

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
جامعة عمّار ثليجي بالأغواط  
UNIVERSITÉ AMAR TELIDJI LAGHOUAT  
كلية العلوم  
FACULTÉ DES SCIENCES  
ميدان علوم المادة  
DÉPARTEMENT SCIENCES DE LA MATIÈRE



**Mémoire de Master**

**Domaine :** Sciences de la matière  
**Filière :** Physique appliquée  
**Option:** Physique

**Par :**  
**M<sup>elle</sup> :** KECIBA Maria

**THÈME**

---

**Étude numérique de l'interaction entre la puissance inductive et la puissance thermique dans les fours à induction électromagnétique d'affinage des métaux**

---

**Soutenu publiquement devant le jury composé de :**

- |                       |              |              |
|-----------------------|--------------|--------------|
| • MrGUIBADJ Abdenacer | • Professeur | • Président  |
| • MrNOUIOUA Ismaïl    | • MAA        | • Examineur  |
| • Mr NOURI Abdallah   | • MCB        | • Rapporteur |

*Année universitaire 2019 - 2020*

## *Remerciements*

*En tout premier lieu, je remercie le Bon Dieu, tout puissant, de m'avoir donné la force pour survivre.*

*Je tiens à remercier mon encadreur de mémoire, Dr NOUR Abdallah, pour son soutien et d'avoir dirigé ce travail et m'avoir fait bénéficier de son expérience et de ses précieux conseils. Ses conseils m'ont été particulièrement précieux.*

*Je tiens aussi à remercier les honorables membres de jury, le professeur GUIBADJ Abdenacer et Mr NOUIOUA Ismaïl qui ont accepté de faire partie de mon jury de soutenance de mémoire.*

*Je tiens à remercier tous les responsables au département de science de la matière ainsi que les intervenants et les professeurs responsables des enseignements.*

*Je remercie également du fond du cœur tous mes proches pour leur soutien et leur foi indéfectibles en moi.*

*À tous ceux qui m'ont aidée de près ou de loin dans la réalisation de ce travail, je vous dis*

*MERCI.*

## *Dédicaces*

*Au nom du dieu, le clément et le miséricordieux, louange à ALLAH le tout puissant. Je dédie ce modeste travail en signe de respect, de reconnaissance et de remerciement :*

*À mes parents pour leur amour inestimable, leur confiance, leur soutien, leurs sacrifices et toutes les valeurs qu'ils ont su m'inculquer.*

*À ma deuxième maman Nana, ma plus grande source de bonheur, j'espère que la vie lui réserve le meilleur pour sa douceur et sa gentillesse.*

*À mon très cher mari Hichem Badreddine : ton soutien moral m'a permis de réussir mes études.*

*À mon cher frère pour toute l'affection qu'il m'a donné et pour ses précieux encouragements.*

*À mes chères tantes pour leur patience qui me pousse vers les succès, vous êtes toujours les plus importantes dans ma vie.*

*À ma belle-famille pour leur tendresse.*

*À mes amis surtout : Aicha .y, Aicha .B, Fadia, Hanane, Fatiha, Fatima Zohra et Anfel.*

## TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	i
DEDICACES .....	ii
LISTE DES FIGURES.....	v
LA LISTE DES TABLEAUX.....	vii
ACRONYMES ET ABREVIATIONS .....	viii
INTRODUCTION GENERALE .....	1
<b>I. CHAPITRE I : PROCEDES D’AFFINAGE METALLURGIQUE PAR INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE.....</b>	<b>2</b>
I.1. INTRODUCTION .....	2
I.2. ÉTAT D’ART.....	2
I.3. PROCESSUS D’AFFINAGE PAR INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE .....	3
I.4. MATERIAUX AFFINES PAR INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE .....	3
I.4.1. LE CUIVRE METALLURGIQUE .....	3
I.4.2. L’AFFINAGE DE CUIVRE METALLURGIQUE .....	4
I.4.3. LE FER METALLURGIQUE.....	5
I.4.4. L’AFFINAGE DE FER METALLURGIQUE .....	6
I.4.5. L’ALUMINIUM METALLURGIQUE.....	7
I.4.6. L’AFFINAGE DE L’ALUMINIUM METALLURGIQUE.....	7
I.5. PROBLEMATIQUE DE L’AFFINAGE PAR INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE.....	8
<b>II. CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES FOURS A INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE .....</b>	<b>10</b>
II.1. FOUR A INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE.....	10
II.1.1. AVANTAGES DES FOURS A INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE.....	11
II.1.2. INCONVENIENTS DES FOURS A INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE	11
II.2. TYPE DE FOUR A INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE .....	11
II.2.1. FOURS A INDUCTION A CREUSET .....	12
II.2.2. FOURS A INDUCTION A CANAL.....	12
II.3. PROCESSUS DE CONTROLE INDUCTIF ET THERMIQUE .....	13
II.3.1. PARAMETRES LIES A L’INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE .....	14

II.3.2. MODELE THEORIQUE DE L'INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE :.....	16
II.3.3. MODELE THEORIQUE DE TRANSFERT THERMIQUE.....	17
<b>III. CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE DES FOURS A INDUCTION</b>	
<b>ELECTROMAGNETIQUE.....</b>	<b>19</b>
III.1. LOGICIEL MULTIPHYSIQUES COMSOL .....	19
III.2. DESCRIPTION DU MODELE UTILISE.....	19
III.3. RESULTATS DE LA SIMULATION : FOUR STANDARD SANS	
AMELIORATION.....	21
III.3.1. RESULTATS DU CAS DE CUIVRE METALLURGIQUE.....	22
III.3.2. RESULTATS DU CAS D'ALUMINIUM METALLURGIQUE .....	23
III.3.3. RESULTATS DU CAS DE FER METALLURGIQUE .....	24
III.4. RESULTATS DE LA SIMULATION : FOUR STANDARD AVEC	
AMELIORATIONS .....	25
III.4.1. DESCRIPTION DE NOUVEAU CONTROLE ET DESIGN .....	25
III.4.2. RESULTATS DU PREMIER CONTROLE : VARIATION DU COURANT	
D'ENTREE .....	27
III.4.3. RESULTATS DU DEUXIEME CONTROLE : VARIATION DU NOMBRE DE	
SPIRES .....	30
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>33</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>34</b>
<b>ANNEXES</b>	
ANNEXE A.....	I
ANNEXE B.....	II
ANNEXE C.....	III
<b>RESUME</b>	

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure I. 1 :</b>	Les minerais de cuivre sulfurés : <b>(a)</b> . La bornite $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$ et <b>(b)</b> . La chalcopryrite $\text{CuFeS}_2$	4
<b>Figure I.2 :</b>	Les minerais oxydés : <b>(a)</b> . La malachite $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ [6], <b>(b)</b> . L'azurite $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$ [7], et <b>(c)</b> . La cuprite $\text{Cu}_2\text{O}$	4
<b>Figure I.3 :</b>	Les minerais de fer : <b>(a)</b> . La magnétite $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , <b>(b)</b> . La sidérite $\text{FeCO}_3$ et <b>(c)</b> . La pyrite $\text{FeS}_2$	6
<b>Figure I.4 :</b>	Formation de matière solide dans le haut du bain liquide en fusion. Société ATRITOR, Coventry UK	9
<b>Figure II.1 :</b>	Four à induction électromagnétique <b>(a)</b> . Schéma descriptif et <b>(b)</b> . Type de four dans le marché	10
<b>Figure II.2 :</b>	Four à induction à canal	13
<b>Figure III.1 :</b>	Schéma descriptif de la géométrie du four	20
<b>Figure III.2 :</b>	Schéma du contrôle de four pour le cas standard	21
<b>Figure III.3 :</b>	Cas de cuivre métallurgique : <b>(a)</b> . Champ des flux de densité magnétique. <b>(b)</b> . Profil de la puissance dans l'épaisseur de peau de cuivre	22
<b>Figure III.4 :</b>	Cas de Cuivre métallurgique : <b>(a)</b> . Champ thermique. <b>(b)</b> . Évolution de la température maximale en fonction du temps.	22
<b>Figure III.5 :</b>	Cas de l'aluminium métallurgique : <b>(a)</b> . Champ des flux de densité magnétique, <b>(b)</b> . Profil de la puissance dans l'épaisseur de peau d'aluminium.	23
<b>Figure III.6 :</b>	Cas de l'aluminium métallurgique : <b>(a)</b> . Champ thermique, <b>(b)</b> . Évolution de la température maximale dans d'aluminium en fonction du temps	24
<b>Figure III.7 :</b>	Cas de fer métallurgique : <b>(a)</b> . Champ des flux de densité magnétique, <b>(b)</b> . Profil de la puissance dans l'épaisseur de peau de fer	24
<b>Figure III.8 :</b>	Cas de fer métallurgique : <b>(a)</b> . Champ thermique, <b>(b)</b> . Évolution de la température maximale dans le fer en fonction du temps	25
<b>Figure III.9 :</b>	<b>(a)</b> . Schéma de contrôle four amélioré, cas du courant électrique d'entrée variable. <b>(b)</b> . : Schéma de contrôle four amélioré, cas de nombre de spires variable.	27
<b>Figure III.10 :</b>	Cas de cuivre métallurgique, <b>(a)</b> . Champ des flux de densité magnétique : <b>(1)</b> pour 30% et <b>(2)</b> pour 50% de plus de courant initial.	27
<b>Figure III.11 :</b>	Cas de cuivre métallurgique. <b>(b)</b> . Profil de la puissance dans l'épaisseur de peau : <b>(1)</b> pour 30% et <b>(2)</b> pour 50% de plus de courant initial.	28

<b>Figure III.12 :</b>	Cas de cuivre métallurgique. (a). Champ des flux de densité magnétique : (1) pour $n=2$ spires et (2) pour $n=3$ spires.	30
<b>Figure III.13 :</b>	Cas de cuivre métallurgique. (b). Profil de la puissance dans l'épaisseur de peau : (1) pour $n=2$ spires et (2) pour $n=3$ spires.	30
<b>Figure A.1 :</b>	Principe de fonctionnement des bobines dans les fours à induction électromagnétique	36
<b>Figure B.1 :</b>	Schéma simplifié avec les dimensions du four à induction électromagnétique utilisée pour la simulation numérique	37

## LA LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau I.1 :</b>	Niveau d'impuretés dans les grades de cuivre après affinage	5
<b>Tableau I.2 :</b>	Niveau d'impuretés dans les grades de fer après affinage	6
<b>Tableau I.3 :</b>	Niveau d'impuretés dans les grades d'aluminium après affinage	8
<b>Tableau III.1 :</b>	Propriétés utilisées dans le calcul numérique pour les trois matériaux	21
<b>Tableau III.2 :</b>	Résultats pour les trois matériaux, cas du courant d'entrée variable.	29
<b>Tableau III.3 :</b>	Résultats pour les trois matériaux, cas de nombre de spires variable.	31
<b>Tableau C.1 :</b>	Les propriétés physiques des matériaux des éléments utilisés dans la conception et l'utilisation du four à l'induction	38

## ACRONYMES ET ABREVIATIONS

<b>5N</b>	Le degré de pureté
<b>C10100</b>	Grade de cuivre de 99.99% cuivre
<b>C11000</b>	Grade de cuivre de 99.9% cuivre
<b>C13000</b>	Grade de cuivre de 99.88% cuivre
<b>G10080</b>	Grade de fer de 99.31 – 99.7% fer
<b>G10650</b>	Grade de fer de 98.31 – 98.8% fer
<b>G10750</b>	Grade de fer de 98% fer
<b>A92011</b>	Grade de l'aluminium de 91.3 – 94.6% aluminium
<b>A92014</b>	Grade de l'aluminium de 90.4 – 95% aluminium
<b>A92017</b>	Grade de l'aluminium de 91.6 – 95.5% aluminium
<b>R</b>	La résistance électrique
$\rho_e$	La résistivité électrique
<b>l</b>	La longueur du matériau
<b>s</b>	La section transversale du passage du courant électrique.
$\rho_e$	La résistivité électrique à la température T
$\rho_{e0}$	La résistivité électrique à la température ambiante $T_0$
$\alpha$	Le coefficient de température pour chaque matériau.
$\mu$	La perméabilité magnétique en Henry par mètre
<b>B</b>	L'induction magnétique en Tesla
<b>H</b>	L'intensité du champ magnétique en ampères par mètre
<b>I</b>	La densité de courant induit dans le matériau affiné
<b>y</b>	La distance à partir de la surface du matériau affiné en direction du centre
<b>I<sub>0</sub></b>	La densité initiale de courant
$\delta$	La profondeur de pénétration du courant dans le matériau affiné
<b>J</b>	La densité du courant électrique volumique
<b>E</b>	Le champ électrique
$\rho$	La résistivité électrique
$\sigma$	La conductivité électrique du milieu mesuré
$\vec{E}$	Le champ électrique
$\vec{H}$	Le champ magnétique
$\vec{B}$	La densité de flux magnétique

$\vec{D}$	Le champ électrique
$\vec{J}$	La densité du courant volumique,
$\vec{A}$	Le potentiel du vecteur magnétique
<b>I</b>	Le courant induit
<b>e</b>	La force électromotrice
$\phi$	Le flux magnétique
<b>N</b>	Le nombre de spires
<b>T</b>	La température recherchée
$\rho$	La masse volumique du milieu
<b>c</b>	La chaleur spécifique du milieu à pression constante
<b>p</b>	La source de la chaleur thermique par effet joule inductif
$\lambda$	La conductivité thermique du milieu
<b>P</b>	La puissance induite

### **INTRODUCTION GENERALE**

Ce travail est focalisé sur l'étude de l'amélioration par simulation numérique de la configuration thermique générée par le chauffage inductif dans les fours à induction électromagnétique, type creuset, utilisé principalement dans l'industrie métallurgique pour l'affinage des matériaux impurs.

