REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Energétique

L'effet de champ magnétique sur la coulée par injection des moules

---

Présenté par

TCHIKOU Ismail

NECHAD Abdessalem

Proposé et Dirigé par

Dr. ZIRARI Mounir

Promotion 2019

Remerciements

Je tiens d'abord à présenter mes profondes gratitudes à DIEU le Tout Puisant.

Je remercie notre promoteur Dr. ZIRARI MOUNIR pour le soutien et l'accompagnement qu'il nous procure, durant toute la période de réalisation de ce projet.

Je remercie également les membres de jury pour leur participation dans le jugement de ce travail, ainsi que tous nos professeurs, pour l'aide inconditionnel que nous avons reçu durant toutes les années d'étude à l'université de Médéa.

Je remercie sincèrement mes amis et amies et tous ceux qui m'ont encouragé.

Je remercie également tous ceux qui ont contribué de prés ou de loin dans la préparation de ce projet.

En fin, je remercie tous ceux qui ont contribué à notre formation durant 17 ans d'étude.

Médéa, juin 2019

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail à ceux qui m'ont aidé de prés ou de loin pour la réalisation de ce mémoire

Surtout à :

- Ma famille :
  - -Très chers parents
  - -Frères et sœur
  - -Oncles et mes cousins

- A tous mes amis avec qui j'ai passé ces années d'études et mes camarades du groupe LMD 2019

TCHIKOU Ismail
NECHAD Abdessalem

ملخص:

مشروعالتخرجهذا يهدف لمحاكاة العددية لملءالقالب من الحديد السائل المنصهر، وذلك لتحليلالعيوبالممكنحدوثها أثناء عمليةالقولبة في غياب الحقل المغناطيسي وفي وجوده ,بوضع مقارنة بين التجربتين. وذلك باستخدام تقنية نماذج العناصر المحدودة باعتماد على برنامج ANSYS. خلال محاكاة مرحلة التعبئة اعتبرتبعضالخصائصمثلالكثافةوالنا قليةالحرارية والحرارة النوعيةللمعدنالسائلوالصلب كقيمثابتة. كما عرفتحالةالاضطرابنموذج$k-\varepsilon$.

النتائجأظهرتأهميةالمحاكاةفيتحليلعدةظواهر أثناءعمليةملءالقالب،والتيلايمكنملاحظتها تطبيقيا.

الكلمات المفتاحية: المحاكاة العددية، الحقل المغناطيسي، طريقة العناصر المحدودة ،ملء القالبوحجم السائل(VOF).

Résumé :

Ce projet de graduation vise à simuler le remplissage numérique du moule en fer liquide afin d'analyser les défauts pouvant survenir lors du processus de moulage en l'absence de champ magnétique et dans son existence en comparant les deux expériences. Utilisation de la technologie de modèle de composant limité utilisant ANSYS. Lors de la simulation de la phase de compactage, certaines caractéristiques telles que la densité, la composition thermique et la chaleur spécifique du métal liquide et de l'acier ont été considérées comme des valeurs fixes. La perturbation était également connue sous le nom de k-ε.
Les résultats ont montré l'importance de la simulation dans l'analyse de plusieurs phénomènes lors du remplissage du moule, ce qui ne peut être observé appliqué.

Mots-clés: simulation numérique,champ magnétique, méthode des éléments finis, remplissage de moule et le volume du fluide (VOF).

Abstract:

This graduation project aims to simulate the numerical filling of the mold of molten liquid iron, in order to analyze the defects that can occur during the molding process in the absence of the magnetic field and in its existence by comparing the two experiments. Using the limited component model technology using ANSYS. During simulation of the packing phase, certain characteristics such as density, thermal composition and specific heat of liquid metal and steel were considered as fixed values. The disturbance was also known as k-ε.
The results showed the importance of simulation in the analysis of several phenomena during the process of filling the mold, which can not be observed applied.
Keywords:numerical simulation, magnetic field, finite element method, molds filling and fluid volume (VOF).

SOMMAIRE

Introduction Général……..…...1

Chapitre I étude bibliographique

I.1 Introduction :.....2
I.2 le Moulage : 2
I.2.1. Généralités sur le moulage: 2
I.2.2. Possibilité et avantage des moulages:.....6
I.2.3. Les inconvénients du moulage: 6
I.2.4. Classification des procédés de moulage: 6
I.3. Les techniques de moulage : 7
I.3.1. Moulage en sable :.....7
I.3.1.1. Avantages du procédé : 8
I.3.1.2. Inconvénients du procédé :.....8
I.3.2. Moulage mécanique : 8
I.3.3. Moulage par modèleperdu.....9
I.3.3.1. Procédé par modèlegazéifiable 9
I.3.3.2. Principe de fonctionnement du procédé par modèle gazéifiable: 10
I.3.3.3. Moulage à la cireperdue.....11
I.3.4. Moulage en moule métalliques:.....11
I.3.4.1. Différents procédés de moulage en coquille: 11
I.3.4.2. Moulage en coquille par gravité.....12
I.3.4.3. Moulage en coquille basse pression:.....12
I.3.4.4. Moulage souspression :.....12
I.3.5. Moulage par forgeage liquide :.....13
I.3.6. Moulage avec refroidisseurs :.....15
I.3.7. Moulage magnétique: 15
I.3.7. 1. Configuration expérimentale :.....16
I.3.7.2. Procédure expérimentale :.....17
I.4. Matériaux ferromagnétiques : 20
I.4.1. Propriétés des matériaux ferromagnétiques : 21
I.5. Le remplissage: 21
I.6. Défauts de moulage :[5].....22
I.6.1. Défauts formés pendant le retrait de solidification : 22
I.6.2.Défaut du aux gaz :.....24
I.6.3.Défaut du au matériau avec lequel est réalisé lemoule :.....25

I.6.4.Défaut formé pendant le remplissage dumoule : 25
I.6.5.Défautd'élaboration : 25
I.7. Conclusion : 25

Chapitre II FORMULATION MATHEMATIQUE

II.1.Introduction :……27
II.2.Équations gouvernantes de la dynamique de la chaleur :……...27
II.2.1. Equation de continuité :…….……..27
II.2.2. Equation de quantité de mouvement :…… ……28
II.2.3. Equation de conservation d'énergie :……...29
II.3. Modélisation thermique :…….....29
II.3.1-Différentes modes de transfert de chaleur :…….….29
II.4. Modèle de turbulence k-ε :……..…..30
II.4.1. Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente k :…….31
II.4.2.Equation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ε : ……....31
II.5.La méthode volume-of-fluide (VOF):…….…...31
II.5.1.Calculs équilibrés et transitoires de la méthode VOF :……32
II.5.2.Equation de la fraction volumique :…….....32
II.6.CONCLUSION :……..….33

Chapitre III METHODE DE DISCRETISATION

III.1.INTRODUCTION :……...…34
III.2. méthodes de discrétisation :…….34
III.2.1 Méthode des différences finies :……36
III.2.2. Méthode des volumes finis :……...36
III.2.3 Méthode des éléments finis :……...37
III.3.Calcul d'interfaces :……..37
III.3.1.Maillage :…….38
III.3.1.1 les méthodes lagrangiennes :…….39
III.3.1.2. les méthodes eulérienne :…….39
III.3.1.2.1.Les méthodes de suivi de front :……40
III.3.1.2.2.Les méthodes de suivi de volume :……...…40

III.4.Simulation numérique en fonderie :……..42
III.4.1.Mise en œuvre numérique :…….42
III.4.1.1.Définition de la géométrie :……..43
III.4.1.2.Définition des matériaux et des paramètres du procédé :…….43
III.4.1.3.Maillage de la géométrie :……44
III.4.1.4.Calculs :……46
III.4.1.5.Visualisation et analyse des résultats :……..46
III.5.Conclusion :……47

Chapitre IV Résultat et interprétation

IV. 1.Introduction : 48
IV.2. Indentification et validation de la simulationnumérique 48
IV.3. Les conditions initiales : 49
IV.4. Les conditions limitent : 49
IV.5. Influence su champ magnétique: 51
IV.6. interprétation des résultats de simulation : 52
IV.6.1 Champ de température : 53
IV.6.2 l'emplacement des capteurs pour l'analyse : 54
IV.6.3 Champ de pression : 56
IV.6.4 Champ de température : 61
IV.6.5 Champ de pression : 63
IV.7 Comparaison entre la première et la deuxième expérience : 66
IV. 7.1 : température : 67
IV. 7.2 : champ de pression: 69
IV. 8 Conclusion : 71
Conclusion générale……..... 72

