

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Ammar Telidji – Laghouat –  
Faculté des sciences et de technologie  
Département génie Électrique



**Mémoire pour l'Obtention du diplôme :**

Master en électrotechnique industrielle

**Option :** Électrotechnique industrielle

**Thème :**

---

*Etude par simulation l'influence des défauts sur  
le processus de refroidissement dans un  
transformateur*

---

**Présenté par :**

SADEKI Fatima Zahra

EL BAR Khadidja Samah

**Devant le jury :**

**Président :** MCA. Sonne Abdelkader

**Encadreur :** Pr. Seghier Tahar

**Co- Encadreur :** Dr. Hadjadj Ahmed

**Examineur :** MCA Boudraa Saliha

**Année Universitaire :** 2022/2023



## ***Dédicace***

***Je dédie ce modeste**  
travail à ma mère et mon père en général  
et à mes frères Et ma grand-mère*

***A tous les membres de nos familles***

***A nos très chers amis***

***A tous les enseignants du  
département génie électrique***

***KHADIDJA SAMAH***

*Je dédie ce travail*

*A ma chère mère,*

*A mon cher père,*

*Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir tout au long de mes études, et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs.*

*A mes chères sœurs,*

*A mes meilleurs amis,*

*A toute ma famille.*

*Fatima Zahra SADEKI*

## **Remerciement**

*En préambule, on remercie ALLAH le tout puissant de nous avoir donné la santé, la volonté et la patience durant ces longues années des études. En tout premier lieu, nous remercions vivement nos parents qui nous ont donnés tous les outils et les conditions de succès. Pour leur confiance et leur soutien moral.*

*Nous tenons à exprimer toute notre reconnaissance à notre encadreur le professeur **T. SEGHIER** pour son suivi continu tout le long de la réalisation de ce mémoire.*

*Nos vifs remerciements à notre Co-encadreur **A. HADJADJ** pour son gentillesse, orientations, et ses conseils précieux.*

*Et Nos Remerciements Vont A L'administration De La Faculté Des Sciences De La Technologie De l'Université De Laghouat, Et A Nos Honorables Professeurs A L'université Pour Offrir Le Meilleur Environnement Pour Enseigner Et Acquérir Des Connaissances Dans Les Meilleures Conditions Qui Conviennent.*

*Et à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail, qui nous ont encouragés et soutenus tout au long de ce travail*

## ملخص

يمكن أن تتعرض المحولات في الخدمة لأخطاء مختلفة تؤثر على أدائها وتقلل من قدرتها على العزل. تعد الدوائر القصيرة أو التجاوب أو اضطرابات تدفقات التبريد من بين هذه المشكلات ويمكن أن تغير بشكل كبير التوزيع الحراري داخل المحول. يمكن أن تؤدي هذه الحالات الشاذة إلى ارتفاع درجات الحرارة المحلية، مما قد يضعف وظيفة نقل الحرارة للزيت العازل.

يمثل هذا العمل دراسة عن قدرة الزيت (الجديد، القديم) على نقل الحرارة في المحولات، لحالات الدراسة المختلفة (بدون عيوب: عدم التحميل، عند التحميل، مع وجود أعطال: ماس كهربائي، تجويف). أظهرت النتائج المختلفة التي تم الحصول عليها أن الدوائر القصيرة والفجوات الغازية لها تأثير كبير على قدرة حالة الزيت على نقل الحرارة في المحولات. فهي تؤدي إلى انخفاض كفاءة التبريد وزيادة خطر تلف الزيت العازل. لذلك من الضروري مراقبة هذه الأخطاء ومنعها للحفاظ على أداء المحولات الأمثل.

الكلمات المفتاحية: محول، زيت، شيخوخة، أعطال، ماس كهربائي، محاكاة درجة الحرارة، كمصول متعدد الفيزياء

## Résumé

Les transformateurs en service peuvent subir divers défauts qui affectent leur performance et diminuent leur capacité d'isolation. Les courts-circuits, les cavités ou les perturbations des flux de refroidissement font partie de ces problèmes et peuvent changer significativement la répartition thermique à l'intérieur du transformateur. Ces anomalies peuvent élever les températures locales, ce qui nuit à la fonction du transfert thermique de l'huile isolante.

Ce travail représente une étude sur la capacité d'huile (neuve, vieillie) à transférer la chaleur dans les transformateurs, pour différents cas d'étude (sans défauts : à vide, en charge ; avec défauts : court-circuit, cavité). Les différents résultats obtenus montrent que les courts-circuits et les cavités gazeuses ont un impact significatif sur la capacité de l'état de l'huile à transférer la chaleur dans les transformateurs. Ils entraînent une diminution de l'efficacité de refroidissement et des risques accrus de dégradation de l'huile isolante. Il est donc crucial de surveiller et de prévenir ces défauts pour maintenir des performances optimales des transformateurs.

**Mots clés : Transformateur, Huile, Vieillesse, Défauts, Court-circuit, Température Simulation, Comsol Multiphysics.**

## **Abstract**

Transformers in service can experience various faults that affect their performance and decrease their insulation capacity. Short circuits, cavities or disturbances of cooling flows are among these problems and can significantly change the thermal distribution inside the transformer. These anomalies can elevate local temperatures, which would impair the heat transfer function of the insulating oil.

This work represents a study on the ability of oil (new, aged) to transfer heat in transformers, for different study cases (without faults: no-load, on load; with faults: short-circuit, cavity). The various results obtained show that short circuits and gas cavities have a significant impact on the ability of the state of the oil to transfer heat in transformers. They lead to reduced cooling efficiency and increased risk of insulating oil degradation. It is therefore crucial to monitor and prevent these faults to maintain optimal transformer performance.

**Keywords:** Transformer, Oil, Aging, Faults, Short-circuit, Temperature simulation, Comsol Multiphysics.

# *Listes des figures*

## *Chapitre I*

<b>Fig.I.1</b> : Un transformateur de puissance	<b>6</b>
<b>Fig.I.2</b> : Réseau électrique type	<b>7</b>
<b>Fig.I.3</b> : Représentation du flux dans le circuit magnétique	<b>10</b>
<b>Fig.I.4</b> : Schéma du réseau de transport	<b>10</b>
<b>Fig.I.5</b> : Echauffement excessif d'un enroulement	<b>12</b>
<b>Fig.I.6</b> : Point chaud sur le sélecteur d'un régleur en charge	<b>13</b>
<b>Fig.I.7</b> : Court-circuit entre spires	<b>14</b>
<b>Fig.I.8</b> : Décharge partielle dans un diélectrique	<b>16</b>
<b>Fig.I.9</b> : Huile Naturel Air Naturel (ONAN) - Refroidissement du transformateur	<b>18</b>
<b>Fig.I.10</b> : Huile Naturel Air Forcé (ONAF) - Refroidissement du transformateur	<b>18</b>
<b>Fig.I.11</b> : Huile Forcé Air Forcé (OFAF) - Refroidissement du transformateur	<b>19</b>
<b>Fig.I.12</b> : Huile forcé Eau forcé (OFWF) - Refroidissement du transformateur	<b>20</b>
<b>Fig.I.13</b> : La conduction thermique	<b>20</b>
<b>Fig.I.14</b> : Convection thermique	<b>21</b>
<b>Fig.I.15</b> : Evacuation de la chaleur dans un transformateur	<b>23</b>

## *Chapitre II*

<b>Fig.II.1</b> : Montrant l'interface d'ouverture du programme avec le logo dessus	<b>27</b>
<b>Fig.II.2</b> : Fenêtre de démarrage du logiciel	<b>28</b>
<b>Fig.II.3</b> : Diagramme de différentes étapes de résolution dans Comsol	<b>29</b>
<b>Fig.II.4</b> : Navigateur de modelés	<b>30</b>
<b>Fig.II.5</b> : Le plan de dessin 2D	<b>30</b>
<b>Fig. II.6</b> : Fenêtre pour choisir le modèle physique	<b>31</b>
<b>Fig.II.7</b> : Fenêtre pour choisir le cas d'étude	<b>31</b>
<b>Fig.II.8</b> : Le dessin d'un transformateur	<b>32</b>
<b>Fig.II.9</b> : Différents types de maillage(a) maillage fin, (b) maillage normal	<b>34</b>
<b>Fig.II.10</b> : Distribution de la température cas d'une huile neuve pour t=180 s (a) maillage, (b) Echogramme, (c) contour isotherme	<b>37</b>
<b>Fig.II.11</b> : la répartition de la température entre enroulement	<b>37</b>

<b>Fig.II.12</b> : La répartition de la température dans la partie extérieure	<b>38</b>
<b>Fig.II.13</b> : Distribution de la température cas d'une huile neuve pour $t=600$ s (a) maillage, (b) Echogramme, (c) contour isotherme	<b>38</b>
<b>Fig.II.14</b> : la répartition de la température entre enroulement	<b>39</b>
<b>Fig.II.15</b> : La répartition de la température dans la partie extérieure	<b>39</b>
<b>Fig.II.16</b> : Distribution de la température cas d'une huile vieillie pour $t=180$ s (a)Maillage, (b) Echogramme, (c) Contour	<b>40</b>
<b>Fig.II.17</b> :La répartition de la température entre enroulement	<b>41</b>
<b>Fig.II.18</b> : La répartition de la température entre enroulement	<b>41</b>
<b>Fig.II.19</b> : La répartition de la température dans la partie extérieure	<b>42</b>
<b>Fig.II.20</b> : la répartition de la température dans la partie extérieure dans le cas en cahrge sans défauts pour une huile neuve et huile vieillie.	<b>42</b>
<b>Fig.II.21</b> : La répartition de la température entre deux enroulements dans le cas en cahrge sans défauts pour une huile neuve huile vieillie.	<b>44</b>
<b>Fig.II.22</b> : Distribution de la température cas d'une huile neuve pour $t=180$ s (a) maillage, (b) Echogramme, (C) Contour isotherm	<b>44</b>
<b>Fig.II.23</b> : Le gradient de température dans le cœur du transformateur cas à vide à $t=180$ s	<b>45</b>
<b>Fig.II.24</b> : Le gradient de température dans la partie extérieure du transformateur cas à vide à $t=180$ s	<b>46</b>
<b>Fig.II.25</b> : Distribution de la température cas d'une huile neuve pour $t=600$ s (a) maillage, (b) Echogramme, (c) contour isotherme	<b>46</b>
<b>Fig.II.26</b> : Le gradient de température dans le cœur du transformateur cas à vide à $t=600$ s	<b>47</b>
<b>Fig.II.27</b> : Le gradient de température dans la partie extérieure du transformateur cas à vide à $t=600$ s	<b>47</b>
<b>Fig.II.28</b> : Gradient de température pour deux temps d'exécutions.	<b>49</b>
<b>Fig.II.29</b> : Distribution de la température cas de court-circuit et une huile neuve (a) maillage, (b) Echogramme, (C) Contour isotherme.	<b>49</b>
<b>Fig.II.30</b> : Le gradient de température dans le cœur du transformateur, cas de court circuit et huile neuve.	<b>50</b>
<b>Fig.II.31</b> : Le gradient de température dans la partie extérieure du transformateur cas de court circuit et huile neuve.	<b>51</b>
<b>Fig.II.32</b> : Distribution de la température cas de court-circuit et une huile vieillie	<b>51</b>

(a) maillage, (b) Echogramme, (C) Contour isotherme.

<b>Fig.II.33:</b> Le gradient de température dans le cœur du transformateur, cas de court circuit et huile vieillie	<b>51</b>
<b>Fig.II.34:</b> Le gradient de température dans la partie extérieure du transformateur, cas de court circuit et huile neuve.	<b>52</b>
<b>Fig.II.35:</b> La répartition de la température entre deux enroulements dans le cas de défauts (en court-circuit) pour une huile neuve et huile vieillie.	<b>53</b>
<b>Fig.II.36 :</b> Distribution de la température cas de court-circuit et une huile Vieillie en présence d'une cavité d'air de diamètre de 9 $\mu\text{m}$ (a) maillage, (b)Echogramme, (C) Contour isotherme	<b>54</b>
<b>Fig.II.37 :</b> Distribution de la température dans la cavité d'air	<b>54</b>
<b>Fig.II.38 :</b> Courbe de la répartition de la température cas d'huile vieillie, court-circuit en présence d'une cavité de 9 $\mu\text{m}$ de diamètre dans la partie centrale	<b>55</b>
<b>Fig.II.39 :</b> Distribution de la température la cavité d'air	<b>57</b>
<b>Fig.II.40 :</b> Courbe de la répartition de la température cas d'huile vieillie court-circuit en présence d'une cavité de 9 $\mu\text{m}$ de diamètre dans la partie latérale,	<b>56</b>
<b>Fig.II.41 :</b> Distribution de la température cas de court-circuit et une huile vieillie en présence des particules en cuivre (a) maillage, (b) Echogramme, (C) Contour isotherme	<b>57</b>
<b>Fig.II.42 :</b> Distribution de la température au voisinage de la particule.	<b>57</b>
<b>Fig.II.43 :</b> Courbe de la répartition de la température cas d'huile vieillie, court-circuit en présence d'une particule dans la partie centrale	<b>58</b>
<b>Fig.II.44 :</b> Distribution de la température dans cavité (cuivre)	<b>58</b>
<b>Fig.II.45 :</b> Courbe de la répartition de la température cas d'huile vieillie court-circuit en présence d'une cavité de 9 $\mu\text{m}$ de diamètre dans la partie latérale	<b>59</b>
<b>Fig.II.46 :</b> Gradient de température pour les trois modes de fonctionnement du transformateur.	<b>60</b>
<b>Fig.II.47 :</b> Gradient de température pour les cas les plus défavorables.	<b>61</b>
<b>Fig. II.48 :</b> Montrent L 'interface d'ouverture du programme	<b>63</b>
<b>Fig. II.49 :</b> l'interface d'utilisateur	<b>63</b>

<b>Fig.II.50</b> : Espace de travail	<b>65</b>
<b>Fig.II.51</b> : la première boîte	<b>65</b>
<b>Fig.II.52</b> : la deuxième boîte	<b>66</b>
<b>Fig. II.53</b> : Les deux boîtes.	<b>66</b>
<b>Fig. II.54</b> : La première tôle.	<b>67</b>
<b>Fig.II.55</b> : Le circuit magnétique.	<b>68</b>
<b>Fig.II.56</b> : L'angle de rotation de spire.	<b>68</b>
<b>Fig.II.57</b> : La première spire.	<b>69</b>
<b>Fig.II.58</b> : Application de l'outil joindre.	<b>69</b>
<b>Fig.II.59</b> : Représente la distance entre deux spires.	<b>70</b>
<b>Fig. II.60</b> : La première couche.	<b>71</b>
<b>Fig. II.61</b> : La deuxième couche.	<b>71</b>
<b>Fig. II.62</b> : La troisième couche.	<b>72</b>
<b>Fig. II.63</b> : Les couches de 1 à 10.	<b>73</b>
<b>Fig. II.64</b> : La définition de l'outil balayage.	<b>73</b>
<b>Fig. II.65</b> : Le modèle de l'enroulement.	<b>74</b>
<b>Fig.II.66</b> : Construction de la géométrie.	<b>74</b>
<b>Fig. II.67</b> : La dimension d'espace.	<b>75</b>
<b>Fig. II.68</b> : Les modèles des physiques appropriés.	<b>75</b>
<b>Fig. II.69</b> : Le modèle de géométrie	<b>76</b>

## *Listes des tableaux*

<b>Tableau II.1.</b> Représente les données du transformateur 2D	32
<b>Tableau II.2.</b> Représente les caractéristiques d'huile neuve	33
<b>Tableau.II.3.</b> Représente les caractéristiques d'huile vieillie.	33
<b>Tableau II.4.</b> Représente les caractéristiques de l'aire	33
<b>Tableau II.5.</b> Représente les caractéristiques de cuivre.	33
<b>Tableau. II.6.</b> Les données du transformateur	63
<b>Tableau. II.7.</b> Données géométriques du transformateur	64
<b>Tableau. II.8.</b> Dimensionnements des spires de chaque couche.	72
<b>Tableau. II.9.</b> Les caractéristiques de fer.	76

### *Liste des abréviations*

DP : décharge partielle

HV : huile vieillie

HN : huile neuve

DWG: DraWinG

CAO : Conception assistée par ordinateur

DAO : Dessin assisté par ordinateur

SCU : Systèmes de Coordonnées Utilisateur

## *Table des matières*

<b>Introduction générale.....</b>	<b>2</b>
 <b>Chapitre I Généralité sur les transformateurs</b> 	
I.1. Introduction.....	5
I.2. Définition.....	5
I.3. Rôle de transformateur.....	6
I.3.1. Aspect fonctionnel : convertisseur AC/AC.....	6
I.3.2. Contextes d'utilisation.....	7
I.3.2.1. Le réseau électrique.....	7
I.3.2.2. La production d'électricité.....	7
➤ Transformateur élévateur de tension.....	7
I.3.2.3. Le transport d'énergie électrique.....	8
➤ Transformateur d'interconnexion.....	8
I.3.2.4. La distribution électrique.....	8
➤ Transformateurs abaisseurs.....	8
➤ Transformateurs de distribution.....	8
I.4.principe de fonctionnement d'un transformateur.....	8
I.5. Importance du transformateur dans le réseau.....	10
I.6. Les problèmes dues à la mauvaise évacuation de la chaleur.....	11
I.6.1. Processus d'échauffement.....	11
I.6.2. Défaillances, Causes et impact.....	11
I.6.2.1. Le mode de défaillance thermique (surcharges, points chauds et vieillissement)11	
I.6.2.1.1. Le vieillissement.....	12
➤ Des papiers isolants.....	12
➤ De l'huile isolante.....	12

I.6.2.1.2. Un point chaud.....	13
I.6.2.1.3. Les surcharges.....	14
I.6.2.2. Défauts entre spires.....	14
I.6.2.3. Court-circuit.....	14
I.6.2.3.1 Conséquences des courts-circuits.....	15
I.6.2.4. Les décharges partielles.....	15
I.7. Phénomène de refroidissement dans le transformateur.....	17
➤ Huile Naturel Air Naturel (ONAN).....	17
➤ Huile Naturel Air Forcé (ONAF).....	18
➤ Huile Forcé et Air Forcé (OFAF).....	19
➤ Huile Forcé et Eau Forcé (OFWF).....	19
I.8. Transfert de chaleur dans l’huile de transformateur.....	20
I.8.1. Modes du transfert de la chaleur.....	20
➤ La conduction.....	20
➤ La convection.....	20
➤ Rayonnement.....	21
a) Fonction diélectrique.....	21
b) Fonction transfert de chaleur.....	21
I.9. Le coût du transformateur.....	22
➤ Coût annuel des pertes.....	23
➤ Coût global des transformateurs.....	23
I.10. Conclusion.....	24

## **Chapitre II      Calcul de la Capacité du Transfert de Chaleur d’un Transformateur**

II.1. Introduction.....	26
II.2. Présentation du logiciel comsol multi-physiques.....	26
II.2.1 COMSOL Multi-physiques.....	26

II.2.2. Les performances de COMSOL Multi-physiques.....	27
II.2.3. Avantages de conception avec COMSOL Multiphysics.....	27
II.2.4 . L’interface graphique de COMSOL.....	28
II.3. Étapes de réalisation de notre modèle.....	28
a. Choix du modèle.....	30
b. Choix du modèle Physique.....	30
c. Choix de domaine d’étude.....	31
d. Géométrie.....	31
e. Définition des caractéristiques des sous domaines et domaines.....	32
f. Maillage des domaines.....	33
g. Analyse des résultats.....	34
II.4. Calcul de la capacité du transfert de chaleur du transformateur dans différentes conditions.....	34
a) Sans défaut.....	34
b) Avec défauts.....	35
II.4.1. Source de chaleur.....	35
II.4.1.1. Cas sans défauts.....	35
II.4.1.2. Cas avec défauts.....	35
II.5. Résultats et discussions.....	36
II.5.1. Cas sans défaut.....	36
II.5.2. Cas avec défaut.....	48
II.6. Comparaison de variation de la température dans les cas étudiés.....	59
II.7. Simulation d’un modèle 3D du transformateur.....	61
II.7.1. Description de logiciel AutoCAD.....	61
II.7.2. Présentation de logiciel AutoCAD.....	61
II.7.3. Fonctionnalités de logiciel AutoCAD.....	62

II.7.4. Description générale de l'AutoCAD.....	62
II.7.5. L'environnement de travail de l'AutoCAD 2021.....	63
II.8. Méthodologie de dessin de la géométrie du transformateur 3D selon logiciel AutoCAD.....	65
II.8.1 circuit magnétique.....	65
II.8.2 le bobinage.....	67
II.8.2.1 la première couche.....	67
II.8.2.2. la deuxième couche.....	70
II.8.1.3 la troisième couche.....	71
II.9. Création du modèle de simulation.....	74
II.9.1. Choix de modèle.....	74
II.9.2. Géométrie.....	75
II.9.3. Les propriétés des matériaux utilisé.....	76
II.9.4. Les conditions des domaines.....	76
II.9.4. Maillage des domaines.....	76
II.10. Conclusion.....	77
Conclusion générale.....	79
<b>Références</b>	
Références.....	82

# **Introduction générale**

## **Introduction générale**

L'état de fonctionnement des transformateurs au début et à la fin de chaque ligne de transmission est crucial pour la disponibilité de l'énergie électrique. En effet, le transformateur est un élément clé du génie électrique, et son étude constitue l'un des fondements de ce domaine. De ce fait, le transformateur est un maillon essentiel de la croissance de l'énergie électrique. Un réseau électrique moderne ou un équipement de conversion de puissance ne peut être imaginé sans transformateur.

Dans la plupart des cas, des liquides isolants sont utilisés pour remplir les transformateurs de puissance. L'huile sert d'isolant liquide assurant à la fois l'isolation électrique et le transfert de chaleur. Dans un transformateur électrique, ce dernier est le seul matériau accessible en raison de ses fonctions de refroidissement et d'isolation, Son étude renseigne sur l'état des transformateurs car elle comporte 70% d'informations sur ceux-ci.

Les transformateurs en service peuvent subir divers défauts qui affectent leur performance et diminuent leur capacité d'isolation. Les courts-circuits, les cavités ou les perturbations des flux de refroidissement font partie de ces problèmes et peuvent changer significativement la répartition thermique à l'intérieur du transformateur. Ces anomalies peuvent élever les températures locales, ce qui nuit à la fonction du transfert thermique de l'huile isolante. L'objectif du système de refroidissement est de maintenir des températures à des niveaux acceptables. Pour l'isolation et les enroulements. Les facteurs suivants sont pris en considération lors du choix du mode de refroidissement : la quantité de pertes à évacuer, la température extérieure, le niveau de bruit, la taille du transformateur et le coût.

Dans ce contexte, notre étude a pour objectif l'évaluation de la capacité de transfert thermique de l'huile isolante. Une étude de simulation de la fonction du transfert de chaleur à sera entamé pour mettre en évidence l'impact des différentes conditions de fonctionnement ainsi que les éventuels défauts sur le processus de refroidissement d'un transformateur.

Après une introduction, le présent manuscrit s'articule essentiellement sur deux chapitres et une conclusion.

Le premier chapitre est consacré aux généralités sur les transformateurs ; leur rôle, leur importance dans le réseau, le principe de fonctionnement, et surtout les problèmes dues à la mauvaise évacuation de la chaleur.

Dans le deuxième chapitre, nous allons présenter notre étude réalisée sur un transformateur en utilisant le logiciel COMSOL Multiphysics. Le but est de calculer la répartition de chaleur dans le volume du transformateur pour différents cas de fonctionnement et différentes conditions. Les résultats de calcul seront présentés également. Dans une autre démarche nous allons entamer une étude en trois dimensions réalisé en utilisant le logiciel AUTOCAD, pour l'utiliser avec le logiciel Comsol.

Enfin, en conclusion, nous soulignons les résultats essentiels de cette étude et les perspectives qui en découlent.

# **Chapitre I**

## **Généralité sur les transformateurs**

## **I.1. Introduction**

Le transformateur de puissance est un élément crucial de l'investissement dans les réseaux mondiaux de transport et de distribution d'énergie électrique. Les défaillances des transformateurs de puissance sont également bien connues pour avoir un impact économique important sur la capacité de fonctionnement d'un réseau électrique.

Afin d'atteindre les objectifs d'augmentation du retour sur investissement et de baisse des coûts globales liées à l'exploitation du réseau énergétique, celui-ci doit fonctionner dans de très bonnes conditions. Les transformateurs à huile sont supérieurs à ceux à air pour les puissances élevées puisque l'huile assure la fonction d'isolation et de refroidissement [1].

## **I.2. Définition**

Selon CEI « le transformateur de puissance est appareil statique à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, transforme un système de tension et courant alternatif en un autre système de tension et de courant, généralement de valeurs différentes et de même fréquence, dont le but est le transport d'électricité » [2].

L'appareil a deux enroulements, l'un est appelé primaire et l'autre est appelé secondaire.

- Le primaire : c'est l'enroulement qui reçoit la puissance active de la source.
- Le secondaire : c'est celui qui restitue la puissance active du primaire.

Ils sont montés sur un circuit magnétique feuilleté. Si la tension d'alimentation appliquée au primaire est supérieure à celle fournie par le secondaire, le transformateur fonctionne en abaisseur, sinon il fonctionne en élévateur [3].



**Fig. I.1.** Un transformateur de puissance [4].

### **I.3. Rôle de transformateur**

#### ***I.3.1. Aspect fonctionnel : convertisseur AC/AC***

Quelques définitions :

« Transformateur de puissance : dispositif statique à deux enroulements ou plus qui, par induction électromagnétique, convertit un système de tension et de courant alternatifs en un autre système de tension et de courant dont la valeur est généralement différente tout en fonctionnant à la même fréquence, pour transmettre la puissance ».

« Les transformateurs sont réversibles et permettent, soit l'élévation, soit l'abaissement de la tension ; d'où la possibilité de choisir la meilleure tension pour la production, le transport, la distribution, l'utilisation de l'énergie électrique, et de passer facilement de l'une à l'autre ».

Par conséquent, un transformateur électrique permet la transmission d'énergie électrique en courant alternatif (AC) à différents niveaux de tension avec le moins de pertes de l'installation de production d'électricité au consommateur final. Le transformateur est un composant du réseau qui permet le passage d'une tension alternative à une autre. C'est un convertisseur AC/AC qui fonctionne à la fréquence fixe du réseau.

### 1.3.2. Contextes d'utilisation

#### 1.3.2.1. Le réseau électrique

Grâce à un réseau électrique (Fig. I.2) composé de plusieurs transformateurs, fils et disjoncteurs, L'énergie électrique est transmise des sources aux utilisateurs, industriels ou domestiques à des niveaux de tensions différents.

Le réseau est classiquement divisé en trois parties principales : la production, le transport et la distribution d'électricité.

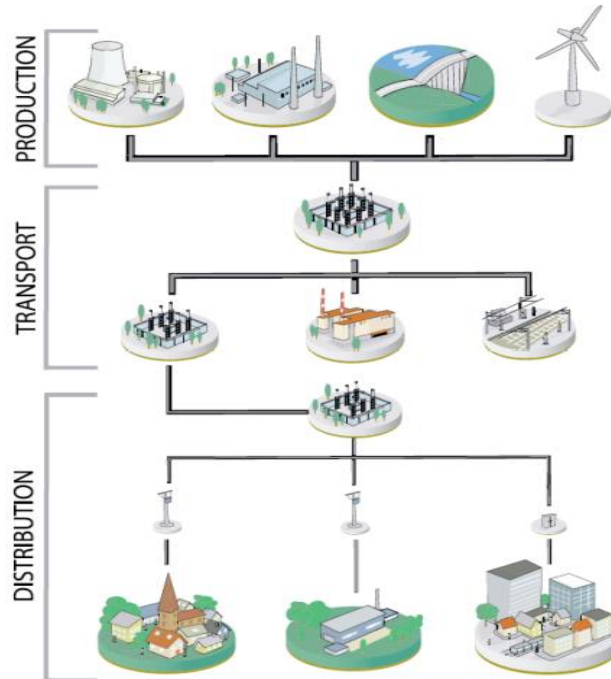


Fig. I.2. Réseau électrique type [5].

#### 1.3.2.2. La production d'électricité

Grâce à un transformateur élévateur, l'énergie électrique produite dans les centrales électriques (comme les centrales nucléaires, hydrauliques et thermiques) est rendue accessible sur le réseau de transport et, plus récemment, sur le réseau de distribution pour la production décentralisée (comme l'éolienne, photovoltaïque).

- **Transformateur élévateur de tension** : En règle générale, les générateurs fournissent de l'électricité à un niveau de tension de quelques kV. Pour minimiser les pertes sur les lignes, la tension doit être la plus élevée possible, afin de réduire les courants qui transitent, généralement à 400 kV ou 220 kV en France.

### *1.3.2.3. Le transport d'énergie électrique*

La répartition de l'électricité depuis les principales installations de production jusqu'aux réseaux de distribution qui sont reliés aux clients est assurée par le réseau de transport d'énergie électrique.

En France, il existe un réseau maillé qui est géré par le Réseau de Transport d'Electricité (RTE) et comprend des niveaux de tension allant jusqu'à 220 kV et 400 kV notamment. Certaines très grands pays, comme la Chine, le Brésil ou le Canada, ont des réseaux pouvant atteindre 800 kV AC. Les développements actuellement en cours en Chine et en Inde atteignent 1200 kV AC.

Les transformateurs d'interconnexion constituent la majorité du réseau de transport.

- **Transformateur d'interconnexion** : ces transformateurs adaptent les différents niveaux de tensions du transport en France, les autotransformateurs sont souvent utilisés entre les réseaux 400 kV et 220 kV, tandis que les transformateurs sont utilisés pour les raccordements à basse tension.

### *1.3.2.4. La distribution électrique*

Le réseau de distribution électrique sert souvent de lien entre le réseau de transport et le consommateur final. Les tensions sur ce réseau local sont inférieures à celles du réseau de transport, et plusieurs transformateurs abaisseurs sont utilisés pour ajuster la tension aux différents usagers. Electricité Réseau Distribution France (ERDF) en assure la gestion en France.