Le principe du chauffage se fait par induction électromagnétique générée par un inducteur circulaire en cuivre et qui est alimenté par un générateur électrique spécifique.

La problématique rencontrée est que la surface du matériau en fusion à l'état liquide dans le haut du four a tendance à se solidifier sous l'effet des pertes d'énergies thermiques, qui sont dues aux non-homogénéités du champ thermique dans la totalité de la charge de matériau.

Pour remédier à cette problématique, nous proposons une nouvelle conception avec un nouveau contrôle de l'inducteur électromagnétique.

Dans le premier chapitre, nous présentons une revue sur le contexte de l'utilisation des fours d'induction électromagnétique dans l'industrie métallurgique, les matériaux métallurgiques affinés par induction électromagnétique et la problématique rencontrée dans ce procédé.

Le second chapitre donne les principaux éléments qui composent les fours d'induction électromagnétique et leurs fonctionnements avec les modèles théoriques du couplage électromagnétique et thermique.

Le dernier chapitre développe la partie de simulation numérique du four d'induction électromagnétique et le logiciel utilisé.

Les simulations sont présentées en premier lieu, pour un four sous sa forme standard utilisée dans l'industrie, et en deuxième lieu, sous une forme de conception et de contrôle améliorée pour remédier à la problématique de solidification de la surface de matériau en fusion.

La simulation nous a permis de proposer une amélioration possible à réaliser selon chaque procédé et selon chaque matériau à affiner.

**CHAPITRE I :**  
**PROCEDES D’AFFINAGE METALLURGIQUE**  
**PAR INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE**

## **I. CHAPITRE I : PROCÉDES D’AFFINAGE METALLURGIQUE PAR INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE**

### **I.1. INTRODUCTION**

L'affinage métallurgique est une industrie de traitement de base pour la purification de la plupart des matériaux, elle utilise des minerais comme matière première pour produire des matériaux prêts à être utilisés par les industriels.

La plupart des matériaux dans la nature se présentent sous forme de minerai à un état impur, ils sont mélangés à d'autres éléments. Pour pouvoir les utiliser, il faut les purifier par affinage.

L'affinage est une opération qui sépare les impuretés du métal, réalisées après l'extraction de minerai, elle peut éliminer les impuretés de la matrice du matériau pour donner des produits purs jusqu'à 99,999 % (5N) [1].

Elle se fait par voie chimique au physique selon le besoin et le matériau. Pour la voie physique, le processus le plus important du procédé total la fusion thermique des matériaux traités, l'état de fusion permet d'introduire des processus de purification et d'élaboration selon la demande du marché industriel.

La méthode de chauffage le plus utilisée le plus développé, et qui a prouvé son efficacité pour avoir la fusion du matériau traité est la méthode de chauffage par induction électromagnétique.

Ce phénomène physique d'induction électromagnétique permet d'avoir un chauffage thermique par effet Joule sans contact avec le matériau en fusion, pour éviter la contamination, il est rapide, efficace, précise et reproductible et qui peut être appliquée à tous les matériaux qui ont la propriété physique d'être un conducteur électrique.

### **I.2. ÉTAT D’ART**

Le phénomène d'induction électromagnétique a été découvert par le physicien, M. Faraday en 1831 lorsqu'il a déplacé un barreau magnétique dans une bobine électrique ou il a remarqué un changement de tension du circuit [2], il en déduit les facteurs et les paramètres de contrôle de l'induction électromagnétique et le chauffage par effet Joule. En 1887 Ferrant [3] a conçu un four de fusion avec une géométrie qui lui permettait de traiter des matériaux solides ou recyclés, l'énergie développée par induction dans les matériaux par effet Joule donnait la fusion jusqu'à la température de coulée. En 1903 [3], le même principe de

chauffage a été développé avec succès par F. Kjellin, il a eu l'idée d'ajouter un canal ouvert dans la conception du four. Pour le fonctionnement du générateur, en 1918 [3] EF Northrup a breveté la conception du four à induction à haute fréquence, puis en 1927 [3] le premier four à moyenne fréquence était installé dans une usine de Sheffield en Angleterre. Depuis lors, le même principe est toujours utilisé dans la conception des fours à induction électromagnétique.

### **I.3. PROCESSUS D’AFFINAGE PAR INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE**

La méthode de l'affinage des matériaux qui transforme les minerais impurs en matériaux purs est la purification en fusion thermique. Cette méthode consiste à faire passer un métal de l'état solide à l'état liquide pour faciliter son traitement. Lors de la fusion, les matériaux, le plus souvent, sont purifiés par l'addition des oxydes spécifique pour chaque matériau en état de fusion dans des fours à induction électromagnétique. Cette méthode est utilisée aussi pour la production de la plupart des métaux, comme le cuivre, le nickel, le fer, le plomb, le magnésium, l'aluminium, etc. [4].

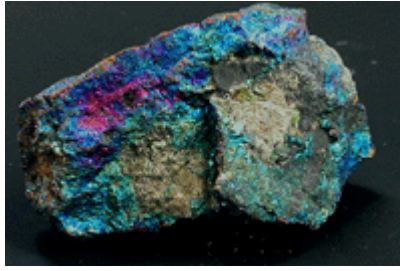
### **I.4. MATERIAUX AFFINES PAR INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE**

Pour notre travail nous avons choisi trois matériaux très importants dans l'industrie en générale dans le monde et qui utilisent le processus de fusion inductif, le cuivre, le fer et l'aluminium.

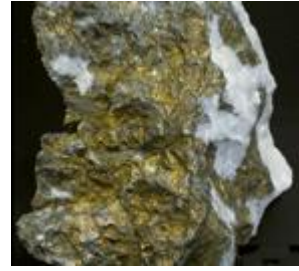
#### **I.4.1. Le cuivre métallurgique**

Le cuivre est un métal ductile et malléable, il conduit bien la chaleur et l'électricité, très utilisée dans l'industrie pour sa bonne conductivité électrique et thermique. Les minerais de cuivre les plus courants sont des minerais qui se présentent sous deux formes : les sulfures et les oxydes.

- Les sulfures sont des minerais sulfurés, ils sont constitués principalement de chalcopryrite et de bornite qui sont présentées dans la figure I.1.



(a)



(b)

**Figure I.1 :** Minerais de cuivre sulfurés : (a). La bornite  $\text{Cu}_5\text{FeS}_4$  et (b). La chalcopirite  $\text{CuFeS}_2$  [5].

- Les oxydes sont des minerais oxydés, ils sont constitués essentiellement de malachite, d'azurite et de cuprite (figure I.2).



(a).



(b).

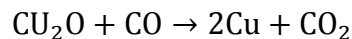


(c).

**Figure I.2 :** Minerais de cuivre oxydés : (a). La malachite  $\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$  [6], (b). L'azurite  $2\text{CuCO}_3 \cdot \text{Cu}(\text{OH})_2$  [7], et (c). La cuprite  $\text{Cu}_2\text{O}$  [8].

#### **I.4.2. L'affinage de cuivre métallurgique**

La fusion du minerai de cuivre est obtenue par des fours à induction électromagnétique. L'une des méthodes d'affinage est réalisée en injectant un gaz réducteur directement dans le bain liquide du minerai de cuivre en fusion par induction électromagnétique, la réaction produite dans le bain est la suivante :



Après traitement, les grades (les spécifications d'impuretés) de cuivre qui sont obtenus, selon les producteurs ils peuvent être résumés dans le tableau suivant :

**Tableau I.1 :** Niveau d'impuretés dans les grades de cuivre après affinage [9].

Les grades de cuivre métallurgique			
Éléments	C10100 %	C11000 %	C13000 %
Cu	99,99 Min	99,9 Max	99,88 Max
Pb	0,0005Min		0,004 Min
Zn	0,0001Min		
Fe	0,001 Min		
P	0,0003Min		
Ag	0,0025Min		0,085 Max
As	0,0005Min		0,012 Min
O	0,0005Min	0.005à0.04	
Sb	0,0004Min		
Te	0,0002Min		0,025 Min
Ni			0,05 Min
Bi			0,003 Min

Il est essentiel de connaître les niveaux de concentration des impuretés, car ils modifient les propriétés physiques du matériau, comme la conductivité thermique et la conductivité électrique.

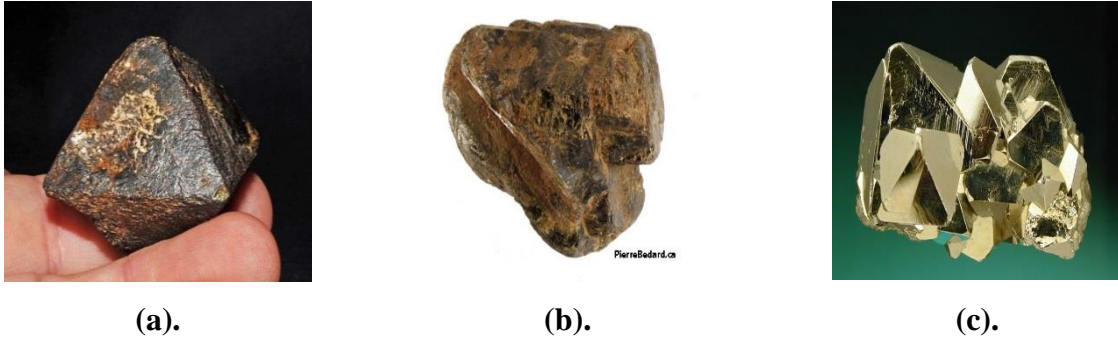
Par exemple, le phosphore dans le grade C10100 réduit la conductivité thermique du cuivre, ce qui est indésirable lorsque le cuivre est utilisé dans des applications de chauffage.

Ces impuretés peuvent aider à déterminer les types de propriétés que nous souhaitons avoir dans le cuivre après fusion, ils peuvent également aider à décider les types d'éléments d'alliage qui peuvent être ajoutés sans affecter les autres propriétés du cuivre.

### **I.4.3. Le fer métallurgique**

Le minerai de fer est classé parmi les premiers. C'est un matériau ferromagnétique, il se combine avec l'oxygène et le carbone, formant des minerais d'oxyde et de carbonate de fer.

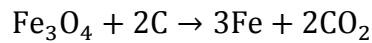
Les minerais de fer sont : la magnétite constituée de 70 % de fer, la sidérite constituée de 48 % de fer et la pyrite de 46 % de fer. (Figure I.3).



**Figure I.3 :** Les minerais de fer : **(a).** La magnétite  $Fe_3O_4$  [10], **(b).** La sidérite  $FeCO_3$  [11] et **(c).** La pyrite  $FeS_2$  [12]

#### I.4.4. L'affinage de fer métallurgique

En affinage métallurgique, en ajoutant le carbone avec la magnétite dans le four de fusion par induction on obtient un fer quasiment pur d'après la réaction suivante :



Selon les procédés et les producteurs, il existe plusieurs types de grades de fer, quelques exemples sont présentés dans le tableau suivant :

**Tableau I.2 :** Niveau d'impuretés dans les grades de fer après affinage [13].

Les grades de fer métallurgique			
Éléments	G10080 %	G10650 %	G10750 %
Fe	99.31 – 99.7	98.31 – 98.8	98
Mn	0.3 – 0.5	0.60 - 0.90	0.40 – 0.70
C	0.1	0.60 – 0.70	0.70 – 0.80
S	0.050 Max	0.050	0.050 Max
P	0.040 Max	0.040	0.040 Max

Pour chaque grade, chaque quantité d'impuretés va changer les caractéristiques de fer, ils peuvent modifier les propriétés mécanique, physique, chimique, ou électrique de produit final.

Comme exemple, dans le grade G 10080 la conductivité thermique est la plus élevée parmi les aciers avec une faible conductivité électrique. Par contre, le grade G 10650 donne une conductivité électrique plus élevée.

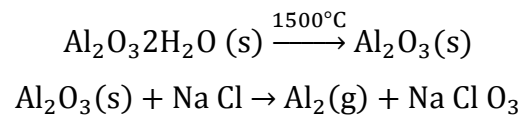
#### **I.4.5. L'aluminium métallurgique**

L'aluminium est un élément très abondant dans la terre, il est le deuxième le plus utilisé à cause de sa bonne conductivité thermique et électrique. Il est fragile et mou comme le cuivre.

On le trouve dans la nature sous forme de minerais comme la bauxite, le corindon, le feldspath, la cryolite, l'alunite et la kaolinite etc.

#### **I.4.6. L'affinage de l'aluminium métallurgique**

Comme exemple, en traitant la bauxite en fusion dans un four à induction électromagnétique il est possible d'obtenir de l'aluminium quasiment pur à partir des deux réactions suivantes :



D'après les réactions, les molécules d'eau se vaporisent, puis on ajoute le chlorate de potassium pour qu'il réagisse avec l'oxyde d'aluminium en fusion pour finalement obtenir un aluminium quasiment pur.

Le même principe, les impuretés influencent la qualité des matériaux. Comme exemple, la composition d'aluminium A92011 contient des quantités de cuivre (Cu) et de plomb (Pb).

Dans cette situation, le cuivre est utilisé pour améliorer la résistance à la corrosion et à la soudabilité, et le plomb est utilisé pour améliorer l'usinabilité au prix de la toxicité et la diminution de la soudabilité.

Dans le marché, il existe plusieurs types de grades d'aluminium, le tableau suivant donne un exemple des grades qui existent :

**Tableau I.3 :** Niveau d'impuretés dans les grades d'aluminium après affinage [13]

<b>Les grades d'aluminium métallurgique</b>			
Éléments	A92011 %	A92014 %	A92017 %
Al	91.3 – 94.6	90.4 – 95	91.6 – 95.5
Cu	5 – 6	3.9 - 5	3.5 – 4.5
Pb	0.2 – 0.6		
Bi	0.2 – 0.6		
Fe	0.7 Max	0.7 Max	0.7 Max
Si	0.4 Max	0.5 – 1.2	0.2 – 0.8
Zn	0.3 Max	0.25 Max	0.25 Max
Mn		0.4 – 1.2	0.4 – 1
Mg		0.2 – 0.8	0.4 – 0.8
Zr		0.2 Max	
Ti		0.15 Max	0.15 Max
Cr		0.1 Max	0.1 Max
Résidus	0.15 Max	0.15 Max	0.15 Max

### **I.5. PROBLEMATIQUE DE L’AFFINAGE PAR INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE**

Dans la conception des fours à induction électromagnétique, la composante responsable des courants induits dans le matériau traité est la bobine.