Listes des figures

Figure.(I.1) : représenté d'un moule complet.Figure 1 : représenté d'un moule complet. 4
Figure (I.2) : Principe de la fabrication de pièces de fonderie 5
Figure (I.3): Principe de moulage en moule non permanent 6
Figure (I. 4): exemple sur moulage en moule permanent 7
Figure (I.5) : présenté le moulage en sable 9
Figure (I.6): Plaque modèle double 10
Figure (I.11): séquences du procédé de moulage par modèle gazéifiable 12
Figure (I.13) : Moulage en coquille sous pression 14
Figure (I.12) : moulage en coquille par gravité 14
Figure (I.14) : Moulage par forgeage liquide 16
Figure (I.14) : Configuration fabriquée 18
Figure (I.17) : la direction du champ magnétique 22
Figure (II.1) : Différent mode de transfert thermique 30
Figure (III.1) : méthode de discrétisations……...35
Figure (III.2) : Présentation des méthodes de calcul d'interface……..38
Figure (III.3) : Maillage carré……...39
Figure (III.4): Différentes méthodes de suivi de front,…….40
Figure (III.5) : Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque :……..41
Figure (III.6) : Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret.……..42
Figure (III.7): Définition de la géométrie…….…44
Figure (III.8): Définition des propriétés des matériaux……44
Figure (III.9) : Maillage de la géométrie……...46
Figure (III.10): Phase du Calcul……47
Figure (IV.1) : le moule multi-empreinte de validation. 48
Figure (IV.2): (a) Champs de fraction volumique de résultats de simulation Thierry BARRIERE, Boasheng LIU, Jean-Claude GELIN. (b) simulation notre analogique par le code de ANSYS. 49
Figure (IV.2) : le maillage de la géométrie 51
Figure (IV.3) Volume de fraction pendant le remplissage du moule ; a) Modèle de l'absence de champ magnétique ; b) Modèle de la présence de champ magnétique. 52

Figure(IV.4) Représentation spatiale de remplissage du moule (vof).....53
Figure (IV.5) Représentation spatiale de champ de température dans le domaine de calcul...54
Figure (IV.6) : les points choisis à une section du moule 55
Figure (IV.7) la variation de température dans le temps pour de différent position 56
Figure(IV.8) Représentation spatiale de champ de pression dans le domaine de calcul.....58
Figure (IV.9) la variation de pression dans le temps pour de différent position 59
Figure (VI.10) : détection des défauts de remplissage dans les empreintes. 60
Figure IV.11) Représentation spatiale de remplissage du moule (vof) 61
Figure IV.12) Représentation spatiale de champ de température dans le domaine de calcul ..62
Figure (IV.13) variation de température dans le temps pour de différent position 63
Figure (IV.14) Représentation spatiale de champ de pression dans le domaine de calcul.....65
Figure (IV.15)la variation de pression dans le temps pour de différent position 66
Figure (VI.15) : détection des défauts de remplissage dans les empreintes. 67
Figure (IV.16) Comparaison entre les Champs des températures dans chaque point pour les deux simulations. 69
Figure (IV.17) Comparaison entre les Champs des pressions dans chaque point pour les trois simulations.....71

Liste des tables

Tab.(I.1) : classification les procédés de la fonderie …….....07

Tab .(I.2) : matériaux ferromagnétiques et ferrimagnétiques associés à la température…….....…22

Tab. (IV.1) : les propriétés thermiques de fer…….……...50Tab. (IV.2) : les propriétés de matériaux du moule en acier……...50

Nomenclature

Notation	Signification	Unité
Cp	chaleur spécifique	[$J.Kg^{-1}.K^{-1}$]
p	pression	[Pa]
T	Température	[K]
T	variable du temps	[s]
τ_{xx}, τ_{yy}, τ_{zz}	contraintes visqueuses normales	[$N.m^{-2}$]
$\tau_{yz,xy,}\tau_{zx}$	contraintes visqueuses tangentielles	[$N.m^{-2}$]
u	vitesse suivant x	[$m.s^{-1}$]
v	vitesse suivant y	[$m.s^{-1}$]
w	vitesse suivant z	[$m.s^{-1}$]
x, y, z	coordonnées cartésiennes	
ρ	masse volumique	[$Kg.m^{-3}$]
ρ_0	masse volumique de référence	[$Kg.m^{-3}$]
μ	viscosité dynamique	[$Kg.m^{-1}.s^{-1}$]
dQ	Énergie élémentaire	[J]
λ	Conductivité thermique du matériau	[$W.m^{-1}.K^{-1}$]
A	section	[m^2]
dt	temps élémentaire	[s]
$\frac{dT}{dx}$	Gradient de température en x	[$K.m^{-1}$]
σ	constante de Stephan Boltzmann	[$W.m^{-2}.K^{-4}$]

A surface d'échange [m^2]

ε coefficient d'émission de la surface

Tstempérature de surface du corps [K]

Ta température ambiante. [K]

 La dissipation irréversible due au frottement visqueux

φ La densité de flux thermique [w/m^2]

vLa viscosité cinématique [m^2/s^2]

h La constante de Plank[Js^{-1}]

E Energie [J]

Abréviation

2D Deux Dimensions

EDP Equations aux Dérivées Partielles

EF Elément Finis

VF Volume Finis

MDF Méthode des Différences Finis

VOF Volume Of Fluid (volume de fluide)

MAC Marker And Cells (méthode de marqueur de volume)

TVD Total Variation Diminishing

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Procédé de formage des métaux, la fonderie consiste à couler un métal ou un alliage liquide dans un moule afin de reproduire une pièce dans ses formes intérieure set extérieures, en limitant autant que faire se peut les travaux de finition après refroidissement. Utilisées dans des secteurs variés (aéronautique, automobile, robinetterie, appareils ménagers,...) les techniques dépendent du matériau, des dimensions et des caractéristiques géométriques de la pièce à obtenir, mais également, des quantités à produire.

Nous avons proposé de faire deux simulations défirent avec les conditions normales de la pression atmosphérique, la première simulation ne applique pas le champ magnétique par contre la deuxième nous avons appliqué le champ, pour connaître l'effet de champ magnétique sur la coulé par injection des moules par faire une comparaison entre les deux pour trouvé les déférences et les résultats

Pour ce faire, on a devisé notre travail en quatre chapitres :

Le premier chapitre représente des généralités sur le moulage, il contient les techniques et les différents types de moulage, on représente les défauts lié au remplissage, tandis que le second représente la modélisation mathématique des équations de modèle utilise (Navier-Stokes, conservation de masse) et finalement nous représentons la méthode (vof)

Pour le troisième chapitre est consacré à la simulation numérique ou les trois méthodes de discrétisation sont exposées ainsi que le chois de la méthode et la discrétisation du modèle mathématique.

Le quatrième chapitre est consacré à la résolution, validation et la discutions des résultats numériques obtenus.

Et finalement terminer le travail par une conclusion générale

Chapitre I
Etude bibliographique

I.1 Introduction :

La fonderie consiste à couler un métal ou un alliage en fusion dans un moule pour obtenir, après solidification, une pièce dont les formes reproduisent celles du moule. Du fait qu'elles mettent en forme le métal liquide, les industries de la fonderie doivent maîtriser deux technologies essentielles : la fusion des métaux et alliages, et le moulage.

L'objectif de ce chapitre est de présenter la problématique industrielle liée à la formation des défauts de remplissage, ainsi que une synthèse sur le principe de la fabrication de pièces de fonderie. Après une présentation exhaustive des différences techniques de moulage nous avons défini plus précisément les défauts de moulage, avec quelques remèdes possibles.

I.2 le Moulage :

Le moulage ou fonderie est un ensemble de procédés qui permet de réaliser des pièces Métalliques brutes. Le moulage proprement dit consiste à réaliser des pièces brutes par coulée Du métal en fusion dans un moule en sable ou en métal (représentant l'empreinte de la pièce à Obtenir), le métal en se solidifiant, reproduit les contours et dimensions de l'empreinte du moule.[1]

I.2.1. Généralités sur le moulage:

Les organes et pièce constituants les machines et appareils proviennent de sources diverses de fabrication tels que forgeage, usinage, estampage, fonderie et la technique de fonderie est la plus souvent utilisée car elle est non seulement économique mais :

- Elle permet de produire des pièces de formes complexes (difficilement réalisables par usinage ou par d'autresprocédés).
- Obtention de pièces estidentique.
- Obtention de pièces massives telles que bâtis, volantsetc.

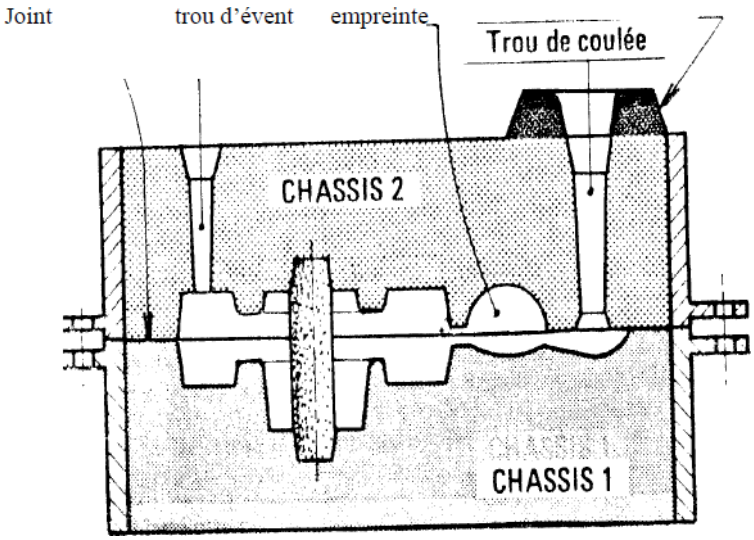


Figure.I.1 : représenté d'un moule complet**.**

Le procédé peut-être décrit d'une manière générale en plusieurs étapes (figure 2) :

- La conception des plans.
- La fabrication des moules.
- La préparation et la conduite de la fusion du métal ou de l'alliage.
- La coulée, c'est-à-dire le versement du métal liquide dans le moule.
- Le démoulage.
- Et enfin, le nettoyage, la finition et l'inspection finale de la pièce.[2]

