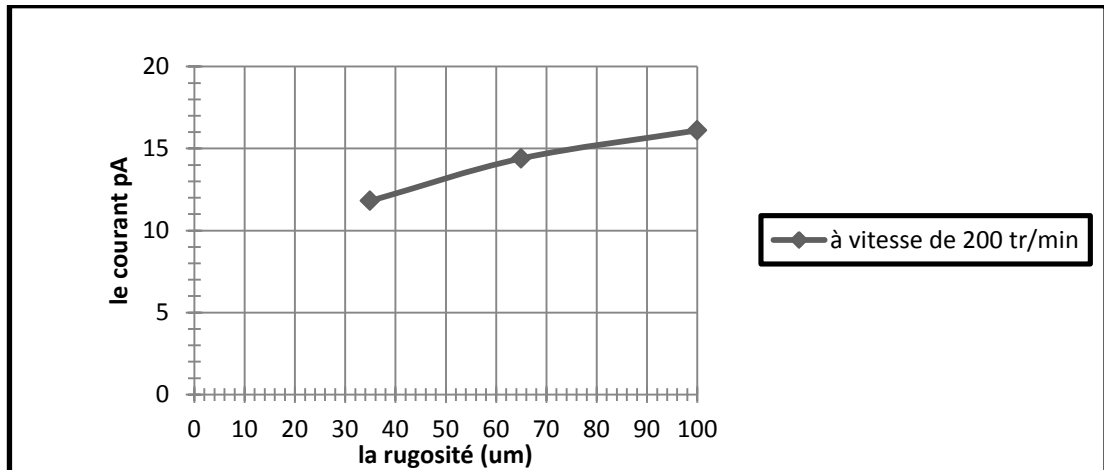
On va prendre trois types de carton **c1**, **c2** et **c3**. La rugosité du c1 est égale 35  $\mu\text{m}$ , La rugosité du c2 est égale 65  $\mu\text{m}$ , La rugosité du c3 est égale 100  $\mu\text{m}$ . la vitesse de rotation du disque est constante, pour ce cas on garde la même température et la même géométrie.

Le tableau suivant montre les résultats de calcul de la contrainte de cisaillement en fonction de la vitesse de rotation pour chaque rugosité :

| La vitesse tr/min | La contrainte de cisaillement pour rugosité de 35 $\mu\text{m}$ | La contrainte de cisaillement pour 65 $\mu\text{m}$ | La contrainte de cisaillement pour 100 $\mu\text{m}$ |
|-------------------|---|---|--|
| 200               | 0.106   | 0.131   | 0.169  |

**Tableau IV.7** Les différentes contraintes de cisaillements obtenus par la simulation

On remarque sur ces figures que plus la rugosité est élevée, plus le courant d'électrisation est important. Cette augmentation est très importante pour le carton C3 (le courant d'électrisation atteint 16.11 pA). Les charges sont piégées par les surfaces rugueuses. Donc pour avoir un courant d'électrisation faible il faut choisir un papier carton qui possède une surface lisse.



**Figure IV.16** évolution de courant en fonction de la rugosité

La rugosité a une influence remarquable, la rugosité du surface semble être à l'origine de cette différence, le courant est plus élevé avec l'interface le plus rugueux [46].

### VI.5 Conclusion :

Le mécanisme d'électrisation par circulation de l'huile à travers les enroulements des transformateurs est un mécanisme très complexe, son étude à travers des simulations numériques, a permis de mettre en évidence l'influence de certains paramètres tels que la température, la vitesse d'écoulement, la nature des interfaces, la surface du contact.

L'électrisation statique est un phénomène qui peut endommager les transformateurs de puissance. Il est alors nécessaire de comprendre le mécanisme de ce phénomène afin de trouver des solutions.

### Conclusion générale

L'augmentation de la tension et de la puissance dans les transformateurs de puissance et la diminution de leurs gabarits ont conduit à la mise en œuvre des systèmes de refroidissement pour évacuer la chaleur en utilisant un fluide diélectrique généralement une huile minérale.

De nombreuses recherches montrent que la circulation d'huile à travers les canaux de refroidissement du bobinage (sur des surfaces cellulosiques) est à l'origine d'une séparation de charges statiques. Celles-ci sont, en effet, produites à l'interface solide/liquide par le flux d'huile entraînant une partie de la double couche électrique, formée par l'absorption préférentielle des ions négatifs par la surface cellulosique. Ainsi, le papier se charge généralement négativement et l'huile positivement.

Notre étude est déterminée le courant d'électrisation à l'interface carton/huile en utilisant un outil informatique, Cette étude est effectuée dans un système à disque rotatif. L'objectif de cette simulation numérique est validé les résultats expérimentaux de l'influence de certains paramètres sur le mécanisme de l'électrisation statique.

Pour la simulation, le choix s'est porté sur le logiciel commercial CFX-développé par ANSYS ;c'est un logiciel de simulation numérique des écoulements en mécanique des fluides et de transferts thermiques. Il permet de mettre en œuvre une simulation numérique complète en passant par la génération du maillage et de calcul. CFX est particulièrement bien adapté aux machines tournantes.

Les résultats de simulation obtenus montrent que le type de papier de transformateur, les propriétés physico-chimiques tel que la température de l'huile, la vitesse d'écoulement, l'état de surface du carton (rugosité et l'épaisseur de surface de contact) influent sur le l'électrisation statique, des études expérimentaux confirment ces résultats.

#### Les perspectives et recommandations :

Il est recommandé de pour suivre le travail de recherche pour clarifier certain points dans le présent travail et qui concerne la simulation d'un écoulement de l'huile dans les transformateurs.

Pour cela nous suggérons :

- La simulation de l'influence de la teneur en eau dans le carton.
- La simulation de l'influence du champ électrique.