Cette bobine est sous forme cylindrique fabriquée par un tube de cuivre de forme standard.

Le choix des dimensions de la bobine est en relation avec la puissance utile dans les opérations d'affinage.

La hauteur de la bobine doit être égale ou supérieure à la hauteur de la charge pour avoir un couplage inductif sur la surface totale du matériau traité. Malgré ces précautions de fabrication, il est possible d'avoir la problématique de la solidification de la surface du matériau en fusion dans le haut du four, comme est le cas dans la figure I.4 pour l'affinage de l'acier.



**Figure I.4 :** Formation de matière solide dans le haut du bain liquide en fusion. D'après la société ATRITOR, Coventry UK.

Cette problématique est due aux effets de perte d'énergie thermique par le haut du four, qui est dû aux non-homogénéités du champ thermique dans la totalité de la charge de matériau en fusion et qui est en relation avec les courants électriques induits par l'inducteur électromagnétique. Pour remédier à cette problématique, nous proposons une nouvelle conception et un nouveau contrôle de l'inducteur électromagnétique.

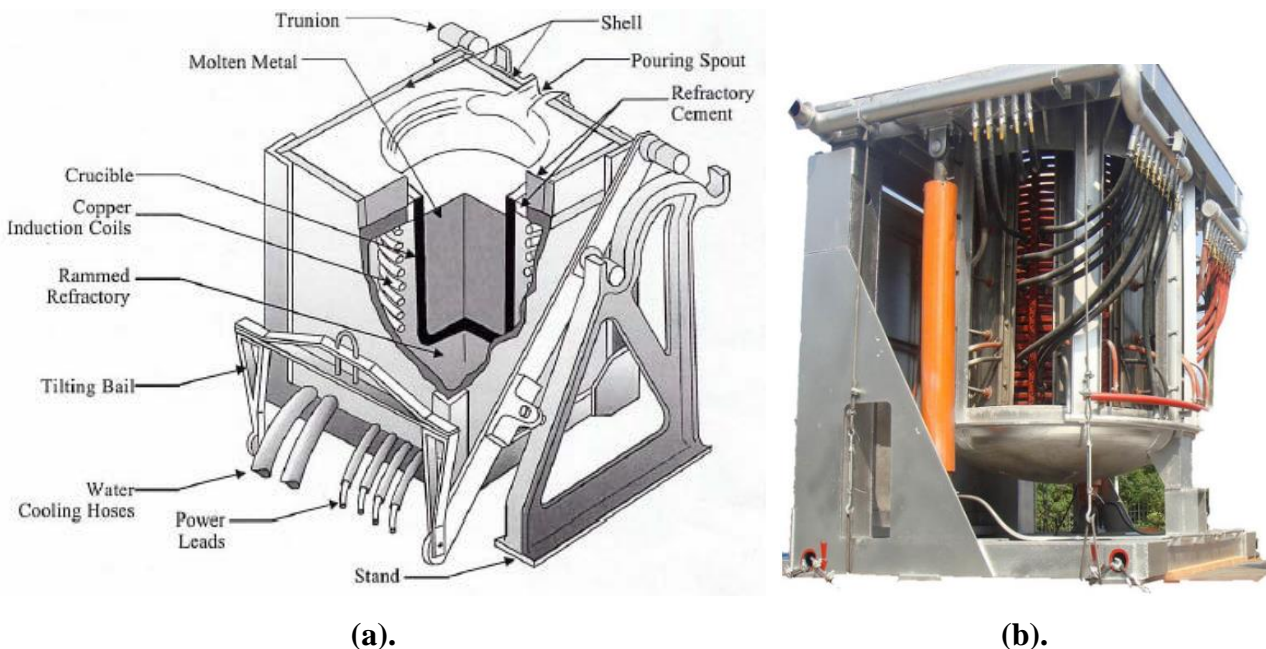
**CHAPITRE II :**  
**CARACTERISTIQUES DES FOURS A**  
**INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE**

## CHAPITRE II : CARACTERISTIQUES DES FOURS A INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE

### II.1.FOUR A INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE

Dans le cas de notre travail, pour obtenir un métal quasiment pur on a besoin d'un affinage physicochimique pour éliminer ou contrôler les impuretés indésirables.

Pour réaliser cette tâche, il faut utiliser un four qui ne contamine pas le matériau, les fours à induction électromagnétique sont les mieux adaptés. Pour avoir une idée de la conception de four à induction, la figure II.1 représente un schéma descriptif :



**Figure II.1:**Fours à induction électromagnétique (a).Schéma descriptif [14] et (b).Exemple d'un grand four dans le marché [15].

Généralement, dans la conception des fours on trouve un creuset cylindrique pour contenir le matériau en fusion, ce creuset est construit d'un matériau réfractaire qui peut résister à des températures hautes et il a la capacité d'éliminer les pertes de chaleur et le couplage avec le champ électromagnétique. Autour du creuset, il y a une bobine cylindrique en tube de cuivre refroidi avec un circuit d'eau et qui est alimentée par une alimentation en courant alternatif.

Le passage du courant dans la bobine génère un champ magnétique qui va induire des courants induits dans le métal qui se trouve dans le creuset, le matériau chauffera par effet Joule sans contact avec la source d'énergie.

### **II.1.1. Avantages des fours à induction électromagnétique**

Dans ces fours, l'induction permet :

- Une transmission plus rapide de la chaleur par rapport aux fours thermiques traditionnelle.
- Un chauffage efficace des endroits inaccessibles, comme les morceaux de métal, encastrés dans d'autres matériaux non conducteurs.
- Des économies considérables dans les espaces d'installations comparés aux fours traditionnels, avec une faible perte d'énergie par dissipation par radiation thermique.
- De meilleures conditions de travail par rapport aux installations des fours traditionnelles.
- Une rentabilité plus importante, conditionnée par une faible perte d'énergie.

### **II.1.2. Inconvénients des fours à induction électromagnétique**

Le principal inconvénient est lié au phénomène physique d'induction électromagnétique, n'importe quel matériau conducteur électrique est susceptible d'interagir avec le champ électromagnétique. Pour éviter ce couplage, on utilise un refroidissement contenu par eau des parties de fours.

Le deuxième inconvénient est lié aux coûts d'acquisition des fours qui est élevée, surtout pour les fours de forte puissance. Le troisième inconvénient est lié à l'environnement électromagnétique, des champs électromagnétiques peuvent apparaître ce qui peut perturber l'environnement sans protection.

## **II.2. TYPE DE FOUR A INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE**

Deux types de fours sont les plus utilisés, le premier four est un four à creuset (figure II.1), il est largement utilisé, car il est très simple dans son fonctionnement et il peut être appliqué à la plupart des matériaux métallurgiques.

Le deuxième four, est un four à canal (figure II.2), c'est un four spécifique, il est équipé d'un canal interne qui permet la recirculation et la chauffe en contenu du matériau en fusion dans le four, il a un fonctionnement compliqué et il est utilisé pour des matériaux spécifiques.

### **II.2.1. Fours à induction à creuset**

La plupart des fours à induction à creuset sont constitués d'une enveloppe en acier spécifique, qui est équipé d'un mécanisme d'inclinaison, le plus souvent hydraulique (figure II.1).

Le four comprend un creuset en réfractaire cylindrique, dont le sommet est ouvert pour les opérations de production.

Une bobine électrique hélicoïdale en cuivre refroidie à l'eau et montée à l'intérieur de la structure autour du creuset.

Ils sont classés selon la fréquence du courant alternatif appliqué, il y a des fours de fréquence de ligne qui sont exploités à 50 Hz et il y a aussi les fours de fréquence moyenne qui peuvent être exploités à partir de 150Hz jusqu'à 1500Hz, et les fours de haute fréquence.

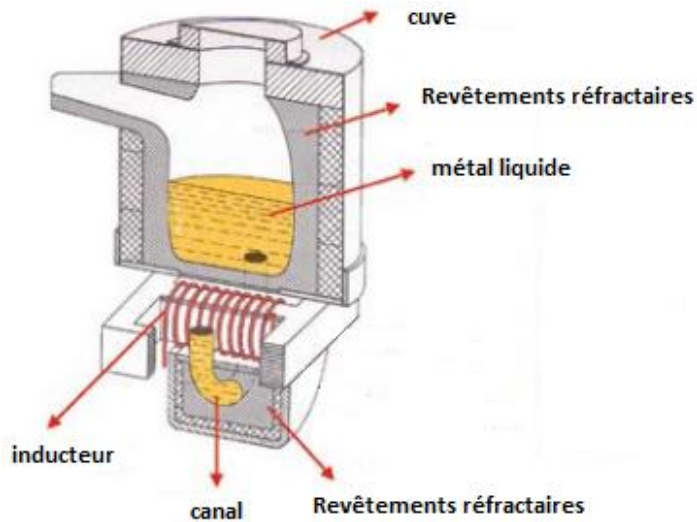
### **II.2.2. Fours à induction à canal**

Dans ces fours, la structure réfractaire (le creuset) est reliée à un ou plusieurs inducteurs de type canal pour chauffer le matériau (figure II.2).

À cause des effets thermiques et mécaniques de la matière en fusion, l'inducteur de type canal est placé au fond de la structure du four.

Cette contrainte empêche la conception des fours à grande capacité.

Ces fours sont utilisés pour la fusion du cuivre et ces alliages, du fait que le cuivre est sensible à la prise de l'oxygène de l'air sur une surface turbulente, car ces fours offrent une surface lisse du bain en fusion, une turbulence suffisante à l'intérieur de la masse fondue pour la mélanger et assurer une composition chimique.



**Figure II.2 :** Four à induction à canal [16].

Les fours à canal ont un rendement électrique plus élevé que les fours à creuset, mais pour la fusion de fer et d'acier ou les hautes puissances sont nécessaires avec changement d'alliages et le besoin de vider le four régulièrement, le four à creuset est le plus adéquat.

### **II.3.PROCESSUS DE CONTROLE INDUCTIF ET THERMIQUE**

L'induction est une technique électrothermique permettant de chauffer des matériaux conducteurs d'électricité sans contact avec la source.

C'est-à-dire, avec la circulation du courant électrique alternatif à travers la bobine, un champ électromagnétique est créé, il traverse le matériau réfractaire et couple avec le matériau qui est dans le creuset du four, ce matériau induit un courant, en circulant à l'intérieur de ce matériau il produit de la chaleur qui va le fondre (Annexe A).

Quand le matériau est fondu complètement l'interaction du champ magnétique et des courants électriques qui circuler dans la bobine d'induction produit une action d'agitation à l'intérieur du métal fondu.

Généralement, l'intensité de l'action inductive est influencée par la puissance, la fréquence appliquée, la taille et la forme de la bobine, la densité et la viscosité du métal en fusion.

### **II.3.1. Paramètres liés à l'induction électromagnétique**

L'induction électromagnétique est un couplage entre deux phénomènes physiques : l'électromagnétisme et la thermique.

Elle est obtenue par la résolution des équations de Maxwell pour la partie électromagnétique [17-19] et les équations de transfert de chaleur [20] pour la partie thermique.

Le couplage entre les deux physiques est très fort, du fait que la source de chaleur introduite dans le modèle thermique est d'origine électromagnétique, et la plupart des propriétés physiques du matériau traité sont dépendantes de la température.

Comme est le cas de la résistance électrique du matériau traité, qui est la propriété principale qui influence la chaleur induite par l'effet de la résistance qu'elle oppose au passage des courants induits dans le matériau traité. Elle est exprimée sous la forme suivante :

$$R = \rho_e l/s \quad (\text{II.1})$$

Avec :

R : est la résistance électrique,

$\rho_e$  : est la résistivité électrique,

l : est la longueur du matériau,

s : est la section transversale du passage du courant électrique.

De même, la résistivité électrique ( $\rho_e$ ) du matériau peut changer avec la variation de la température, généralement elle est donnée pour les métaux purs en fonction de la température sous la forme suivante :

$$\rho_e(T) = \rho_{e0} [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (\text{II. 2})$$

Avec :

$\rho_e(T)$  : est la résistivité électrique à la température T,

$\rho_{e0}$  : est la résistivité électrique à la température ambiante  $T_0$ ,

$\alpha$  : est le coefficient de température pour chaque matériau.

Une autre propriété physique qui influence l'induction électromagnétique est la perméabilité magnétique du matériau traité. Elle est définie par l'équation suivante :

$$\mu = \frac{\vec{B}}{\vec{H}} \quad (\text{II. 3})$$

Avec :

$\mu$  : est la perméabilité magnétique en Henry par mètre,

$B$  : est l'induction magnétique en Tesla (T),

$H$  : est l'intensité du champ magnétique en ampères par mètre.

Chaque matériau a une perméabilité magnétique propre lui, cette propriété caractérise la possibilité que le matériau permette de laisser passer ou bien d'interagir avec le champ magnétique.

La perméabilité magnétique propre est liée à la perméabilité magnétique relative  $\mu_r$  et la perméabilité de l'espace libre  $\mu_0$  qui est égal à  $4\pi 10^{-7}$  H/m par l'équation suivante :

$$\mu_r = \mu/\mu_0 \quad (\text{II. 4})$$

Un autre paramètre de contrôle qui mérite d'être cité est la fréquence utilisée pour la production de l'induction électromagnétique,

elle est essentielle pour déterminer les paramètres de chauffage par induction, ce chauffage est concentré à la surface du matériau traité, cet effet est appelé effet de peau.