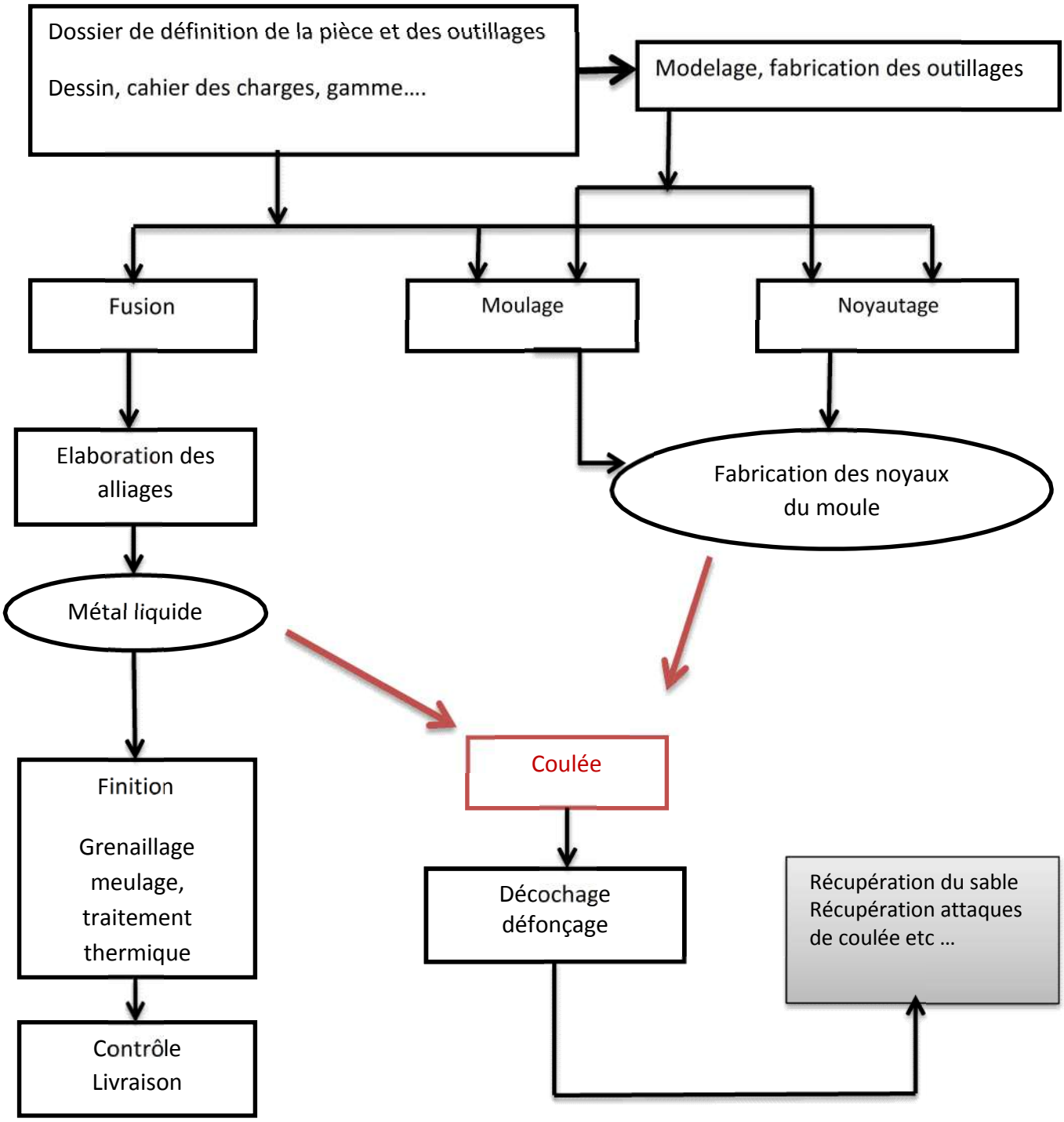


Figure.I.2 : Principe de la fabrication de pièces de fonderie. [2]

On distingue deux types de moules : moule non permanent, et moule permanent

Moulage en moule non permanent : Les moules destructibles sont fabriqués en sable ou en céramique. après la coulée et la solidification du métal, ils doivent être désagrégés pour libérer les pièces. Le moulage en sable est utilisé pour tous les alliages, mais particulièrement pour la réalisation de pièces en fontes ou en acier. Le procédé permet de réaliser des formes complexes de pièces unitaires ou de faibles séries pour un outillage de faible coût. [3]

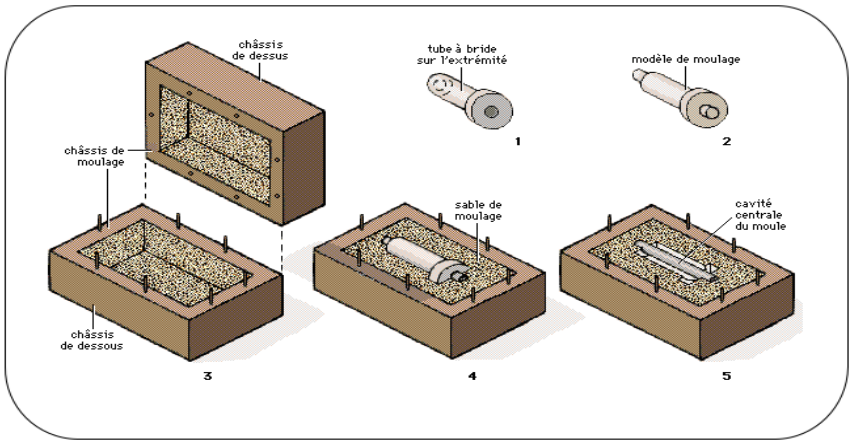


Fig. (I.3): Principe de moulage en moule non permanent

Moulage en moule permanent : Les moules permanents sont métalliques, réutilisables plusieurs centaines de milliers de fois. Ils permettent de couler des alliages légers (aluminium, magnésium, zinc). Le procédé permet de réaliser des formes complexes, le coût de l'outillage est élevé, il est adapté pour la production en grande série. [3]



Fig. (I. 4): exemple sur moulage en moule permanent[3]

I.2.2. Possibilité et avantage des moulages:

- Permet de réaliser des pièces de forme complexe;
- Permet de réaliser des formes intérieur et extérieur;
- Suivent les procédés de moulage on peut obtenir des pièces dont les dimensions sont plus au moins proches de la pièce finie;
- On peut réaliser des pièces de très dimension;
- Certaines procédés de moulage permettent une production eu très grandsérie.

I.2.3.Les inconvénients du moulage:

Les inconvénients dépendent des procèdes de moulage.

- Limitation de propriété mécanique des pièces (matériaux);
- Faible précision dimensionnelles et mauvaise état des surface certaines procédé (Exemple : moulage au sable);
- Problème environnement aux(fumées).

I.2.4. Classification des procédés de moulage:

Dans la spécialisation de la fonderie, on distingue pratiquement les fonderies suivantes :

Types de moulage			
Moulage à modèle permanent : **1.** Sables restantplastiques. **2.** Sablesdurcissement thermique. **3.** Sablesdurcissement chimique. ▪ Autodurcissants. ▪ Pargazage. **4.** Sablesdurcissement physique. ▪ Vprocess. ▪ Congélation.	**Moulage à modèles perdus :** **1.** Polystyrène expansé. **2.** Cireperdue **3.** Mercure congelé.	**Moulage en moules métallique:** **1.** Coquillegravité. **2.** Coquillebasse pression. **3.** Moulagesous pression. **4.** Moulage par forgeageliquide.	**Procédés spéciaux :** **1.** Moulageavec refroidisseurs. **2.** Moulageavec inserts. **3.** Moulage pièces bimétal. **4.** Moulage par centrifugation. **5.** Moulage en coulée continue. **6.** Moulage à empreintessouples.

TAB.I.1 : classification les procédés de la fonderie [4]

I.3. Les techniques de moulage :

I.3.1. Moulage en sable :

Le matériau est coulé dans un moule en sable. Le moule sera détruit après la fabrication de chaque pièce, Il faut donc refaire un moule pour chaque pièce.

Le moule est fabriqué en au moins deux parties. Chaque partie ayant une empreinte donnant la moitié des formes de la pièce. Pour chaque partie du moule on utilise donc un modèle (en métal, bois ou autre matériau) qui enfoncé dans le sable va laissé sont empreinte dans la Partie du moule. Le modèle est ensuite extrait du moule Avant que les deux parties du moule soient assemblées.

Lorsque la pièce à des formes intérieures qui Empêche toutes extraction du modèle, on insère entre les deux parties du moule un noyau en sable qui devra être maintenu dans le moule, puis détruit après démoulage de la pièce.