- **Transformateurs abaisseurs** : Ces appareils ajustent la tension du réseau de transport électrique 220 kV aux tensions 90 kV, 63 kV et 20 kV des différents réseaux de distribution, majoritairement utilisés en France. Dans les postes de transformation se trouvent ces transformateurs.
- **Transformateurs de distribution** : ces transformateurs de faible puissance (quelques centaines de kVA) sont en général utilisés pour abaisser la tension 20 kV du réseau de distribution et l'adapter à un utilisateur final à des fins domestiques ou industrielles, le plus souvent en 400 V triphasé. A la différence des transformateurs précédents, plutôt imposants, ces transformateurs sont construits en série, et ont tendance à être remplacés lorsqu'ils sont défectueux [5].

## **I.4. Principe de fonctionnement d'un transformateur**

Un transformateur se compose de deux (ou plus) enroulements couplés sur un noyau magnétique.

Notez qu'il n'y a pas de connexion électrique entre le primaire et le secondaire. Tout couplage entre les deux bobinages est magnétique. Lorsqu'une tension alternative est appliquée à la source, ou qu'un flux magnétique alternatif est généré dans un noyau magnétique. Selon la loi de Faraday, ce flux crée

Des forces électromotrices dans les bobines. La force électromotrice induite est proportionnelle au nombre de spires de la bobine et au taux de variation du flux. Selon le rapport du nombre de spires entre le primaire et le secondaire, le secondaire alimente la charge avec une tension différente de celle de la source. Un transformateur idéal ou parfait est un transformateur virtuel sans pertes. Il est utilisé Pour modéliser un vrai transformateur. Ceux-ci sont considérés comme une association d'un transformateur parfait et de diverses impédances. En négligeant toutes les pertes et les fuites de flux, le rapport du nombre des spires primaires sur le nombre de spires secondaires détermine le rapport de transformation du transformateur. En supposant qu'il y ait un flux dans le noyau, reliant les deux enroulements, est une fonction sinusoïdale du temps  $\phi_{max} \sin \omega t$ .

Ensuite, La loi de Faraday-Lenz stipule que la tension provoquée par le flux dans l'enroulement primaire à un instant donné est la suivante :

$$E_1 = -N_1(d\phi / dt) \quad (I.1)$$

$$E_1 = -N_1\omega \phi_{max} \cos \omega t \quad (I.2)$$

Où :  $\omega = 2\pi f$

Par conséquent :

$$E_1 = -2\pi f N_1 \phi_{max} \cos \omega t \quad (I.3)$$

Et la valeur efficace de cette tension est :

$$E_{1eff} = (2\pi f / \sqrt{2}) * N_1 \phi_{max} \quad (I.4)$$

$$E_{1eff} = 4,44.f.N_1.A. B_{max} \quad (I.5)$$

f : fréquence.

A : Aire de la section de circuit magnétique.

B<sub>max</sub> : densité de flux maximal dans le noyau

$$E_{2eff} = 4,44f N_2 A B_{max} \quad (I.6)$$

Par fonction  $E_{pri}/E_{sec}$  :

$$V_1 / V_2 = N_1 / N_2 = m \quad (I.7)$$

$$\text{Aussi : } I_2 / I_1 = N_1 / N_2 = m \quad (I.8)$$

m : est appelé rapport de transformation [6].

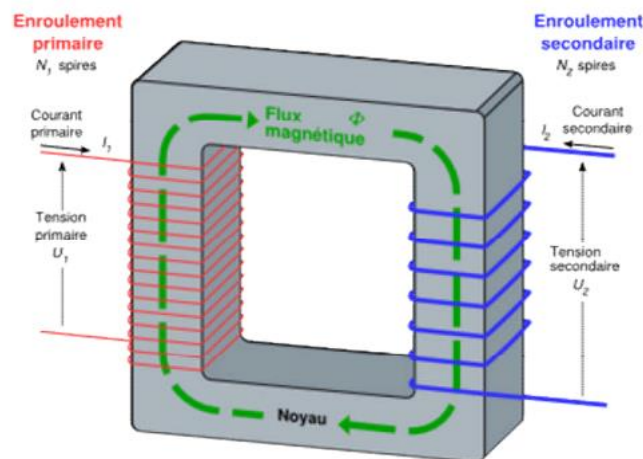


Fig. I.3. Représentation du flux dans le circuit magnétique [7].

### I.5. Importance du transformateur dans le réseau

Aujourd'hui, il y a environ 35 millions de convertisseurs en activité aux États-Unis. Ils occupent une place particulière dans notre société moderne grâce à leurs efforts inlassables pour augmenter la tension utilisée dans chaque entreprise domestique et industrielle leur ont donné un rôle unique dans notre monde moderne. Les transformateurs au sens propre sont devenus le cœur des sous-stations. La société moderne d'aujourd'hui ne connaîtrait pas l'ère de la révolution électrique sans cet appareil relativement silencieux qui pourrait effectuer des tours intemporels [8].

Les postes électriques distribuent l'électricité et la commutent d'une tension à une autre à l'aide de transformateurs [9].

Les transformateurs sont des éléments fondamentaux pour l'interconnexion de différents réseaux énergétiques [10].

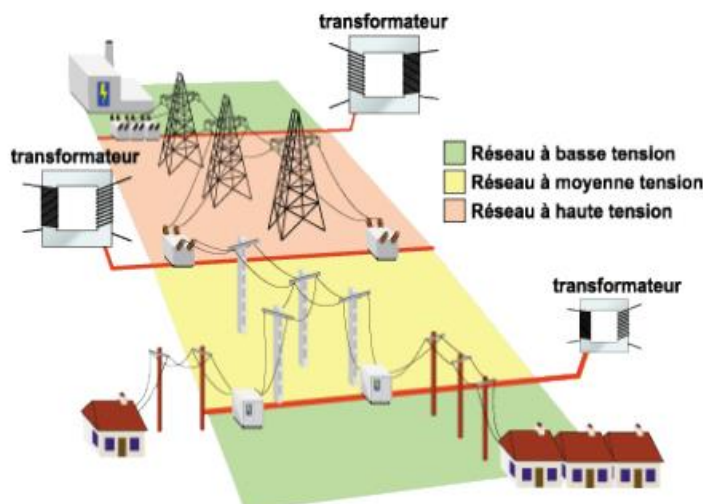


Fig. I.4. Schéma du réseau de transport [6].

## I.6. Les problèmes dues à la mauvaise évacuation de la chaleur

Comme tout autre système technique, les transformateurs de puissance subissent une perte de puissance pendant le fonctionnement sous forme de chaleur. Pour éviter la surchauffe, ces pertes de puissance doivent être correctement limitées. La durée de vie du transformateur est fortement impactée par la température de fonctionnement [11].

### I.6.1. Processus d'échauffement

Un transformateur subit des pertes lors de la conversion de l'énergie. La quasi-totalité des pertes sont dégagées par effet Joule dans les parties actives du transformateur, c'est à dire dans son circuit magnétique et dans ces enroulements, une partie de la puissance dissipée est également liée aux éléments mécaniques du transformateur.

Cette partie constitutive est chauffée du fait que les pertes dégagées dans le transformateur pendant le fonctionnement sont converties en énergie thermique [12].

### I.6.2. Défaillances, Causes et impact

Différentes pièces et composants d'un transformateur peuvent tomber en panne en raison de contraintes mécaniques, électriques ou thermiques causées par différentes conditions. Certaines des pannes de transformateur les plus courantes et leurs causes sont répertoriées ci-dessous : [13]

#### I.6.2.1. Le mode de défaillance thermique (surcharges, points chauds et vieillissement)

Ce mode de défaillance est causé par une augmentation anormale de la température des composants du transformateur. Ces perturbations thermiques résultent : d'un manque de refroidissement, ou d'un effet Joule accru.

La première cause d'échauffements excessifs est la mauvaise dissipation de la chaleur par manque d'échange thermique entre le transformateur et le fluide caloporteur due à une température ambiante élevée, un encrassement des ailettes de réfrigération, un débit de réfrigérant insuffisant...

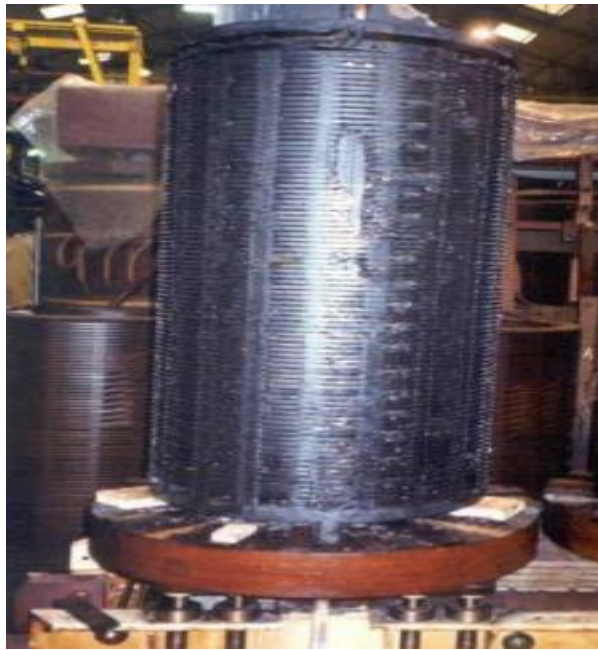
La deuxième est d'origine électrique, et est liée à la résistance des conducteurs. La circulation d'un courant est source d'un dégagement de chaleur (l'effet Joule), tel que [14] :

$$dw = (R \cdot i^2) dt \quad (I.9)$$

Dans tous les cas ces contraintes thermiques provoquent :

#### I.6.2.1.1. Le vieillissement

- **Des papiers isolants :** et la dégradation de leurs propriétés diélectriques par voie de conséquence. Ceux-ci sont d'autant plus critiques qu'ils ne sont pas, sauf reconstruction, remplaçables au long de la vie d'un transformateur. Par exemple dans le cas extrême de (**Fig. I.5**) La totalité de la bobine devient noire de l'intérieur en raison d'un fonctionnement à une température excessive [15].



**Fig. I.5.** Echauffement excessif d'un enroulement [15].

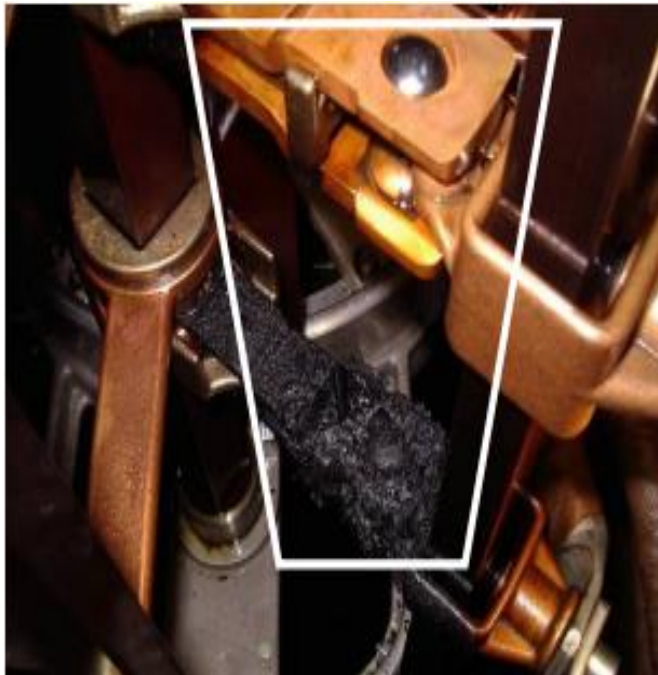
- **De l'huile isolante [15] :** En raison d'une série de processus de réaction qui déterminent sa durée de vie, les propriétés physico-chimiques de l'huile isolante utilisée subiront des modifications irréversibles. Ces processus font vieillir ces huiles. L'action simultanée de l'oxygène et d'un champ électrique en présence de métaux (catalyseurs métalliques) conduit au vieillissement. L'oxydation est le facteur le plus dommageable. L'oxygène présent dans l'huile provient non seulement de l'extérieur du réservoir, mais également de la dégradation thermique du papier cellulose. Il réagit avec des hydrocarbures pour former des oxydes qui constituent un des facteurs de vieillissement de l'huile. En présence d'oxygène, il se produit une oxydation qui comporte un certain nombre d'étapes (initiation, propagation, ramification et terminaison). Les produits finaux résultant de l'oxydation sont des alcools, des aldéhydes, des cétones, des esters, des acides, de l'eau, des oxydes de carbone et des hydrocarbures légers. Des peroxydes sont également produits, qui sont des produits Intermédiaires du processus d'oxydation. L'action de tous ces produits d'oxydation entraîne la formation de boue. Sous l'influence du champ électromagnétique cette boue est attirée dans les

enroulements et contribue à obstruer les conduits (canaux) horizontaux et verticaux de circulation de l'huile. Le coefficient de transmission thermique entre les bobinages et l'huile est affecté par ce phénomène. De ce fait, le système de refroidissement devient moins efficace, et l'élévation de température qui s'ensuit accélère l'oxydation et la dégradation du papier isolant [1].

#### ***1.6.2.1.2. Un point chaud***

Est caractérisé par l'échauffement local interne d'une connexion précise du transformateur. Après une coloration sombre, les points chauds forment généralement des morceaux solides de carbone qui conduisent l'électricité.

Habituellement, un point chaud peut provenir d'un mauvais contact dans le circuit électrique qui s'échauffe alors anormalement, comme sur des connexions au niveau des brasures, ou sur des contacts mobiles du régleur en charge (**Fig. I.6**), ou du régleur hors tension. Elles peuvent également être causées par des courants de Foucault anormalement induits circulant dans des composants non prévus pour cela, qui chauffent alors anormalement, par exemple : des tôles du circuit magnétique ou des isolants défectueux de la partie active, hors bobinages [15].



**Fig. I.6.** Point chaud sur le sélecteur d'un régleur en charge [15].

### ***1.6.2.1.3. Les surcharges***

La surcharge est principalement due à l'augmentation de la demande énergétique, mais parfois aussi à un mauvais dimensionnement des équipements composant l'installation électrique.

Les surcharges se caractérisent par des courants supérieurs aux courants maximums admissibles. Si ces courants durent trop longtemps, ils peuvent d'une part endommager l'isolation et d'autre part provoquer la rupture des conducteurs par suite de la dégradation de leur résistance mécanique [16].

### ***1.6.2.2. Défauts entre spires***

Le mode de défaillance le plus fréquent et le plus difficile à identifier est celui des défaillances entre spires dans l'enroulement haute tension. Ils sont causés par la dégradation locale de l'isolation du conducteur sous l'effet de la chaleur ou de contraintes diélectriques. Du fait des variations du rapport de transformation et de l'apparition d'un phénomène de spire en court-circuit sur l'enroulement impacté, la manifestation immédiate se réduit à une légère augmentation du courant primaire. L'évolution du défaut sera plus ou moins rapide en fonction du courant traversant la spire, qui fonctionne comme un enroulement secondaire et est le siège d'un courant limité seulement par son impédance propre et par la résistance au point de défaut. Lorsqu'il y a un courant important, une surchauffe locale entraînera la dégradation des spires proches et le défaut se propagera rapidement [17].

### ***1.6.2.3. Court-circuit***

Un court-circuit se produit lorsqu'un conducteur à faible résistance connecte intentionnellement ou accidentellement de deux emplacements de circuit électrique (ou plus) où il existe une différence de potentiel. Il provoque une augmentation de la température des conducteurs et se traduit par un courant de court-circuit [18].



**Fig. I.7.** Court-circuit entre spires [15].

### 1.6.2.3.1 Conséquences des courts-circuits

- L'accumulation de chaleur excessive qui peut devenir dommageable si la résistance thermique devait être dépassée. Dans le cas d'une situation de charge normale, au cours duquel le processus est lent et l'échange de température avec l'air ambiant n'a pas le temps de se réaliser. Cet effet d'accumulation n'est pas remarqué.
- Les courants de défauts détériorent les caractéristiques des isolants du fait de l'échauffement. Les isolants perdent irréversiblement ses propriétés, ce qui entraîne des points faibles, où se produisent les futures défaillances.
- Incendie au niveau de l'arc du court-circuit.
- Surchauffe des circuits magnétiques.
- Une augmentation de la température le long du trajet du courant de court-circuit.
- Des efforts électrodynamiques importants qui peuvent être à l'origine de la dislocation ou la déformation des enroulements des transformateurs.
- Les courants de défaut réduisent les capacités mécaniques du conducteur (rupture des conducteurs) [16].

### 1.6.2.4. Les décharges partielles

Dans le cadre de la spécification, voici la définition recommandée par la CEI :

Une décharge électrique qui ne court-circuite que partiellement un isolant disposé entre deux électrodes et entre lesquelles s'introduit une différence de potentiel est appelée décharge partielle. La décharge partielle peut se produire à l'intérieur de l'isolant ou à côté d'un conducteur [19].

Trois types de décharge partielles peuvent apparaître dans une isolation de transformateur, à savoir :

- Les décharges dans les intervalles d'huile.
- Les décharges dans les isolants solides.
- Les décharges à l'interface huile-isolant solide.

Le phénomène de décharges partielles est susceptible de se produire dans toute isolation comportant des cavités gazeuses, dès que la tension aux bornes atteint une valeur critique. L'apparition de ces cavités peut avoir lieu dans les cas suivants :

- Lors du remplissage du transformateur par le fluide diélectrique : ce sont essentiellement des poches d'air.
- En utilisation du fait de l'échauffement local : ce sont des vapeurs du liquide diélectrique.

- Dans des champs élevés dans des endroits où les champs sont renforcés, par exemple lors de surtensions.

De plus, ces mécanismes générateurs de cavités dans les transformateurs à circulation de fluide sont renforcés par l'émergence de zones de turbulence.

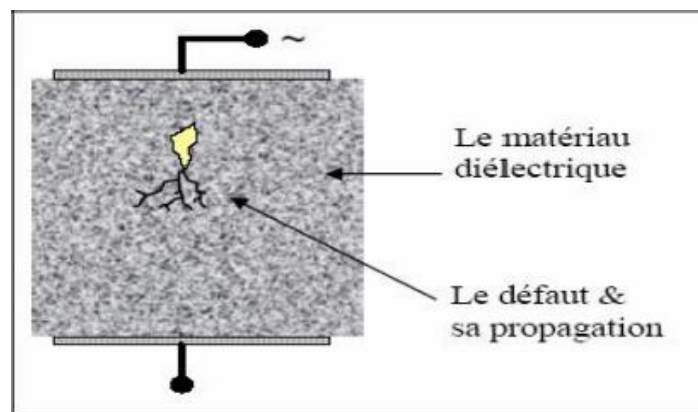
Nous listons les éléments suivants comme facteurs contributifs à l'apparition de décharges partielles suite à la formation de cavités gazeuses :

- La faible valeur de la permittivité relative du gaz par rapport aux isolants solides ou liquides renforce le champ électrique à l'interface cavité-diélectrique.
- La faible valeur de la rigidité diélectrique des gaz vis à vis des isolants solides [20].

L'extension de la décharge est limitée soit parce que le champ électrique local n'est pas suffisant pour provoquer sa propagation totale (décharge couronne dans un gaz ou un liquide, par exemple), soit parce que la propagation est bloquée par un isolant dont le champ de claquage est plus élevé (en général un solide) (**Fig. I.8**).

Si une DP ne conduit pas immédiatement à la mise hors service d'un appareil, elle est toutefois préjudiciable dans la mesure où elle conduit à une dégradation des matériaux (en particulier solides) sous l'action de diverses contraintes :

- Contrainte thermique générée localement par la décharge (par exemple carbonisation du carton d'un transformateur).
- Contrainte chimique due aux produits de dégradation générés par la décharge (par exemple ozone ou acide nitrique).



**Fig. I.8.** Décharge partielle dans un diélectrique [21].

La détection et la surveillance des décharges partielles (DP) sont d'une importance capitale car les phénomènes de décharges partielles précèdent souvent un claquage d'isolant dans un équipement de puissance, pouvant entraîner des pannes et des réparations extrêmement coûteuses [22].

## I.7. Phénomène de refroidissement dans le transformateur

Pendant le fonctionnement, les transformateurs génèrent des pertes, dont la plupart sont localisées dans deux composants principaux :

- Le circuit magnétique. Ces pertes dépendent de l'induction c'est-à-dire de la tension appliquée.
- Bobinage. Perte de cuivre en fonction du courant de charge.

Enfin, les flux de fuite peuvent induire des courants de Foucault dans les composants non actives adjacents (pièces de serrage, cuve, couvercle), entraînant des pertes parasites.

Toutes ces pertes entraînent une surchauffe du transformateur, cela nécessite l'utilisation d'équipements de réfrigération adéquats [23].

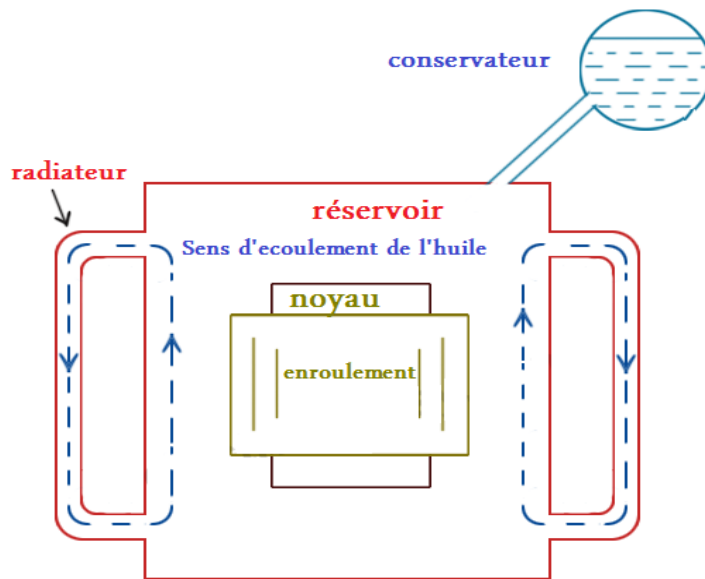
Les quatre lettres qui composent le mode de refroidissement représentent l'environnement intérieur et extérieur ainsi que le mécanisme de circulation.

En ayant une circulation d'huile suffisante et un échange de chaleur entre l'huile et l'air ambiant à travers les radiateurs, les transformateurs sont maintenus au frais. Il existe quatre principaux types de refroidissement, selon que l'échange de chaleur se produit naturellement par convection ou est forcé par des méthodes mécaniques [24].

- **Huile Naturel Air Naturel (ONAN)**

Pour les transformateurs immergés dans l'huile, cette technique est utilisée. Dans cette technique, la chaleur produite dans l'enroulement et le noyau est transmise à l'huile. Selon le principe de la convection, l'huile chauffée circule dans le sens ascendant puis dans le radiateur. L'huile de radiateur qui a été refroidie remplit l'espace vide.

En raison du vent naturel entourant le transformateur, la chaleur de l'huile s'évapore dans l'atmosphère. La convection naturelle et la conduction naturelle fonctionnent ensemble pour maintenir la circulation de l'huile du transformateur et dissiper la chaleur dans l'atmosphère. Cette technique est applicable aux transformateurs jusqu'à environ 30 MVA.

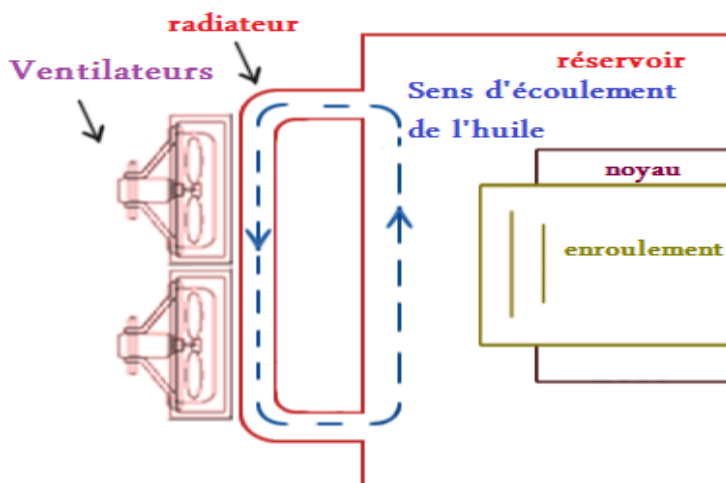


**Fig. I.9.** Huile Naturel Air Naturel (ONAN) - Refroidissement du transformateur [25].

➤ **Huile Naturel Air Forcé (ONAF)**

L'application d'air forcé sur la surface de dissipation thermique peut encore améliorer la dissipation thermique. Par rapport au flux d'air naturel, l'air forcé permet une dissipation thermique plus rapide.

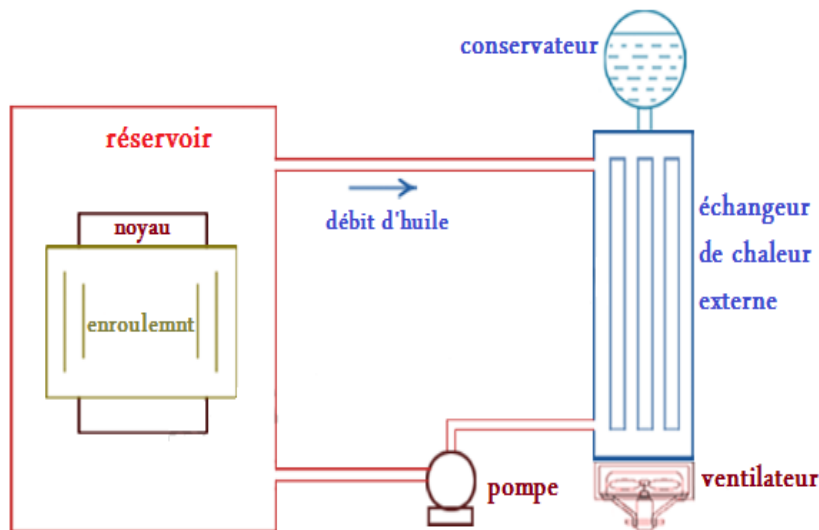
Dans cette méthode, Les ventilateurs de cette manière sont situés à proximité du radiateur et peuvent être équipés d'un dispositif de démarrage automatique, qui s'active lorsque la température dépasse un niveau spécifié. Les gros transformateurs utilisent généralement cette technique pour refroidir les transformateurs.



**Fig. I.10.** Huile Naturel Air Forcé (ONAF) - Refroidissement du transformateur [25].

➤ **Huile Forcé et Air Forcé (OFAF)**

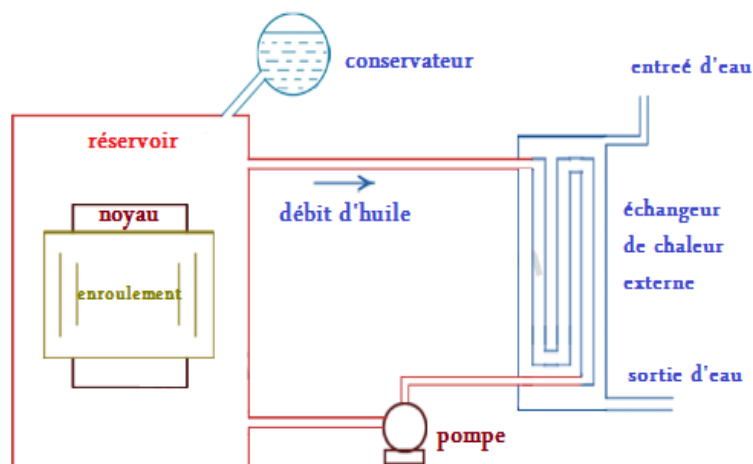
Dans cette méthode, l'huile est mise en circulation à l'aide d'une pompe. La circulation d'huile est forcée à travers les échangeurs de chaleur. Après cela, des ventilateurs sont utilisés pour pousser l'air comprimé à travers l'échangeur de chaleur. L'image illustre comment les tuyaux en haut et en bas peuvent relier des échangeurs de chaleur montés séparément du réservoir du transformateur. Les transformateurs de puissance supérieure dans les sous-stations ou les centrales électriques sont conçus pour utiliser cette méthode de refroidissement.



**Fig. I.11.** Huile Forcé Air Forcé (OFAF) - Refroidissement du transformateur [25].

➤ **Huile Forcé et Eau Forcé (OFWF)**

Cette méthode est comparable à la méthode OFAF, mais ici le bruit des échangeurs de chaleur est dissipé à l'aide d'un débit d'eau forcé. Une pompe est utilisée pour forcer l'huile à conduire à travers l'échangeur de chaleur, où la chaleur est dissipée à l'eau qui est également forcée de s'écouler. L'eau qui a été chauffée est libérée pour se refroidir dans des refroidisseurs séparés. D'une puissance de plusieurs centaines de MVA, les très gros transformateurs utilisent ce type de refroidissement.

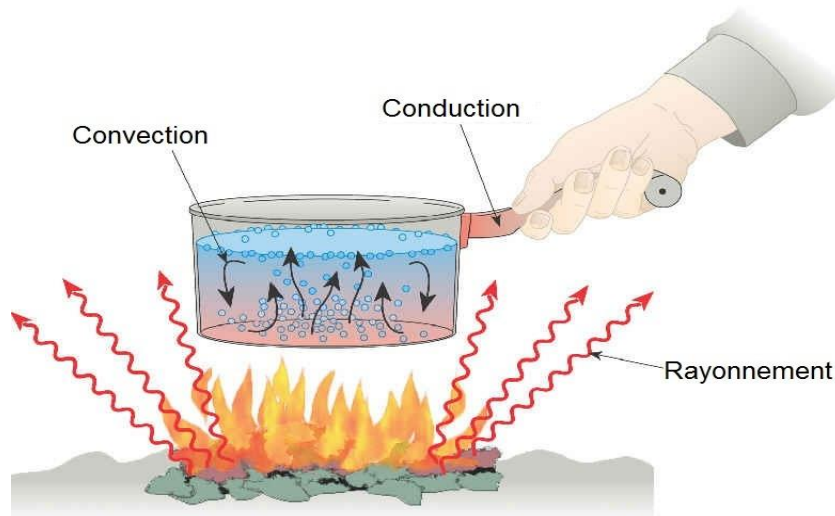


**Fig. I.12.** Huile forcé Eau forcé (OFWF) - Refroidissement du transformateur [25].

## I.8. Transfert de chaleur dans l'huile de transformateur

Le transfert de chaleur est une science qui contient de nombreux concepts pratiques de base utilisés dans de nombreuses applications industrielles. Le transfert de chaleur se fait par trois mécanismes différents : la conduction, la convection et le rayonnement. Par conséquent, une connaissance de base de ce domaine est essentielle pour la compréhension et l'application pratique de ces phénomènes [26].