Théoriquement, la distribution du courant induit est donnée par l'équation (II.5) dans une couche fine à la surface du matériau traité:

$$I = I_0 e^{-y/\delta} \quad (\text{II. 5})$$

Avec :

$I$  : est la densité de courant induit dans le matériau affiné ( $A/m^2$ ),

$y$  : est la distance à partir de la surface du matériau affiné en direction du centre (m),

$I_0$  : est la densité initiale de courant ( $A/m^2$ ),

$\delta$  : est la profondeur de pénétration du courant dans le matériau affiné (m).

Comme le montre l'équation (II.5), le courant diminue exponentiellement depuis la surface jusqu'au centre du matériau en fusion, ce qui donne une plus grande concentration de la puissance induite sur la surface. L'épaisseur de cette couche est appelée épaisseur de peau ou profondeur de pénétration.

Elle est donnée sous la forme suivante :

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho_e}{\pi \mu f}} \quad (\text{II.6})$$

Comme le montre l'équation (II.6), cette épaisseur dépend de la fréquence du courant, de la résistivité électrique du matériau affiné et de sa perméabilité magnétique.

### II.3.2. Modèle théorique de l'induction électromagnétique :

La variation de champ électrique génère un champ magnétique et vice versa ce qui résulte en une onde électromagnétique qui transporte de l'énergie au matériau. Pour un milieu isotrope la relation entre l'intensité du champ et la densité de flux électriques est donnée par :

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} \quad (\text{II.7})$$

De plus, la relation entre la densité de flux magnétique et l'intensité du champ magnétique est donnée par :

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (\text{II.8})$$

Avec  $\epsilon$  la permittivité électrique absolue du milieu, en Farad par mètre (F/m) et  $\mu$  est la perméabilité magnétique absolue du milieu, en Henry par mètre (H/m).

À l'intérieur d'un matériau conducteur, les courants de conduction sont dus au mouvement des charges mobiles dû au champ électrique.

Ce phénomène est formulé par la loi d'Ohm, qui est donnée par l'équation suivante :

$$\vec{J} = \frac{1}{\rho} \vec{E} = \sigma \vec{E} \quad (\text{II.9})$$

Avec

$J$  : est la densité du courant électrique volumique,

$E$  : est le champ électrique

$\rho$  : est la résistivité électrique

$\sigma$  : est la conductivité électrique du milieu mesuré en Siemens par mètre (S/m).

Finalement, les grandeurs du champ électrique et du champ magnétique sont liées entre eux par les équations connues sous le nom d'équations de Maxwell :

- L'équation qui représente le théorème d'Ampère généralisé :  $\nabla \times \vec{H} = \vec{J} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$  (II.10)

- L'équation qui représente la loi de Faraday :  $\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$  (II.11)

- l'équation qui représente le théorème de Gauss :  $\nabla \cdot \vec{D} = \rho$  (II.12)

- l'équation qui définit la conservation du flux magnétique :  $\nabla \cdot \vec{B} = 0$  (II.13)

Avec :

$\vec{E}$  : est le champ électrique,

$\vec{H}$  : est le champ magnétique,

$\vec{B}$  : est la densité de flux magnétique,

$\vec{D}$  : est le champ électrique,

$\vec{J}$  : est la densité du courant volumique,

$\vec{A}$  : est le potentiel du vecteur magnétique,

Après résolution du système des équations de Maxwell, le courant induit dans le matériau traité est donné par les deux équations suivantes [20] :

$$e = -n \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{II.14}) \quad \text{et} \quad I = \frac{e}{R} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

I : est le courant induit (A),

e : est la force électromotrice (V),

R : est la résistance électrique ( $\Omega$ ),

$\phi$  : est le flux magnétique (Wb),

n : est le nombre de spires,

### II.3.3. Modèle théorique de transfert thermique

Le four et son environnement peuvent être considérés comme un milieu homogène et isotrope. Si l'on applique la loi de Fourier suivante [21] :

$$\varphi(\mathbf{M}, t) = -\lambda \rho \text{grad } T \quad (\text{II.16})$$

On obtient pour chaque environnement le bilan thermique suivant :

$$\text{div}(\lambda \text{grad } T) + p - \rho c \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \rightarrow \Delta T + \frac{p}{\lambda} - \frac{\rho c}{\lambda} \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (\text{II.17})$$

L'équation (II.17) est l'équation de la chaleur qui contrôle la thermique du four.

Avec :

T : est la température recherchée (K)

$\rho$  : est la masse volumique du milieu ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$c$  : est la chaleur spécifique du milieu à pression constante (J/K.kg)

$p$ : est la source de la chaleur thermique par effet joule inductif pour notre cas (W/m<sup>2</sup>)

$\lambda$  : est la conductivité thermique du milieu (W/m.k)

L'élément qui génère la thermique et le paramètre  $p$ , il représente la puissance induite par le couplage induction électromagnétique et thermique dans le matériau traité. Elle est donnée par l'équation suivante :

$$P = R.I^2 \text{ ou } P = e.I \quad (\text{II.18})$$

Avec :

$e$  et  $I$  les quantités qui sont définies dans les équations (II.14) et (II.15).

Dans notre cas, la modélisation thermique est basée sur l'équation (II.17), qui va résoudre l'évolution thermique du four en calculant le phénomène de conduction thermique dans le four en régime in stationnaire.

**CHAPITRE III :**  
**SIMULATION NUMERIQUE DES FOURS A**  
**INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE**

### **III. CHAPITRE III : SIMULATION NUMERIQUE DES FOURS A INDUCTION ELECTROMAGNETIQUE**

#### **III.1. Logiciel Multiphasiques COMSOL**

La simulation numérique est une méthode complémentaire à l'expérimentation, elle permet de comprendre les processus physiques, comme c'est le cas de notre travail, la compréhension du couplage électromagnétique et thermique et leurs interactions pour dans l'affinage métallurgique. Pour faire cette simulation, nous avons utilisé le logiciel numérique COMSOL Multiphysics®.

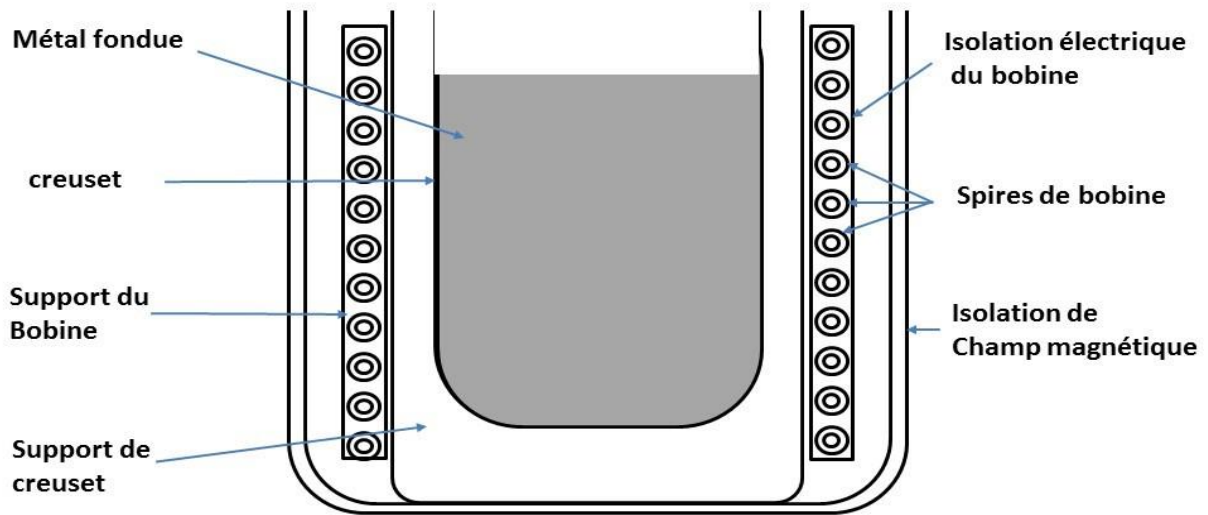
Il est polyvalent pour la modélisation de procédés dans les domaines de l'ingénierie, de la production et de la recherche scientifique. Sa plate-forme peut être utilisée seule ou en combinaison avec des modules complémentaires pour simuler l'électromagnétisme, la mécanique des structures, l'acoustique, la mécanique des fluides, le transfert thermique, le génie chimique, etc.

Pour notre cas de four, nous avons utilisé le modèle 2D axisymétrique avec le couplage électromagnétique et thermique, c'est-à-dire, la résolution des équations de Maxwell et les équations de transfert de chaleur par conduction avec le couplage entre les deux physiques pour le domaine de notre four avec les conditions initiales et aux limites appropriées.

#### **III.2. DESCRIPTION DU MODELE UTILISE**

Le four analysé est un four standard, il a les dimensions des fours industriels d'affinage métallurgique. La figure III.1 représente un schéma descriptif de tous les éléments essentiels du four.

Les dimensions extérieures du four sont : 0,85m de longueur et 0,90m de largeur, équipé d'une bobine de 0,25m de rayon en cuivre avec neuf spires espacées de 2cm. Les spires sont fabriquées par un tube de cuivre de 2cm de diamètre et de 0,5cm d'épaisseur, à l'intérieur du tube, une circulation d'eau est réalisée pour refroidir la bobine, le creuset est fabriqué avec un matériau réfractaire principalement constitué d'alumine de rayon égale à 0,15m et de hauteur égale à 0,47m qui peut contenir un volume de l'ordre de  $0,04\text{m}^3$ , la structure est composée d'un alliage métallique ferromagnétique pour bloquer le champ magnétique.



**Figure III.1** : Schéma descriptif de la géométrie du four (Annexe B).

Dans la réalisation du modèle, nous avons suivis les étapes suivantes : le choix d'un mode de résolution en 2D, l'introduction de la physique par le choix des modules (électromagnétique et thermique), la conception de la géométrie du four comme domaine de résolution des modules choisis.

L'affectation des matériaux de chaque partie du domaine avec les propriétés physiques de chaque milieu (Annexe C), l'initiation des conditions aux limites et la création du maillage puis la résolution des équations en mode stationnaire.

Les paramètres de la simulation sont les suivants :

- La température de fusion du matériau à traiter (K),
- le temps de chauffage (h).

Les conditions initiales et aux limites sont les suivantes :

- Une température initiale qui est égale à la température ambiante  $T = 289.15$  K,
- Un débit d'eau constant pour le refroidissement de la bobine :  $Mt = 60$  kg/h,
- Les propriétés physiques des sous-domaines (sous-domaine par matériau) qui sont connectés par des parois couplées numériquement,

### III.3. RESULTATS DE LA SIMULATION : FOUR STANDARD SANS AMELIORATION

L'étude est réalisée pour un four d'induction électromagnétique avec un contrôle standard de la bobine d'induction. C'est-à-dire, un contrôle unique est imposé avec une seule valeur de courant électrique à l'entrée de la bobine, comme le montre la figure suivante :

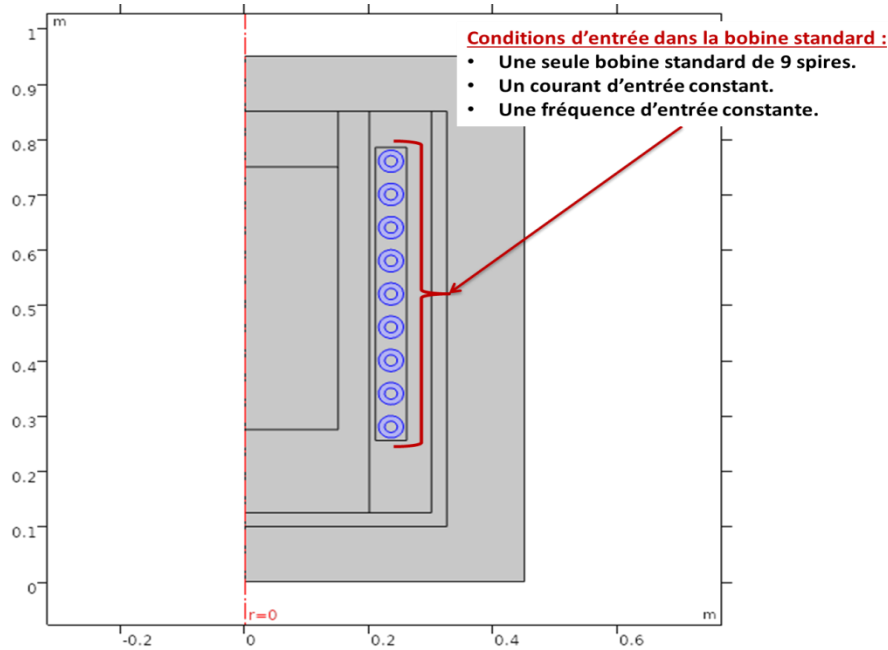


Figure III.2 : Schéma du contrôle du four pour le cas standard.