Ce noyau est donc fabriqué de la même manière que chacune des parties du moule en tassant du sable dans un modèle en deux parties ayant les formes de la pièce.[5]

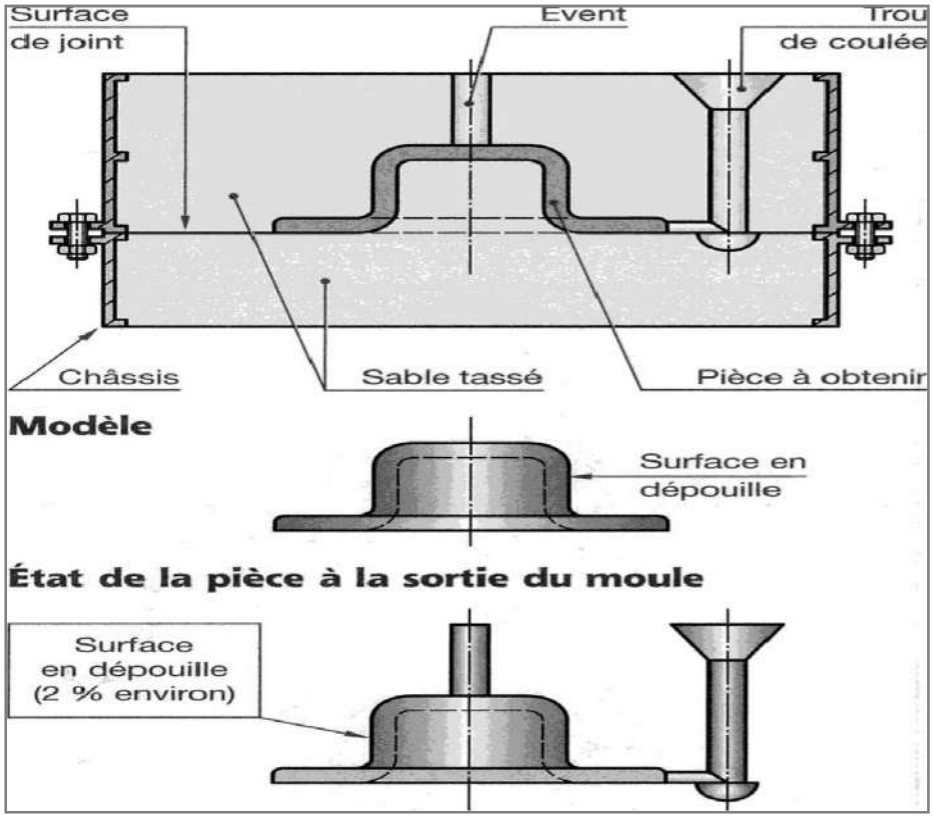


Figure (I.5) : présenté le moulage en sable

I.3.1.1. Avantages du procédé :

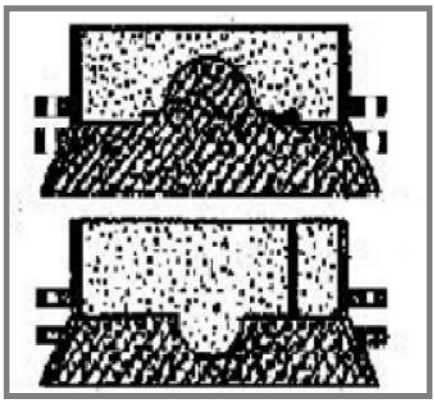
- Possibilité de mouler des matériaux dont le point de fusion est élevé (acier, fonte).
- Possibilité de mouler des pièces de (très) grande taille (Moulage de carters de machines)
- Procédé rentable pour les petites et moyennes séries (quelques dizaines à quelques milliers de pièces)

I.3.1.2. Inconvénients du procédé :

- ✓ Surfaces obtenues peu précises (± 0,5 mm) Nécessite un usinage des surfaces fonctionnelles
- ✓ Procédé peu rentable pour les grandes séries. [2]

I.3.2. Moulage mécanique :

Afin de pouvoir effectuer le moulage mécaniquement, de nombreux types de machines ont été crées pour réaliser le serrage et le démoulage. Le modèle est collé à une plaque matérialisant la surface de joint du moule, l'ensemble constitue une plaque modèle, qui peut être en bois, en plâtre ou métallique. Deux plaques modèles sont généralement nécessaires pour exécuter un moule (Par pression, Par secousses, Par projection)



Figure(I.6): Plaque modèle double [6]

I.3.3. Moulage par modèle perdu

I.3.3.1. Procédé par modèle gazéifiable

Le modèle est fabriqué en polystyrène expansé ou d'autres matériaux équivalents dont la masse volumique dans cet état est généralement comprise entre 16 et 28 g/L.

Les principaux intérêts de ce procédé sont l'utilisation d'un sable siliceux sans liant et la suppression du noyautage.par ailleurs, les pièces ainsi fabriquées ne comportent pas de bavures.

Les cavités que peut comporter une pièce sont conformées sans avoir recours à des noyaux, ce qui prédestine ce procédé à la fabrication économique de pièces très complexes, comportant parfois des formes intérieures non réalisables avec des noyaux en procédé des classiques. Ceci permet en particulier d'optimiser l'échange thermique dans certaines culasses très complexes:

- Culasses de moteurs d'automobiles;
- Carters cylindres et culasses de moteurs hors-bord;
- Collecteurs d'admission ;
- Réchauffeurs de gazole;
- Echangeurs thermiques, etc.

Des progrès importants ont été réalisés dans la fabrication des modèles avec l'utilisation du polystyrène, mieux adaptée aux impératifs du moulage. La technologie de fabrication des modèles permet d'obtenir des états de surface conformes aux exigences de l'industrie automobile. Les enduits ont également fait d'énormes progrès, ce qui permet d'éviter des défauts, tels que les métallisations (abreuvage) et la présence d'inclusions formées de résidus carbonés. A cet égard, l'enduit a le rôle clé de réguler l'échappement des résidus gazeux du polystyrène et d'absorber les résidus liquides par « effet buvard ».La qualité des enduites joue un rôle essentiel pour la robustesse du procédé. Les modèles, lorsqu'ils sont constitués de plusieurs parties, sont assemblés par collage avec des cires spéciales dites « hot melt » qui évitent les dégagements gazeux et assurent une bonne continuité des cordons décollage.

Ce procédé est similaire à la coulée au sable avec des vitesses de refroidissement du même ordre de grandeur voire légèrement plus faibles. De ce fait, et en particulier dans zones de forte épaisseur, se manifeste une microporosité liée au gazage (et parfois combinée à de la micro retassure). Cette microporosité-combinée à la structure grossière résultant de la solidification lente- affecte notablement les caractéristiques mécaniques, en particulier l'allongement et la résistance à la fatigue.[7]

I.3.3.2.Principe de fonctionnement du procédé par modèle gazéifiable (figure 11):

- Fabrication du modèle par expansion de billes de polystyrène dans un outillage de précision par de la vapeur de eau.
- Assemblage en grappes par collage, chauffage superficiel ou emboîtage.
- Enduction au trempé de la grappe dans une couches, cette dernière doit recouvrir intégralement le modèles y compris les cavités.
- Séchage de l'enduit à l'air pulsé.
- Mise en place de la grappe dans une cuve contenant un lit de sable, remplissage en pluie pour ne pas endommager la grappe, ni la déformer. Une vibration de faible amplitude permet au sable de bien remplir tous les orifices de la pièce.
- Coulée de l'alliage liquide sur le modèle. Celui-ci est progressivement détruit par décomposition en phase liquide puis gazeuse.
- Mise en pression de la cuve selon une rampe de montée en pression bien définie. Seule cette séquence est spécifique au procédé Castral® et nécessite une unité de mise en pression d'air et des cuves spéciales équipées de couvercles à fermeture rapide.
- Extraction de la grappe solidifiée et trempée dans l'eau pour éliminer l'enduit adhérant à la pièce.

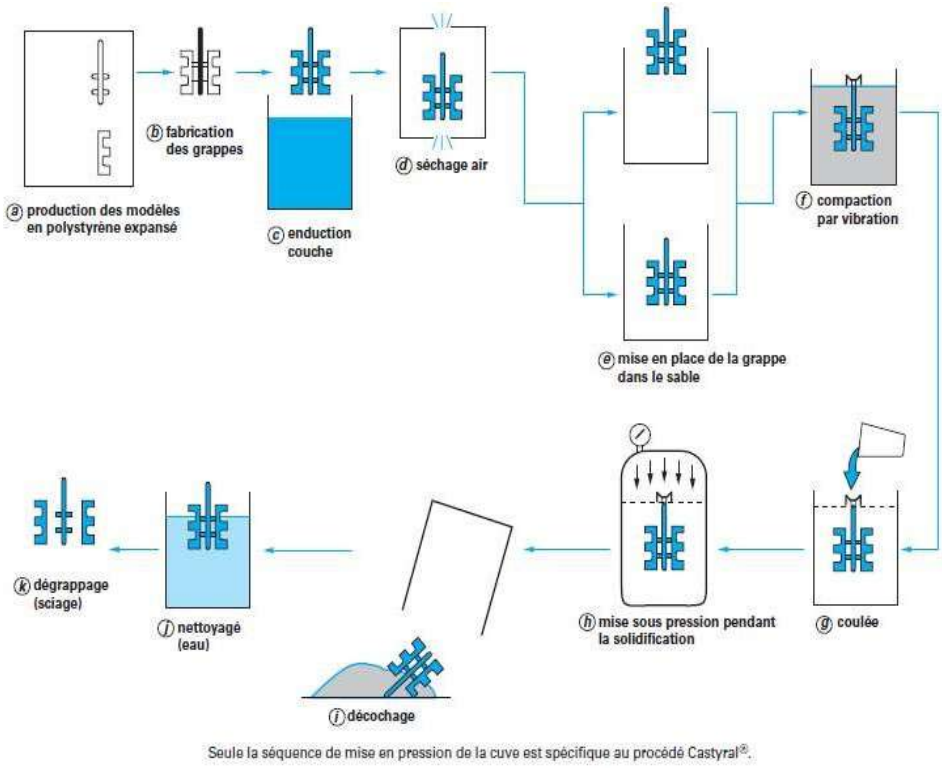


Figure.I.11 : séquences du procédé de moulage par modèle gazéifiable. [7]

I.3.3.3.Moulage à la cire perdue

Il existe deux variantes de ce procédé :

- Moule plâtre ou moule bloc.
- Moules en carapace (procédé à la silice colloïdale ou au silicate d'éthyle).