### I.8.1. Modes du transfert de la chaleur



**Fig. I.13.** Conduction, convection, rayonnement [27].

#### ➤ La conduction

La conduction thermique correspond à l'échange d'énergie entre matériaux en contact sans déplacement macroscopique. C'est le mouvement de la chaleur dans les zones plus chaudes qui se Propage vers les zones plus froides. Cette anxiété varie quelque peu selon l'état de la matière. Pour les solides : vibration des particules Pour les liquides ou les gaz : collisions entre molécules Dans tous les cas, le mouvement provoque le transfert d'énergie cinétique entre particules ou molécules, qui à son tour provoque le transfert d'énergie thermique [28].

#### ➤ La convection

La convection implique essentiellement le transfert d'énergie d'une zone à une autre par le mouvement de paquets (de nombreuses molécules), généralement un déplacement fluide ou macroscopique. Ce mécanisme implique toujours un transfert d'énergie par le mouvement moléculaire, qui est l'aspect dominant de ce modèle. Il existe deux types de convection. En

convection naturelle (convection libre), le mouvement des particules est dû à la différence de température imposée au liquide. Les différences de température impliquent des différences de densité (déplacement des particules, dilatation). En convection forcée, le mouvement des particules est induit par une pression exercée sur le liquide par des moyens mécaniques, et le transfert de chaleur se produit entre deux phases par convection en présence d'un gradient de température. Le mouvement du fluide peut être causé par des différences de densité ( $\rho$ ) causées par des différences de température [26].

### ➤ **Rayonnement**

Le rayonnement est le transfert d'énergie électromagnétique d'un milieu chaud à un autre milieu froid sans support physique. En général, un objet opaque ou partiellement opaque chauffé au-dessus de zéro Kelvin rayonne de l'énergie dans toutes les directions. Cette énergie est transportée sous forme d'ondes électromagnétiques et ne nécessite aucun support physique pour sa propagation. Ce mode de transport de chaleur ressemble à la propagation de la lumière et, contrairement aux courants électriques, ne nécessite pas de support physique. Les gaz, les liquides et les solides peuvent émettre ou absorber un rayonnement thermique [26].

Les huiles isolantes assurent plusieurs fonctions :

#### **a) Fonction diélectrique**

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

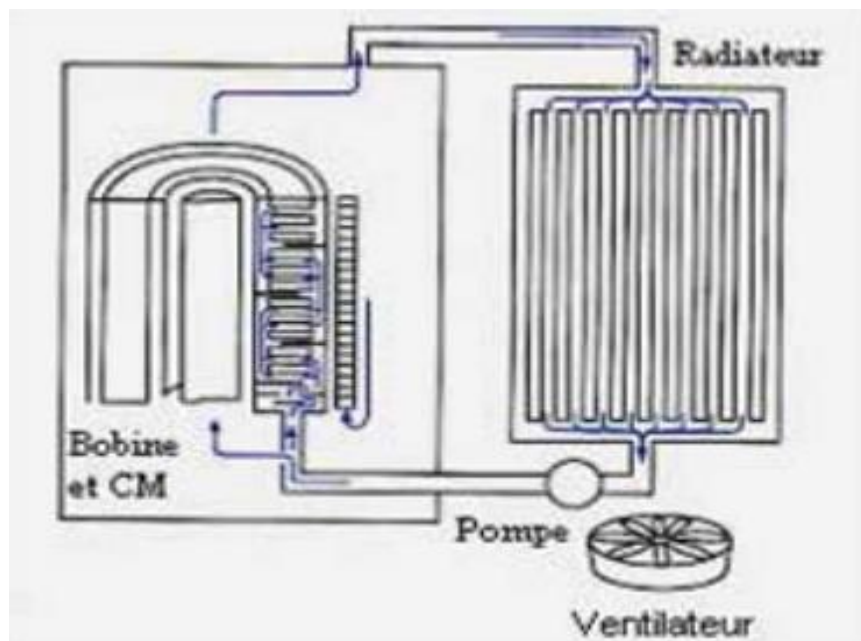
- Par le diélectrique liquide seul, lorsqu'il s'agit d'une isolation entre deux pièces métalliques nues (plots de commutateur par exemple).
- Par une couche solide (papier ou carton) imprégnée de diélectrique liquide, c'est le cas par exemple de l'isolation entre deux conducteurs voisins d'un même enroulement.
- Par une isolation mixte : combinaison de films de diélectrique liquide et de barrières d'isolants solides, c'est le cas d'une isolation entre deux enroulements concentriques de tensions différentes.

Les principales propriétés qui permettent de juger l'aptitude d'une huile à remplir sa fonction de diélectrique sont la rigidité diélectrique, le facteur de dissipation ou facteur de pertes diélectriques ( $\tan \delta$ ), la permittivité relative ( $\epsilon_r$ ) et la résistivité ( $\rho$ ). Ces caractéristiques qui dépendent de la température et de la fréquence pour une tension donnée, sont essentielles pour le dimensionnement du transformateur.

#### **b) Fonction transfert de chaleur**

Bien que Son rendement soit exceptionnellement élevé (99 à 99.9 %), un transformateur ne peut échapper à la perte d'énergie qui accompagne toute conversion. L'énergie perdue se dissipe sous forme de chaleur nécessitant ainsi le refroidissement de l'appareil. En raison des pertes, les températures de chacun des éléments s'élèvent jusqu'à établissement d'un équilibre entre les vitesses de production et d'évacuation de la chaleur.

La chaleur à évacuer et véhiculée par circulation naturelle ou forcée de l'huile, vers le radiateur extérieur. Un dispositif de refroidissement. Bien dimensionné permet d'éviter la formation des points chauds grâce à une circulation importante et bien régulée. Le Refroidissement se fait par convection et par conduction thermique. Et les principales caractéristiques qui permettent de juger de l'aptitude d'une huile à évacuer la chaleur, sont la viscosité, la conductivité thermique et la chaleur spécifique [29].



**Fig. I.15.** Evacuation de la chaleur dans un transformateur [30].

## I.9. Le coût du transformateur

Les pertes du transformateur représentent une source d'énergie qui ne peut être livrée aux clients et qui ont donc un coût économique pour l'utilisateur / le propriétaire du transformateur. Une réduction des pertes du transformateur entraîne généralement une augmentation de son coût.

Selon l'application, il peut y avoir un avantage économique pour un transformateur avec des pertes réduites et un prix élevé (coût initial), et inversement. Ce processus est généralement traité à l'aide d'évaluations des pertes, qui attribuent une valeur monétaire aux pertes du transformateur afin de calculer un coût total de possession constitué d'une combinaison du prix et des pertes.

En règle générale, chaque paramètre de perte, perte à vide, perte de charge et perte auxiliaire du transformateur se voit attribuer une valeur en dollars par kilowatt (\$ / kW) [31].

➤ **Coût annuel des pertes :**

Coût annuel des pertes Les pertes annuelles d'un transformateur peuvent être évaluées selon la formule suivante :

$$W_{\text{Pertes}} = (P_0 + P_k \times K^2) * 8760 \quad (\text{I.10})$$

- $W_{\text{Pertes}}$  : montant des pertes annuelles en kWh
- $P_0$  : pertes à vide en kW, paramètre spécifié dans les caractéristiques du transformateur
- $P_k$  : pertes en charge en kW, paramètre spécifié dans les caractéristiques du transformateur
- $K$  : facteur de charge pondérée sur l'année
- 8760 : nombre d'heures de fonctionnement dans l'année (24/24 h, 365 j /an)

Pour évaluer le coût des pertes durant la vie du transformateur, il doit être actualisé en tenant compte de l'évolution du coût de l'argent dans le temps. Ce calcul est appelé le « Coût Total Actualisé des pertes ». Il est défini par la formule suivante :

$$\text{CTA Pertes} = C * W_{\text{Pertes}} * \frac{(1+i)^n}{i * (1+i)^n} \quad (\text{I.11})$$

- $C$  : évaluation du coût moyen par kWh par an
- $W_{\text{Pertes}}$  : pertes annuelles
- $i$  : taux d'actualisation
- $n$  : durée de vie espérée du transformateur (en années)

➤ **Coût global des transformateurs :**

Afin d'évaluer économiquement l'achat d'un transformateur, il est important de calculer le prix total actualisé sur la durée de vie du transformateur. L'argent au cours de l'heure actuelle.

Chaque transformateur a ses propres coûts et pertes initiaux, mais les autres coûts d'installation, de maintenance et d'élimination en fin de vie sont essentiellement les mêmes pour tous les types de transformateurs et n'ont pas besoin d'être pris en compte.

Le coût total peut être calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\text{CTO} = \text{PP} + \text{A} \times \text{P0} + \text{B} \times \text{Pk} \quad (\text{I.12})$$

- PP : coût d'achat du transformateur
- A : coût des pertes à vide (exprimé en €/W)
- P0 : total des pertes à vide garanties
- B : coût des pertes dues à la charge (exprimé en €/W)
  
- Pk : pertes dues à la charge garantie

L'évaluation des facteurs A et B est délicate puisqu'elle dépend de l'évolution du régime de charge du transformateur, du coût de l'énergie, du taux d'actualisation, et aussi de la durée de vie économique prévue.

Il faut aussi tenir compte de l'évolution de la charge et du prix de l'énergie durant la vie du transformateur [32].

## **I.10. Conclusion**

L'objectif, de ce chapitre est de donner une vision générale sur le principe de fonctionnement, le rôle, l'importance dans le réseau, ainsi le coût des transformateurs électriques. Nous avons cité quelques défauts des transformateurs comme : les courts circuits, les surcharges, les défauts entre spires, le vieillissement diélectrique, phénomène de décharges partielles. Enfin on a parlé sur le Phénomène de refroidissement en citons leurs types, et le transfert de chaleur dans l'isolant huile.

## **Chapitre II**

# **Calcul de la Capacité du Transfert de Chaleur d'un Transformateur**

## II.1 Introduction

C'est intéressant d'avoir un environnement de simulation qui nous permet d'ajouter différentes physiques à des modèles de recherche. Comsol Multiphysics a été développé dans cet esprit.

Il s'agit d'un programme numérique modulaire par éléments finis qui peut modéliser une variété de phénomènes physiques qui caractérisent les problèmes du monde réel. Il est également utilisé comme outil de conception car il peut gérer des géométries 3D complexes.

Comsol contient différents modules de physique tels que la mécanique des fluides, le transfert de chaleur, l'électricité, l'électromagnétisme, la chimie, la mécanique des structures... De nombreux phénomènes physiques peuvent être combinés dans une même simulation numérique. C'est l'une des forces de ce programme.

Le chapitre suivant vise à modéliser le transfert de chaleur dans la partie isolante du transformateur. Les résultats de simulation obtenus à partir du logiciel COMSOL Multiphysics, qui est basé sur la méthode des éléments finis comme méthode de résolution des équations aux dérivées partielles caractéristiques du problème concerné, seront présentés.

L'objectif principal de ce chapitre est de modéliser la capacité de transférer de la chaleur pour différents modes de fonctionnements.

## II.2. Présentation du logiciel comsol multi-physiques

### II.2.1. COMSOL Multi-physiques

COMSOL-Multiphysics, anciennement appelé FEMLab, est un logiciel de simulation qui permet de résoudre des systèmes d'équations différentielles partielles en utilisant la méthode des éléments finis en une, deux et trois dimensions. Il peut relever les défis du domaine de l'électromagnétisme, l'élasticité dynamique des fluides et la dynamique des gaz. FeEMLab permet également de résoudre le problème comme une formulation mathématique (sous la forme d'équations) et physiques (le choix des modèles physiques, tels que les processus de diffusion). Dans le mode dit physique, on peut aussi utiliser les équations prédéfinies pour la majorité des phénomènes qui ont lieu dans les sciences et la technologie, tels que le transfert de chaleur et d'électricité, la théorie de l'élasticité, la propagation des ondes de diffusion, l'écoulement du fluide [33].



**Fig. II.1.** Montrant l'interface d'ouverture du programme avec le logo dessus

### ***II.2.2. Les performances de COMSOL Multi-physiques***

Les possibilités de Comsol Multi-physics sont nombreuses et dépendent du nombre d'applications qui peuvent être résolues grâce à son environnement de calcul scientifique complet. Il peut combiner et résoudre des équations dans de nombreux domaines, notamment la mécanique des fluides et le transfert de chaleur, l'électromagnétisme, la mécanique des fluides et la chimie, les MEMS et la mécanique des structures. Il fournit également un solveur très puissant qui peut résoudre des problèmes avec un temps de résolution optimal. Ces caractéristiques et d'autres font de COMSOL un environnement de modélisation unique pour la conception industrielle, la recherche et le développement et l'éducation [34].

### ***II.2.3. Avantages de conception avec COMSOL Multiphysics***

L'objectif principal du développement de COMSOL Multiphysics est de fournir un logiciel permettant aux scientifiques et aux ingénieurs de formuler des systèmes d'équations aux dérivées partielles (EDP) basés sur les lois de la physique, en particulier les domaines les plus courants de la physique, via une interface utilisateur et ingénierie.

Cette interface est basée sur un interpréteur d'équations qui formule à la volée des discrétisations par éléments finis à travers des systèmes entièrement couplés.

Interfaces de modélisation prédéfinies pour divers domaines de la physique appliquée, y compris le couplage multiphysique. Grâce à la technologie sous-jacente Les propriétés, les sources,

les puits et les conditions aux limites peuvent être des fonctions des variables modélisées et de leurs dérivées partielles [35].

Les équations complètes peuvent également être modifiées dans l'interface utilisateur. Il a été choisi pour les raisons suivantes.

- ✓ Il est spécialisé dans la résolution de problèmes d'électricité statique.
- ✓ Il devient possible d'envisager l'existence de plusieurs diélectriques[35].

#### II.2.4. L'interface graphique de COMSOL

Au démarrage du logiciel, le navigateur de modèle apparaît. C'est lui qui permettra de spécifier le ou les modèles physiques qui seront utilisés. C'est aussi ici que la dimension de l'espace est choisie. Pour chacun des modèles, il est précisé quelles sont les variables propres à ce modèle [36].

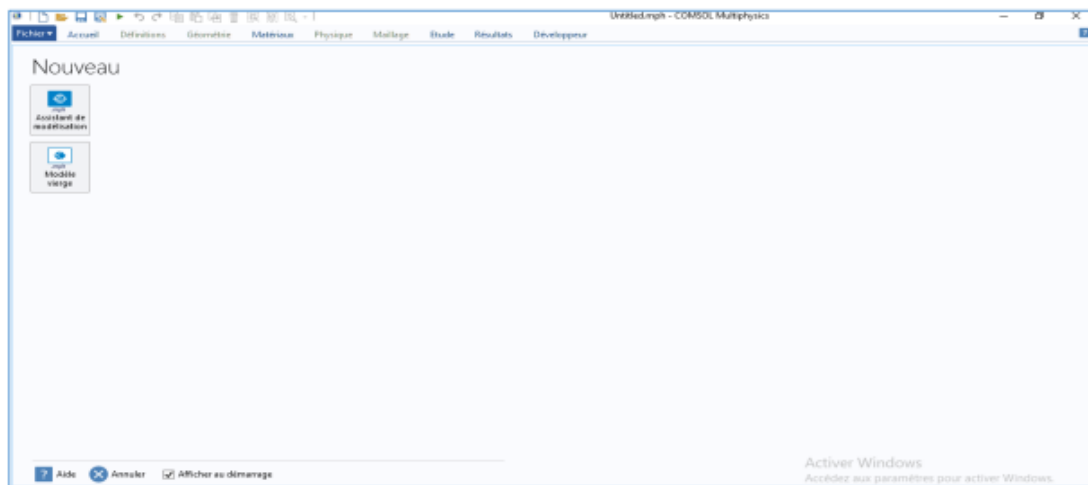


Fig.II.2. Fenêtre de démarrage du logiciel

### II.3. Étapes de réalisation de notre modèle

- Le processus de modélisation et de simulation numérique sous Comsol Multi-physiques implique plusieurs étapes [37].
  - La définition globale des paramètres et des variables liées au modèle.
  - La définition de sa géométrie.
  - La prise en compte des différents phénomènes physiques qui peuvent exister dans le problème considéré.

- La résolution du problème à l'aide d'un des différents solveurs.
- La visualisation des résultats.

Lors du lancement de COMSOL, l'assistant Modèle (Model Wizard) permet de définir toutes les étapes de la modélisation brièvement évoquées ci-dessus. Ces étapes sont les suivantes :

- Exécutez l'Assistant Modèle ce qui implique de choisir le système de coordonnées Pour le modèle, la physique pertinente au problème, et le type d'études que l'on souhaite effectuer (stationnaire ou en fonction du temps).

- Définir les paramètres, les équations et les variables pertinentes pour le modèle (dans le répertoire Définitions Globales).

- Définir la géométrie du modèle (Geometry).

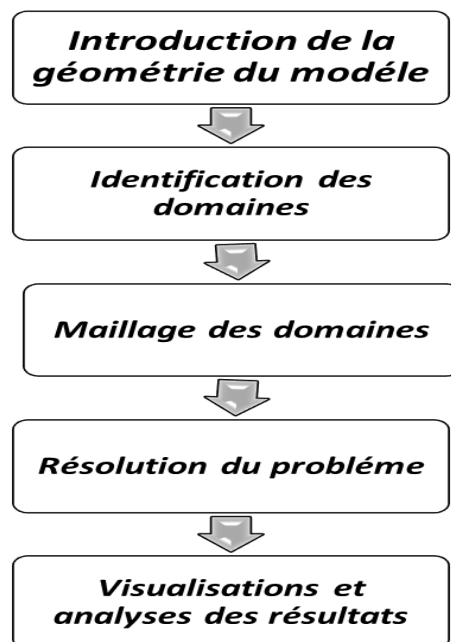
- Sélectionnez le ou les matériaux adéquats du modèle dans le répertoire (Materials).

- Choisir les conditions initiales et aux limites de votre modèle pour chaque physique utilisée.

- Choisir la taille des éléments à utiliser pour le maillage ainsi que les différents types de maillage qui existent.

- Régler les paramètres du solveur et lancer les calculs dans le répertoire études (Study).

- Afficher les résultats souhaités de la manière la plus significative dans le répertoire résultat (Résultat).



**Fig.II.3.** Diagramme de différentes étapes de résolution dans Comsol. [37]

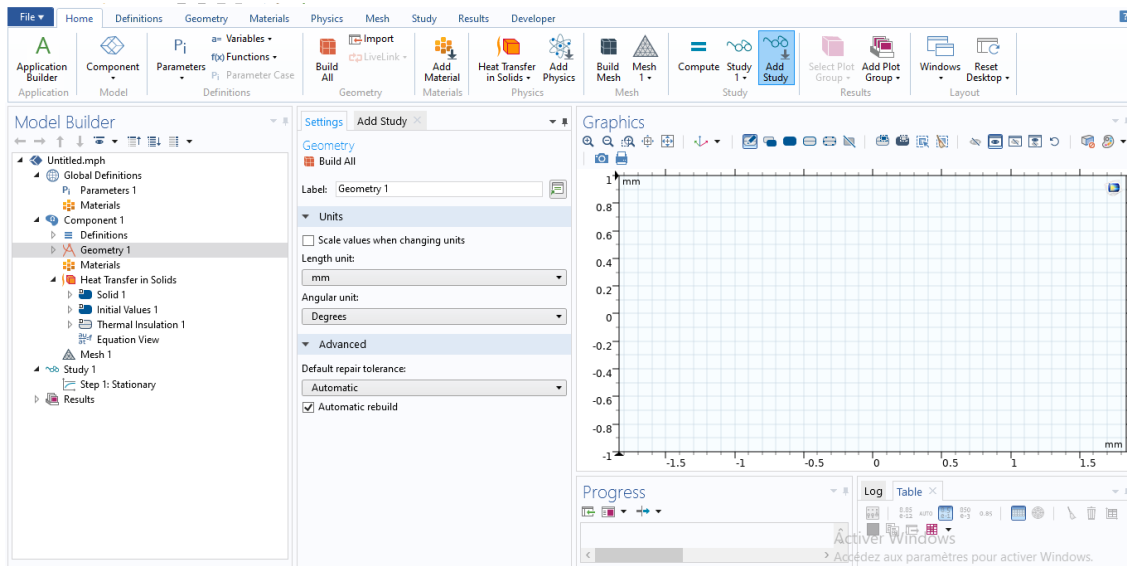
**a. Choix du modèle**

Pour choisir le modèle il faut lancer le module électrostatique dans le navigateur de modèle. Dans notre cas, nous avons entamer une étude en deux dimensions 2D.



**Fig.II.4.** Navigateur de modèles.

Après qu'on double cliques sur Heat transfert in fluide on obtient la fenêtre suivante :



**Fig.II.5.** Le plan de dessin 2D

**b. Choix du modèle Physique**

La prochaine étape est le choix du physique approprié ; dans notre cas il s'agit de Heat Transfer.

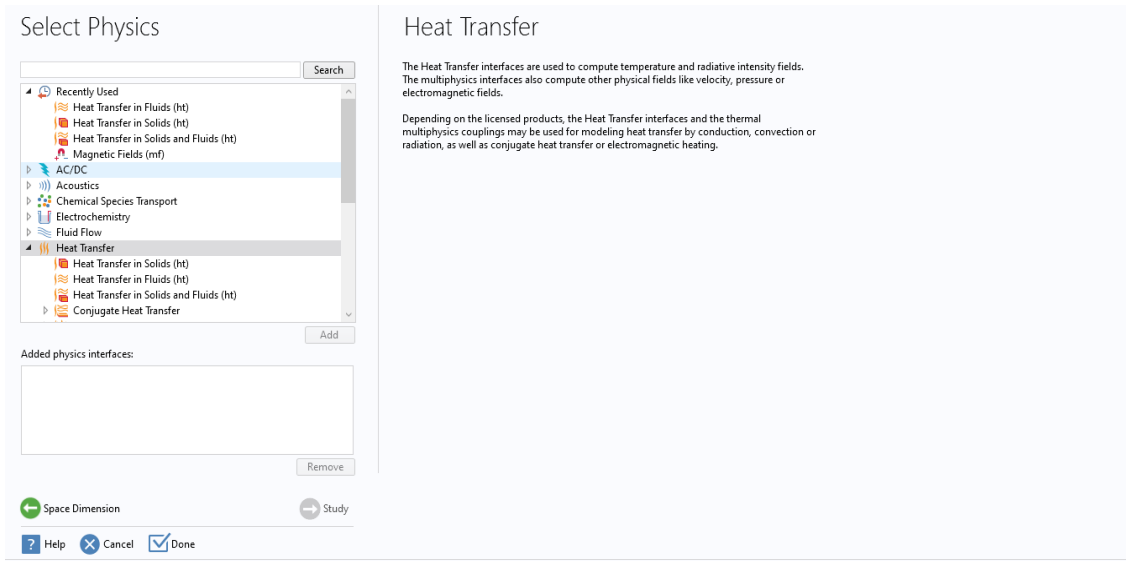


Fig.II.6. Fenêtre pour choisir le modèle physique.

**c. Choix de domaine d'étude**

Après avoir sélectionné le modèle, nous avons choisi le type d'étude par rapport au temps. Sous Preset Studies, nous avons opter pour Stationary mode.

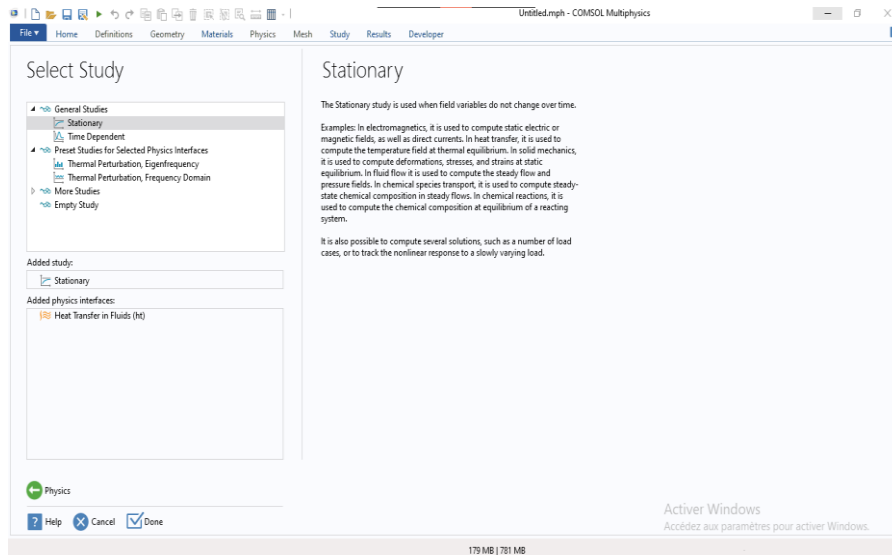
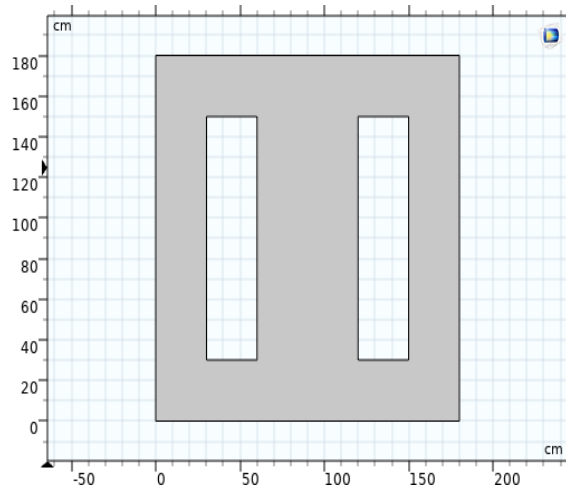


Fig.II.7. Fenêtre pour choisir le cas d'étude

**d. Géométrie**

La première chose à faire une fois le programme ouvert est de dessiner la géométrie de notre système (transformateur). La figure suivante représente un modèle représentatif approximatif d'un

transformateur monophasé. Le transformateur est sous forme d'un rectangle, représentant la cuve remplie d'huile et deux petit rectangle représentant les enroulements (sources de chaleurs).



**Fig.II.8.** Le dessin d'un transformateur

*e. Définition des caractéristiques des sous domaines et domaines*

Le but ici est de définir les paramètres physiques qui définissent le domaine : la température, la conductivité, la densité ...etc. Les paramètres sont évidemment liés à notre modèle physique étudié. Pour résoudre les EDP, il est nécessaire de définir un certain nombre de conditions aux limites cohérentes [38].

➤ **Les caractéristiques du transformateur 2D**

**Tableau II.1.** Représente les données du transformateur 2D.

Description	Caractéristique
Longueur (cm)	180
Largeur (cm)	180
Longueur de la bobine (cm)	120
Largeur de la bobine (cm)	30
La résistance électrique de la bobine ( $\Omega$ )	2.7
Le courant électrique circulant dans la bobine à vide (A)	3
Le courant électrique circulant dans la bobine en charge (A)	10
La masse de bobine (Kg)	2.9
La capacité thermique de cuivre ( $J/kg.C^\circ$ )	385
La température ambiante ( $C^\circ$ )	22

➤ Les caractéristiques de l'huile neuve

**Tableau II.2.** Représente les caractéristiques d'huile neuve [39].

Description	Caractéristique physique
Densité (Kg/m <sup>3</sup> )	922
Capacité thermique (J/kg.k)	1970
Conductivité thermique (W/m.k)	0.166
Viscosité dynamique (Pa.s)	2.9 e <sup>-2</sup>
Conductivité électrique (S/m)	5.17*10 <sup>-13</sup>
Permittivité relative (1)	2.16
Perméabilité relative (1)	0.5

➤ Les caractéristiques de L'huile vieillie

**Tableau.II.3.** Représente les caractéristiques d'huile vieillie.

Description	Caractéristique physique
Densité (Kg/m <sup>3</sup> )	600
Capacité thermique (J/kg.k)	4000
Conductivité thermique (W/m.k)	0.001
Viscosité dynamique (Pa.s)	0.493

➤ Les caractéristiques de l'air

**Tableau II.4.** Représente les caractéristiques de cuivre [40].

Description	Caractéristique physique
Conductivité thermique (w/m.k)	2.5*10 <sup>-2</sup>
Densité (Kg/m <sup>3</sup> )	1.2
Capacité thermique (J/kg.k)	1.256
Diffusivité (m <sup>2</sup> /s <sup>-1</sup> )	2*10 <sup>-5</sup>

➤ Les caractéristiques de cuivre

**Tableau II.5.** Représente les caractéristiques de cuivre.

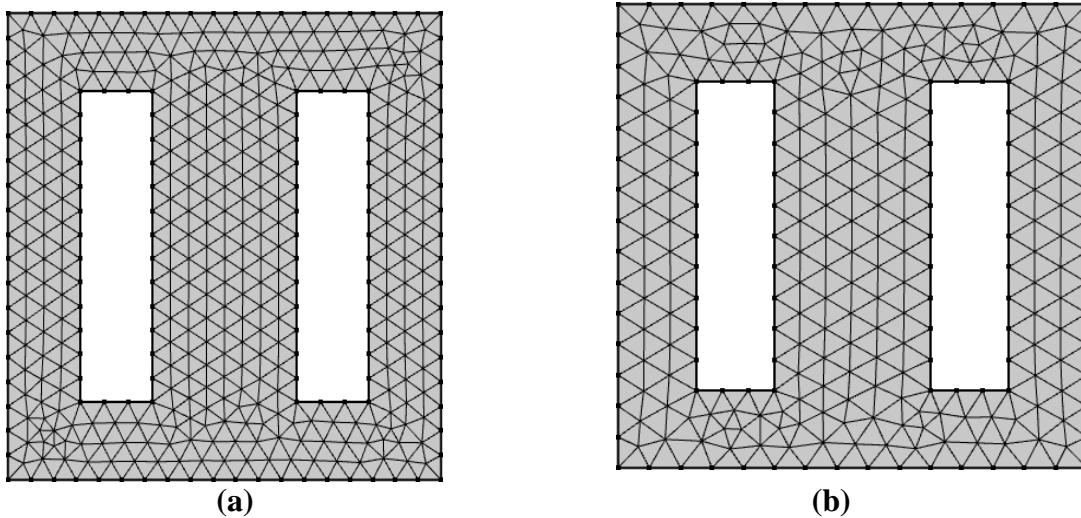
Description	Caractéristique physique
Capacité thermique (J/(kg.k)	385
Masse volumique (Kg/m <sup>3</sup> )	8960
Conductivité thermique (W/m.k)	400
Conductivité électrique (S/m)	5.96*10 <sup>7</sup>
Permittivité relative (1)	1
Perméabilité relative (1)	1

### f. Maillage des domaines

Un maillage est une division d'un espace ou d'un domaine en cellules unitaires.