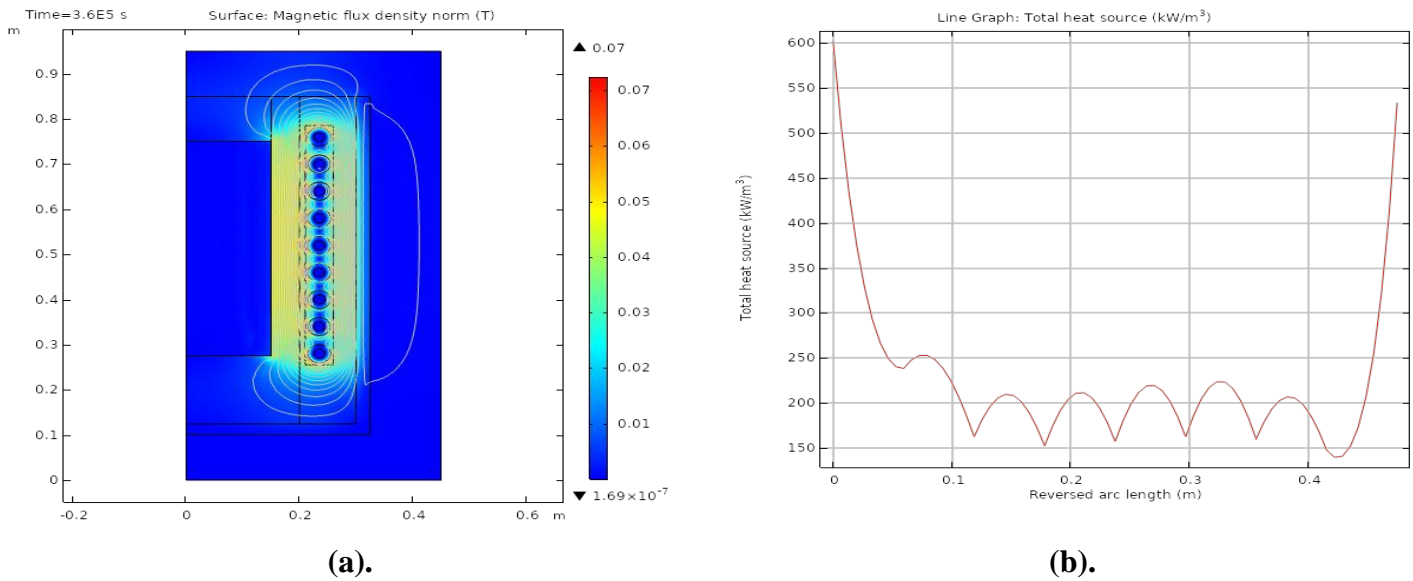
Nous avons réalisé la simulation de l'induction électromagnétique et de la thermique du même four pour les trois matériaux métallurgiques suivants : le cuivre, l'aluminium et le fer. Le tableau suivant liste les propriétés utilisées dans le calcul pour les trois matériaux :

Tableau III.1 : Propriétés utilisées dans le calcul numérique pour les trois matériaux.

	Cuivre métallurgique	Aluminium métallurgique	Fer métallurgique
$\rho$ : Densité volumique ( $\text{kg/m}^3$ )	8940	2700	7874
$C_p$ : chaleur spécifique	385	897	460
$T_f$ : température de fusion (K)	1356	933	1888
$m$ : la masse de la charge (kg)	~290	~90	~260
$\sigma$ : Conductivité électrique (s/m)	$5.998 \cdot 10^7$	$3.77 \cdot 10^7$	$9.93 \cdot 10^6$

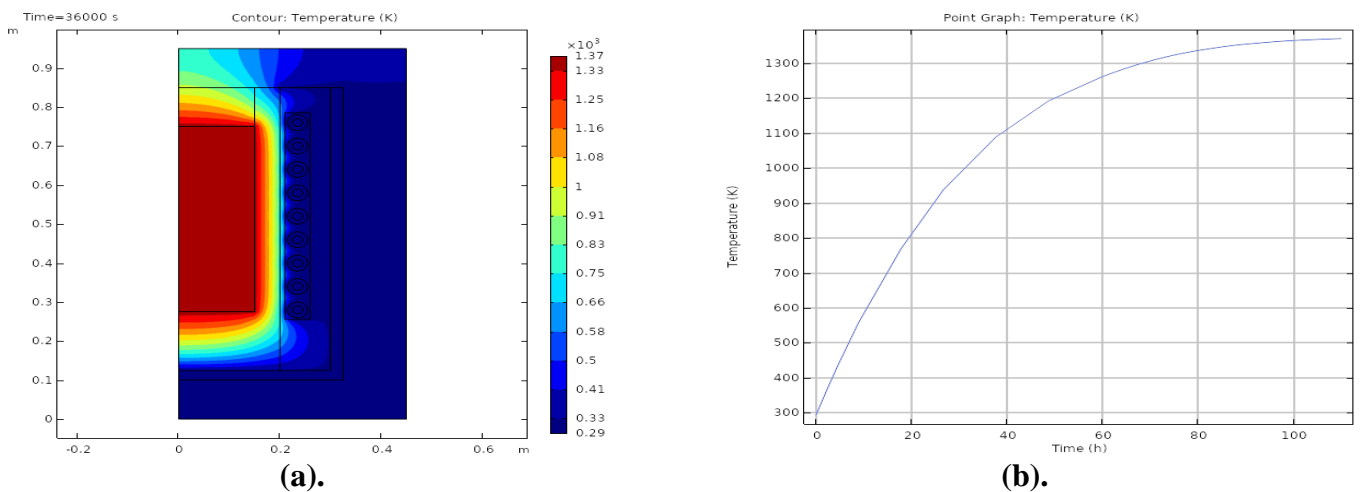
### III.3.1. Résultats du cas de cuivre métallurgique

Pour la partie électromagnétique, quelques résultats sont présentés dans la figure suivante :



**Figure III.3:** Cas de cuivre métallurgique : (a).Champ des flux de densité magnétique. (b).Profil de la puissance dans l'épaisseur de peau de cuivre.

La figure ci-dessous montre que la valeur de densité de flux magnétique maximale exigée pour la fusion totale de la charge de cuivre est de l'ordre de 0,07 T, cette valeur génère une puissance maximale de l'ordre de 550 à 600 kW/m<sup>3</sup> dans l'épaisseur de peau par rapport aux deux bords de la bobine. Pour le champ thermique de four, la figure suivante représente quelques résultats:

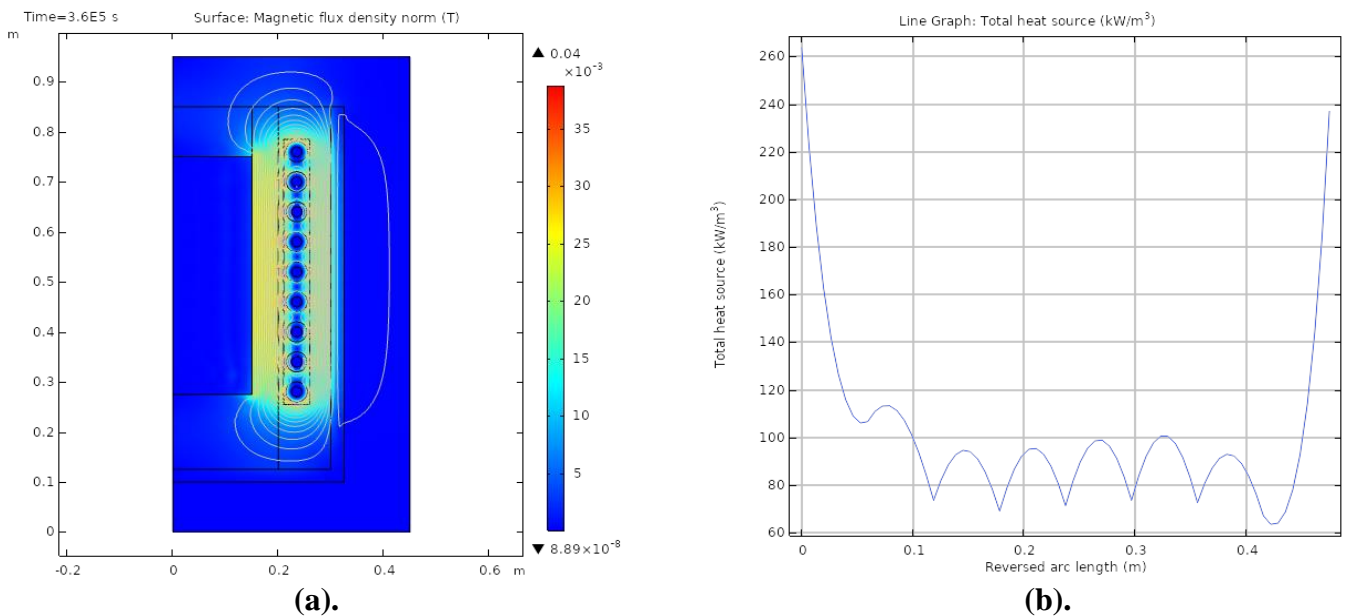


**Figure III.4 :** Cas de cuivre métallurgique : (a).Champ thermique. (b).Évolution de la température maximale en fonction du temps.

La figure montre deux points essentiels, le premier, il faut 80 heures de fonctionnement pour que la valeur de la température se stabilise avec une fusion totale (figure III.4 (b)). Le deuxième est que la température maximale atteinte est de l'ordre de 1370K, cette température est influencée par une perte d'énergie thermique vers le haut du four. Cette perte, si elle n'est pas contrôlée, elle causera la solidification de la surface du bain de cuivre.

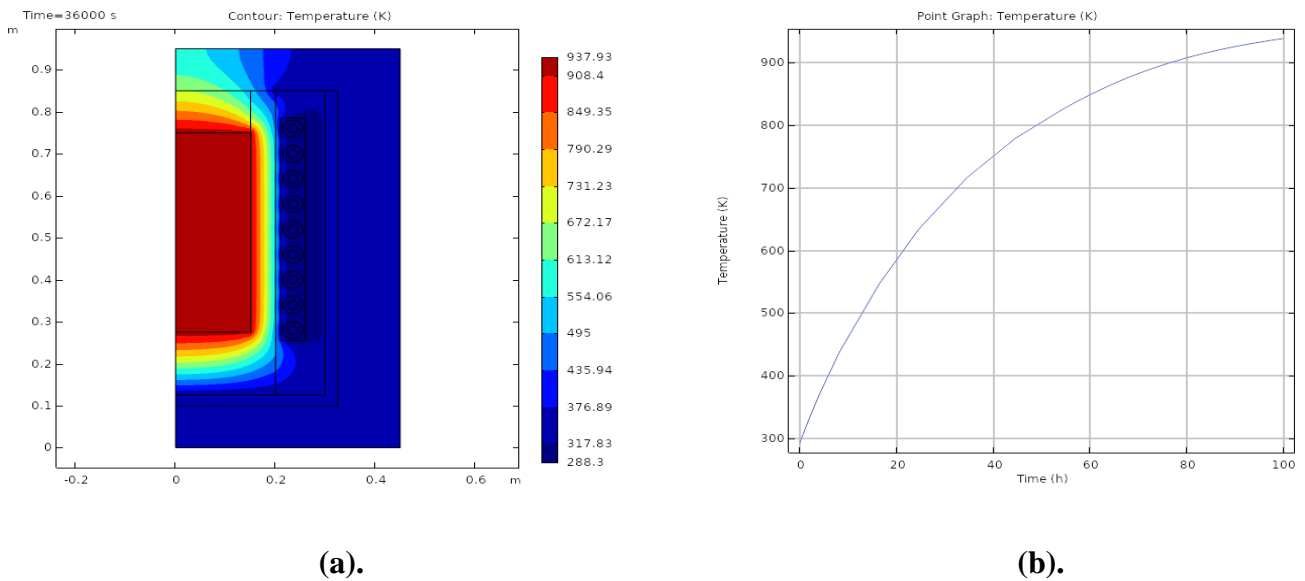
### III.3.2. Résultats du cas d'aluminium métallurgique

Les mêmes résultats sont présentés pour le cas de l'aluminium. Pour la partie électromagnétique (figure III.5) :L'aluminium montre que la valeur de densité de flux magnétique maximal exigée pour la fusion totale est de l'ordre de 0,04T, qui génère une puissance maximale aux deux bords de l'ordre de 240 à 260 kW/m<sup>3</sup>.



**Figure III.5 :** Cas de l'aluminium métallurgique : **(a).**Champ des flux de densité magnétique.  
**(b).**Profil de la puissance dans l'épaisseur de peau d'aluminium.

Pour le champ thermique, quelques résultats sont représentés dans la figure suivante :

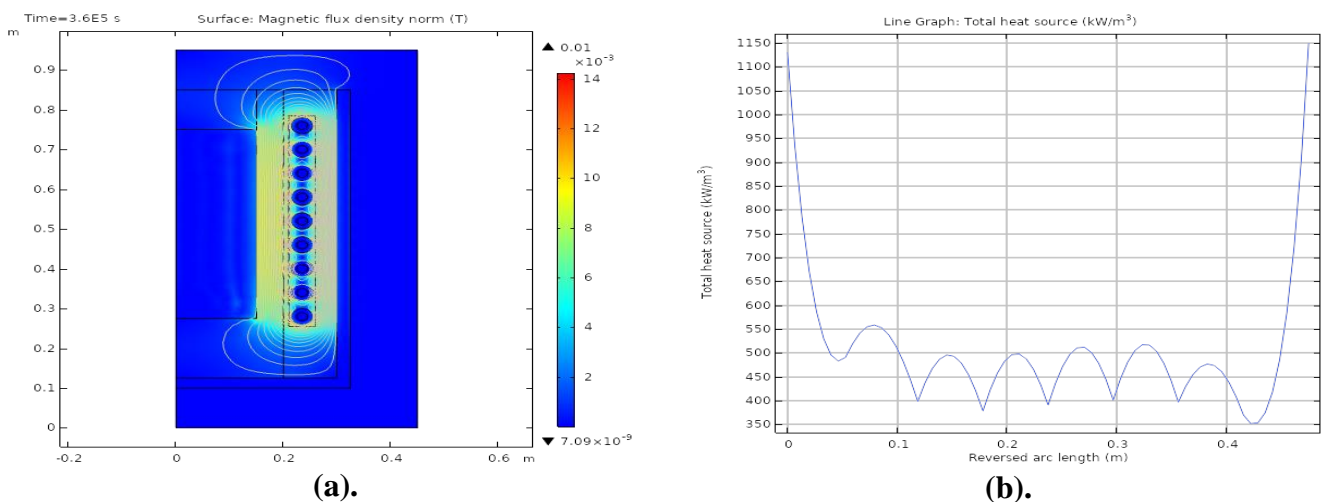


**Figure III.6 :** Cas de l'aluminium métallurgique : **(a).**Champ thermique. **(b).**Évolution de la température maximale de l'aluminium en fonction du temps.