Ce procédé est utilisé pour des pièces ou sont exigés un excellent étant de surface et une grande précision dimensionnelle. L'épaisseur minimale peut atteindre 0.5 mm sur petites surfaces. Ce procédé doit être utilisé pour des pièces à haute valeur de refroidissement à la porosité. Il existe des variantes permettant d'éviter ces inconvénients. [7]

I.3.4. Moulage en moule métalliques:

I.3.4.1. Différents procédés de moulage en coquille:

Ces procédés sont classés et différenciés suivent le mode de mise en œuvre du métal liquide :

- Moulage en coquille par gravité : la coulée se fait par gravité, directement dans le gode de coulée de la coquille.
- Moulage en coquille basse pression : le métal est injecté dans l'empreinte

grâce la pression d'un gaz sur le bain liquide et introduit dans le moule par l'intermédiaire d'une buse d'injection.

- Moulage sous pression : le métal est injecté sous forte pression dans le moule par l'intermédiaire d'un piston agissant sur le métal liquide versé dans un conteneur.
- Moulage sous très haute pression (100 à150 MPa) forgeage liquide.
- Moulage en coquille centrifugée : il est utilisé principalement pour la fabrication de pièces cylindriques creuses.[5]

I.3.4.2.Moulage en coquille par gravité

Moulage par gravité on vers par gravité le métal fondu dans un moule en métal jusqu'à ce qu'il se solidifie. On ouvre alors le moule et on en retire la pièce. Le moule est généralement fait en font de fer mais on peut également utiliser des aciers à bas taux de carbone et des aciers pour moules. Les moules peuvent être de construction relativement

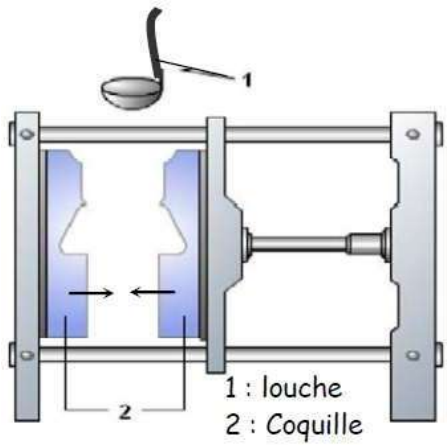


Figure.I.12 : moulage en coquille par gravité [8]

I.3.4.3.Moulage en coquille basse pression:

Le remplissage du moule se fait par mise en pression du four installé sous la coquille, à une vitesse lente pour éviter les turbulences. Une légère surpression est appliquée en fin de remplissage. Ce procédé est principalement utilisé dans l'industrie automobile pour la réalisation de pièces de sécurité.[10]

I.3.4.4.Moulage sous pression :

La fonderie sous pression est destinée à réaliser des pièces en grandes séries. Cette technologie consiste à injecter à grande vitesse le métal liquide dans un moule métallique on obtient ainsi un bon état de surface et on évite la maximum de reprise d'usinage.

Il existe l'emploi de machines spéciales à couler, le métal est injecté dans la

coquille sous l'action d'un piston (Figure.I.13).[8]

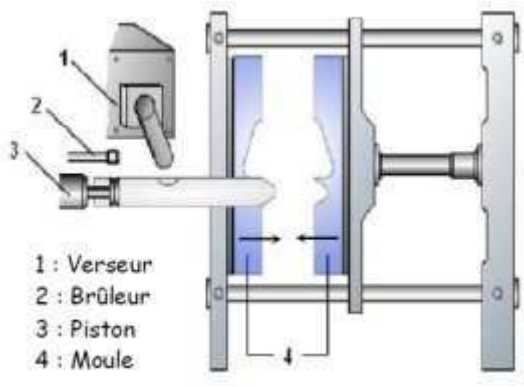


Figure.I.13 : Moulage en coquille sous pression. [9]

Les avantages :

- Grande précision dimensionnelle;
- Très bon état surface;
- Suppression de certains usinages;
- Obtention de pièces légères;
- Bonne caractéristiques mécaniques.[5]

Les inconvénients :

Le remplissage turbulent, par définition, conduit à des entraînements d'air et à la formation d'oxydes, qui créent des soufflures et des replis.

- Les pièces présentent des retassures à cœur malgré la pression appliquée. Les retassures sont des défauts de fonderie rencontrés lorsque le métal passe de l'état liquide à l'état solide.
- Les pièces ne peuvent pas être traitées thermiquement, ce qui limite les propriétés mécaniques des pièces.
- La faible liberté de formes due aux difficultés d'utilisation de noyaux.
- Les pièces ne peuvent pas être assemblées par soudage.[9]

I.3.5.Moulage par forgeage liquide :

Le forgeage (figure 10) s'applique aux alliages légers et se distingue des autres procédés en moules métalliques par:

- Un remplissage très calme de l'empreinte

- Une solidification sous une pression très élevée (100 MPa et jusqu'à 150 MPa), ce qui Confère aux pièces fabriquées de très bonnes caractéristiques mécaniques grâce à une structure très fine et à l'absence de porosités et permettra également de réaliser des composites à matrice métallique renforcée de fibres céramiques.

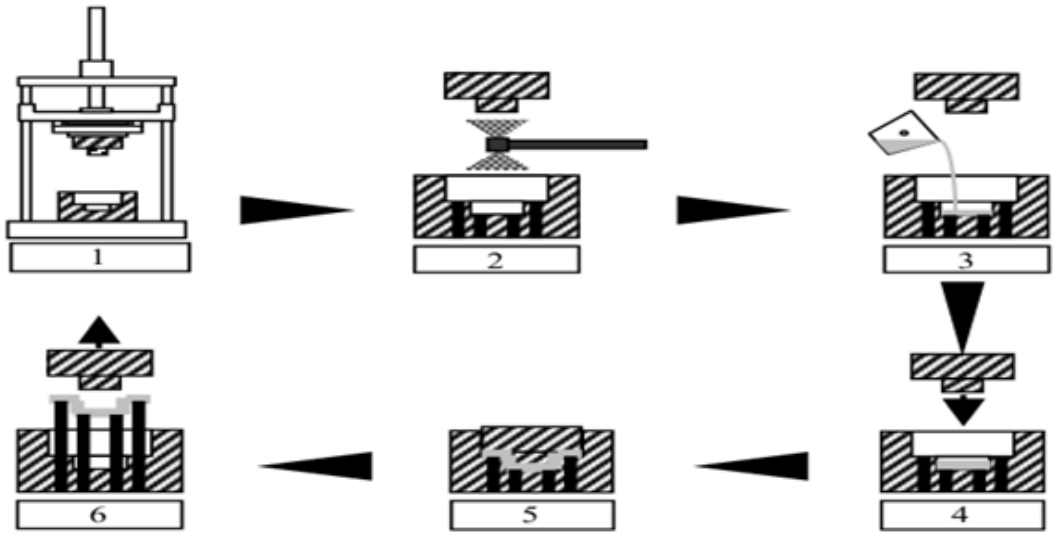


Figure (I.14) : Moulage par forgeage liquide

1. presse hydraulique ouverte
2. poteyage du moule
3. verse métal
4. fermeture presse
5. solidification sous pression
6. ouverture puis éjection de la pièce

II existe deux variantes:

- Le squeeze-casting indirect, qui utilise des moules semblables à ceux de la fonderie sous Pression; le remplissage de l'empreinte se fait à faible vitesse, de bas en haut, le piston d'injection servant ensuite à l'application de la pression de solidification.
- Le squeeze-casting direct, ou forgeage liquide, qui utilise des outillages semblables à des Matrices de forge; le métal liquide est dosé au préalable, puis versé directement dans la matrice. Une pression très élevée est ensuite appliquée par le poinçon supérieur sur toute la surface libre du métal pendant la durée de la solidification et du refroidissement.

I.3.6.Moulage avec refroidisseurs :

Les refroidisseurs sont des masses métalliques, de dimensions réduites, dont le rôle est de créer localement des vitesses de refroidissement de l'alliage coulé supérieures à celles des sables de moulage ou à celles du refroidissement normal de la pièce dans son moule pour:

- Orienter la solidification de la pièce et réduire ainsi localement les risques de retassures et de criques
- Donner une structure particulière à l'alliage coulé à l'endroit du refroidisseur

Ceux-ci peuvent être des refroidisseurs de surface, une de leurs faces sert alors de surface Moulante dans l'empreinte, ou être des refroidisseurs internes noyés dans la pièce.

I.3.7.Moulage magnétique:

Le moulage est un processus de fabrication, utilisé directement ou indirectement dans presque tous les secteurs. Il s'agit d'un processus de fabrication primaire qui influe sur les propriétés du produit résultant. A cette époque, il existe une demande d'innovation de procédés permettant de réduire les délais, les coûts de production sans compromettre la qualité des produits et de réduire les effets néfastes sur l'environnement.

La coulée en moule magnétique est un procédé innovant qui présente un grand potentiel pour remplacer les méthodes de coulée conventionnelles en raison des divers avantages qui lui sont associés.