- Les maillages sont automatiquement liés.
- Il peut être ajusté globalement ou localement [41].

Les figures suivantes représentent notre domaine d'étude avec un maillage normal et une autre fin.



**Fig.II.9.** Différents types de maillage  
(a) maillage fin, (b) maillage normal

### g. Analyse des résultats

Une fois que le programme a trouvé une solution, il passe automatiquement à la fenêtre de post-traitement, où vous pouvez analyser les résultats.

Il est possible de les visualiser sa forme de remplissage de couleur, de lignes de courant, de champ de flèches, etc.... [38].

## II.4. Calcul de la capacité du transfert de chaleur du transformateur dans différentes conditions

Dans le présent travail on a opté pour le calcul du transfert de chaleur dans les cas suivants :

#### a- Sans défaut :

- En charge (dans huile neuve et huile vieillie).
- À vide (dans huile neuve).

**b-** Avec défauts :

- Court-circuit (dans huile neuve et dans huile vieillie).
- Présence de 2 cavités (même matériaux) dans le cas de court-circuit dans huile vieillie.

### II.4.1. Source de chaleur

Dans ce qui suit on va calculer les températures issues de différentes sources de chaleurs.

#### II.4.1.1. Cas sans défauts

✓ **Dans la 1<sup>ère</sup> cas :** (En charge)

On calcule la valeur de température en charge par cette formule :

$$T_{bobine}(t) = \frac{R \cdot I^2}{C_{th}} * t + T_{amb}$$

$T_{bobine}$  = température de la bobine (C) ;

$R$  = résistance électrique de la bobine ( $\Omega$ ) ;

$I$  = courant électrique circulant dans la bobine (A) ;

$t$  = temps (s) ;

$C_{th}$  = Capacité thermique de la bobine ;

$T_{amb}$  = température ambiante (C) ;

$M$  = masse de bobine (kg) ;

$C_{th}'$  = Capacité thermique de cuivre (J/kg.C°) ;

$C_{th} = C_{th}' * M$

✚ L'étude de ce cas est réalisée pendant deux périodes de temps différentes (180s et 600s) :

$t=180s \rightarrow T_{bobine} = 338 \text{ K}$  ; et  $t=600s \rightarrow T_{bobine} = 448 \text{ K}$  ; (voir Tableau II.1).

✓ **Dans la 2<sup>ème</sup> cas :** (à vide)

On calcule la valeur de température à vide par cette formule :

$$T_{bobine}(t) = \frac{R \cdot I^2}{C_{th}} * t + T_{amb}$$

✚ L'étude de ce cas est réalisée pendant deux périodes de temps différentes (180s et 600s) :

$t=180s \rightarrow T_{bobine} = 299 \text{ K}$  ; et  $t=600s \rightarrow T_{bobine} = 308.5 \text{ K}$  ; (voir Tableau II.1).

#### II.4.1.2. Cas avec défauts

Plusieurs types peuvent survenir dans la vie du transformateur. Ces défauts ont des origines liées à la fabrication ou au fonctionnement du transformateur. Dans notre étude nous nous limitons de

quelques types de défauts qui influence d'avantage la fonction du refroidissement à savoir les courts-circuits et les cavités gazeuses contenues dans le volume de l'huile isolante.

## II.5. Résultats et discussions

Dans ce qui suit, on va présenter les résultats de simulations de la répartition de la température dans la partie isolante du transformateur et cela pour différents cas d'étude. Fonctionnement normale et à vide sans défauts dans le cas d'huile neuve et une autre vieillie.

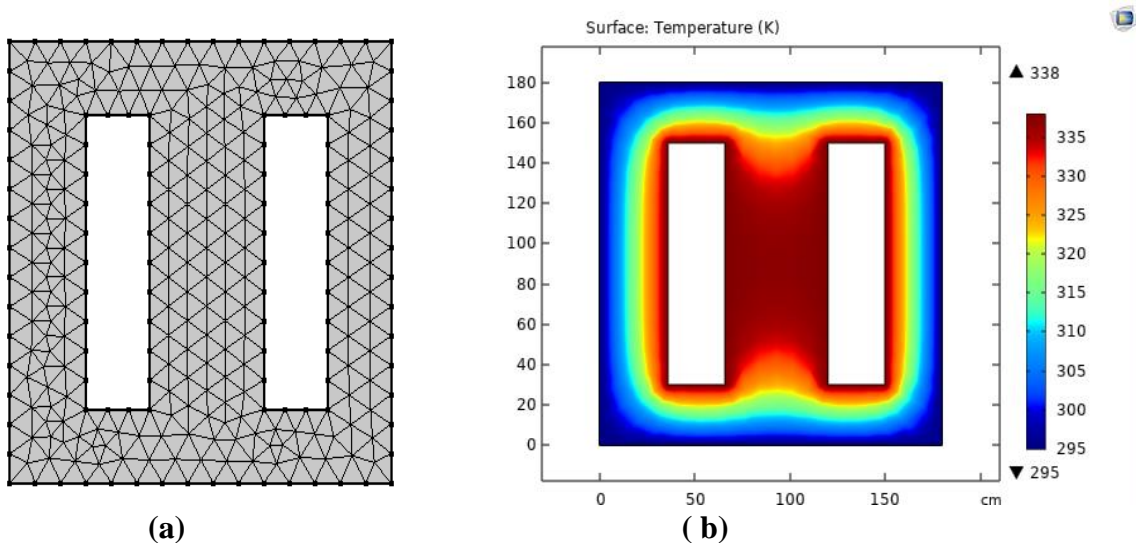
### II.5.1. Cas sans défaut

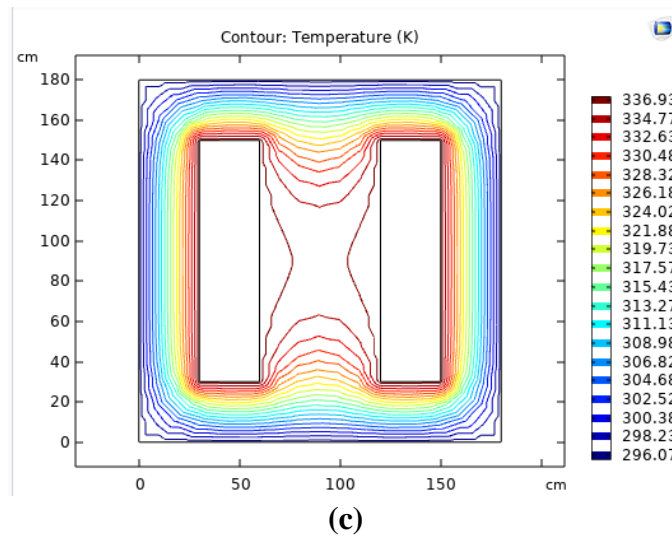
#### II.5.1.1. En charge

Dans cette étude, un modèle simple de transformateur a été créé. Ce modèle est représenté par un carré, avec deux bobines représentées par les frontières de rectangles immergés dans l'huile. On impose une valeur de température de 295K à l'extérieure ; cette valeur représente la température ambiante à l'extérieure. Une valeur 338K représente la température des enroulements. Cette étude a été faite pour deux temps d'exécution 180s et 600s et cela pour deux types d'huiles : huile vieillie et une autre neuve.

➤ **Huile neuve,  $t=180s \rightarrow T=338k$**

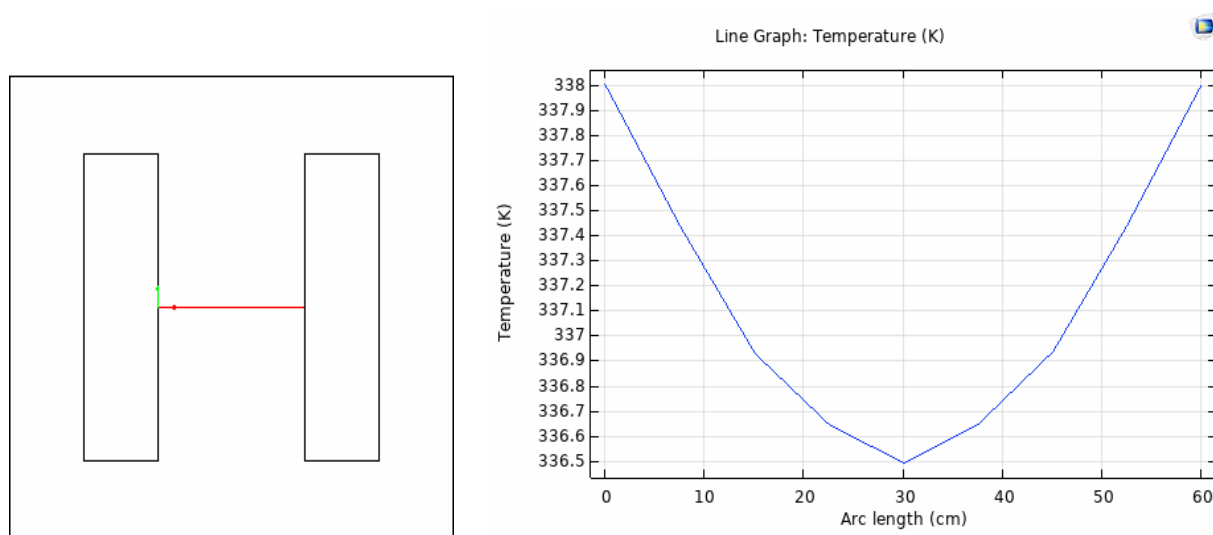
Dans les figures suivantes on représente le maillage de notre domaine d'étude ainsi que les résultats de calcul sous forme de échogramme et contour des lignes isothermiques.



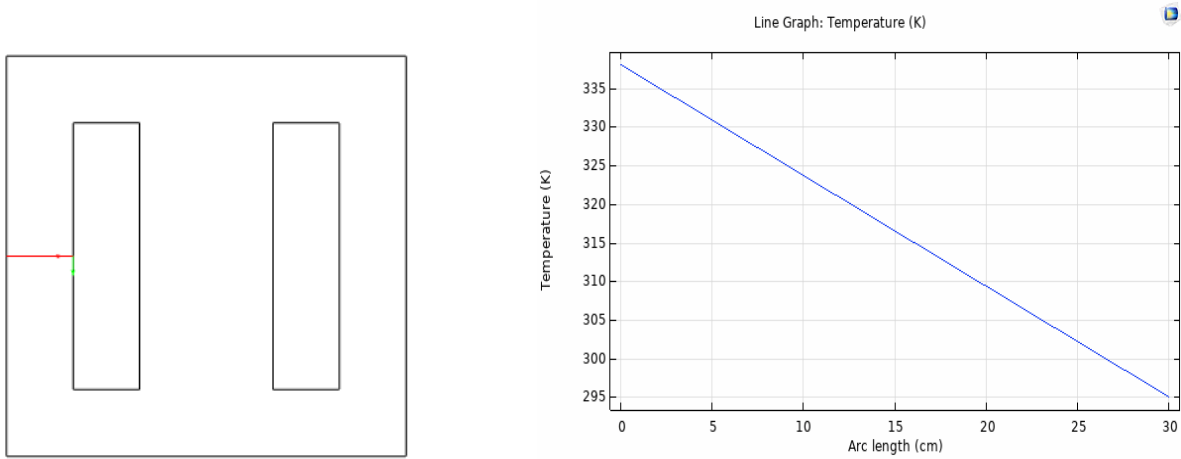


**Fig.II.10.** Distribution de la température cas d'une huile neuve pour  $t=180$  s  
 (a) maillage, (b) Echogramme, (c) contour isotherme

On s'intéresse à la répartition de la température dans la partie isolante. Cependant, dans les figures suivantes, on représente la répartition de la température dans la partie isolante du transformateur.



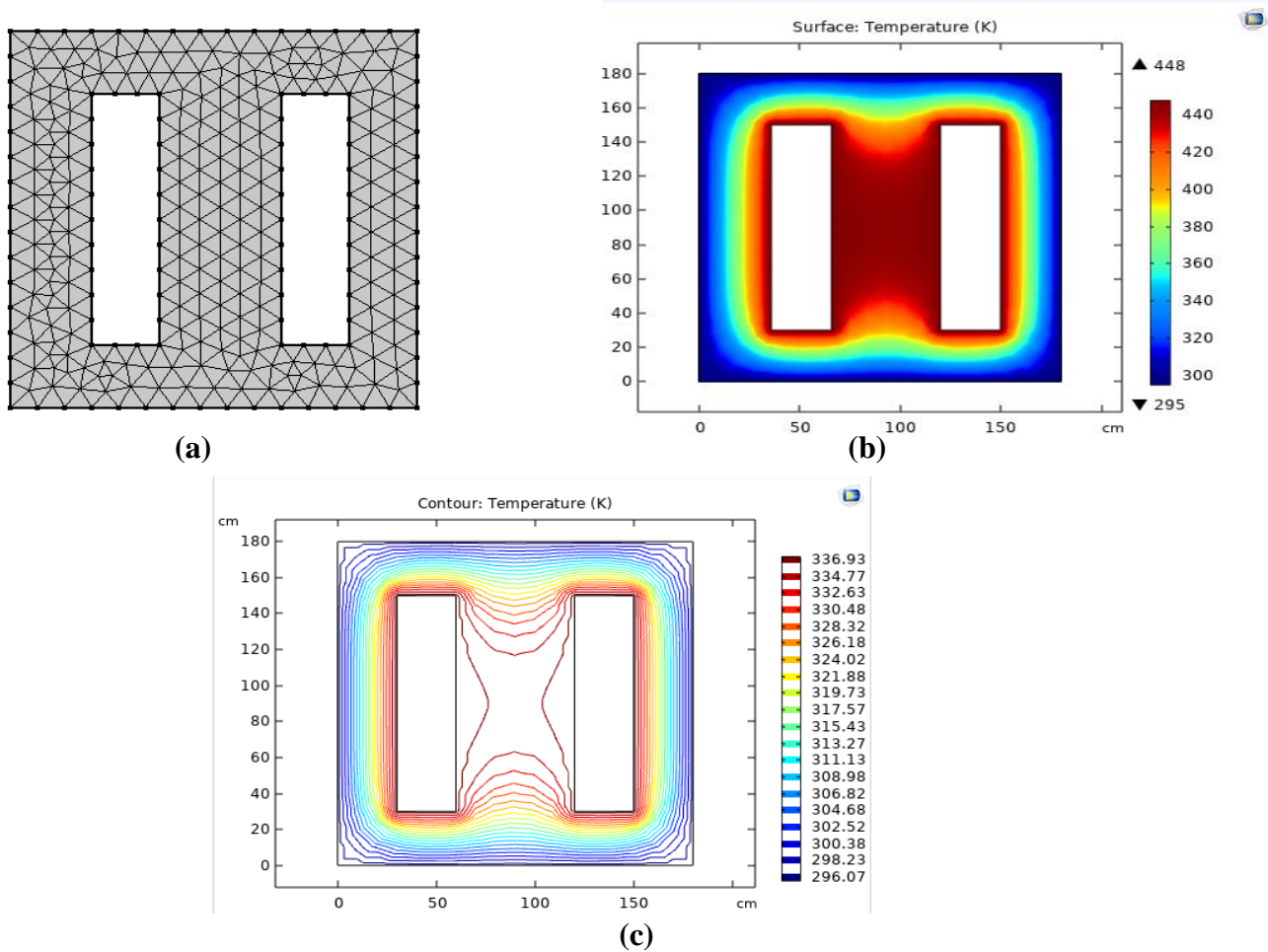
**Fig.II.11.** la répartition de la température entre enroulement



**Fig.II.12.** La répartition de la température dans la partie extérieure

➤  $t = 600s \rightarrow T = 448K$

Dans les figures suivantes, on représente le maillage de notre domaine d'étude ainsi que les résultats de calcul sous forme de échogramme, et contour des lignes isothermiques.



**Fig.II.13.** Distribution de la température cas d'une huile neuve pour  $t=600 s$

(a) maillage, (b) Echogramme, (c) contour isotherme

Dans les figures suivantes on représente la répartition de la température dans la partie isolante du transformateur.

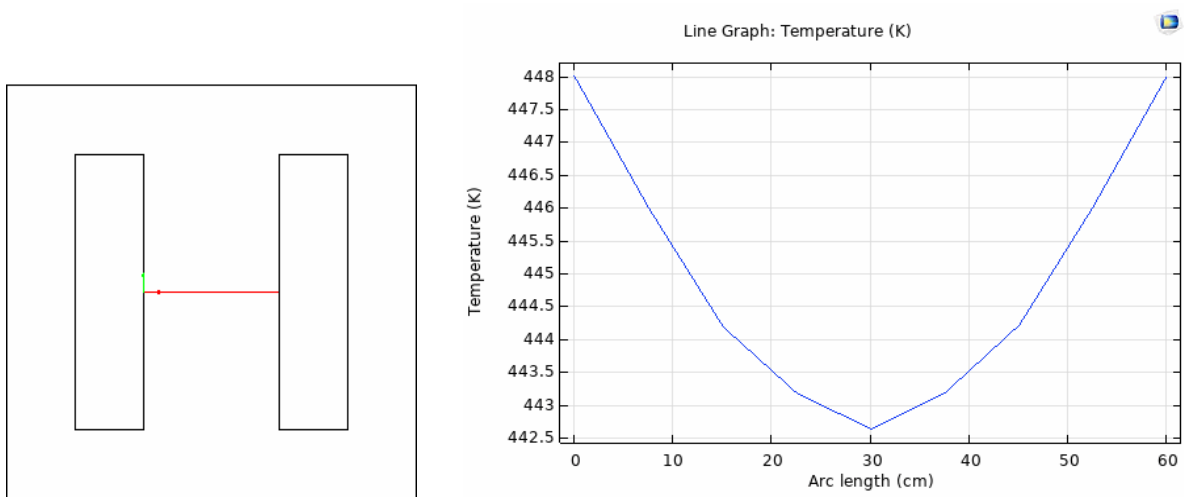


Fig.II.14. la répartition de la température entre enroulement

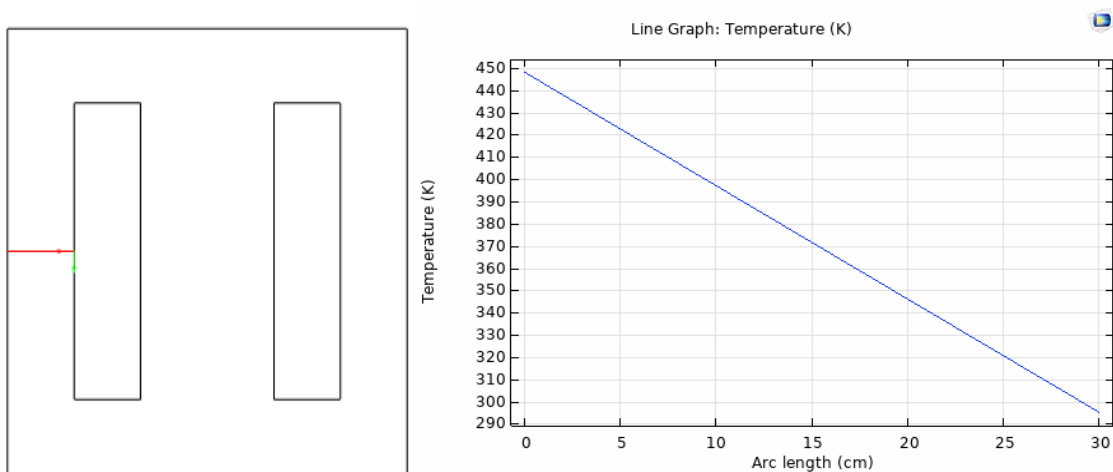
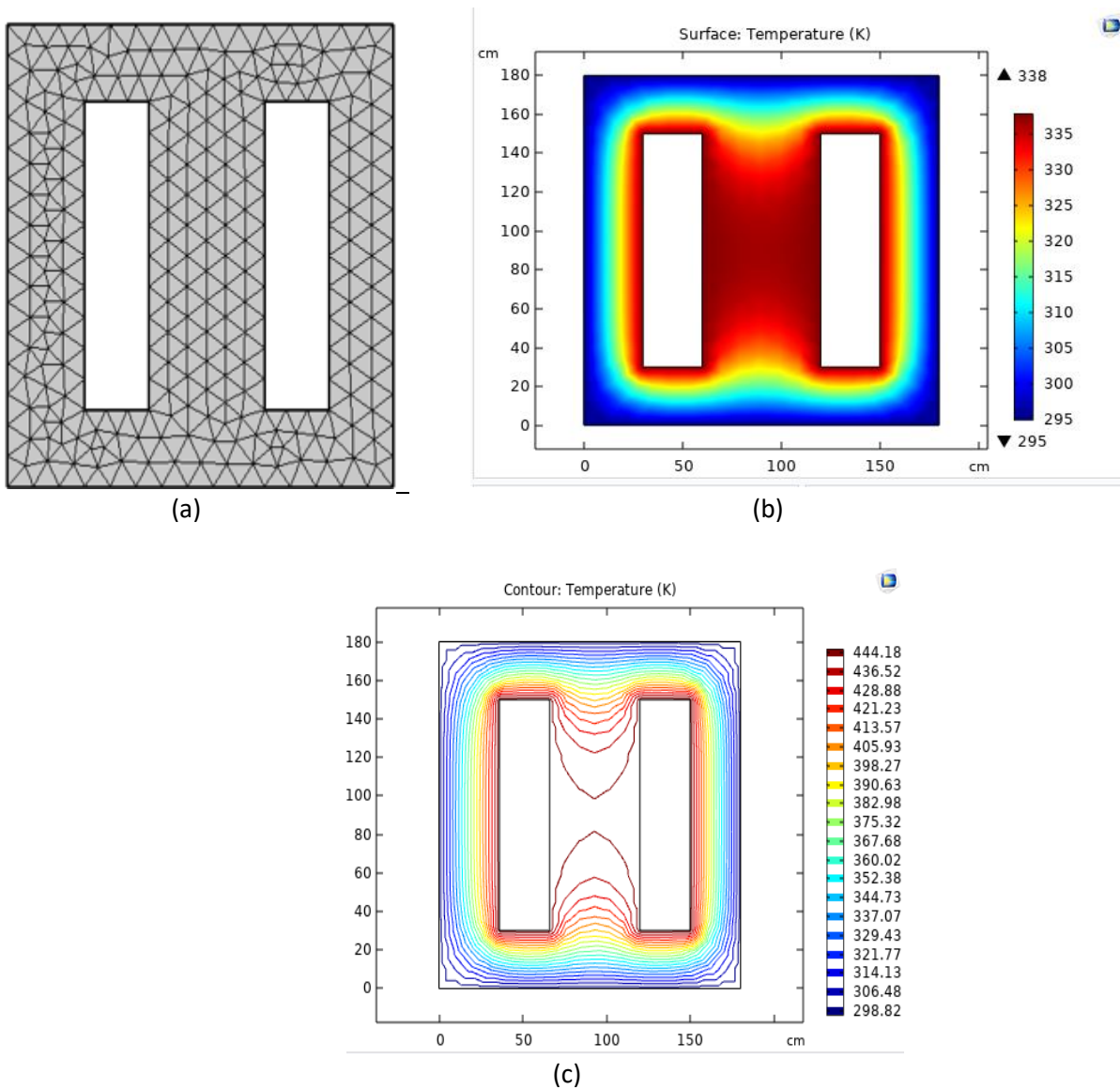


Fig.II.15. La répartition de la température dans la partie extérieure

➤ **Huile vieillie,  $t=180s \rightarrow T=338k$**

Dans cette étude, le modèle précédent a été utilisé, mais les propriétés de l'huile ont été modifiées. Le but final est d'essayer de mettre en évidence l'influence de la qualité d'huile sur la dégradation de la fonction de refroidissement du transformateur. (Voir tableau II.3).

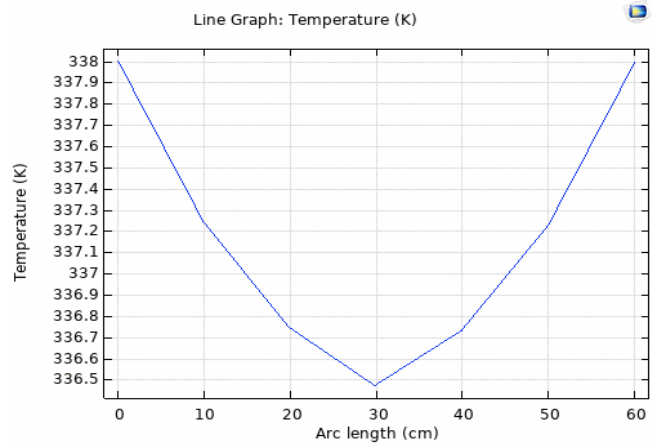
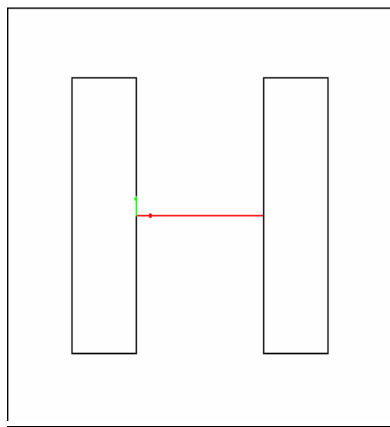
Dans les figures suivantes on représente le maillage de notre domaine d'étude ainsi que les résultats de calcul sous forme de échogramme et contour des lignes isothermiques.



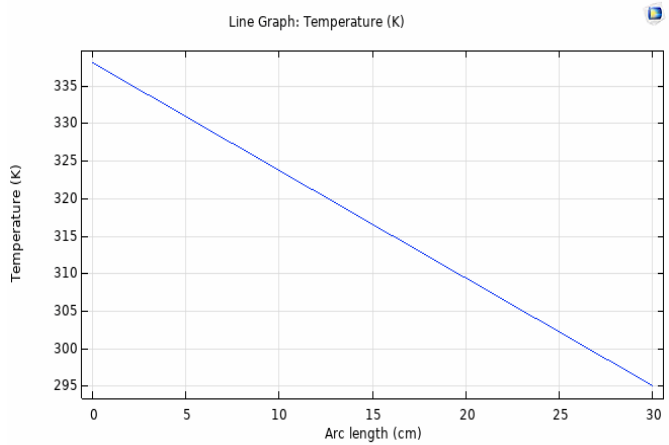
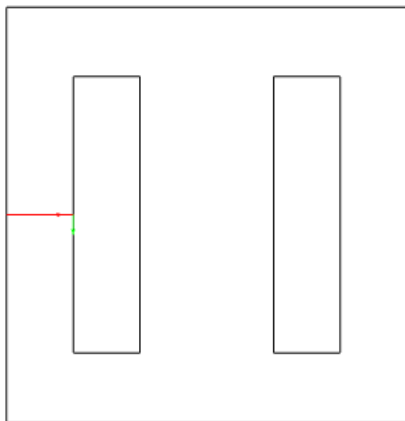
**Fig.II.16.** Distribution de la température cas d'une huile vieillie pour  $t=180$  s

(a) maillage, (b) Echogramme, (c) Contour

Dans les figures suivantes on représente la répartition de la température dans la partie isolante du transformateur



**Fig.II.17.** La répartition de la température entre enroulement



**Fig.II.18.** La répartition de la température dans la partie extérieure

Afin de comparer l'influence du vieillissement d'huile sur la répartition de la température et sur la fonction du transfert de chaleur nous avons tracer les courbes des deux cas sur la même figure. Les figures suivantes représentent la répartition de la température dans les deux parties du transformateur.

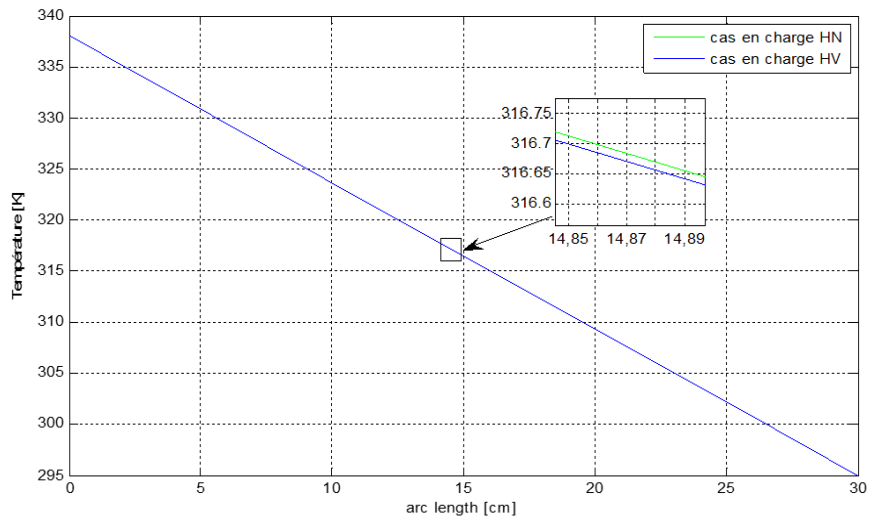


Fig.II.19. la répartition de la température dans la partie extérieure dans le cas en cahrgé sans défauts pour une huile neuve et huile vieillie.

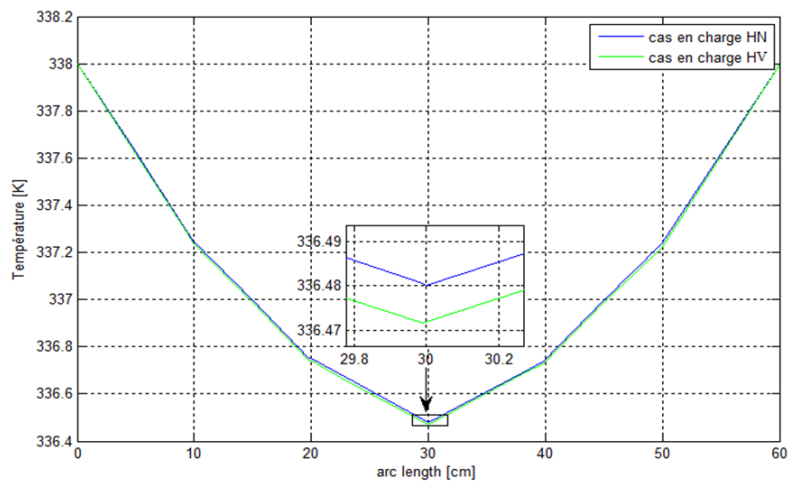


Fig.II.20. La répartition de la température entre deux enroulements dans le cas en charge sans défauts pour une huile neuve et autre vieillie.