Le même constat, pour avoir une fusion totale et pour la stabilisation de la température il nous faut plus de 80 heures de fonctionnements, la température maximale est de l'ordre de 938K, les mêmes pertes d'énergie thermique sont observées vers le haut du four.

### III.3.3. Résultats du cas de fer métallurgique

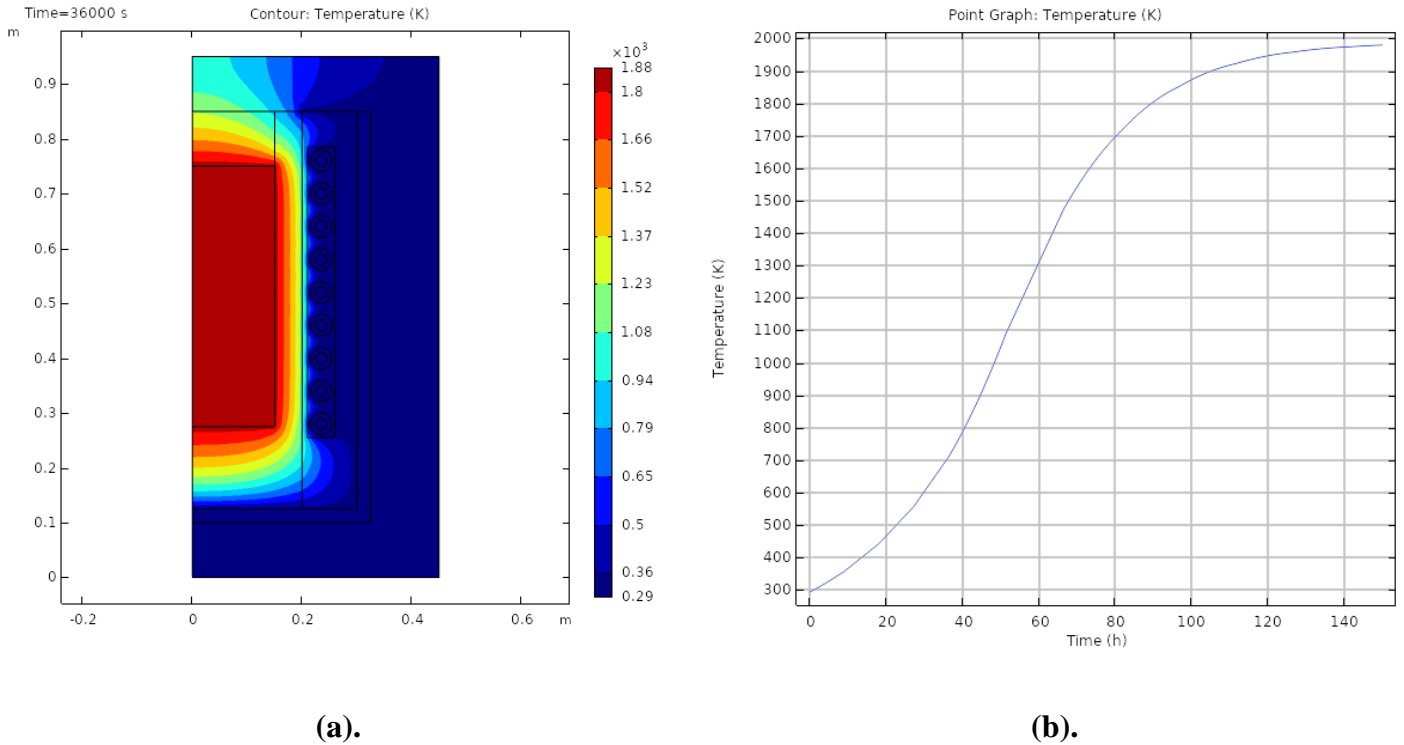
La même procédure est entreprise, pour la partie électromagnétique, quelques résultats sont présentés dans la figure suivante :



**Figure III.7 :** Cas de fer métallurgique : **(a).**Champ des flux de densité magnétique.**(b).**Profil de la puissance dans l'épaisseur de peau de fer.

De même, la figure III.7 montre que les valeurs maximales exigées pour la fusion totale de feront sur les bords de la charge en fusion en face des bords de la bobine, ils génèrent une puissance maximale de l'ordre de 1100 à 1150 kW/m<sup>3</sup>.

Pour la partie thermique, figure suivante :



**Figure III.8 :** Cas de fer métallurgique : (a).Champ thermique.(b).Évolution de la température maximale dans le fer en fonction du temps.

Le fer a une grande température de fusion, il nous faut plus de 120 heures de fonctionnement pour avoir une température stable et pour avoir une fusion totale, la température maximale atteinte est de l'ordre de 1880K, les mêmes pertes d'énergie thermique vers le haut du four sont remarquées, ils peuvent causer la solidification de la surface du bain de fer.

#### III.4. RESULTATS DE LA SIMULATION : FOUR STANDARD AVEC AMELIORATIONS

##### III.4.1. Description de nouveau contrôle et design

L'étude est réalisée pour la même géométrie de four d'induction, mais avec un contrôle amélioré de la bobine d'induction. Deux contrôles sont proposés, la bobine standard est séparée en deux bobines, une bobine qui occupe la place de la bobine standard et une bobine de contrôle, comme le montre la figure III.9.

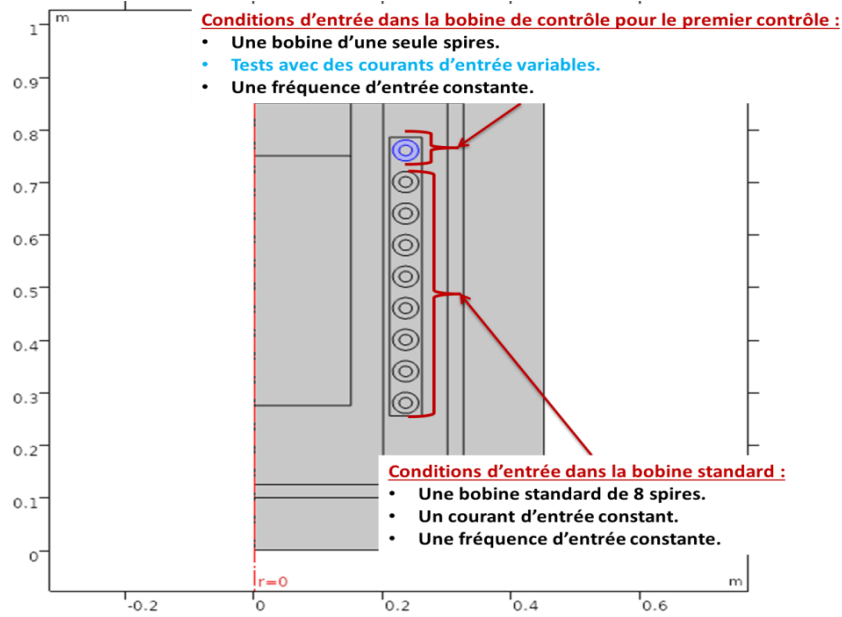


Figure III.9 (a). : Schéma de contrôle pour le four amélioré, cas du courant électrique d'entrée varie.

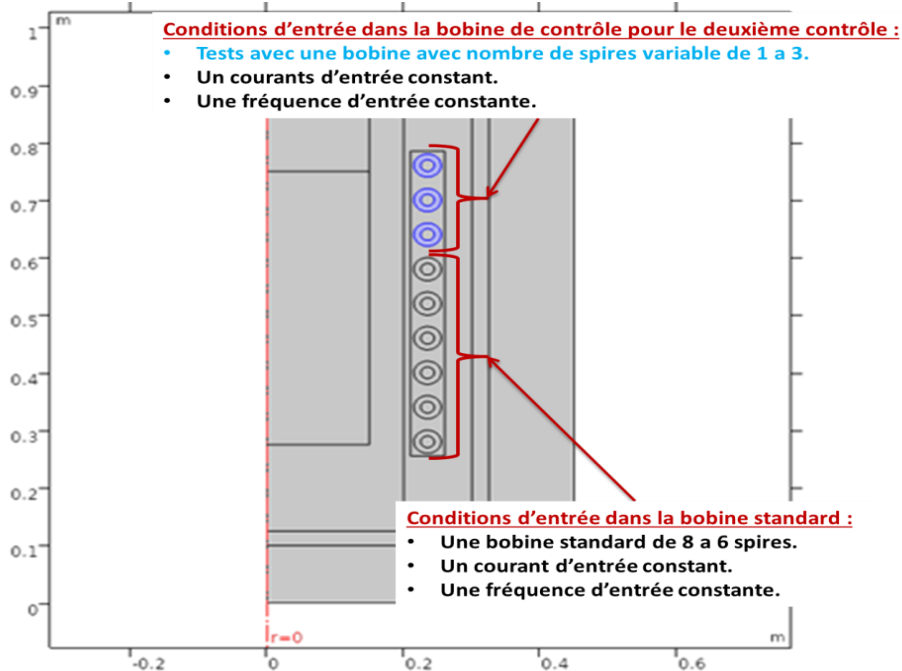


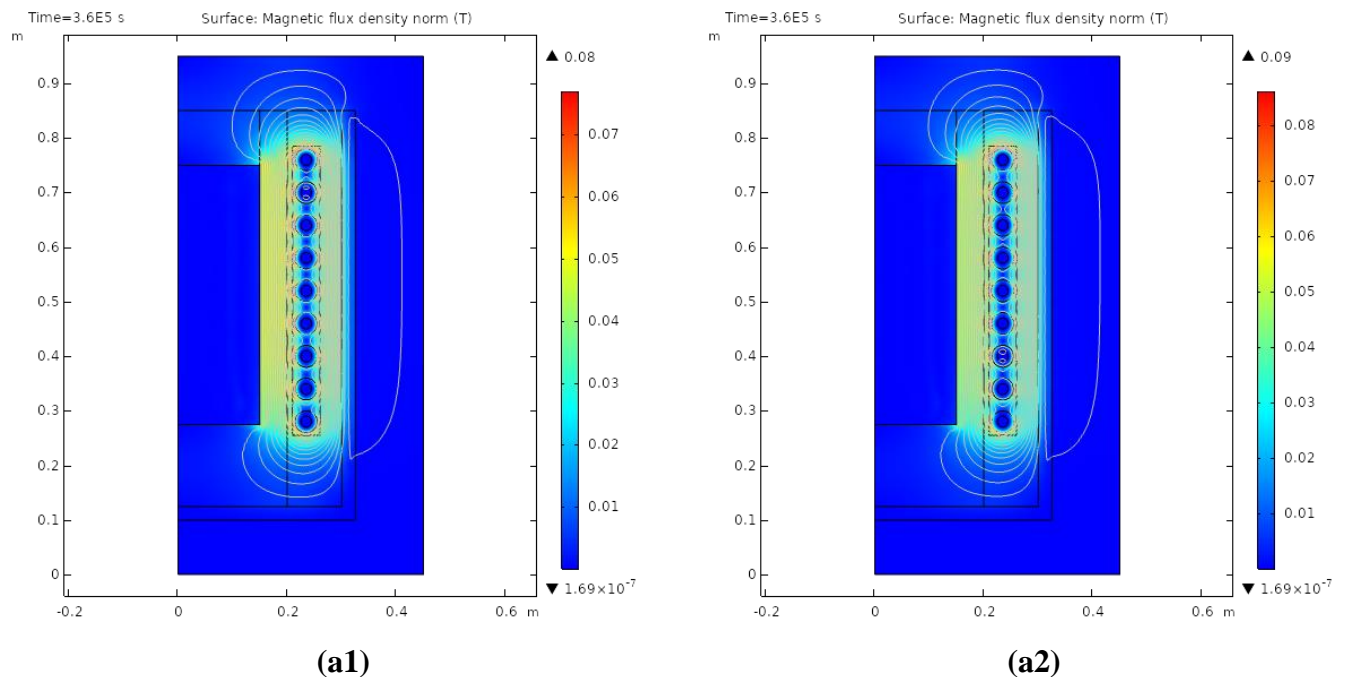
Figure III.9 (b). : Schéma de contrôle pour le four amélioré, cas de nombre de spires variable.

Le premier contrôle est relié au courant électrique d'entrée(en bleu dans la figure III.9 (a)). Le courant est introduit dans la nouvelle bobine de contrôle avec une augmentation progressive suivante : Cas 1 avec  $I = (I_0 + 10\%I_0)$ , Cas 2 avec  $I = (I_0 + 30\%I_0)$  et Cas 3 avec  $I = (I_0 + 50\%I_0)$ . Tondit que, il est maintenu constant a  $I_0$  dans la bobine standard.

- Le deuxième contrôle est relié à la dimension de la bobine de contrôle (en bleu dans la figure III.9 (b)), une augmentation du nombre de spires ( $n$ ) de la nouvelle bobine est imposée progressivement avec la même valeur de courant : Cas 1 avec  $n = 1$ , Cas 2 avec  $n = 2$  et Cas 3 avec  $n = 3$ . Pour chaque cas, le reste des spires est concédé comme la bobine standard.