La configuration de la MMC comprend l'enroulement du fil de cuivre afin qu'il se comporte comme un solénoïde à cavité creuse dans lequel le processus de moulage doit être exécuté. La configuration a été préparée avec un fil de cuivre de calibre 19 et l'enroulement est effectué jusqu'à ce que le champ magnétique requis soit créé.

La configuration de la préparation et les essais montrent qu'il est possible de créer une configuration similaire à grande échelle, de sorte que MMC puisse être utilisée au niveau industriel pour exploiter ses avantages de réduction des coûts, de réduction des délais, de l'effet réduit sur l'environnement et de la comptabilisation de propriétés améliorées. au produit résultant.

I.3.7.1. Configuration expérimentale :

• Dimensions du moule:

Le cylindre creux de diamètre = 200 mm et de hauteur = 250 mm est fabriqué en enroulant un fil de cuivre sur une âme creuse en acier. L'acier est utilisé comme noyau afin de confiner le champ magnétique à l'intérieur du solénoïde, car l'acier a une perméabilité magnétique élevée.

• Un fil de cuivre de calibre 19 est utilisé pour maintenir le courant pendant la période d'expérience requise sans dommage dû au chauffage.

• Conteneur en fer - Il est constitué d'une feuille de fer pur de 1 mm d'épaisseur laminée en forme de cylindre de diamètre extérieur de 180 mm et de hauteur de 250 mm et fermée à une extrémité.

• Alimentation - L'alimentation en courant continu constant est fournie à l'aide d'un autotransformateur monophasé 0-250 V et d'un redresseur en pont de 230 V et 10 A est utilisé.

• Le nombre de tours a été déterminé en vérifiant la valeur du champ magnétique à différentes valeurs de tour et l'enroulement a été arrêté lorsque la valeur de champ requise a été obtenue. Le capteur à effet Hall est utilisé pour la détection de champ magnétique produit à l'intérieur du moule.
Le moule est conçu pour produire un champ magnétique de 0-0,5 Tesla[10]

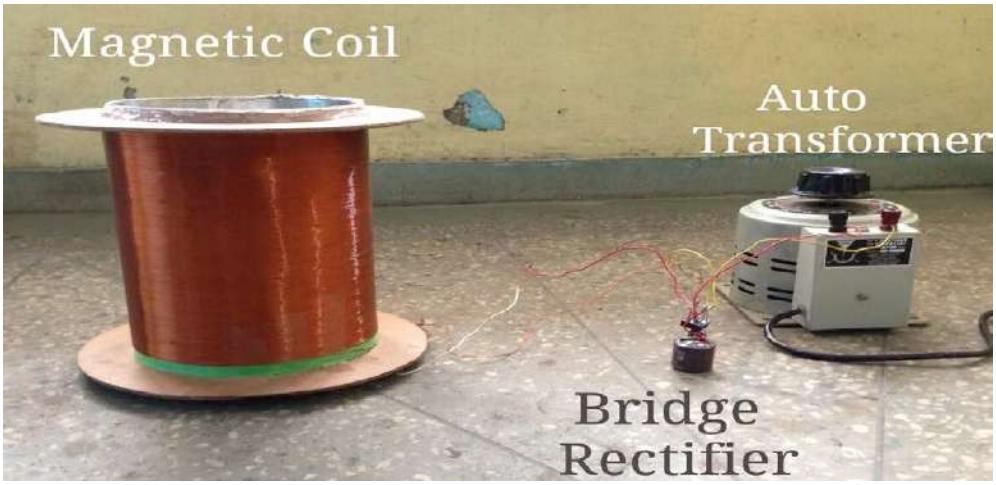


Figure (I.14) : Configuration fabriquée. [10]

I.3.7.2. Procédure expérimentale :

Initialement, les paramètres pour MMC sont définis. La première étape consiste à sélectionner un modèle de montage magnétique et à définir des paramètres tels que
le calibre du fil de cuivre, l'intensité du champ requis, la taille des tirs en acier,
la composition des tirs en acier, la taille des consommables motif en polystyrène et revêtement réfractaire sur sa surface. Les étapes suivantes sont suivies pour effectuer le moulage magnétique:

1. **Préparation de l'installation magnétique:**

Une boîte cylindrique creuse en aluminium est utilisée pour enrouler les bobines dessus. Du fil de cuivre de calibre 19 est utilisé. Une bobine de cuivre de 6,5 kg est utilisée pour l'enroulement. Une boîte en fer est insérée dans la boîte à moules pour former le noyau du champ magnétique.
Pour l'alimentation de la bobine de cuivre, un redresseur de puissance en série pour un autotransformateur est connecté. L'alimentation en courant alternatif est fournie à l'autotransformateur à travers lequel la tension est modifiée. La sortie de l'autotransformateur est connectée au redresseur de puissance, qui convertit le courant alternatif en courant continu, et cette alimentation en sortie continue est fournie aux bobines de cuivre.

2. **Motif EPS et revêtement réfractaire:**

La feuille EPS est découpée dans la forme souhaitée. Ce motif va se vaporiser pendant le processus de coulée. Le revêtement réfractaire du modèle joue un rôle essentiel dans le CMM, il forme une barrière physique et thermique entre le modèle et le moule magnétique. Ce revêtement empêche la diffusion de la masse fondue dans le moule en acier (Pierre-marrie Geoffrey et. Al.).
L'argile réfractaire est utilisée pour le revêtement réfractaire du motif. Sa composition chimique est de 30% d'oxyde d'aluminium, 60% de silice et le reste est constitué de MgO,CaO et oxydes de fer. Il peut supporter une température de 1600 ° C. Le motif est plongé dans la boue à base d'eau d'argile réfractaire, qui est un revêtement réfractaire. Une épaisseur constante de suspension sur le motif est maintenue. On laisse ensuite le motif sécher à la température ambiante.

3. Formation du moule magnétique:

Les cartouches en acier sont placées dans la boîte à moules, puis le motif EPS est conservé au centre et les cartouches en acier continuent à couler.

Les grenailles d'acier sont coulées jusqu'au niveau du bassin verseur. Après le tassement du motif dans les grenailles d'acier environnantes, l'alimentation est activée et un champ magnétique est appliqué sur les grenailles d'acier.

Ces grenailles d'acier se lient les unes aux autres en raison de la force magnétique et forment ainsi un moule constitué de grenailles d'acier autour du motif. Une intensité de champ croissante, qui peut être augmentée en augmentant la tension, augmente la résistance du moule. La tension peut être augmentée en utilisant l'autotransformateur jusqu'à une certaine limite uniquement parce qu'une valeur de tension plus élevée peut entraîner la combustion des bobines.

4. Coulée:

L'aluminium utilisé dans diverses industries telles que l'automobile, les biens de consommation, la défense, la construction, etc. est fabriqué par MMC.

La fonte d'aluminium est préparée à l'aide d'un four. Cette masse fondue est ensuite versée dans un moule magnétique. Alors que le jet de EPS se vaporisait et que la masse fondue prenait la place de ce motif, après 8 min 30 s, le champ magnétique était désactivé en coupant l'alimentation en tension et le moule s'effondrait soudainement. Le moulage est ensuite sorti et laissé refroidir à température ambiante.

Le petit casting de MMC est préparé avec succès.[10]

ETAT DE L'ART:

Vishal Sadade,et al:

Le moule magnétique pour la coulée (MMC) est un processus innovant ayant un grand potentiel pour remplacer les méthodes de coulée conventionnelles en raison des divers avantages qui y sont associés. La mise en place de Le moulage magnétique comprend l'enroulement du fil de cuivre de sorte qu'il se comporte comme un solénoïde à cavité creuse w quel processus de coulée doit être effectué. Pour la fabrication du moule, deux cylindres sont utilisés, un enroulement de cuivre est effectué pour le cylindre extérieur et le courant sont autorisés à passer à travers le fil, il en résulte une génération de champ magnétique à l'intérieur du cylindre. [11]

Pierre-Marie Geffroy :Mise en forme d'alliages ferreux et non ferreux par un procédé de fonderie assisté par un champ magnétique

L'étude concerne un procédé original de fonderie qui combine les avantages du moulage coquille et du procédé en moule plein, ou plus connu sous le nom du procédé "Lost Foam". Ce procédé, appelé moulage magnétique, repose sur l'utilisation d'un modèle facilement pyrolysable, et d'un moule malléable et recyclable, la grenaille. Au cours de la coulée, le métal liquide vient brûler le modèle, et la consolidation du moule en grenaille est alors assurée par l'application d'un champ magnétique externe. L'objet de cette étude est d'améliorer la qualité métallurgique et les tolérances dimensionnelles des pièces moulées, et de définir l'ensemble des avantages et inconvénients liés à cette nouvelle technologie. Ainsi, cette étude a permis d'établir des lois de comportement mécanique du moule en grenaille et les lois reliant la cohésion du moule en grenaille et le champ magnétique appliqué externe. Ce travail monte également que, via les propriétés thermiques du moule, les alliages ferreux et non ferreux coulés présentent un affinement de leur microstructure qui conduit à des propriétés mécaniques supérieures à celles obtenues par un moulage en sable traditionnel, mais inférieures à celles obtenues par un moulage en coquille. [12]