➤ Discussions

En charge, la température élevée utilisée ( $65.5^{\circ}\text{C}$ ) dépasse beaucoup la température par apport au cas à vide ( $25^{\circ}\text{C}$ ). Ce dépassement est justifié par le courant de charge qui circule dans bobines en induisant des pertes d'énergie traduite par une quantité de chaleur supplémentaire. Pour les deux cas huile neuve et huile vieillie, et d'après les figures II.13, II.16 et II.19 on remarque la répartition de la température représente un gradient ; la température décroît si on s'éloigne de du cœur du transformateur. Cette diminution régulière de la température représente la fonction du transfert de chaleur assurer par l'huile isolante. Toujours pour les deux échantillons, et d'après les figures II. 12,

II.15 et II.18 et II.19 la décroissance de la température est moins rapide. Dans ce cas on se retrouve entre deux sources de chaleur, ce qui représente la zone la plus sollicitée en termes de température et de chaleur. Par rapport à la fonction de refroidissement on doit tenir compte de cette zone.

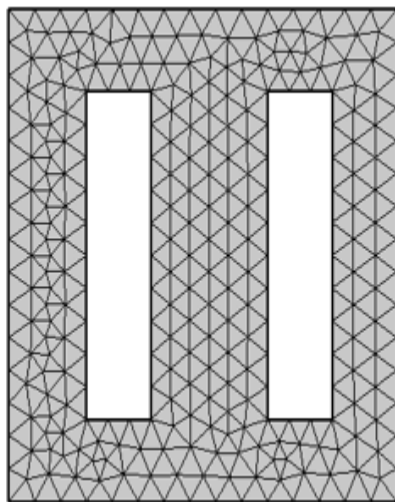
Si on considère les courbes II.20 et II.21, et en zoomant les deux courbes correspondants au cas d'huile neuve et huile vieillie ; on peut clairement remarquer l'influence de l'état d'huile sur la répartition de la température. Pour l'huile vieillie, la capacité du transport de chaleur vers l'extérieure est affectée par l'état de dégradation d'huile. L'huile a tendance de plutôt stocké de chaleur que l'a dissipée. Si on veut bien comparer les deux cas on doit calculer la différence des surfaces entre les courbes et l'axe des abscisses. Cela nous peut donner une idée sur la quantité de chaleur supplémentaire stockée.

**II.5.1.2. À vide**

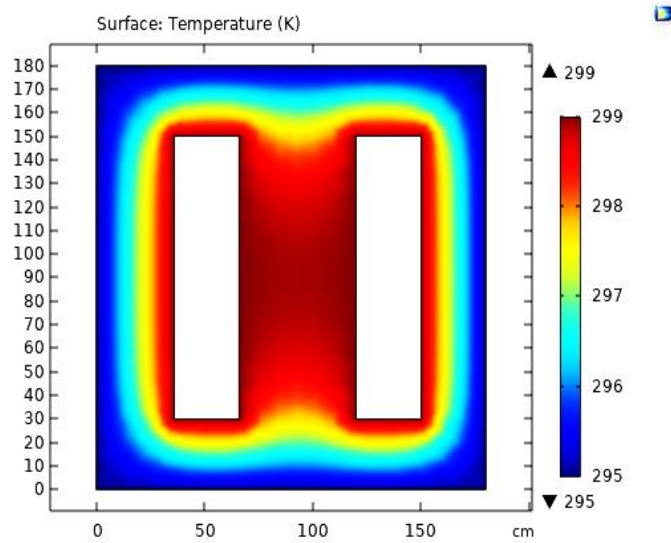
Dans ce cas on impose une valeur de température de 295K à l'extérieure ; cette valeur représente la température ambiante à l'extérieure. Une valeur 299K représente la température des enroulements. Cette étude a été faite pour deux temps d'exécution 180s et 600s et cela pour deux types d'huiles : huile vieillie et une autre neuve.

➤ **Huile neuve,  $t = 180 \text{ s} \rightarrow T = 299 \text{ K}$**

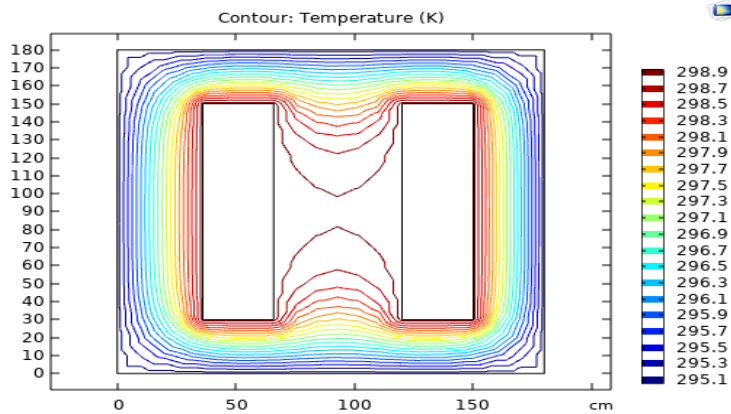
Dans les figures suivantes on représente le maillage de notre domaine d'étude ainsi que les résultats de calcul sous forme de échogramme et contour des lignes isothermiques.



(b)



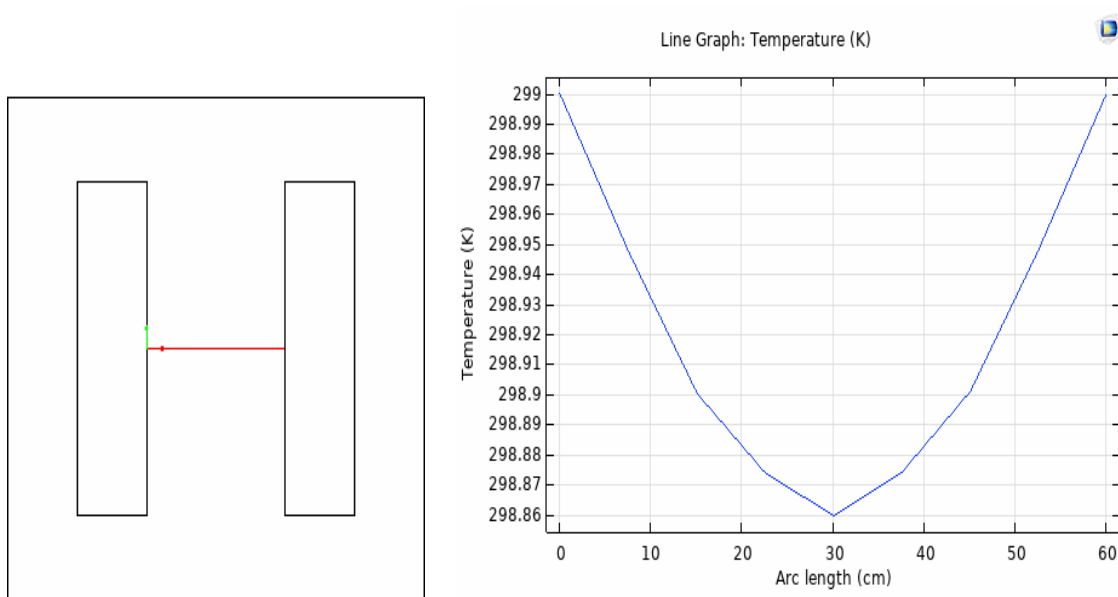
(b)



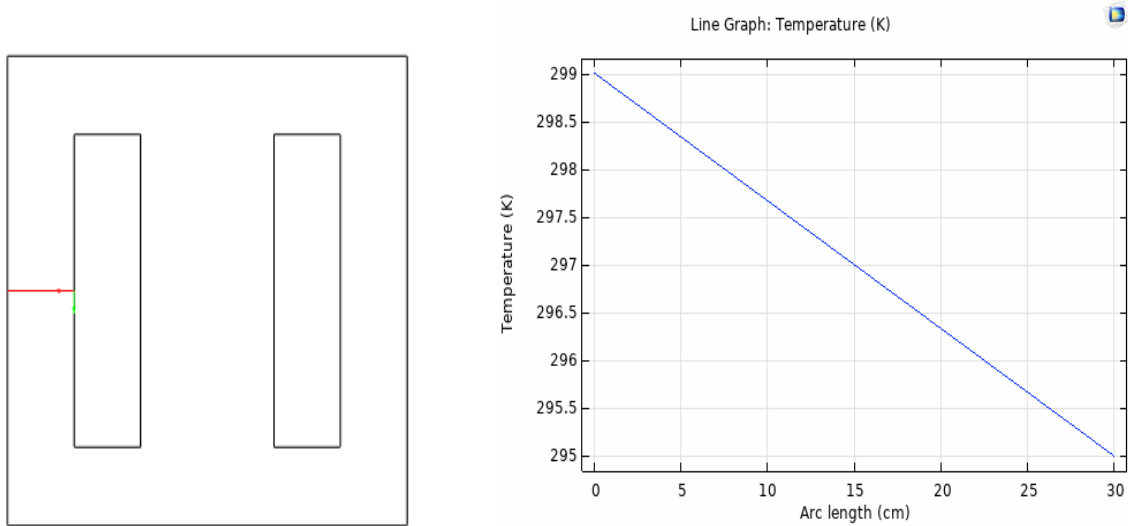
(c)

**Fig.II.21.** Distribution de la température cas d'une huile neuve pour  $t=180$  s  
 (a) maillage, (b) Echogramme, (C) Contour isotherme

On s'intéresse à la répartition de la température dans la partie isolante. Cependant, dans les figures suivantes, on représente la répartition de la température dans la partie isolante du transformateur.



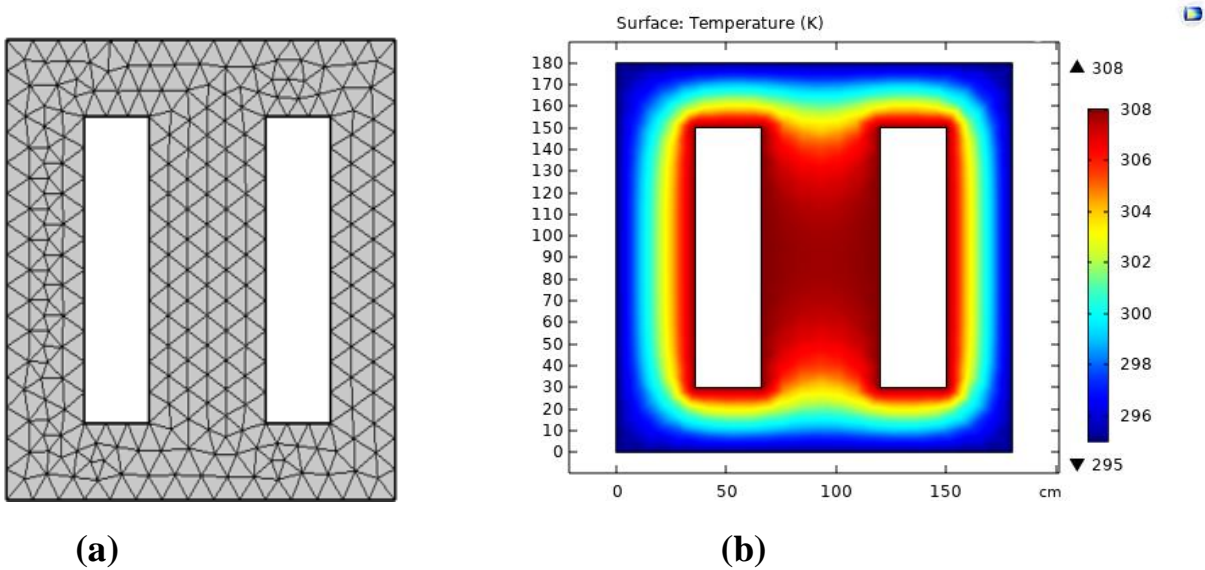
**Fig.II.22.** Le gradient de température dans le cœur du transformateur cas à vide à  $t=180$  s

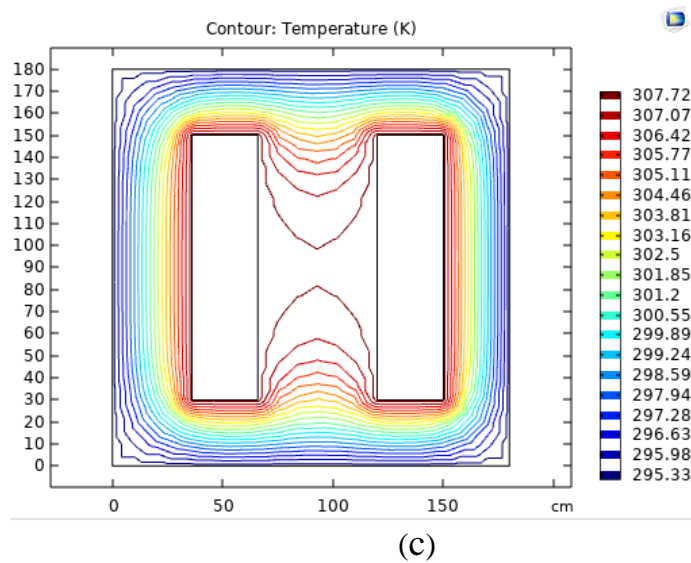


**Fig.II.23.** Le gradient de température dans la partie extérieure du transformateur cas à vide à  $t=180$  s

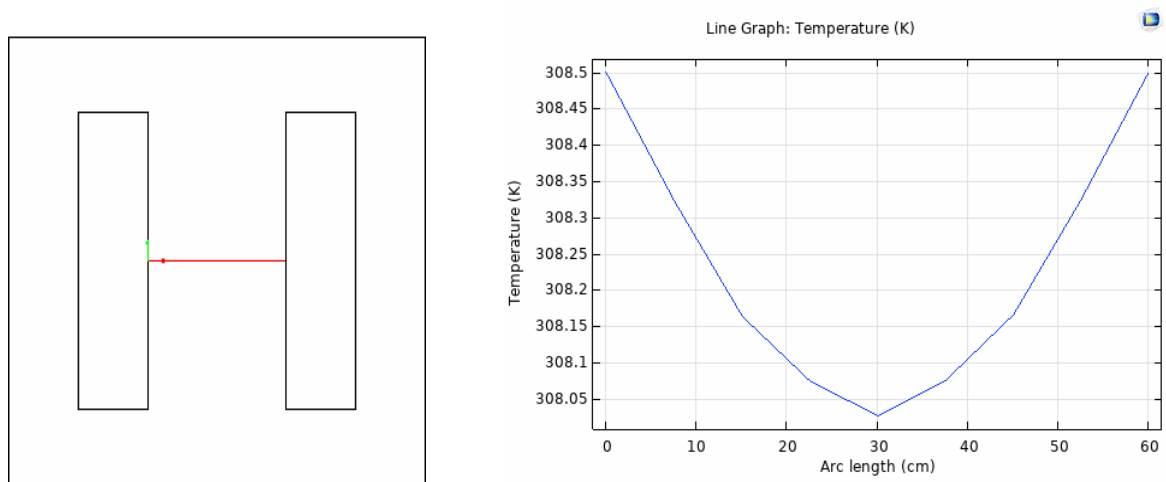
➤  $t=600s \rightarrow T = 308.5$  k

Dans les figures suivantes on représente le maillage de notre domaine d'étude ainsi que les résultats de calcul sous forme de échogramme et contour des lignes isothermiques.

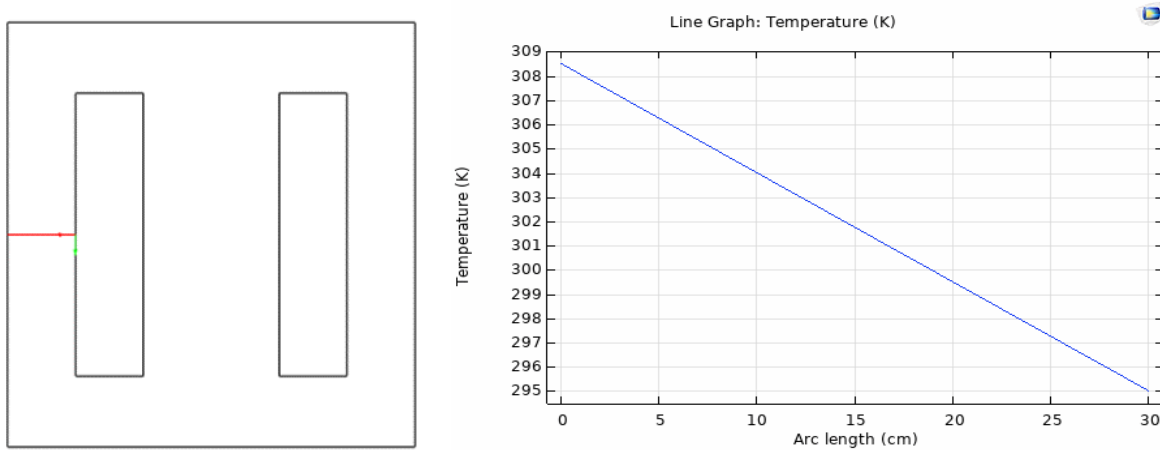




**Fig.II.24.** Distribution de la température cas d'une huile neuve pour  $t=600$  s  
 (a) maillage, (b) Echogramme, (c) contour isotherme

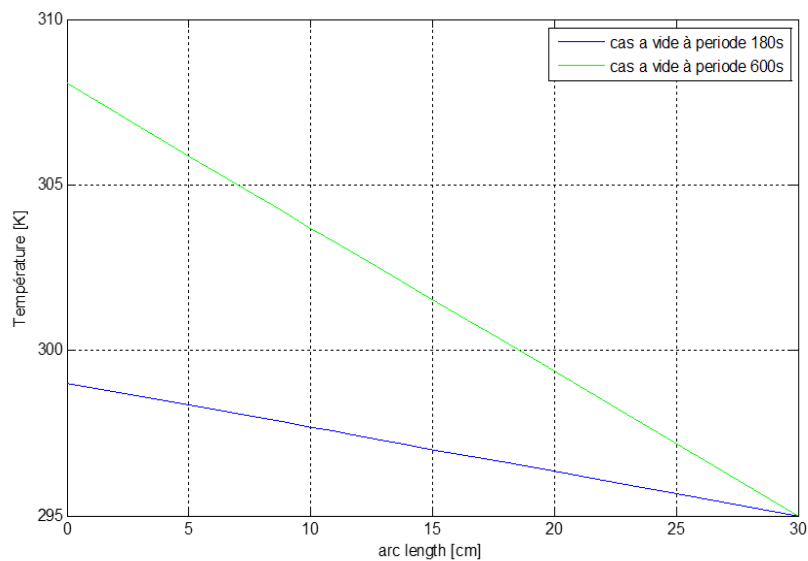


**Fig.II.25.** Le gradient de température dans le cœur du transformateur  
 cas à vide à  $t=600$  s



**Fig.II.26.** Le gradient de température dans la partie extérieure du transformateur cas à vide à  $t=600$  s

Pour montrer l'effet du temps d'exécution nous avons tracé dans la figure suivante le gradient de température pour deux différents temps de calcul.



**Fig.II.27.** Gradient de température pour deux temps d'exécutions.

➤ **Discussions**

Par rapport au cas en charge, la température représente un gradient différent vue la température basse imposée par le fonctionnement à vide. Le transformateur fonctionnant à vide la température est relativement basse et stable due à une seule source de chaleur à savoir les pertes par hystérésis dans le noyau du transformateur transformé en chaleur et dissipée.

Si on considère les deux temps de calcul, le gradient de température sera plus élevé pendant la période la plus longue 600s, car l'huile aura plus de temps pour s'échauffer, ton que constate que pour

un temps de 180s le gradient de température est relativement faible. C'est ce que montre dans la figure II.28.

### II.5.2. Cas avec défaut

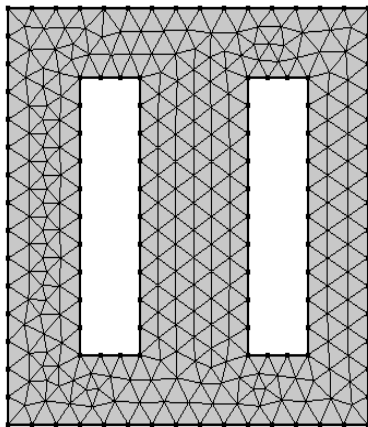
Dans ce qui suit, on va présenter les résultats de simulation dans le cas de l'existence des défauts. Nous avons considéré principalement un défaut de court-circuit et la présence des cavités d'air dans le volume d'huile isolante et cela pour deux états différents d'huile.

#### II.5.2.1. Court-circuit

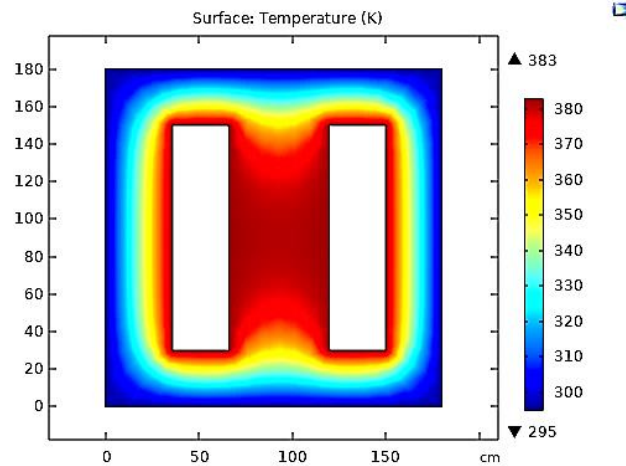
Si on suppose que la température à l'extérieure est toujours la température ambiante, on va imposer dans ce cas une température relativement plus grandes au niveau des enroulements à savoir une valeur de 383K. Cet excès de chaleur a comme origine le courant de court-circuit élevé.

##### ➤ Huile neuve

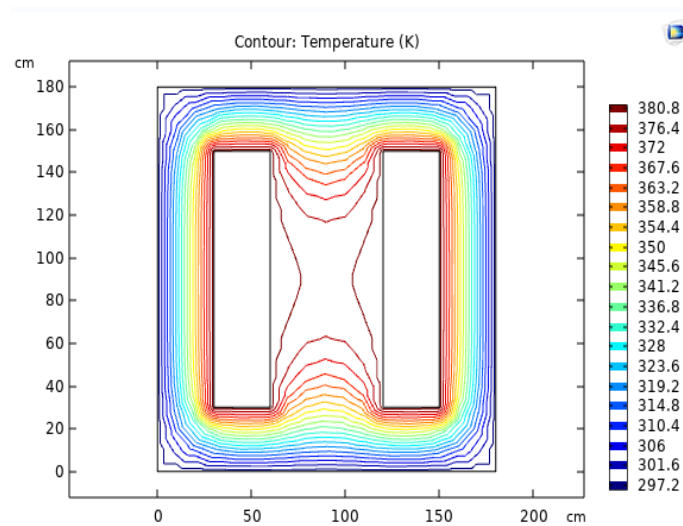
Dans les figures suivantes on représente le maillage de notre domaine d'étude ainsi que les résultats de calcul sous forme de échogramme et contour des lignes isothermiques.



(a)



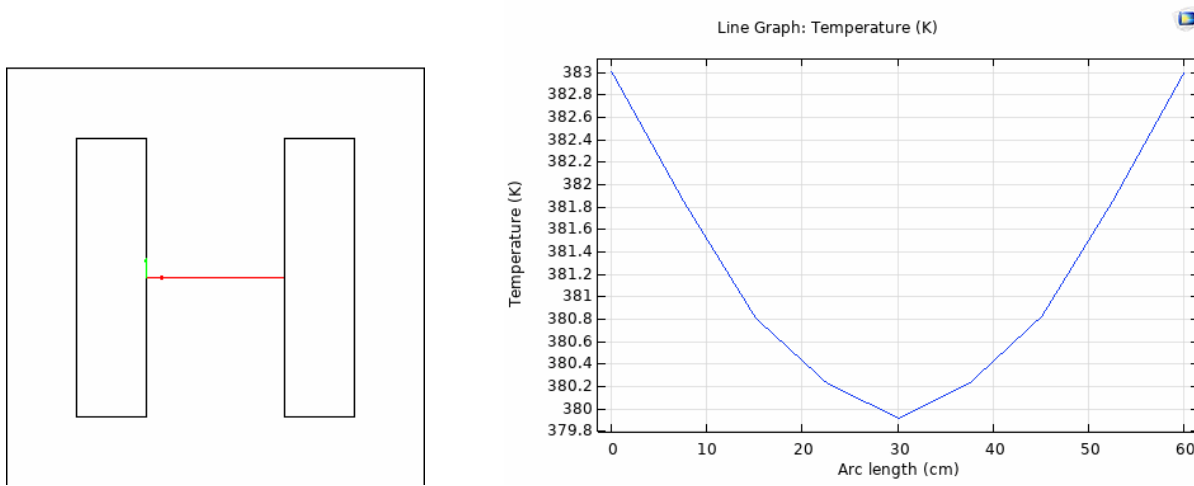
(b)



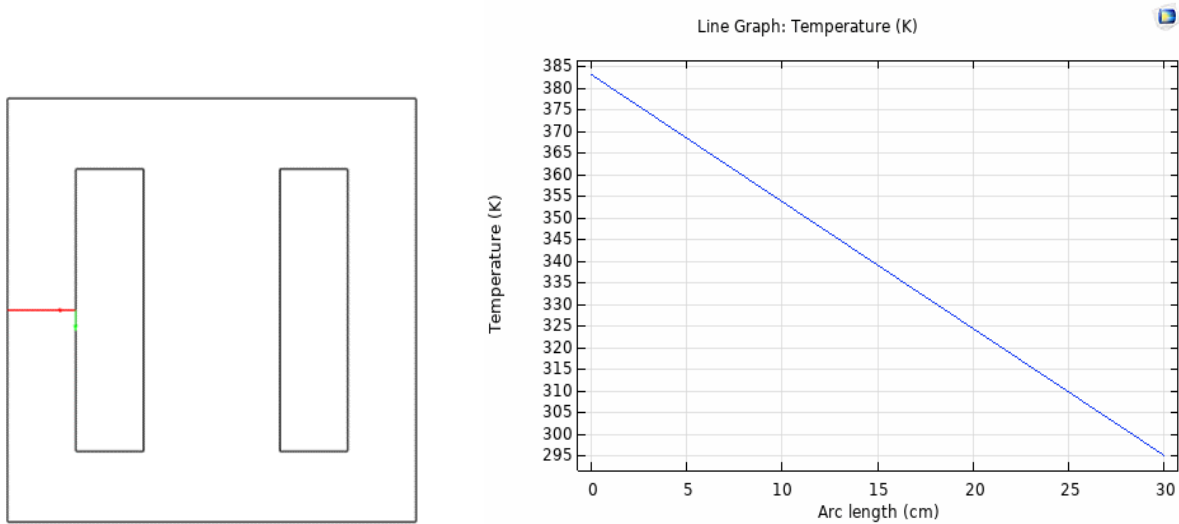
(c)

**Fig.II.28.** Distribution de la température cas de court-circuit et une huile neuve  
 (a) maillage, (b) Echogramme, (C) Contour isotherme.

Dans les figures suivantes on représente la répartition de la température dans la partie isolante du transformateur.



**Fig.II.29.** Le gradient de température dans le cœur du transformateur, cas de court circuit et huile neuve.

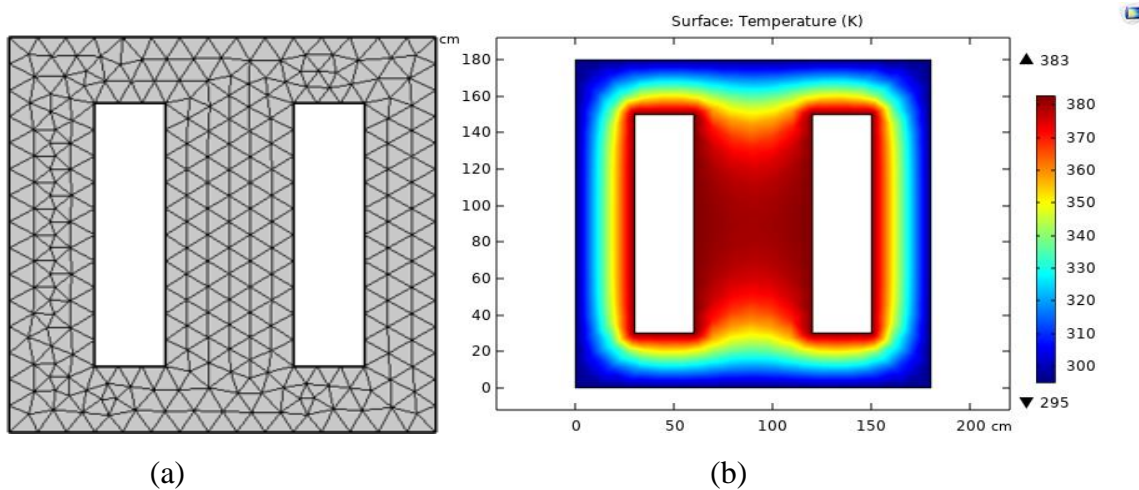


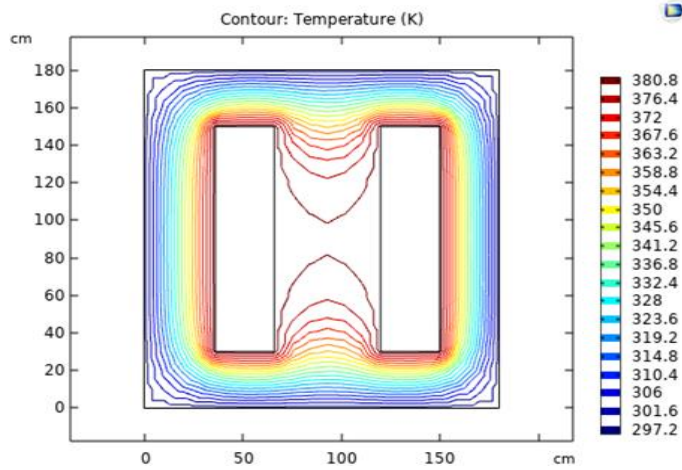
**Fig.II.30.** Le gradient de température dans la partie extérieure du transformateur, cas de court circuit et huile neuve.