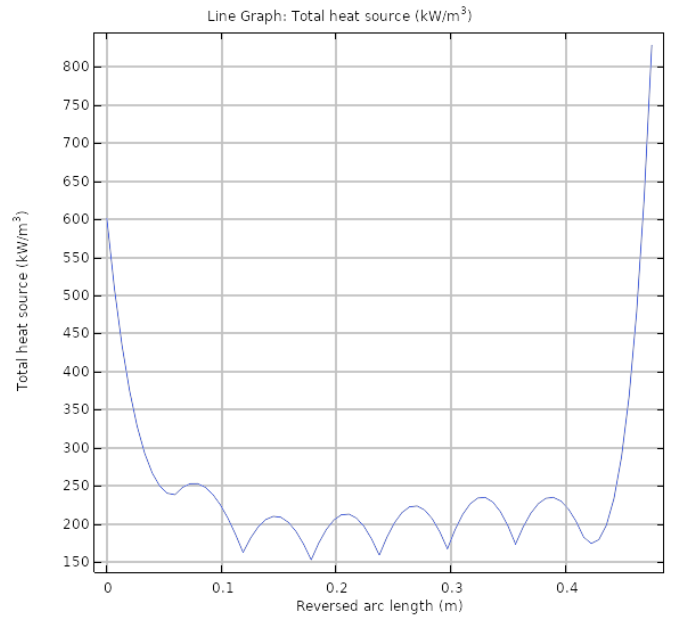
### III.4.2. Résultats du premier contrôle : Variation du courant d'entrée

Les résultats pour le cas de cuivre sont présentés pour les champs de densité magnétique :



**Figure III.10 :** Cas de cuivre métallurgique.(a). Champ des flux de densité magnétique : (1) pour 30% et (2) pour 50% de plus du courant initial.

Pour les profils des puissances :



(b1).

(b2).

**Figure III.11** : Cas de cuivre métallurgique.(b). Profil de la puissance dans l'épaisseur de peau : (1) pour 30% et (2) pour 50% de plus de courant initial.

Pour bien visualiser les résultats pour les trois matériaux analysés, le tableau suivant récapitule tous les résultats obtenus en relation avec les paramètres modifiés :

**Tableau III.2** : Résultats pour les trois matériaux, cas du courant d'entrée variable.

Le courant électrique d'entrée dans la bobine de contrôle d'une spire	La température maximale (K)	La puissance maximale (kW/m <sup>3</sup> )
<b>Cas d'aluminium métallurgique</b>		
Cas standard : Valeur initiale	938	260-240
+ 10% de la valeur initiale	947	260-260
+30% de la valeur initiale	964	260-300
+50% de la valeur initiale	980	260-360
<b>Cas de cuivre métallurgique</b>		
Cas standard : Valeur initiale	1370	600-550
+ 10% de la valeur initiale	1380	600-600
+30% de la valeur initiale	1400	600-700
+50% de la valeur initiale	1430	600-800
<b>Cas de fer métallurgique</b>		
Cas standard : Valeur initiale	1880	1150-1150
+ 10% de la valeur initiale	1890	1150-1250
+30% de la valeur initiale	1900	1150-1500
+50% de la valeur initiale	1960	1150-1800

Comme le montre le tableau III.2, l'augmentation du courant dans la bobine de contrôle d'une seule spire génère une augmentation de la température du bain en fusion. Cette augmentation est due à l'augmentation de la puissance en face de la bobine de contrôle vers le haut de la charge de matériau. D'après les figures III.11 (b1) et (b2) des puissances, c'est une augmentation locale, qui est localisée sur la partie haute du four.

III.4.3. Résultats du deuxième contrôle : Variation du nombre de spires

Les résultats pour le cas de cuivre sont présentés comme suivant.

Pour les champs de densité magnétique :

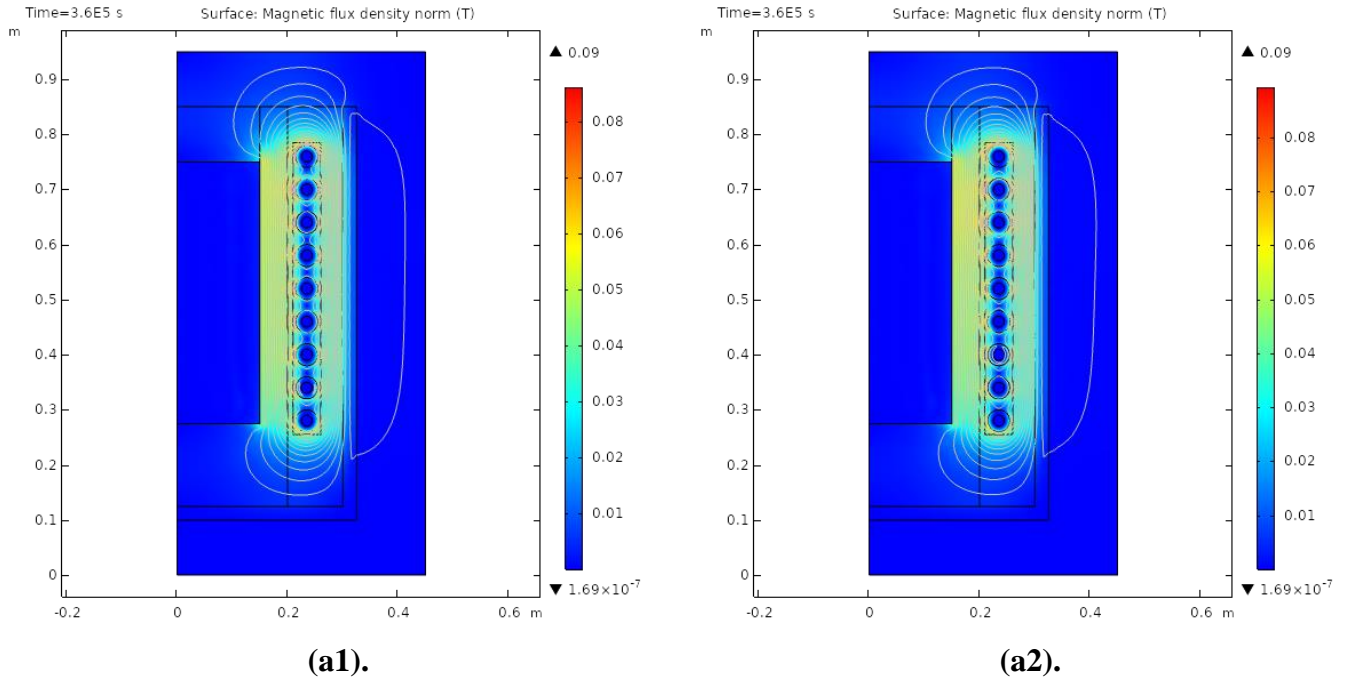


Figure III.12 : Cas de cuivre métallurgique.(a). Champ des flux de densité magnétique : (1) pour  $n=2$  spires et (2) pour  $n=3$  spires.

Pour les profils des puissances :

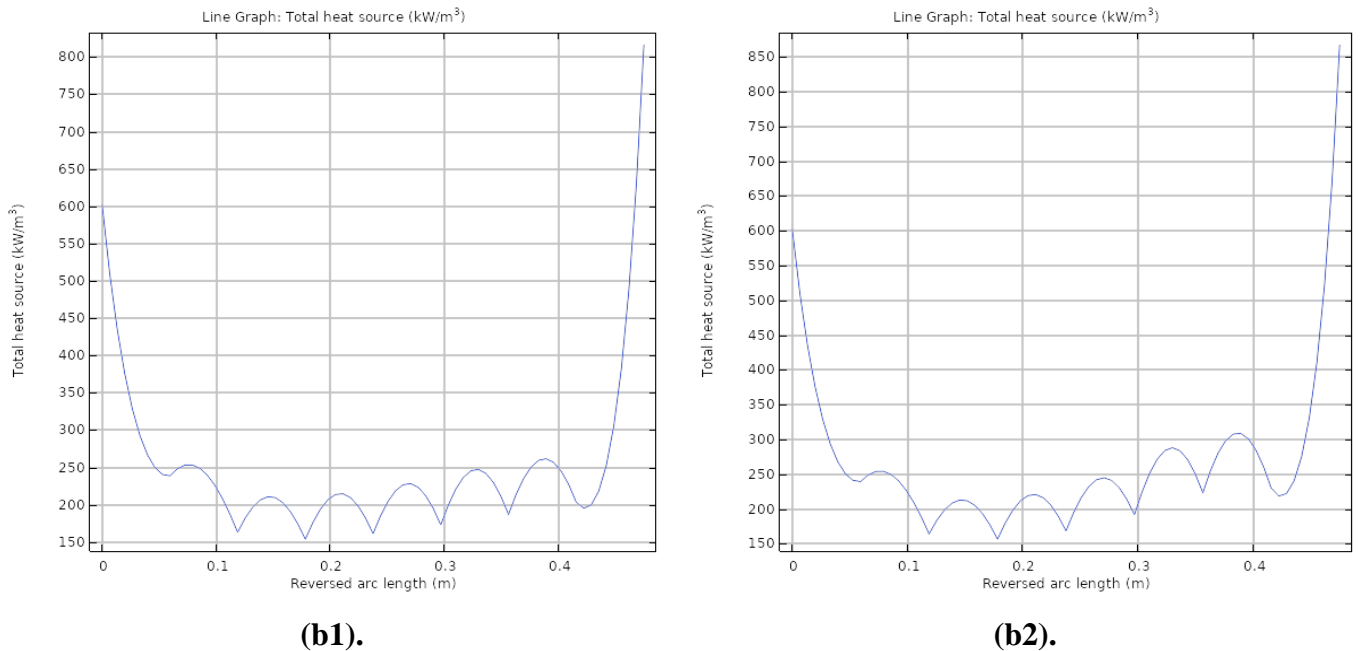


Figure III.13 : Cas de cuivre métallurgique.(b). Profil de la puissance dans l'épaisseur de peau : (1) pour  $n=2$  spires et (2) pour  $n=3$  spires.

Le tableau suivant récapitule tous les résultats obtenus pour les trois matériaux analysés en relation avec les paramètres modifiés :

**Tableau III.3** : Résultats pour les trois matériaux, cas de nombre de spires variable.

<b>Le nombre de spires : bobine de contrôle / bobine standard</b>	<b>La température maximale (K)</b>	<b>La puissance maximale (kW/m<sup>3</sup>)</b>
<b>Cas d'aluminium métallurgique (Plus 30% du courant initial)</b>		
Cas standard : 0/9	938	260-240
1/8	964	260-300
2/7	995	260-360
3/6	1003	260-380
<b>Cas de cuivre métallurgique (Plus 30% du courant initial)</b>		
Cas standard : 0/9	1370	600-550
1/8	1400	600-700
2/7	1440	600-800
3/6	1490	600-850
<b>Cas de fer métallurgique (Plus 30% du courant initial)</b>		
Cas standard : 0/9	1880	1150-1150
1/8	1900	1150-1500
2/7	1990	1150-1750
3/6	2110	1150-1850

Du tableau III.3, deux constatations sont très intéressantes, la première est que l'augmentation de la température est plus significative dans ce contrôle que dans le premier contrôle, la deuxième est que l'augmentation du nombre de spires de la bobine de contrôle génère une plus grande augmentation de la température du bain en fusion. Cette augmentation est due à l'augmentation de la puissance en face des spires de la bobine vers le haut de la charge de matériau. D'après les figures III.12 (b1) et (b2) des puissances, c'est une augmentation qui s'étale sur toutes les spires de la bobine de contrôle sur une partie plus large du haut du four.

## **CONCLUSION GENERALE**

### **CONCLUSION GENERALE**

Les travaux entrepris dans cette étude nous ont permis d'investir une technique largement utilisée dans l'affinage des matériaux, pour cela, dans les deux premiers chapitres, nous avons donné une brève description des éléments essentiels qui sont en relation avec le procédé d'affinage des matériaux métallurgiques par induction électromagnétique ainsi la problématique de la solidification du haut de la charge en fusion.

Dans le dernier chapitre, nous avons réalisé une modélisation très intéressante, elle a permis de bien cerner les phénomènes couplés liés à notre procédé d'affinage et d'apporter des solutions à la problématique rencontrée.

L'étude numérique a permis de proposer la séparation du contrôle de la bobine standard en deux contrôles de deux bobines, une principale qui reste comme une bobine standard et une deuxième bobine qui va occuper le rôle d'une bobine de contrôle où on a la possibilité de changer les paramètres de travail.

Deux paramètres de contrôle ont été changés pour la bobine de contrôle, le premier est un paramètre de contrôle lié au courant d'entrée et le deuxième est un paramètre de contrôle lié au nombre de spires.

Les résultats ont montré que le premier contrôle est incomplet pour traiter la problématique de solidification du haut de la charge en fusion, parce qu'il est très localisé vers une surface fine qui se situe vers le haut de la charge en fusion, et il demande des puissances très élevées.

Par contre, le deuxième contrôle avec plus de spires est plus intéressant, car il est possible d'avoir des puissances plus grandes et plus étalées sur la totalité des spires de la bobine de contrôle.

Ce contrôle permet d'éliminer la problématique de la solidification du haut de charge en fusion.

En perspectives, pour se rapprocher de la réalité, ajoutez un autre paramètre physique qui est la solidification de la couche en haut du bain liquide, et envisagez la possibilité d'utiliser les résultats de la simulation numérique pour la conception d'un four de laboratoire.