Xabier Peña, , et al.. :Le procédé de moulage magnétique

Le procédé de moulage magnétique est basé sur le même concept de moulage que le procédé en moule plein, plus connu sous le nom générique de procédé "Lost Foom". Dans le cas du procédé de moulage magnétique, le sable non lié utilisé dans le procédé "Lost Foam" est substitué par de la grenaille d'acier à laquelle est appliqué un champ magnétique au cours de la coulée et de la solidification du métal. Dans ce cas, la consolidation mécanique du moule en grenaille n'est plus assurée par un liant chimique comme dans les procédés traditionnels, mais par les forces d'aimantation développées entre les granules d'acier sous l'action du champ magnétique. Les principaux avantages du moule magnétique combinent ainsi ceux du moule en coquille et ceux du procédé "Lost Foom". rapport aux principaux procédés de moulage utilisés en fonderie. [13]

Messoudi nawel :

Ce projet vise à l'obtention du diplôme de simulation numérique de mélange de remplissage du moule de cuivre et de 5 % de zinc, et d'analyser les défauts peuvent se produire pendant le processus de moulage. En utilisant la modélisation par éléments finis adoption de la technologie sur le programme ANSYS. Pendant la simulation, le stade de l'emballage considéré certaines propriétés telles que la densité et de la minorité thermique Elena et la chaleur spécifique du métal liquide et des valeurs fixes en acier. Il est connu comme le modèle de la tourmente k - ε.
Les résultats ont montré l'importance de simulation pour l'analyse de plusieurs phénomènes pendant le processus de remplissage du moule, qui ne peut être observée appliquée.[14]

I.4.Matériaux ferromagnétiques :

Les matériaux ferromagnétiques sont les substances qui présentent un fort magnétisme dans la même direction du champ, lorsqu'un champ magnétique leur est appliqué. Premièrement, nous devons savoir ce qu'est un domaine. Il s'agit en réalité d'une toute petite zone de matériaux ferromagnétiques dont l'orientation générale du spin est due à l'effet de la mécanique quantique. Cet effet est vraiment une interaction d'échange. C'est; Lorsque nous considérons des électrons non appariés, ils interagissent entre deux atomes et s'alignent dans une région minuscule avec la direction du champ magnétique (Figure 15). Ce mécanisme du matériau ferromagnétique est le ferromagnétisme. Cela peut être défini comme certains matériaux (cobalt, gadolinium, fer, etc.) deviendront des aimants permanents avec l'utilisation du champ magnétique.

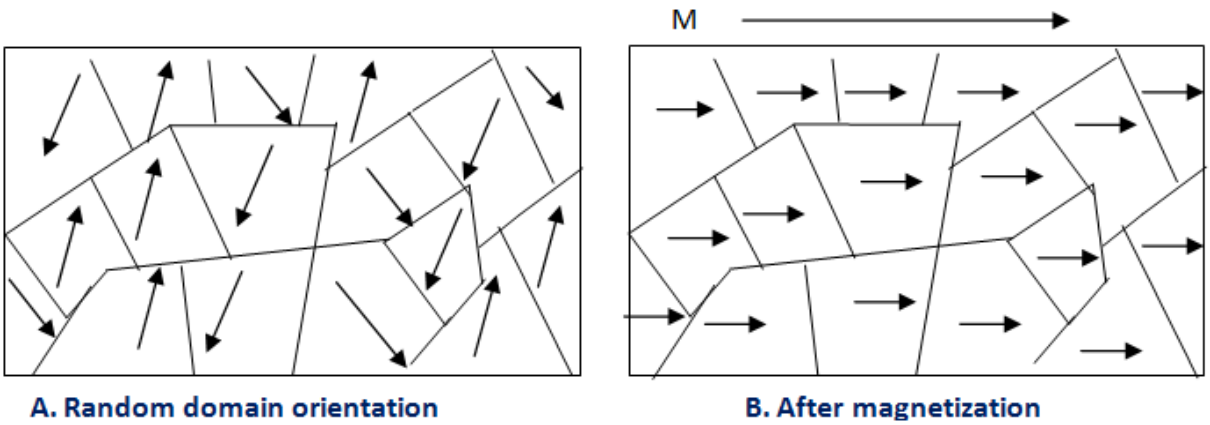


Figure (I.17) : la direction du champ magnétique

Le tableau ci-dessous rassemble une sélection de matériaux ferromagnétiques et ferrimagnétiques associés à la température au-delà de laquelle ils cessent d'exhiber des propriétés d'aimantation spontanée

Matériaux	T° de Curie		Susceptibilité magnétique χ_m
	K	°C	
Co	1 388	1 115	70
Fe α, aciers ferritiques et martensitiques	1 043	770	200
MnBi	630	357	
Ni	627	354	110
MnSb	587	314	
CrO_2	386	113	
MnAs	318	45	
Gd	292	19	
Dy	88	-185	
EuO	69	-204	

Tableau (I.2) : matériaux ferromagnétiques et ferrimagnétiques associés à la température

I.4.1. Propriétés des matériaux ferromagnétiques :

- Lorsqu'une tige de ce matériau est placée dans un champ magnétique, elle s'aligne rapidement dans la piste du champ.
- Il est fortement attiré par l'aimant.
- Le mécanisme de ferromagnétisme n'est pas présent dans les liquides et les gaz.

I.5. Le remplissage:

Le remplissage des moules par métal permet d'obtenir les formes les plus complexes (pleines ou creuses). On obtient alors, sans joints mécanique ni soudures, des pièces de tailles très variées, allant de moins d'un gramme jusqu'à plusieurs centaines de tonnes. La façon de couler n'est pas indifférent et cette opération demande un véritable tour de main, pour assures la

Continuité du remplissage et le débit de la coulée. L'engorgement de la coulée permet d'éviter l'entraînement d'air, ce qui provoquerait des soufflures dans la pièce et d'autres défauts de moulage.

I.6. Défauts de moulage

Un défaut de moulage est une irrégularité indésirable dans une pièce obtenue par moulage, et caractéristique du procédé d'obtention et du métal coulé. Certains défauts peuvent être réparés mais ils peuvent aussi mener au rebut de la pièce.

On peut distinguer cinq catégories de défauts, en se fondant sur leurs mécanismes de formation, à savoir :

- les défauts formés pendant le retrait et qui sont liés à la solidification,
- les défauts dus aux gaz,
- les défauts liés au matériau avec lequel est réalisé le moule,
- les défauts formés pendant le remplissage du moule
- et les défauts d'élaboration.

L'apparition d'un défaut peut toutefois résulter de la combinaison de plusieurs phénomènes. Un correctif apporté au procédé peut éviter la formation d'un défaut et peut aussi créer un défaut d'un autre type. [5]

I.6.1.Défauts formés pendant le retrait de solidification :

Les retassures: Cavités ouvertes ou fermées à contours rugueux, localisées dans les dernières portions de métal solidifié. Elles sont dues aux contractions de volume subies par le métal liquide au cours de la solidification.

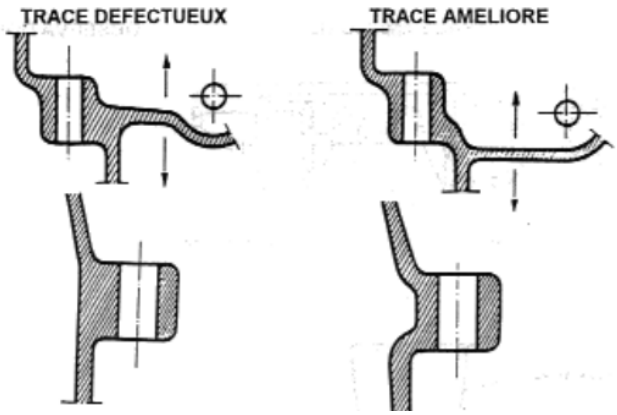


Figure (I.18) : Défauts formés pendant le retrait de solidification (Les retassures) [5]



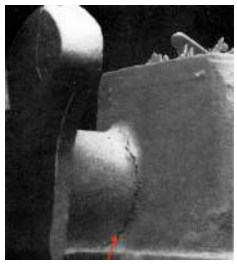
Retassure ouverte **Retassure borgne** **Retassure d'angle** **Retassure de noyau**

Ce défaut de retrait apparait lorsque le métal liquide ne parvient plus à compenser les contractions dues à la solidification du métal: on lutte contre sa formation par un dimensionnement et un positionnement correct de la (des) masselotte(s), qui va (vont) alimenter la pièce en métal liquide au cours du retrait. Si la (les) masselotte(s) est (sont) correctement conçue(s), elle(s) sera(ont) la (les) dernière(s) zone(s) solidifiée(s) et il est normal qu'elle(s) soit(ent) constellée(s) de défauts dus au retrait.



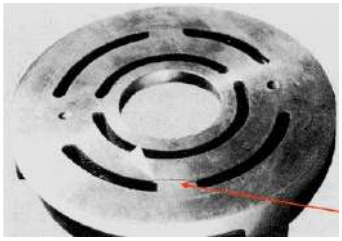
Les criques: Il s'agit d'une déchirure à chaud qui se produit au cours de la solidification en présence de contraintes mécaniques. Elle se développe généralement dans les parties chaudes.







Les tapures: Il s'agit d'une déchirure qui se produit au cours du refroidissement du solide, en présence de contraintes mécaniques. Elle se développe généralement dans les parties encore chaudes et est due à une contraction thermique.



Les criques et les tapures sont dues à un tracé défectueux (différences d'épaisseur importantes, moulage trop ramifié) ou à l'état du moule (rigidité, déformation, rugosité,etc).

Le gauchissement: Une pièce conçue avec des parois trop minces pour le matériau cible risque fortement de se gondoler. Ce phénomène est désigné par le terme de « gauchissement » et peut être évité aisément en suivant les mêmes règles que pour la retassure, c'est-à-dire en respectant les indications générales d'épaisseur de paroi.