➤ **Huile vieillie**

Dans cette étude, le modèle précédent a été utilisé, mais les propriétés de l'huile ont été modifiées (voir Tableau II.3).

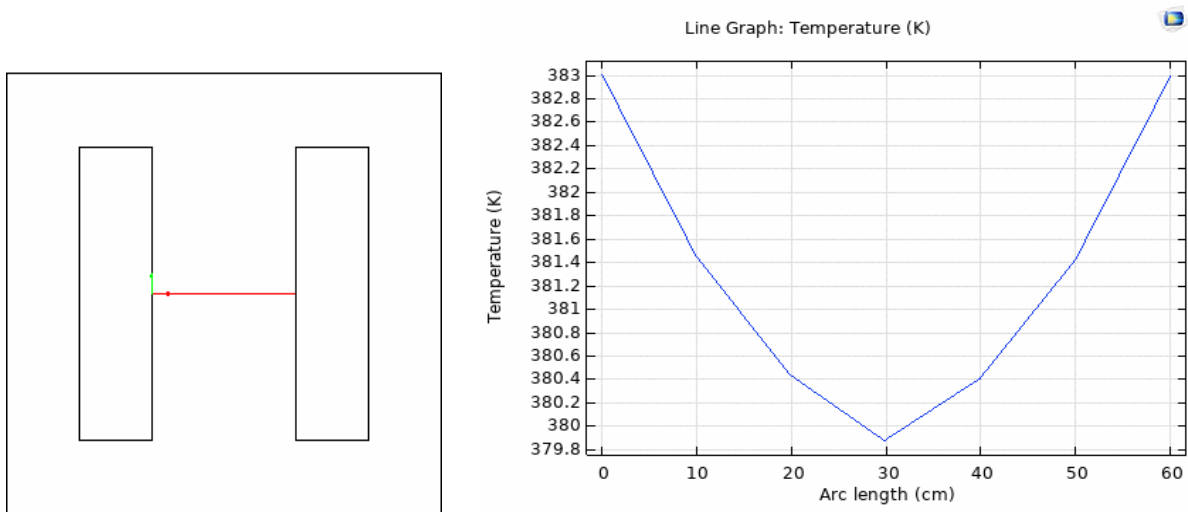
Dans les figures suivantes on représente le maillage de notre domaine d'étude ainsi que les résultats de calcul sous forme de échogramme et contour des lignes isothermiques.



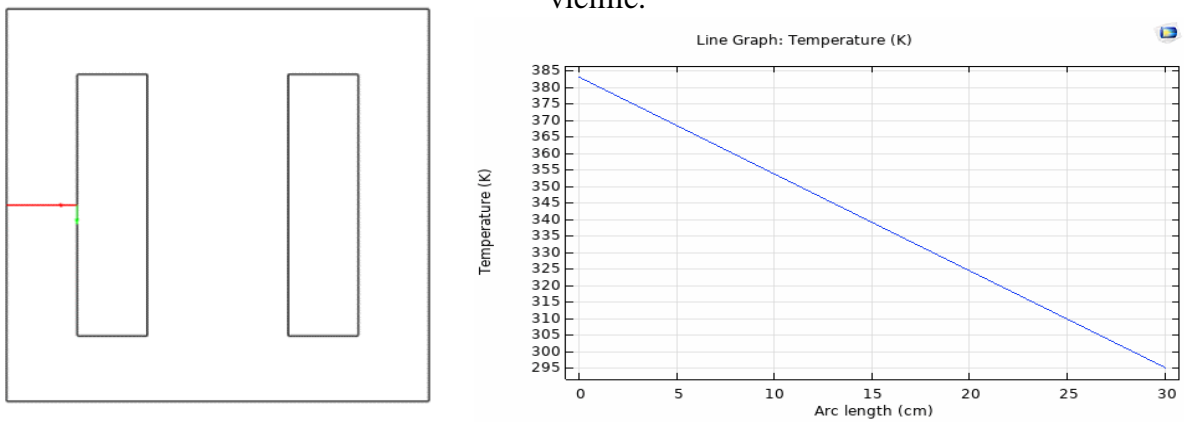


(c)

**Fig. II.31.** Distribution de la température cas de court-circuit et une huile vieillie  
(a) maillage, (b) Echogramme, (C) Contour isotherme.

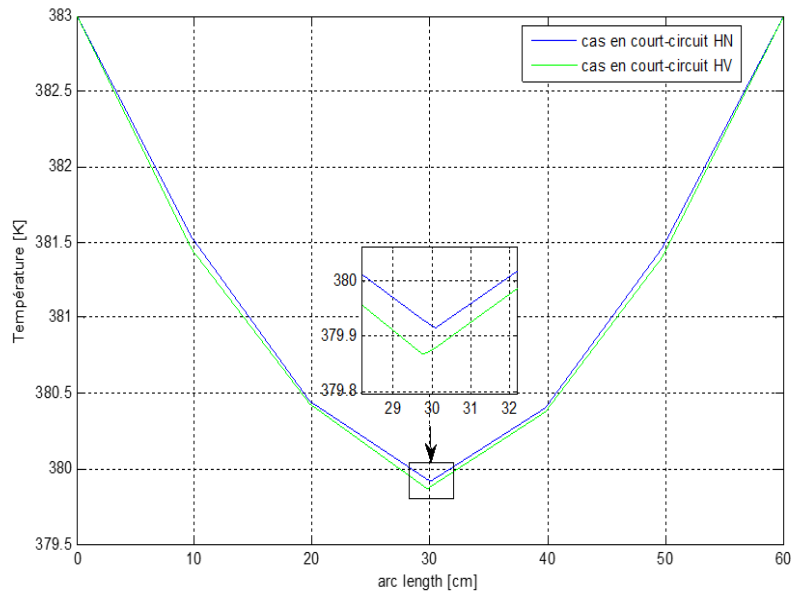


**Fig.II.32.** Le gradient de température dans le cœur du transformateur, cas de court circuit et huile vieillie.



**Fig.II.33.** Le gradient de température dans la partie extérieure du transformateur, cas de court circuit et huile neuve.

Afin de de comparer l'influence du vieillissement d'huile sur la répartition de la température et sur la fonction du transfert de chaleur dans le cas en court-circuit nous avons tracer les courbes des deux cas sur la même figure. Les figures suivantes représentent la répartition de la température dans la zone sensible du transformateur.



**Fig.II.34.** La répartition de la température entre deux enroulements dans le cas de défauts (en court-circuit) pour une huile neuve et vieillie.

➤ **Discussions**

Par rapport au cas en charge, où nous avons choisi une température de fonctionnement de 65.5 C°, on a imposé une température de 110 C° la cas d'un défaut de court-circuit. Dans le cas d'huile neuve, la courbe II.31 montre que la chaleur se propage de la source de chaleur vers les zones froides suivant un gradient de température élevée, dû au fait que les propriétés diélectriques d'huile neuve sont intactes et qu'elle est capable de transporter la chaleur plus efficacement hors du transformateur. Au contraire dans la courbe II.34 révèle à des irrégularités très léger de répartition de la chaleur en raison de la modification des propriétés d'huile. Selon l'équation de Wagner (le bilan énergétique) la vitesse de stockage de la chaleur est plus grande que la vitesse de dissipation dans ce cas. Comme résultats nous avons bien prouvé que le cas d'une huile vieillie dans les conditions de court-circuit représente un cas défavorable en termes de l'état thermique et la fonction de refroidissement par l'huile isolante.

II.5.2.2. Présence de deux cavités dans le cas de court-circuit dans huile vieillie

Les cavités remplies d'air sont omniprésentes dans le volume du transformateur durant le fonctionnement. Ces cavités seront une source de chaleur importante suite à l'activité des décharges partielles. Ces phénomènes physiques représentent des points chauds dans le volume d'huile. Aussi, des particules de métal, comme le cuivre, peuvent se présenter et affecter le processus de transfert de chaleur dû aux décharges qui peuvent survenir. Comme température, nous avons estimé qu'une décharge peut augmenter la température à 800°C (1073K). En effet, dans ce qui suit nous allons considérer le cas le plus défavorable à savoir une huile vieillie dans le cas de court-circuit en présence des cavités ou particules en cuivre dans la partie de haut risque (entre les deux enroulements).

➤ Cas d'une cavité d'air

Dans les figures suivantes on représente le maillage de notre domaine d'étude ainsi que les résultats de calcul sous forme de échogramme et contour des lignes isothermiques dans le cas de la présence de deux cavités dans différentes zones le diamètre de la cavité est de 9 μm.

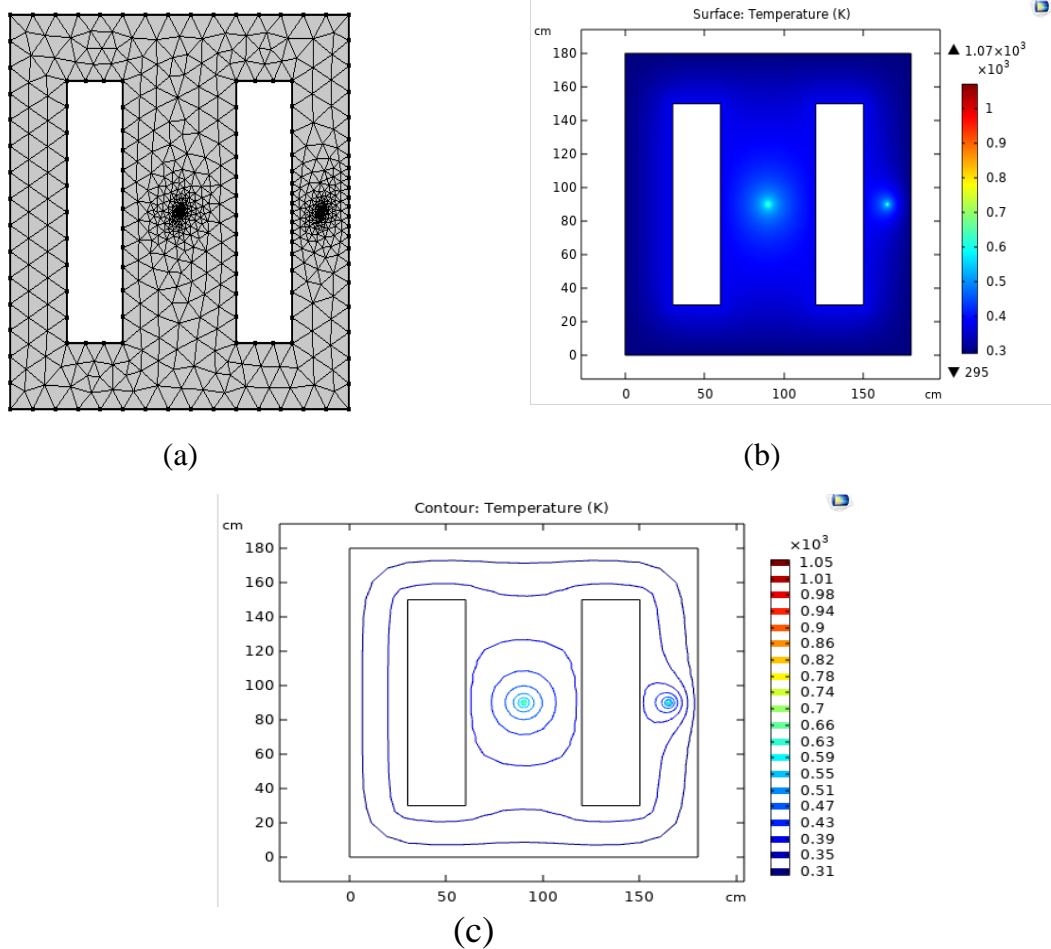
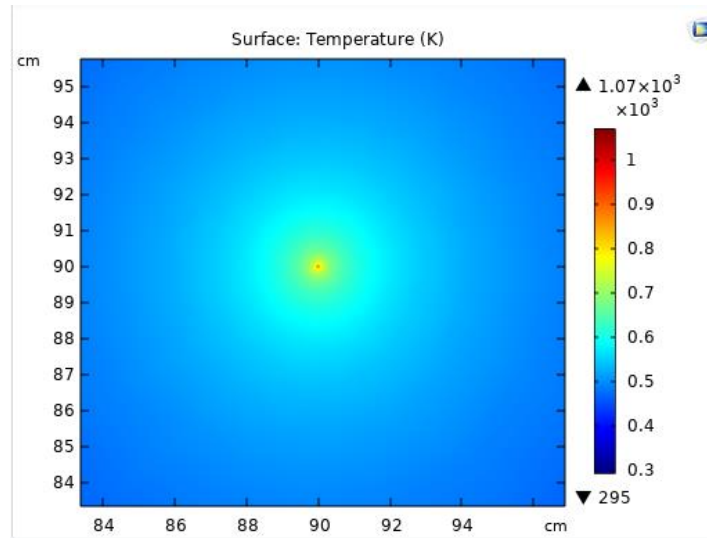


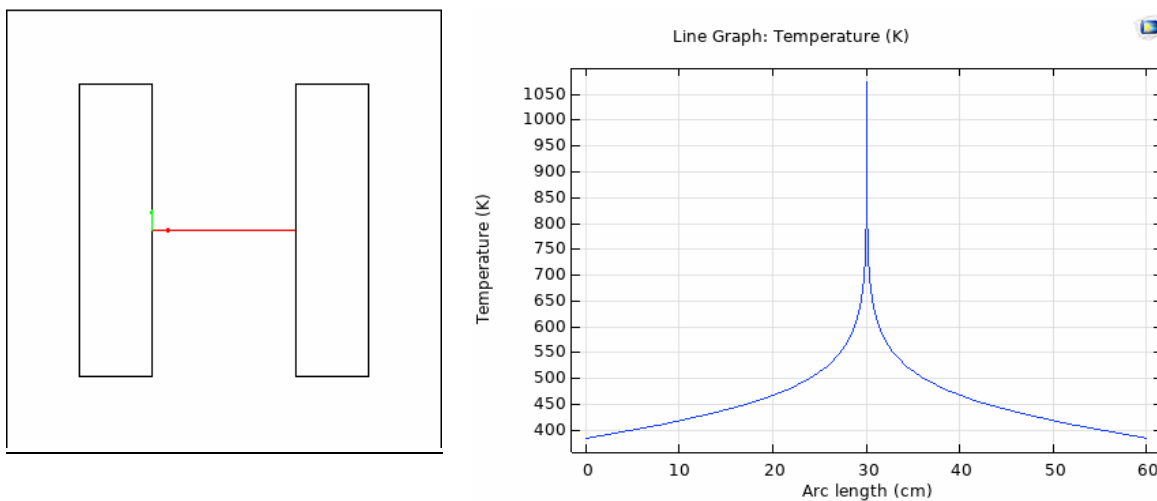
Fig.II.35. Distribution de la température cas de court-circuit et une huile vieillie en présence d'une cavité d'air de diamètre de 9 μm

(a) maillage, (b) Echogramme, (C) Contour isotherme

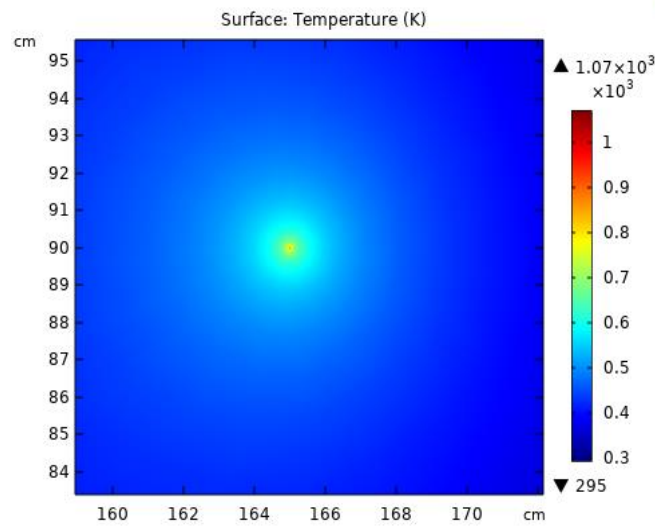


**Fig.II.36.** Distribution de la température de cavité d'air dans la partie centrale.

Dans les figures suivantes on représente la répartition de la température dans les parties isolantes du transformateur.

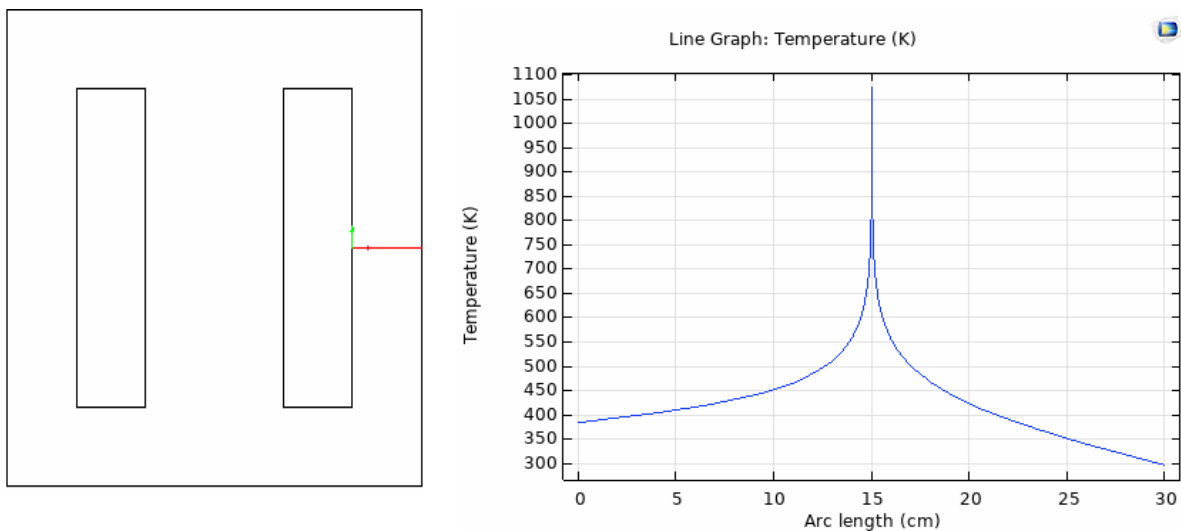


**Fig.II.37.** Courbe de la répartition de la température cas d'huile vieillie, court-circuit en présence d'une cavité de 9  $\mu\text{m}$  de diamètre dans la partie centrale



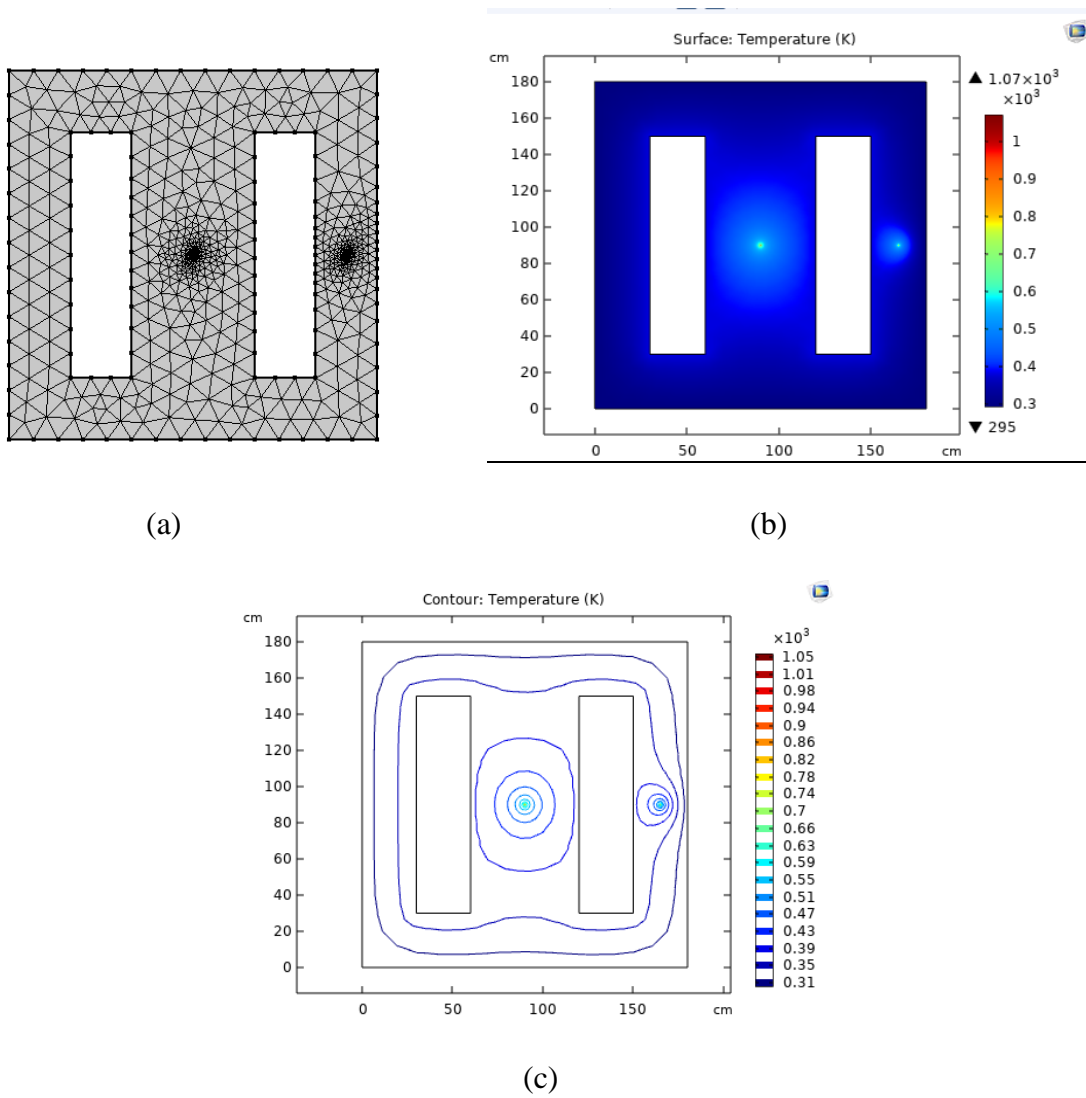
**Fig.II.38.** Distribution de la température de cavité d'air dans la partie latérale.

Dans les figures suivantes on représente la répartition de la température dans la partie isolante du transformateur.

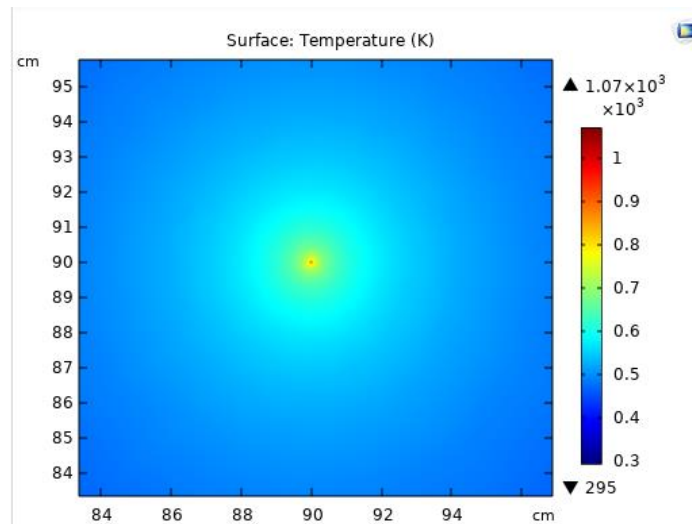


**Fig.II.39.** Courbe de la répartition de la température cas d'huile vieille, court-circuit en présence d'une cavité de 9  $\mu\text{m}$  de diamètre dans la partie latérale.

➤ Cas de présence d'une particule en cuivre

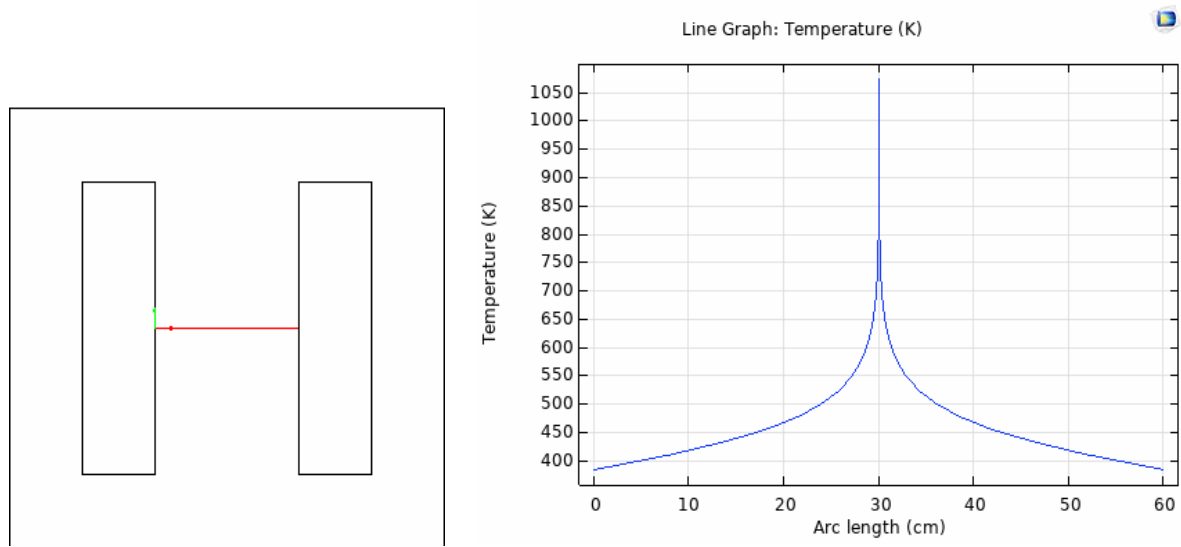


**Fig.II.40.** Distribution de la température cas de court-circuit et une huile vieillie en présence des particules en cuivre  
 (a) maillage, (b) Echogramme, (C) Contour isotherme



**Fig.II.41.** Distribution de la température au voisinage de la particule.

Dans les figures suivantes on représente la répartition de la température dans la partie isolante du transformateur.



**Fig.II.42.** Courbe de la répartition de la température cas d'huile vieillie, court-circuit en présence d'une particule dans la partie centrale

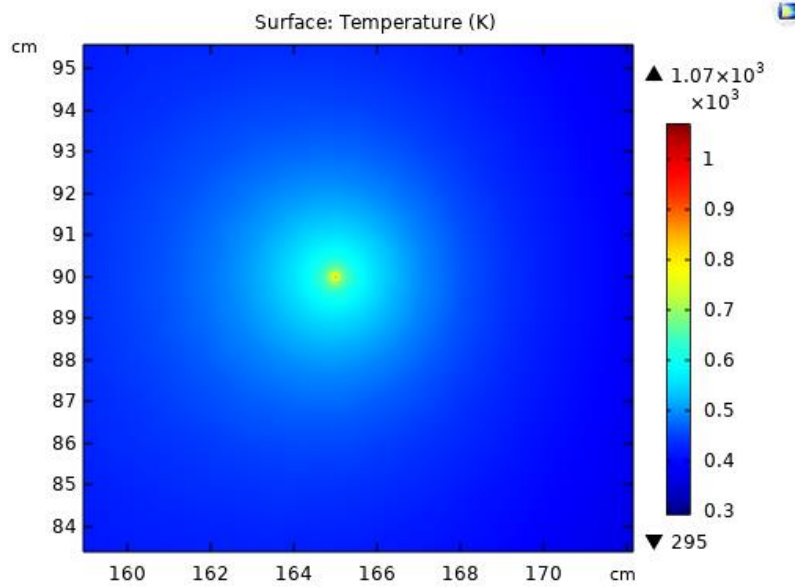


Fig.II.43. Distribution de la température dans cavité (cuivre).

Dans les figures suivantes on représente la répartition de la température dans la partie isolante du transformateur

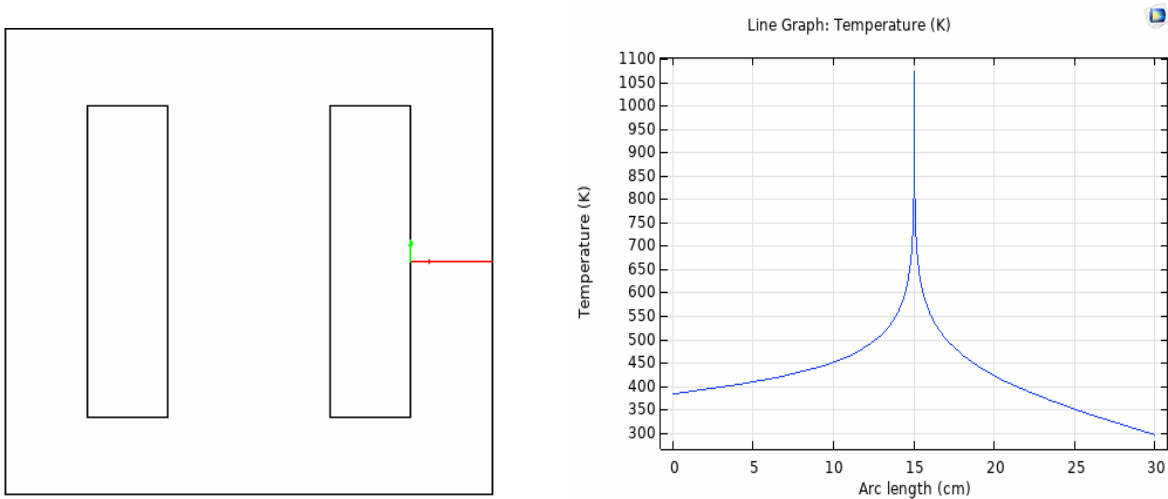


Fig.II.44. Courbe de la répartition de la température cas d'huile vieillie, court-circuit en présence d'une cavité de 9 μm de diamètre dans la partie latérale

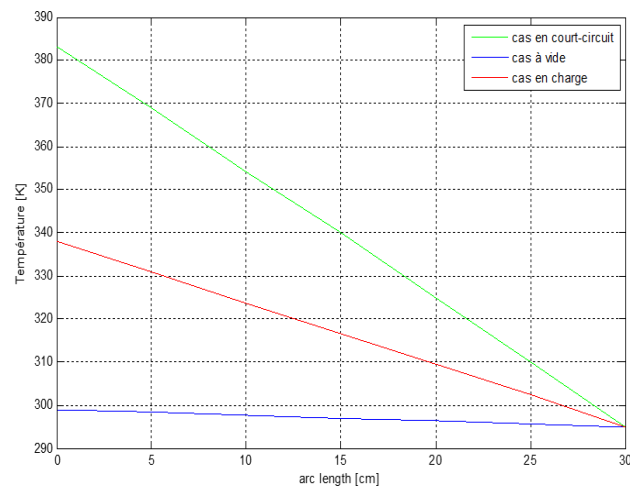
➤ **Discussion des résultats**

En comparant les deux dernières, on peut conclure que la présence d'une cavité dans la zone chaude du transformateur affecte d'avantage la fonction du transfert de chaleur traduite par une

augmentation locale de la température à proximité de la cavité. Comme résultats nous avons bien prouvé qu'une décharge dans une cavité est une source indésirable de chaleur successive.