## Références bibliographiques

- [1] Alain vignes, Métallurgie Extractive, Opération, procédés et filières d'élaboration, volume 3, chapitre 25 : les filières d'élaboration des métaux, page 317-319
- [2] Electromagnetic effect, Cambridge College, <http://mrtremblaycambridge.weebly.com/p14-electromagnetic-effects.html>
- [3] Induction furnaces - a short historical notes, insertec furnaces & refractories, <http://www.insertec-store.com/en/blog/induction-furnaces-a-short-historical-notes>
- [4] La 3<sup>e</sup> édition de l'Encyclopaedia of Occupational Health and Safety chapitre 82, La transformation et le travail des métaux, <http://www.ilocis.org/fr/documents/ilo082.htm>
- [5] Le petit musée minéralogique de l'UQAC, minéraux, [http://mineraux.uqac.ca/mineraux\\_detail/bornite.htm](http://mineraux.uqac.ca/mineraux_detail/bornite.htm)
- [6] France minéraux, guides des pierres, <http://www.france-mineraux.fr/vertus-des-pierres/pierre-malachite>
- [7] France mineraux, guides des pierres, <http://www.france-mineraux.fr/vertus-des-pierres/pierre-azurite>
- [8] Oxydes et hydroxydes, la classification des minéraux, Wikipédia, <https://fr.wikipedia.org/wiki/Cuprite>
- [9] Alloy Properties & Uses, Copper Alloys Search - Advanced, copper development association Inc, <https://alloys.copper.org/alloy>
- [10] Minéral ferromagnétique, magnétite, <http://www.futura-sciences.com/planete/definitions/geologie-magnetite-11930/>
- [11] Clef d'identification des minéraux communs, par pierre Bédard 2009, sidérite, <http://cours.polymtl.ca/PBedard/glq1100/mineraux/siderite/siderite.html>
- [12] Pierres et Cristaux , Pyrite ou l'or des fous , <http://soleildelumiere.canalblog.com/archives/2013/01/14/26150104.html>
- [13] Material Properties Database, Metals Alloys, Make it from, <http://www.makeitfrom.com/material-properties>
- [14] Vivek R. Gandhewar et al. / International Journal of Engineering and Technology Vol.3 (4), 2011, 277-284.
- [15] Shanghai Electric Heavy Machinery Co. Ltd., <http://ac-dc-motor-furnace.en.made-in-china.com/product/uynxHlvbheWp/China-2ton-Induction-Furnace-Melting-15-Ton-Induction-Furnace-Price.html>

- [16] W. Spitz and C. Eckenbach, Marx GmbH & Co. KG, Channel-type versus coreless induction furnaces, ALUMINIUM · 1-2-2013, [http://www.marxgmbh.de/DWD/\\_111327/upload/media\\_142208](http://www.marxgmbh.de/DWD/_111327/upload/media_142208)
- [17] Rudnev V., Loveless D., Cook R, Handbook of Induction Heating, Marcel Dekker Inc., New York, Basel, 2003,
- [18] Develey G., Chauffage par induction électromagnétique : principes, Techniques de l'Ingénieur, Traité Génie électrique, 2000.
- [19] Callebaut J., Chauffage par induction, Laborelec, <https://www.leonardo-energy.org/home>
- [20] Sophie Mergui, Transfert Thermique, Cours de Licence de Mécanique, Université de Sorbonne, France.
- [21] Pryor R.W., Multiphysics modelling using COMSOL: a first principles approach, Jones and Bartlett Publishers International, 2011.
- [22] SM HLQ Induction Equipment Co., LTD, induction brazing, principe de chauffage par induction, <https://dw-inductionheater.com/fr/principe-de-chauffage-par-induction.html>
- [23] Air, Eau, alumina, les propriétés physique des matériaux, Wikipédia, <https://fr.wikipedia.org/wiki>
- [24] Pierre-François Thomas, précis de physique-chimie, première et deuxième année, chapitre 9 : Thermodynamique, page 138.
- [25] Alumina - Aluminum Oxide - Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> - A Refractory Ceramic Oxide, Typical physical and mechanical properties, AZO Materials, <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=52>

# **ANNEXES**

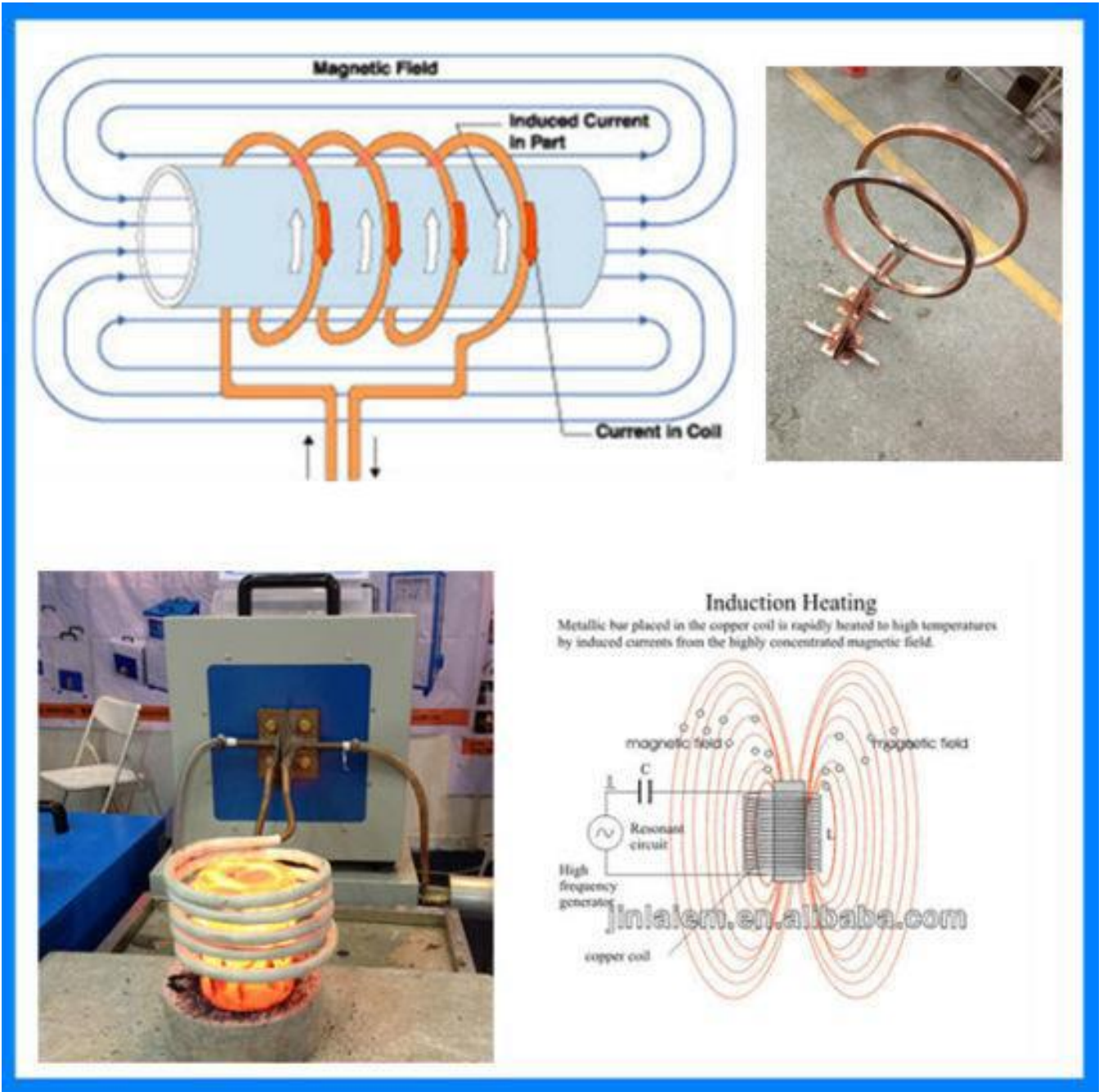
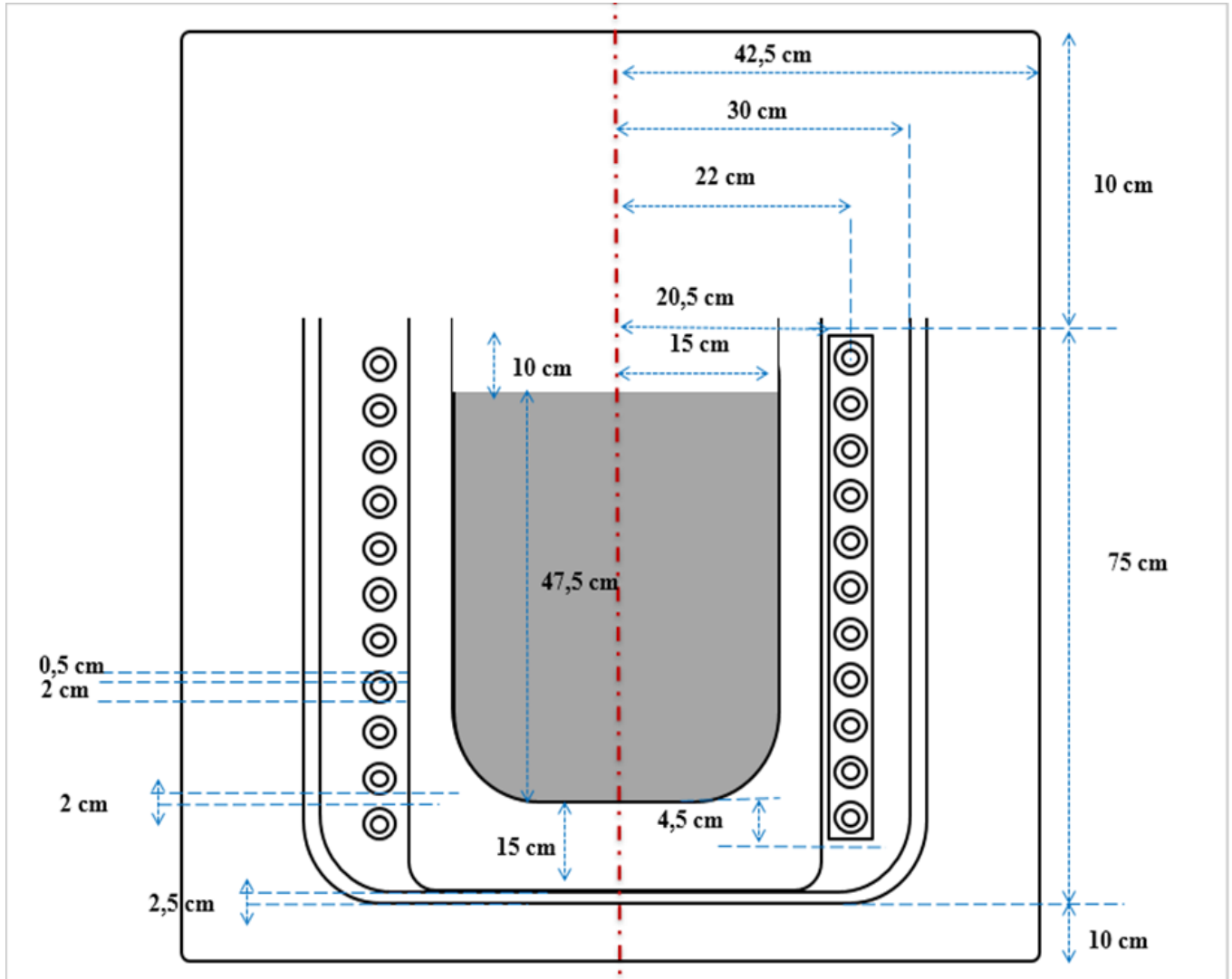


Figure A.1 : Principe de fonctionnement des bobines dans les fours à induction électromagnétique[22].



**Figure B.1 :** Schéma simplifié avec les dimensions du four à induction électromagnétique utilisée pour la simulation numérique, d'après les fours standard qui existent dans l'industrie (**figure II.1**).

**Tableau C.1 :** Les propriétés physiques des matériaux des éléments utilisés dans la conception et l'utilisation du four à induction [23-25].

Les propriétés physiques des matériaux utilisés dans la conception et l'utilisation du four d'induction						
	Conductivité thermique (W/m.K)	Conductivité électrique (S/m)	Masse volumique (kg/m <sup>3</sup> )	Perméabilité relative	Capacité thermique (J/kg.K)	Permittivité relative
<b>Air</b>	0.025	0	1.204	1	1005	1
<b>Eau</b>	10 <sup>3</sup>	5.5*10 <sup>-6</sup>	998.30	80	4185	1
<b>Cuivre</b>	400	5.998*10 <sup>7</sup>	8940	1	385	1
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	20	10 <sup>-8</sup>	3970	1	795.5	1
<b>Acier AISI 4304</b>	50.2	4.032*10 <sup>6</sup>	7850	1	475	1

## **RESUME :**

L'affinage des matériaux métallurgique utilise le couplage thermo électromagnétique. C'est une technique de fusion par chauffage à induction.

Elle est rapide et aide à économiser de l'espace et les coûts avec plus de possibilités d'amélioration.

Dans le cadre de notre travail, nous avons entrepris le procédé d'affinage des matériaux métallurgique (cuivre, aluminium et fer) pour essayer de résoudre la problématique de solidification de la partie haute de la charge en fusion dans les fours, en utilisant une simulation numérique avec des changements de paramètres de contrôle dans la conception et le mode opératoire par rapport au four standard.

Ces changements ont donnés des résultats très intéressants pour résoudre la problématique de la solidification de la partie haute de la charge.

**Mots clés :** Affinage, matériau métallurgique, fusion thermique, induction électromagnétique.

## **ABSTRACT:**

The refining of metallurgical materials used the thermo electromagnetic coupling process. It is an induction heating melting technique. It can be fast and helps to save space and costs with more possibilities of improvement.

As part of our work, we undertook the process of refining metallurgical materials for copper, aluminum and iron to try to solve the problematic of the solidification of the upper part of the molten charge in the furnaces during the refining process, using a numerical simulation with changes of control parameters in design and operating mode compared to the standard furnace.

These changes have given very interesting results in solving the problematic of solidification of the upper part of the molten charge.

**Key words:** Refining, metallurgy material, thermal fusion, electromagnetic induction.

## ملخص:

تستعمل تقنية الحث المغناطيسي لغرض تكرير المواد المعدنية عن طريق صهرها وهذا ينجم عن اقتران الحرارة و الكهرومغناطيسية ، تعتبر هذه التقنية سريعة موفرة للمال وكذا المساحة ، في إطار هذا العمل قمنا بتكرير المواد المعدنية التالية (النحاس ، الألمنيوم و الحديد) للتخلص من التصلب العلوي للكتلة المنصهرة باستخدام المحاكاة الرقمية مع التغيير في معدات التحكم في التصميم و التشغيل ، أعطت هذه التغييرات نتائج جد هامة لحل مشكلة تصلب الجزء العلوي من الكتلة المنصهرة.

**الكلمات المفتاحية :** التكرير ، المواد المعدنية ، الانصهار الحراري ، الحث الكهرومغناطيسي