## II.6. Comparaison de variation de la température dans les cas étudiés

Afin de comparer les résultats obtenus, nous représenterons dans ce suit la répartition de température dans le cas durant les modes de fonctionnement du transformateur à vide, en court-circuit et en charge. Aussi, en présence de défauts pour les trois cas étudiés.

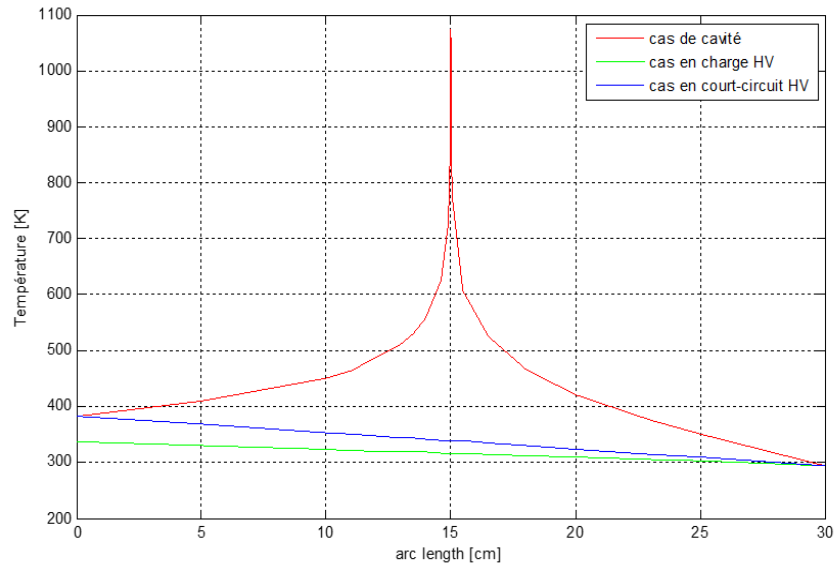


**Fig.II.45.** Gradient de température pour les trois modes de fonctionnement du transformateur.

### ➤ Discussion

Par rapport aux cas à vide et en charge et d'après la courbe il est bien clair que les soucis du transfert de chaleur sont enregistrés dans le cas de court-circuit. Ce qui représente le cas le plus défavorable.

Dans ce qui suit, on représente les trois cas les plus défavorables dans une huile vieillie, à savoir en charge, en court-circuit et en présence de cavité dans la partie la plus faible en termes de chaleur.



**Fig.II.46.** Gradient de température pour les cas les plus défavorables.

### ➤ Discussion

D'après la figure II.47, on constate que le cas le plus défavorable est celui du défaut de cavité, suivi du court-circuit, et enfin du fonctionnement en charge. Lors d'un défaut de cavité, le transfert de chaleur est le plus impacté, tandis que le court-circuit a un impact moins défavorable que le défaut de cavité. Dans le cas du fonctionnement en charge, la température est inférieure par rapport aux autres cas. Cependant, l'utilisation d'une huile vieillie entraîne une diminution de l'efficacité du transfert de chaleur.

## II.7. Simulation d'un modèle 3D du transformateur

### II.7.1. Description de logiciel AutoCAD

Le logiciel AutoCAD, créé par la société AUTODESK basée à San Raphael en Californie existe depuis 1982. Les mises à jour se sont rapidement succédées, si bien que depuis 2004, Autodesk lance une nouvelle version de son logiciel tous les ans. Il est à noter que le format natif des fichiers AutoCAD, le DWG est régulièrement modifié et offre une compatibilité uniquement ascendante. C'est-à-dire qu'il n'est pas possible d'éditer un fichier DWG créé sous une version actuelle dans une version antérieure du programme.

### II.7.2. Présentation de logiciel AutoCAD

AutoCAD, présenté ici dans sa version 2021, est une application universelle de Conception/Dessin Assisté (e) par Ordinateur. Les applications de CAO/DAO sont des outils très puissants. La vitesse et la facilité avec lesquelles un dessin peut être préparé et modifié sur un ordinateur présente un immense avantage par rapport au dessin à la main. Avec AutoCAD 2021, il est possible de créer, pour ainsi dire tout type de dessin. Il est préférable d'avoir de bonnes notions de dessin technique pour mieux apprécier les possibilités du logiciel. Ce logiciel très polyvalent permet d'effectuer la conception de divers éléments et objets en 2D et en 3D. À partir de là, vous pourrez créer vos propres plans de fabrication mais aussi des images réalistes de vos modèles en y appliquant des couleurs et des textures. Il sera également possible d'animer ces objets pour simuler le fonctionnement d'une machine ou effectuer la visite virtuelle d'une maison par exemple [42].



**Fig. II.47.** Montrent L 'interface d'ouverture du programme.

### **II.7.3. Fonctionnalités de logiciel AutoCAD**

Bien qu'il ait été développé à l'origine pour les ingénieurs en mécanique, il est aujourd'hui utilisé par de nombreux corps de métiers. Il est actuellement, selon Forbes, le logiciel de DAO le plus répandu dans le monde. C'est un logiciel de dessin technique pluridisciplinaire :

- Industrie.
- Système d'information géographique, cartographie et topographie.
- Électronique.
- Électrotechnique (schémas de câblage).
- Architecture et urbanisme.
- Mécanique [43].

### **II.7.4. Description générale de l'AutoCAD**

- AutoCAD offre un jeu d'entité pour construire vos dessins. Une entité (ou objet) est élément de dessin comme : une ligne, un arc, un texte....
- Une entité de dessin est indiquée en entrant la commande au clavier, en la choisissant dans le menu déroulant ou dans une barre d'outils.
- Il faut répondre aux messages apparaissant au bas de l'écran pour donner certains renseignements, par exemple : la position de l'entité dans votre dessin, une échelle, un angle de rotation.
- Après avoir répondu à ces questions l'entité sera automatiquement dessinée et vous pouvez alors enchaîner par de nouvelles commandes de dessin.
- AutoCAD vous permet aussi de modifier vos dessins de nombreuses façons à l'aide des commandes : effacer, déplacer, copier ...etc.
- L'organisation du dessin se fait par : la gestion par calque et l'utilisation des blocs.
- L'impression des dessins s'établit en choisissant un traceur ou une imprimante graphique [42].

II.7.5. L'environnement de travail de l'AutoCAD 2021

L'interface utilisateur représente l'aspect visuel et graphique avec lequel l'utilisateur doit se familiariser dans un premier temps. Les dernières versions d'AutoCAD offrent d'ailleurs la possibilité d'adapter l'environnement de travail aux besoins de chaque utilisateur [42].



Fig. II.48. L'interface d'utilisateur

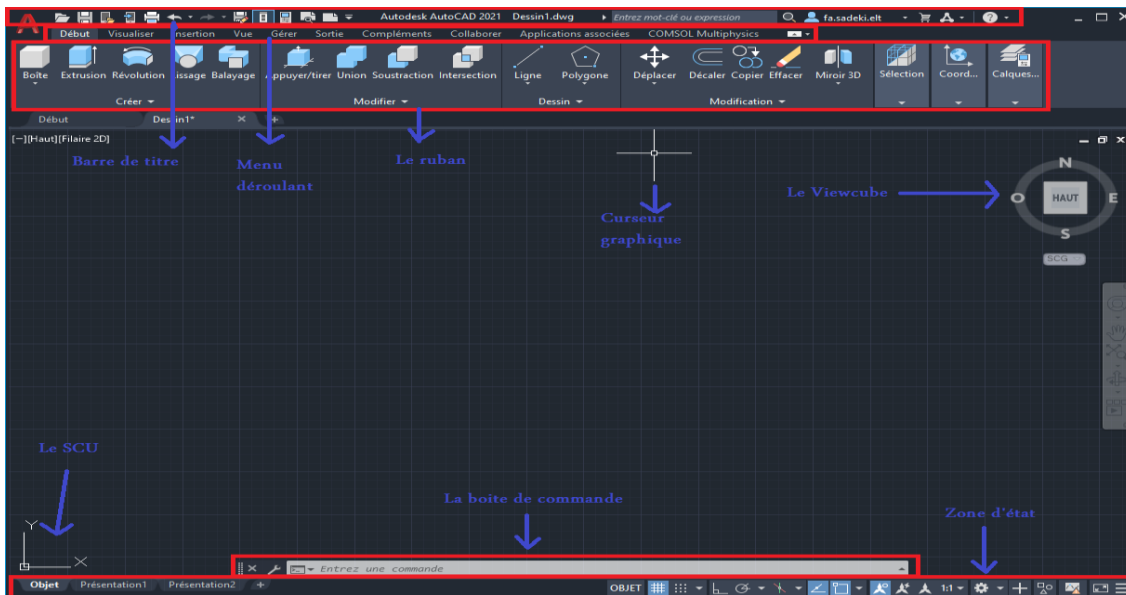


Fig. II.49. Espace de travail

Les données du transformateur sont présentées dans le tableau suivant :

Tableau. II.6. Les données du transformateur.

Caractéristique	Valeur	Unité
Tension nominale au primaire	220	V
Tension nominale au secondaire	220	V
Résistance de l'enroulement primaire	2.7	$\Omega$
Résistance de l'enroulement secondaire	2.7	$\Omega$
Courant à vide	3	A

Courant en charger	10	A
Section du fil	3.8	mm <sup>2</sup>
Fréquence d'alimentation	50	Hz
Nombre de spires au primaire	225	-
Nombre de spires au secondaires	225	-
Pulsation	314	Hz

Les dimensions géométriques du transformateur sont données dans le tableau III-1- comme suit :

**Tableau. II.7.** Données géométriques du transformateur

Signification	Valeur	Unité
Longueur extérieure de noyau	215	mm
Largeur intérieure de noyau	70	mm
Nombre de tôles	85	-
Nombre de couches au primaire	10	-
Nombre de couches au secondaire	10	-
Valeur d'isolation entre les couches	0.05	mm
Valeur d'isolation entre les tôles	0.001	mm
L'épaisseur du tôle	1	mm
Largeur extérieure de noyau	140	mm
Longueur intérieure de noyau	145	mm
Largeur du noyau latéral (droite, gauche)	35	mm
Rayon de cercle	1.75	mm
Hauteur du noyau	85.085	mm
Distance entre le noyau et la première spire (longueur)	3.62	mm
Distance entre le noyau et la première spire (largeur)	2.76	mm

## II.8. Méthodologie de dessin de la géométrie du transformateur 3D selon logiciel AutoCAD

### II.8.1 circuit magnétique

On trace notre géométrie de transformateur 3D avec dimensionnement réelle par logiciel AutoCAD 2021, on commence par le circuit magnétique d'abord on trace la première tôle de 1 mm d'épaisseur par un isolement de 0.001 mm, en suivant les étapes suivantes :

**1<sup>ère</sup> étape :** On trace une 'Boite' de longueur 215 mm et largeur 140 mm et hauteur de 1mm Puis une autre 'Boite' de longueur 145mm et largeur 70 mm et hauteur 1 mm.

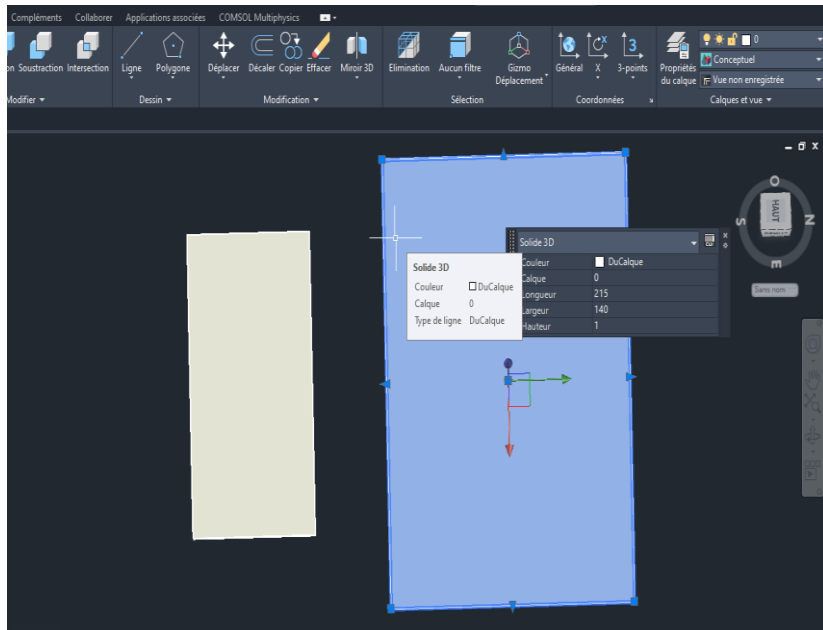


Fig. II.50. La première boite

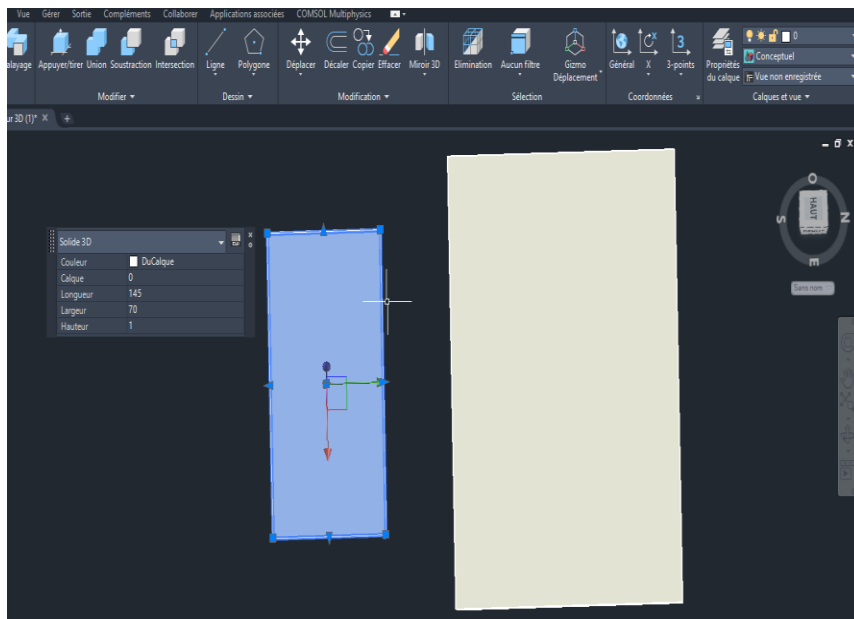


Fig. II.51. La deuxième boite.

2<sup>ème</sup> étape : On utilise l'outil de 'soustraction' pour les deux boites précédentes, on obtient la première tôle.

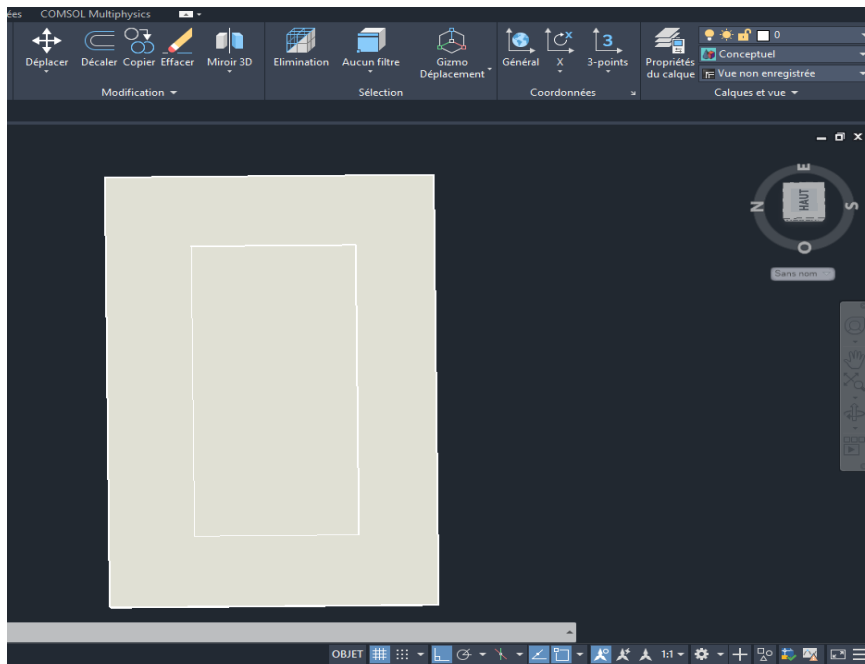


Fig. II.52. Les deux boites.

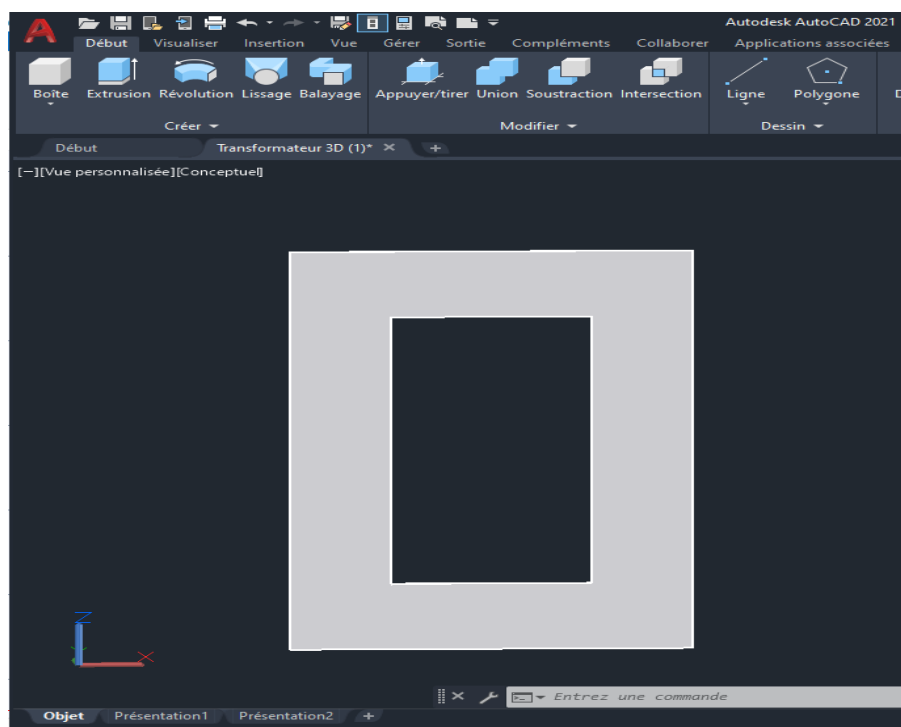
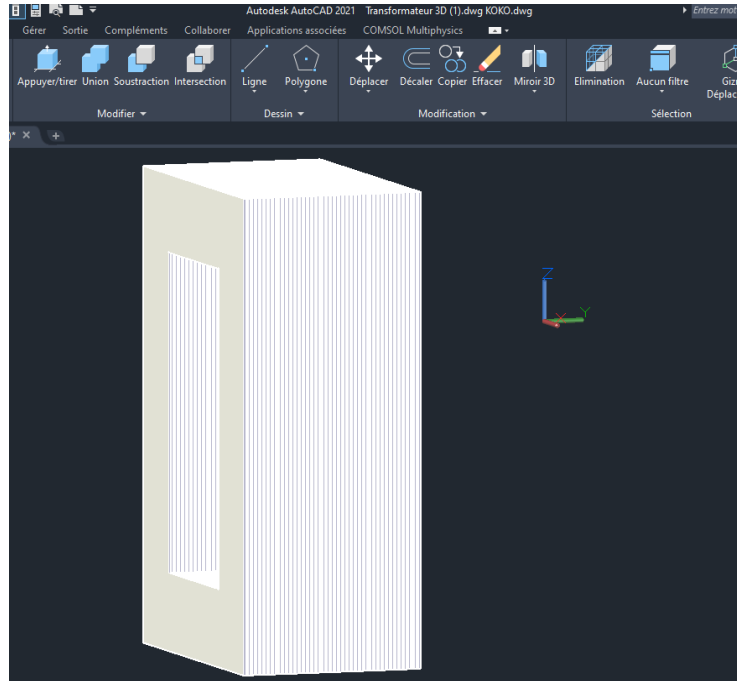


Fig. II.53. La première tôle.

**3<sup>ème</sup> étape :**

On copie ce tôle 85 fois, entre chaque deux tôles espaces de 0.001 mm, après on utilise l'outil 'union' pour faire les tôles même objet.



**Fig. II.54.** Le circuit magnétique.

**II.8.2. Le bobinage**

**II.8.2.1. La première couche**

On commence de dessiner la première couche par sa première spire, la longueur et largeur de ce dernier sont calculé comme suite :

- Longueur de spire 1 = hauteur de noyau + rayon de cercle + distance entre le noyau et la spire (longueur). (Voir Tableau II.7)

Longueur de spire 1 = 90mm

- Largeur de spire 1 = Largeur du noyau latéral (droite, gauche) + rayon de cercle + distance entre le noyau et la spire (largeur). (Voir Tableau II.7)

Largeur de spire 1 = 40mm

Puis on calcule la valeur de l'angle de rotation de la largeur de la spire

$$\Theta = \arctan\left(\frac{\text{largeur de spire 1}}{\text{rayon de cercle}}\right). \text{ (Voir Tableau II.7)}$$

$$\Theta = 2.51^\circ$$

Donc ont tracé la spire par logiciel Autocad ont utilisé l'outil 'ligne' puis ont déplacé la largeur de spire à un angle de  $2.51^\circ$  par l'outil de 'rotation'.

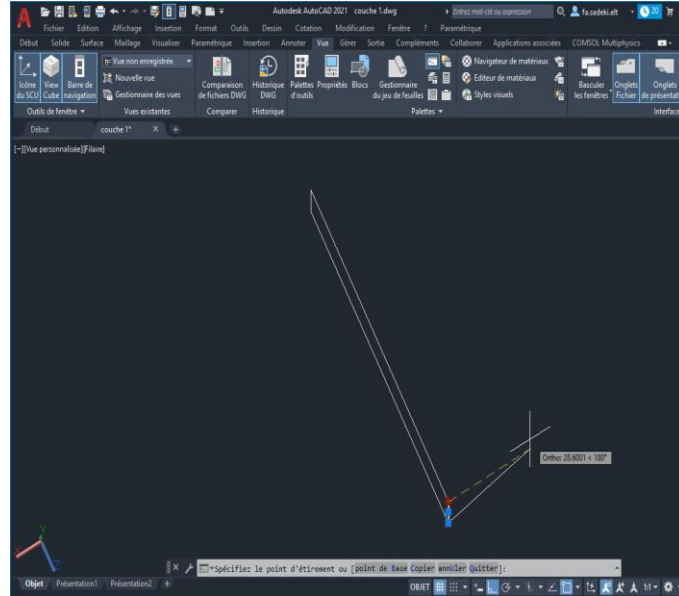


Fig. II.55. L'angle de rotation de spire.

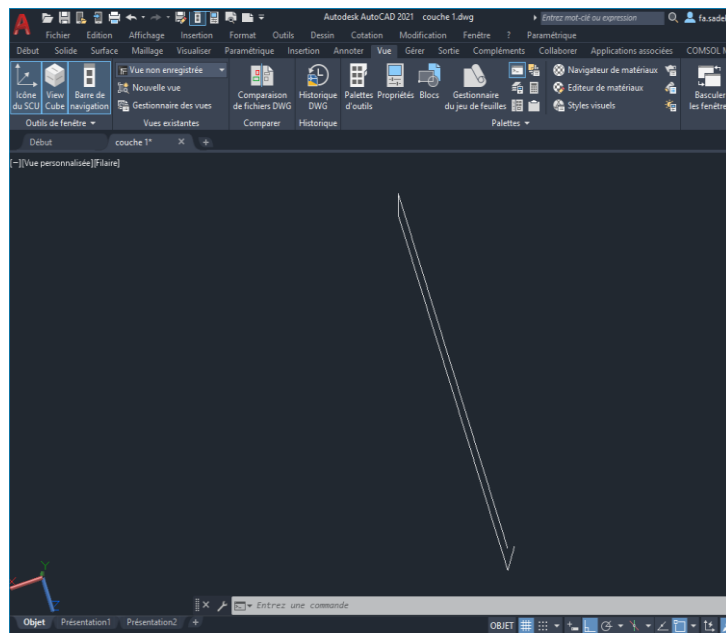


Fig. II.56. La première spire.

Puis on utilise l'outil 'joindre' pour joint les objets de spire similaire pour former un objet unique sans coupure.

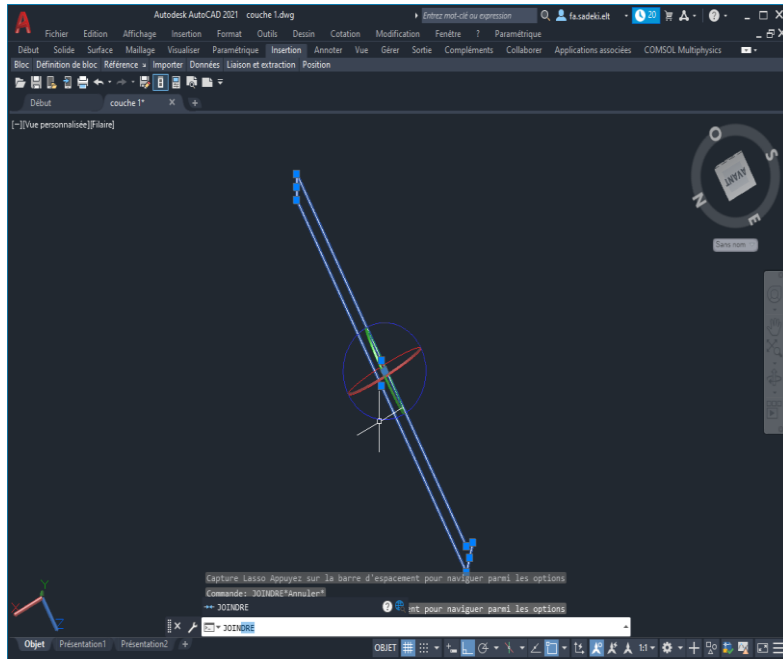


Fig. II.57. Application de l'outil joindre.

Ensuite, nous copions et collons cette spire à distance de 1.75 par l'outil 'copier la sélection', puis on répète ce processus jusqu'à ce que le nombre de spires atteigne 24.

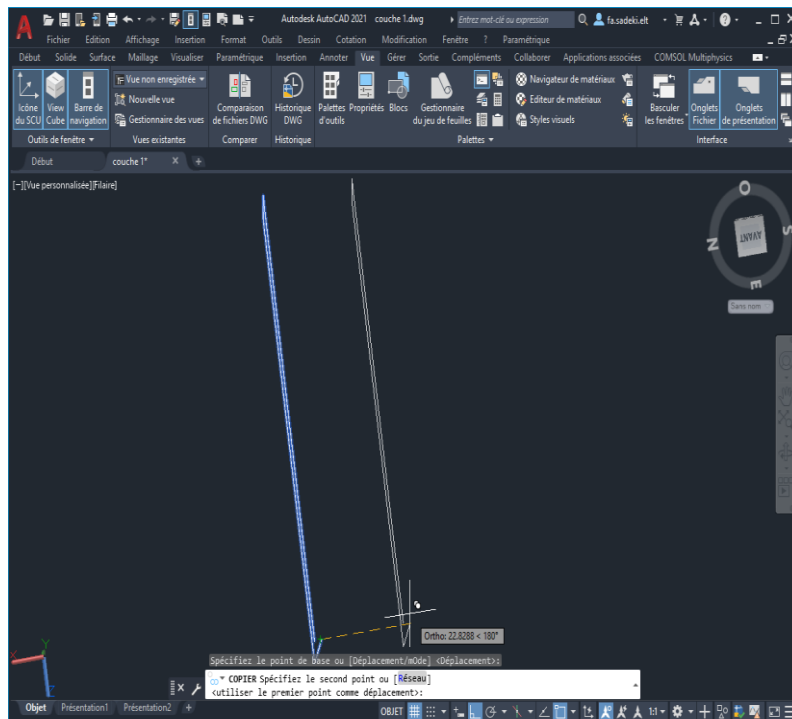


Fig. II.58. Représente la distance entre deux spires.

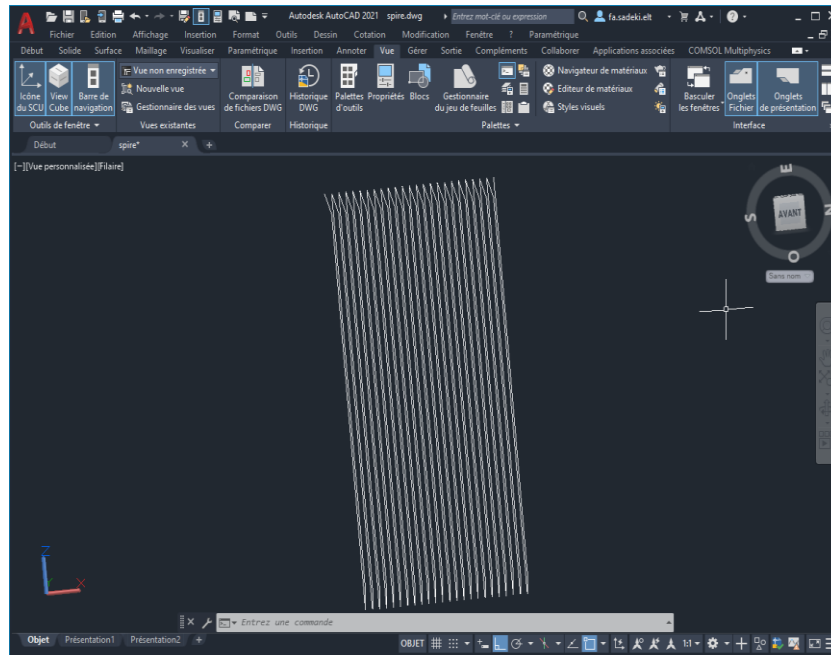


Fig. II.59. La première couche.

### II.8.2.2 la deuxième couche

- Longueur de spire 2 = Longueur de spire 1 + (2\*rayon de cercle). (Voir Tableau II.7)

Longueur de spire 2 = 93.5mm

- Largeur de spire 2 = Largeur de spire 1 +(2\*rayon de cercle). (Voir Tableau II.7)

Largeur de spire 2 = 43.5mm

Puis on calcule la valeur de l'angle auquel la largeur de la spire est tournée :

$$\Theta = \arctan\left(\frac{\text{largeur de spire 2}}{\text{rayon de cercle}}\right) \text{ (voir Tableau II.7).}$$

$$\Theta = -2.30^\circ$$

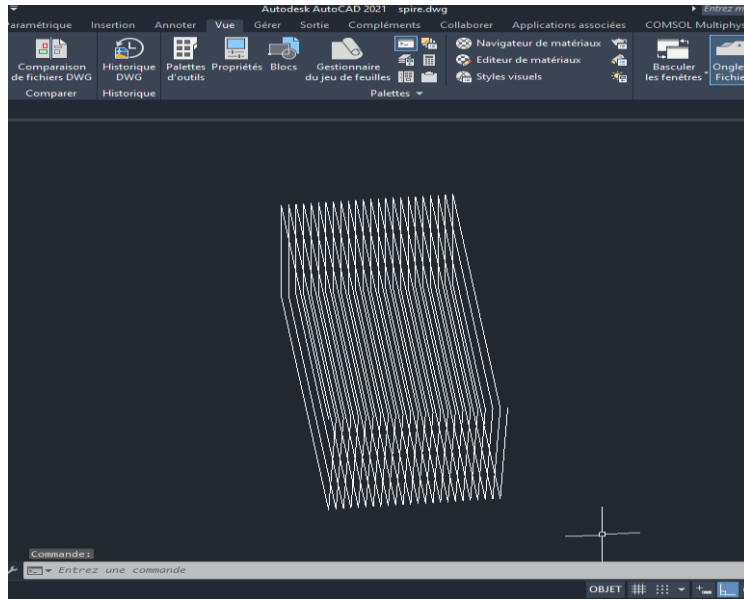


Fig. II.60. La deuxième couche.

**II.8.2.3 la troisième couche**

On continue par la même manière pour les autres couches, on calcule les dimensions des spires comme suit :

- Longueur de spire de couche (n) = Longueur de spire de couche (n-1) + (2\*rayon de cercle). (Voir Tableau II.7)
- Largeur de spire n = Largeur de spire (n-1) +(2\*rayon de cercle). (Voir Tableau II.7)
- $\Theta = \arctan\left(\frac{\text{largeur de spire } n}{\text{rayon de cercle}}\right)$  (voir Tableau II.7)

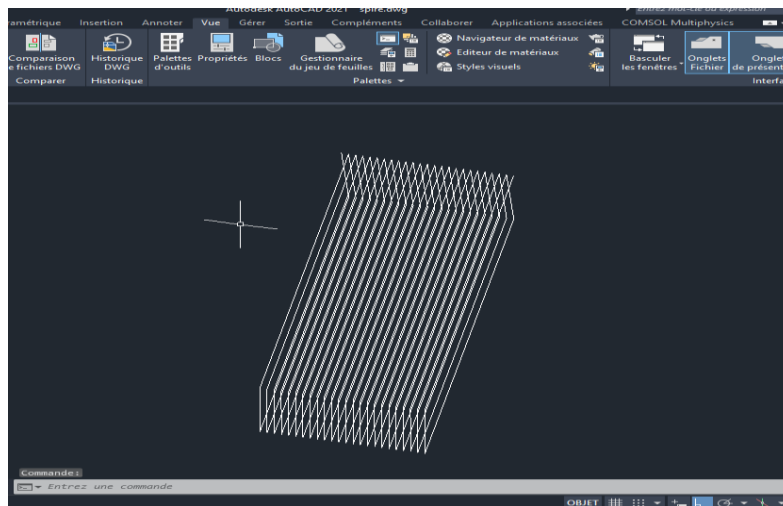


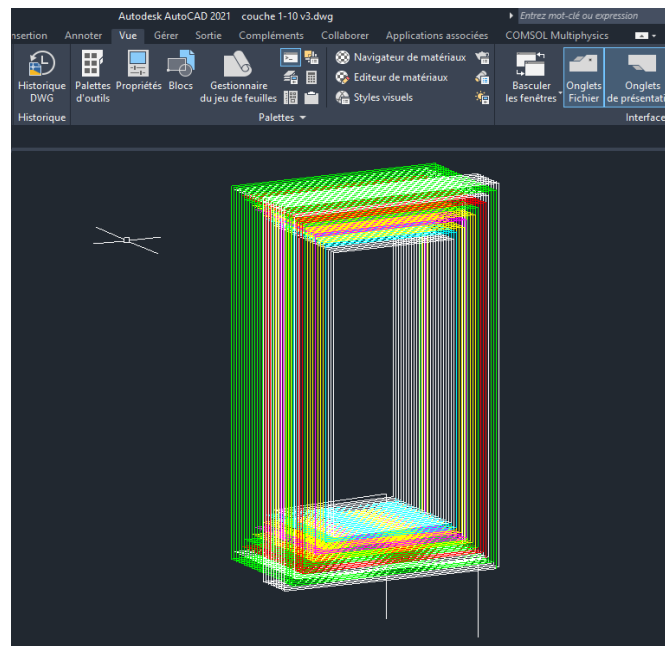
Fig. II.61. La troisième couche.

Dans le tableau suivant on représente les dimensionnement de chaque couche :

**Tableau. II.8.** Dimensionnements des spires de chaque couche.

Numéro de couche	Longueur de spire	Largeur de spire	L'angle de rotation
3	97 mm	47 mm	2.13°
4	100.5 mm	50.5 mm	-1.98°
5	104 mm	54 mm	1.86°
6	107.5 mm	57.5 mm	-1.74°
7	111 mm	61mm	1.64°
8	114.5 mm	64.5 mm	-1.55°
9	118 mm	68 mm	1.47°
10	121.5 mm	71.5 mm	-1.40°

Chaque couche contient 24 spires sauf la couche 10 contient 9 spires, puis on met si couches de 1 à 10 l'un au-dessus de l'autre entre chaque deux couches un espace de 1,75 mm.



**Fig. II.62.** Les couches de 1 à 10.

Puis on trace un cercle de rayon de 1.75 pour crée une surface de l'enroulement en balayant au long d'une trajectoire à l'aide de l'outil ' balayage'.

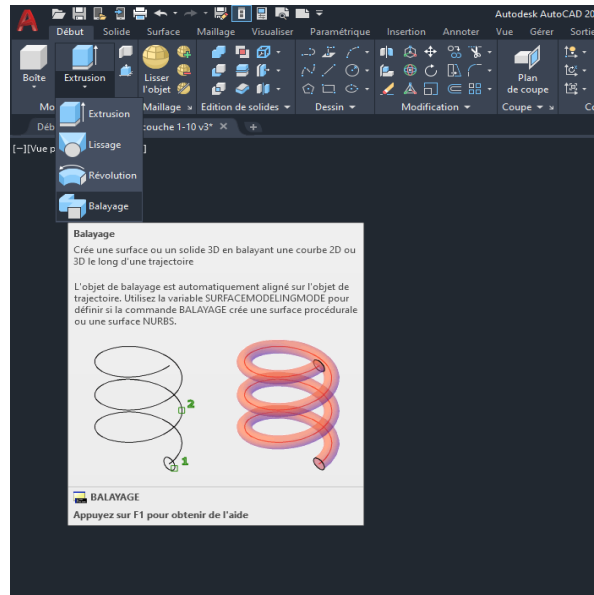


Fig. II.63. La définition de l'outil balayage.

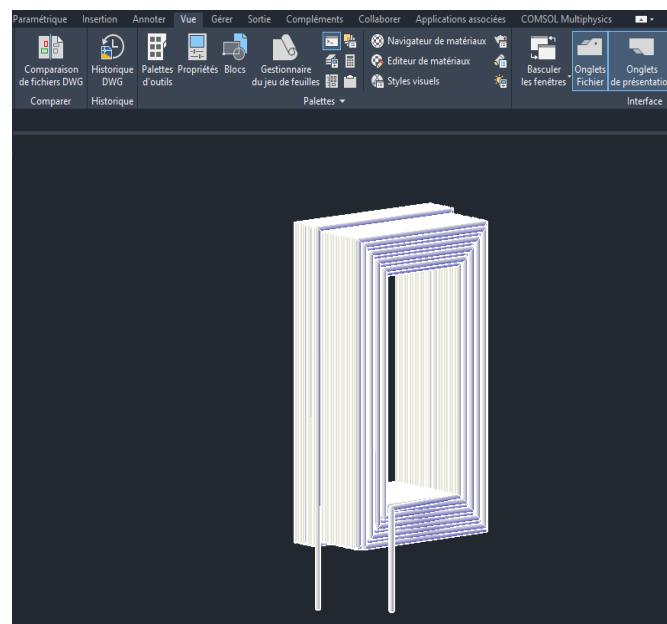


Fig. II.64. Le modèle de l'enroulement.

On copie cet enroulement 4 fois pour l'enroulement de primaire et secondaire

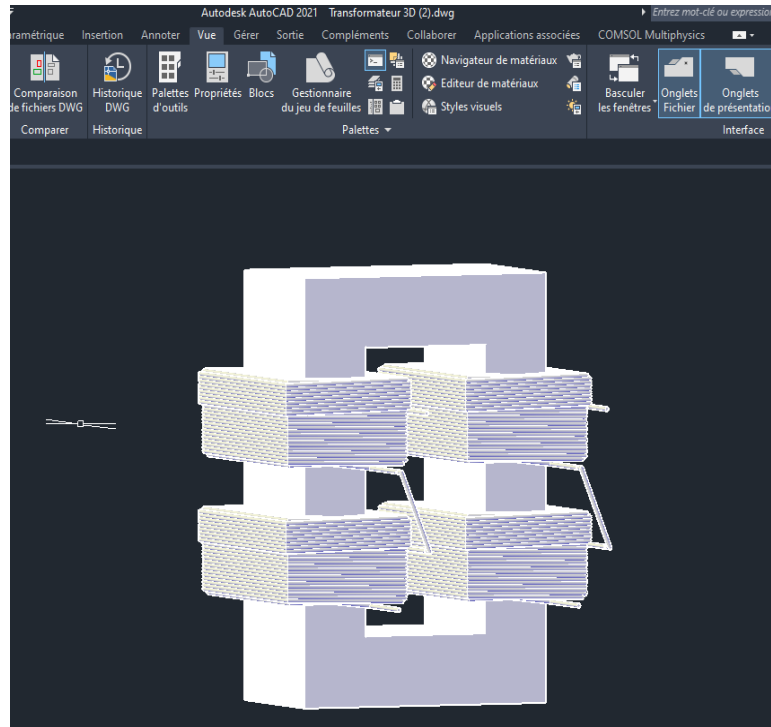


Fig.II.65. Construction de la géométrie.

## II.9. Création du modèle de simulation

### II.9.1. Choix de modèle

On choisit un modèle spatial en 3D

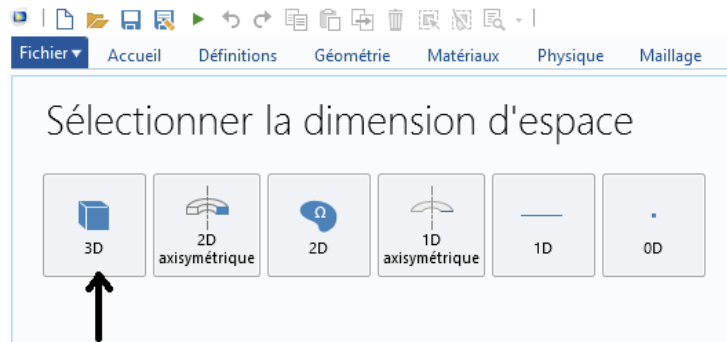


Fig. II.66. La dimension d'espace.

Après on choisit trois physiques :

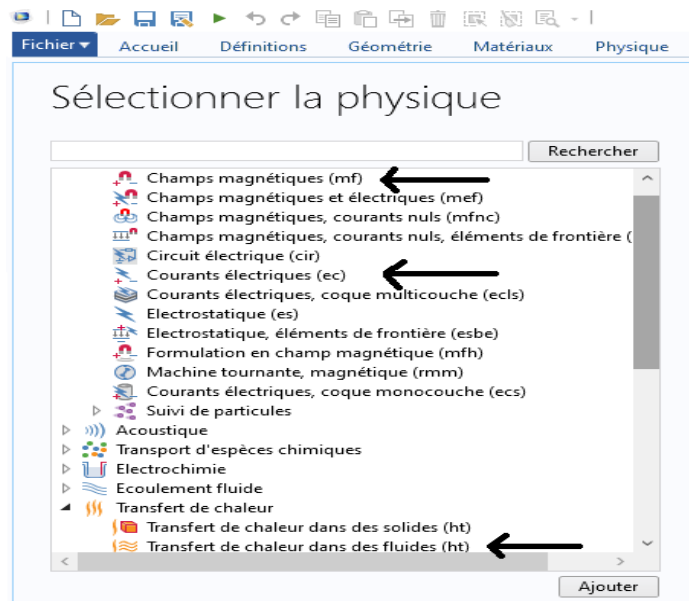


Fig. II.67. Les modèles des physiques appropriés.

### II.9.2. Géométrie

On importer le fichier CAO de notre géométrie, puis on mettre notre transformateur dans un cuve.

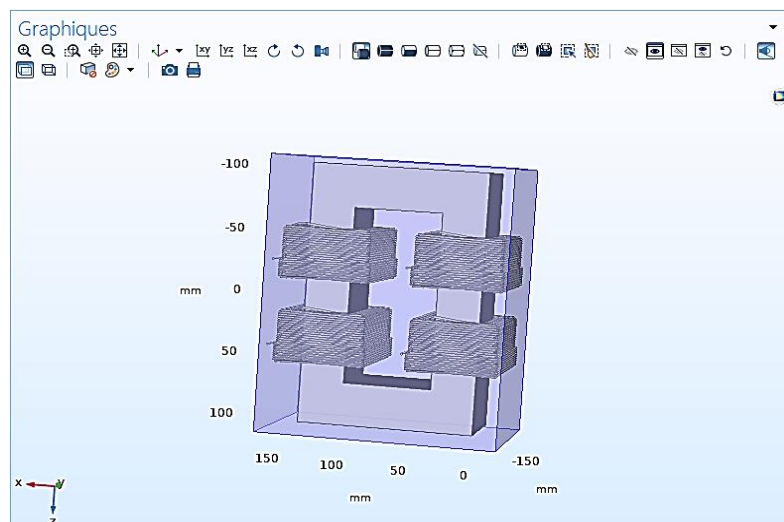


Fig. II.68. Le modèle de géométrie.

**II.9.3. Les propriétés des matériaux utilisé**

- On met le matériau l'huile dans la cuve (voir Tableau II.2).
- On met le matériau cuivre dans les enroulements.
- On met le matériau fer dans le noyau.

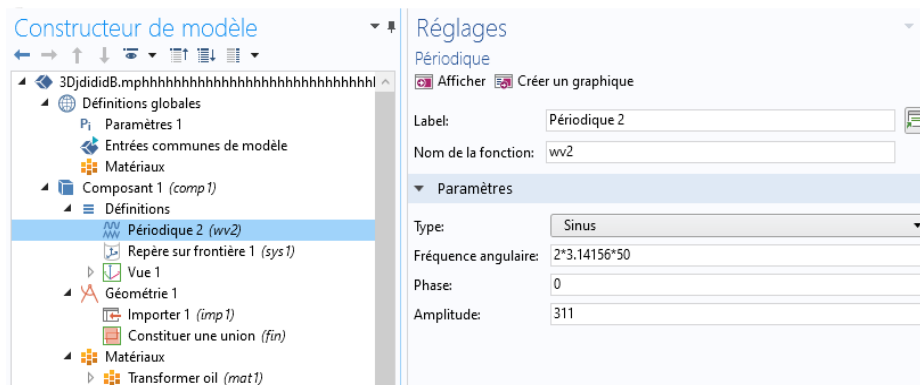
**Tableau. II.9.** Les caractéristiques de fer.

Propriété	Valeur	Unité
Capacité thermique	440	J/(kg.k)
Masse volumique	7870	Kg/m <sup>3</sup>
Conductivité thermique	76.2	W/(m.k)
Conductivité électrique	1.12e7	S/m
Permittivité relative	1	1
Perméabilité relative	4000	1

**II.9.4. Les conditions des domaines**

On doit définir la valeur de potentiel électrique circule dans l'enrouement par une fonction sinusoidal

$V(t) = V * \sqrt{2} * \sin(w * t)$ . ( voir Tableau. II.6)



**Fig. II.69.** Les paramètres de la fonction sinusoidale.

**II.9.5. Maillage des domaines**

Pour le maillage, des tailles plus fines et normales ont été utilisé

Nous avons fait la simulation avec deux stations, chacun avec ses propres caractéristiques, mais les simulations n'ont pas abouti.

La raison de l'échec de la simulation était la petite taille de la RAM de la première station, car il n'a que 64 Go. Quant à la deuxième station, il avait un gros problème de temps d'exécution dû à la faiblesse du processeur.

## **II.10. Conclusion**

La méthode des éléments finis semble présenter des avantages significatifs par rapport aux autres méthodes. Il s'adapte facilement à différentes géométries et prend également en compte les propriétés inhomogènes et non linéaires des matériaux. C'est pourquoi cette méthode a été choisie pour réaliser les différentes simulations du chapitre suivant, en utilisant le logiciel comsol pour plus de précision après la simulation.

Dans le cadre de ces recherches, nous avons travaillé sur la simulation d'un modèle simple de transformateur immergé dans huile contenant de défauts et des cavités de différents matériaux, le but ultime étant d'étudier la réparation de chaleur dans l'isolant (huile).

Cette étude nous a permis de comparer les résultats du calcul par comsol multi-physique pour juger la capacité du transformateur en termes de transfert de chaleur. La présence de cavités siège de décharge partielle affecte le processus de refroidissement accompli par l'huile isolante.

# **Conclusion générale**

## **Conclusion générale**

Les pertes dans un transformateur apparaissent sous forme de chaleur et donnent lieu à une augmentation de température (échauffement), D'où l'intérêt de la connaissance de la température maximale qu'atteignent les différentes parties du transformateur notamment celle d'huile isolante qui joue un rôle essentiel dans le transfert de chaleur en dissipant cette chaleur.

Notre travail porte sur la modélisation thermique de conséquences de quelques types de défauts dans un transformateur qui influence d'avantage la fonction du refroidissement à savoir les courts-circuits et les cavités gazeuses contenues dans le volume de l'huile isolante. Nous avons examiné, également, comment la qualité de l'huile influence la détérioration de la fonction de refroidissement du transformateur.

L'étude a été menée à l'aide du logiciel COMSOL Multi-physiques basé sur la méthode des éléments finis. Les simulations numériques ont été réalisées en configuration approximatif 2D de transformateur dans une autre démarche nous avons essayé de mener une étude en trois dimensions en utilisant le logiciel Autocad.

Le présent travail nous a permis en premier lieu d'enrichir nos connaissances sur l'importance du transformateur dans les réseaux électriques. Nous avons pu enrichir nos connaissances sur les phénomènes néfastes qui peuvent affecter la capacité de l'huile à transporter la chaleur hors du transformateur. Cette étude, nous a permis l'occasion d'établir et d'utiliser un logiciel puissant et récent comme le logiciel « COMSOL Multi-physiques ». Ce logiciel, nous a surtout permis à calculer la Capacité du Transfert de Chaleur en utilisant un modèle simplifié 2D de transformateur pour différents cas d'étude (sans défauts, avec défauts).

A la lumière des résultats obtenus nous pouvons résumer ce qui suit :

- ✓ La présence de la cavité influe considérablement sur la fonction du transfert de chaleur, elle se traduit par les points chauds.
- ✓ La présence d'une cavité dans le volume l'huile provoque des activités de décharges partielles, cela est traduit par l'augmentation locale de la température à proximité de la cavité.
- ✓ L'efficacité du transfert de chaleur dépend beaucoup de l'état de l'huile. L'huile neuve permet de transporter la chaleur efficacement, tandis que l'huile vieillie a tendance à accumuler la chaleur au lieu de la dissiper.

- ✓ Le court-circuit provoque une élévation de la température de l'huile, ce qui entraîne une dégradation plus rapide de l'huile, ce qui réduit la capacité de l'huile à transférer la chaleur vers l'extérieur.
- ✓ Le cœur du transformateur subit plus de chaleur que les autres zones.
- ✓ Les cavités créent des zones de faible conductivité thermique dans l'huile, ce qui perturbe la circulation de l'huile et réduit l'échange de chaleur hors du transformateur.
- ✓ L'huile isolante a besoin d'un temps d'exécution long pour atteindre s'échauffer.
- ✓ Le défaut le plus défavorable est celui de cavité, suivi du court-circuit, en termes de l'état thermique et la fonction de refroidissement par l'huile isolante.

À la fin nous pouvons dire qu'il est primordial de détecter, suivre et éviter ces anomalies pour assurer le bon fonctionnement du transformateur et un refroidissement efficace de l'huile isolante. Des actions préventives, comme des contrôles périodiques, des essais d'isolation et l'entretien adéquat du transformateur, doivent être appliquées pour réduire les risques d'anomalies et protéger le système de refroidissement. Cela permettra d'assurer des performances optimales, une fiabilité renforcée et une durée de vie étendue du transformateur.

En termes de perspective, nous envisagerons de continuer notre étude en considérant un transformateur réel et en trois dimensions pour simuler un transformateur dans des conditions bien représentatif par rapport à ce qui trouve dans l'industrie.

# Références

### Références

- [1] K. Simon KASSI, C. Volat, I. Fofana, M. Isabelle FARINAS, « Impact du vieillissement des huiles minérales des transformateurs de puissance sur leur capacité de refroidissement », XII<sup>ème</sup> Colloque Interuniversitaire Franco-Québécois sur la Thermique des Systèmes, Université de Sherbrooke, Québec (Canada) 2015.
- [2] HOMMADI Azzeddin et MERIGA Mohammed Bachir et GUIDA Laid, « Etude électro-Statistique du Comportement de l'huile de transformateur de puissance. », Mémoire de Fin d'Etude master académique, université d'El Oued, 2019.
- [3] AZOUAOU Sadi et SYLIA Si Fodil, « Optimisation de la construction d'un transformateur de puissance triphasé moyenne tension-moyenne tension fabriquée par Electro-Industries. » Mémoire de Fin d'Etudes, université mouloud Mammeri de TIZI-OUZOU, 2015.
- [4] ALOUACHE Oussama, MERABET Mohammed Nabil, « ETUDE ET MODELISATION DES SYSTEMES DE REFROIDISSEMENTS DES TRANSFORMATEURS », Mémoire de Fin d'Etude, Université Mohamed Seddik Ben Yahia – Jijel, Algérie, 2020,
- [5] JEAN SANCHEZ, « aide au diagnostic de défaut des transformateurs de puissance », thèse, université de Grenoble Alpes, 2011.
- [6] Youcef LAMINE, « ETUDE PAR SIMULATION DE LA SATURATION D'UN TRANSFORMATEUR DE PUISSANCE. », Mémoire de Fin d'Etudes de Master académique, université Mouloud MAMMERI de TIZI-OUZOU 2018.
- [7] AIT HAMOU Mariama et AKIL Hakima, « Effet de la température sur les propriétés du complexe huile/papier utilisé dans les transformateurs de puissance. », Mémoire de Fin d'Etudes, université Mouloud MAMMERI de TIZI-OUZOU, 2011.
- [8] MYERS, KELLY, et PARRICH, A Guide-to-Transformer-Maintenance. 1981.
- [9] « Réseau électrique », [https://fr.wikipedia.org/wiki/Réseau\\_électrique](https://fr.wikipedia.org/wiki/Réseau_électrique).
- [10] Eric Gicquel, « transformateurs\_de\_puissance\_élevés\_ ».

- [11] « Refroidissement des transformateurs grâce à des systèmes intégrant des ventilateurs et la technique de régulation de ZIEHL-ABEGG ». <https://www.ziehl-abegg.com/fr/secteurs-dactivite/transformateurs>
- [12] AOUD FATMA, LARABI FAZIA, « Calcul et dimensionnement d'un autotransformateur triphasé à trois enroulements 32MVA 230KV/121KV/38,5KV », mémoire de fin d'étude, Université Mouloud MAMMERI de TIZI-OUZOU, Algérie, 2009.
- [13] « Transformer Failures, Causes & Impact », International Conference Data Mining, Civil and Mechanical Engineering, Bali (Indonesia),févr 2015. Doi : 10.15242/ie.e0215039.
- [14] NILLY Didier, « Le diagnostic d'état des transformateurs de puissance », mémoire présenté en vue d'obtenir le diplôme D'ingénieur CNAM en systèmes électriques, Centre D'enseignements D'AIX-EN-PROVENCE, Dumas, 2017.
- [15] Jean Sanchez, Aide au diagnostic de défauts des transformateurs de puissance, THÈSE Pour obtenir le grade de DOCTEUR en Spécialité : Génie Electrique, Université de Grenoble, 2011.
- [16] Mohand BOUAKOUK, Ramdane HADJEBAR, « DES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCES », Mémoire de Fin d'Etudes de MASTER ACADEMIQUE, Université MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, Algérie, 2014,
- [17] MEZARI Naouel, « DIAGNOSTIC DES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCES », mémoire de magister en Electrotechnique, université Mouloud MAMMERI de TIZI-OUZOU,
- [18] « Court-circuit ». <https://fr.wikipedia.org/wiki/Court-circuit>.
- [19] Tahar SEGHIER, « Étude des décharges partielles et leurs influences sur l'apparition des arborescences dans la couche isolante des câbles haute tension », Université de Biskra, 2011.
- [20] Zin-Eddine Azzouz. « MODELISATION 3D D'UN TRANSFORMATEUR DE PUISSANCE. ETUDE DE SON COMPORTEMENT A HAUTE FREQUENCE », Energie électrique, Institut National Poly-technique Grenoble, 1992.
- [21] T. Lebey, « Les décharges partielles dans le diagnostic des systèmes électriques », J3eA, vol. 4, p. 003, 2005, Doi :<https://doi.org/10.1051/bib-j3ea:2005853>

[22] Yazid Hadjadj, « CONTRIBUTION AU DEVELOPPEMENT DE NOUVEAUX OUTILS PERMETTANT DE PROLONGER LA DURÉE DE VIE DES TRANSFORMATEURS DE PUISSANCE », mémoire de la maîtrise en ingénierie, université du QUÉBEC, 2010.

[23] A. BERFAS M. NEKACHE, « calcul et exploitation d'un transformateur triphasé de puissance 25/30 MVA-30kV/5,875kV », mémoire fin d'études ingénieur d'état en Electrotechnique, Université Mouloud MAMMERI, TIZI-OUZOU, 2010.

[24] Koutoua Simon KASSIn, « Étude de l'impact du vieillissement des huiles minérales et alternatives sur le refroidissement des transformateurs de puissance : Approches numériques et expérimentales », Thèse, À L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À CHICOUTIMI, 2019.

[25] Kiran Daware, "Cooling Methods of a Transformer".

[26] M. Mustapha Bordjane, « modes de transfert thermique », université Mohammed BOUDIAF, ORAN, 2017.

[27] Adrien Verschaere, « Les 3 Modes de Transfert Thermique », 2016.

[28] Asaph Palencia, « Modes De Transferts De La Chaleur », 2023.

[29] BOUDRAA Saliha, « Maintenance des transformateurs de puissance par l'analyse de l'huile - Apport de l'Intelligence artificielle », thèse de doctorat en sciences en Électrotechnique, à Université de Batna2, 2017.

[30] ABDI Seif-Eddine « influence du vieillissement thermiques sur les propriétés de l'huile de transformateur », thèse de doctorat en génie électrique, Ecole national polytechnique, 2012.

[31] Grigsby, L.L « Le manuel d'ingénierie de l'énergie électrique ». <https://crushtymks.com/fr/transformers/1524-economic-evaluation-of-transformer-losses.html>

[32] « Le coût des pertes du transformateur », <https://www.hqe.guidenr.fr/cible-4-hqe/cout-perte-tranformateur.php>

[33] Noureddine Ben Sedira, « contribution à l'étude du couplage électromagnétique-Thermique dans une charge à symétrie axiale (Étude + Simulation) » Université de Batna, 2012

[34] [www.comsol.com](http://www.comsol.com)

[35] BOUAICHA Mohammed Hadj Bachir et BENMBAREK Aissa, « Contribution à l'Etude

Décharges Partielles dans un Câble Tripolaire par le Calcul des Contraintes Electriques », Université de Laghouat, 2021.

[36] ABDELLAOUI Mohamed et TAIBI Ahmed « Simulation d'un transformateur monophasé En régime transitoire par le logiciel COMSOL-Multiphysics », Université de Biskra, 2022

[37] Kedjough Ismail Khattab Redouane « Etude, Conception et simulation d'une pompe Centrifuge », université de KASDI MERBAH, 2019.

[38] A. Kara, « Contribution à l'étude d'un modèle dynamique de contournement d'un isolateur pollué », Mémoire Magister, Dépt. D'Electrotechnique, Université de Sétif, Décembre, 2013

[39] Sleimane Nasser El Dine. « Multi-physics modeling of cooling of power transformers immersed in a ferrofluid. Electric power». Université Paris-Saclay, 2021.

[40] “Atmosphere of Earth”, [https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere\\_of\\_Earth](https://en.wikipedia.org/wiki/Atmosphere_of_Earth)

[41] Hachim SEGHIRI et Abd Rachid AKKA, « Diagnostic de la fonction isolation de câbles HT isolés par la Méthode des éléments finis » université Mohammed BOUDIAF - M'SILA.

[42] CHAREB-YSSAAD Ismahane, “Description du logiciel AutoCAD 2013, Chapitre 3, Université Aboubekr BELKAID Tlemcen.”

[43] « AutoCAD ». <https://fr.wikipedia.org/wiki/AutoCAD>