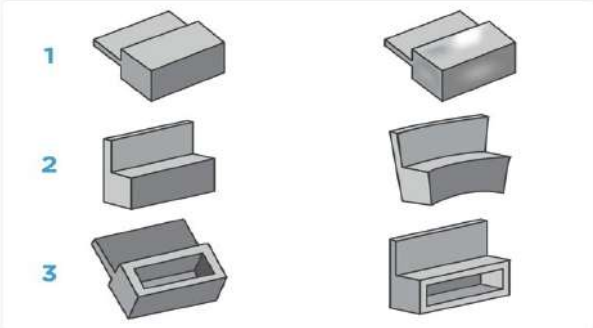


Figure (I.19) : Défauts formés pendant le retrait de solidification (Le gauchissement)

I.6.2.Défaut du aux gaz :

Les soufflures: Cavités à parois lisses crées et occupées par les gaz provenant de l'air entraîné pendant le remplissage et non évacué (mauvaise perméabilité du moule), de la réaction métal liquide/moule/poteyage, formées lors des réactions d'élaboration ou provenant du moule (humidité,...). Les soufflures apparaissent comme une piqure ou un cratère. Elles peuvent également rester piégées au sein du métal, affaiblissant alors dangereusement la pièce moulée. Pour limiter l'absorption de gaz par le métal en fusion, on peut traiter le métal avant la coulée, en le maintenant sous vide ou sous une atmosphère de gaz peu solubles comme l'argon. On limite aussi la solubilité des gaz en travaillant avec des surchauffes, en réduisant les turbulences au moment de la versée du métal dans le moule, en travaillant la forme des canaux d'alimentation et la vitesse de remplissage et en stockant le moule dans un endroit sec pour éviter les reprises en hydrogène.

Les méthodes de détection des soufflures utilisées actuellement sont la radiographie, le contrôle par ultrasons et la magnétoscopie.

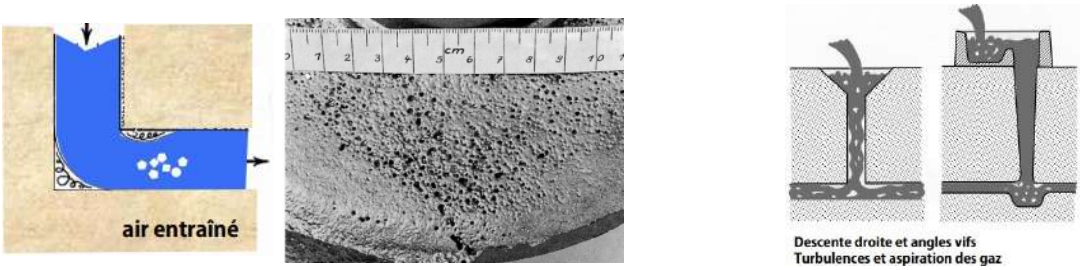
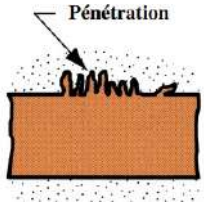


Figure (I.20) : Défaut du aux gaz (Les soufflures)

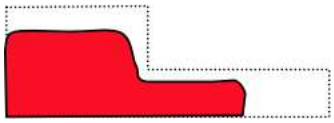
I.6.3.Défaut du au matériau avec lequel est réalisé le moule :

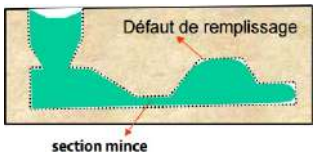
Pénétration: quand le métal coulé est très fluide, il peut pénétrer dans les porosités du sable. La surface de la pièce est un mélange de métal et de sable.



I.6.4.Défaut formé pendant le remplissage du moule :

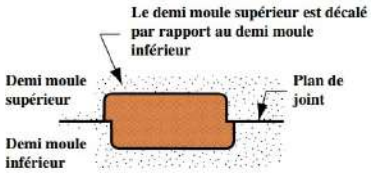
Défaut de remplissage: La pièce se solidifie avant de remplir complètement l'empreinte ou présente un manque de matière dans les parties supérieures du moulage. Ceci peut être due à une température de coulée basse, une fluidité et coulabilité insuffisantes ou un tracé incorrect de la pièce (sections trop faibles).





I.6.5.Défaut d'élaboration :

Défaut de joint: Défaut de mise en position des deux demi moules l'un par rapport al' autre.



I.7.Conclusion :

Présenté dans ce chapitre quelques généralités sur le procédé de remplissage des moules (le moulage). Et dans le cadre de ce travail nous avons défini quelques types de techniques utilisée dans cette opération et qui permettent de réaliser des pièces métalliques brutes , on a basé sur le moulage magnétique. Aussi nous avons traité les défauts rencontrés le plus souvent en moulage.

Chapitre II
Modélisation mathématique

II.1.Introduction :

Dans ce chapitre et à la suite d'une présentation brève du système d'équations générales régissant l'écoulement d'un fluide newtonien incompressible en régime turbulent. Nous ne considérons ici que les aspects relatifs aux caractéristiques dynamiques de l'écoulement turbulent avec transfert de chaleur et sans transfert de masse.

Depuis quelque décennie, Prandtl, Navier-stockes et Reynolds ont pu découvrir les lois fondamentales de la mécanique des fluides, il restait aux ingénieurs et l'homme de science exploiter ces loi et à les mettre au service de l'homme.

Dans son ensemble, la mécanique des fluides est gouvernée par trois équations fondamentales. Celles-ci sont l'équation de continuité, l'équation de la quantité de mouvement et l'équation d'énergie [7]

II.2.Équations gouvernantes de la dynamique de la chaleur :

Le mouvement d'un fluide est modélisé par les équations de Navier-Stokes qui permet de traiter les fluides classiques comme l'air, l'eau, l'huile ou aussi les métaux fondus. Les équations gouvernantes sont :

La conservation de la masse ou l'équation de continuité,

La conservation de la quantité de mouvement,

La conservation d'énergie (premier principe de la thermodynamique).

La formulation mathématique des lois de la conservation régissant les phénomènes physiques comme les écoulements de fluides, est généralement écrite sous forme d'équations aux dérivées partielles comme suit [8]

II.2.1. Equation de continuité :

C'est l'équation qui exprime la loi de conservation de la masse pour un volume de contrôle matériel. Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\delta(\rho v)}{\delta y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}=0 \text{(II.1)}$$

Ou dans une notation plus compacte

$$\frac{\partial \rho}{\partial t}+\text{div }(\rho \mathbf{u})=0 \text{(II.2)}$$

Ainsi, l'incompressibilité d'un fluide ($\frac{\partial \rho}{\partial t}$ =0) se traduit par la relation suivante :

$$\text{div } u=0 \qquad \text{(II.3)}$$

II.2.2. Equation de quantité de mouvement :

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir lesrelations entre les caractéristiques du fluide lors de son mouvement et les causes qui leproduisent. Il indique que le taux de variation de quantité de mouvement contenu dans le volume de contrôle est égal à la somme de toutes les forces extérieures qui lui sont Appliquées. Les équations de la quantité de mouvement (ou équations de Navier-Stokes) pour des fluides newtoniens incompressibles en régime laminaire sont données par les expressions suivantes :

Suivant OX :

$$\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial t}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial x}+\left(\frac{\partial \tau xx}{\partial x}+\frac{\partial \tau yx}{\partial y}+\frac{\partial \tau zx}{\partial z}\right)+(\rho+\rho_0)g_x \text{(II.4)}$$

Suivant OY :

$$\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial t}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial x}+\left(\frac{\partial \tau xy}{\partial x}+\frac{\partial \tau yy}{\partial y}+\frac{\partial \tau zy}{\partial z}\right)+(j\times B)+(\rho+\rho_0)g_y \text{(II. 5)(II.5)}$$

Suivant OZ :

$$\left(\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial t}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)=-\frac{\partial P}{\partial x}+\left(\frac{\partial \tau xz}{\partial x}+\frac{\partial \tau yz}{\partial y}+\frac{\partial \tau zz}{\partial z}\right)+(\rho+\rho_0)g_z \text{(II.6)}$$

Où les composants du tenseur des contraintes visqueuses sont donnés par :

$$\mu=\tau_{xy}=\mu\left[\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right] \text{(II.7)}$$

$$\tau_{yz}=\tau_{zy}=\mu\left[\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial x}\right] \text{(II.8)}$$

$$\tau_{xx}=\tau_{zx}=\mu\left[\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial x}\right] \text{(II.9)}$$

$$\tau_{xx}=\mu\left[2\frac{\partial u}{\partial x}\right];\tau_{yy}=\mu\left[2\frac{\partial v}{\partial y}\right];\tau_{zz}=\mu\left[2\frac{\partial w}{\partial z}\right] \quad \textbf{(II.10)}$$

II.2.3. Equation de conservation d'énergie :

L'équation de conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la Thermodynamique. Ce principe met en relation les différentes formes d'énergie par :

$$\rho C_p\frac{DT}{Dt}+\rho C_p U.\nabla T=\text{div}(\lambda\,\text{grad}T)+\Phi \quad \textbf{(II.11)}$$

$$\Phi=\tau_{xx}\frac{\partial u}{\partial x}+\tau_{yx}\frac{\partial u}{\partial y}+\tau_{zx}\frac{\partial u}{\partial z}+\tau_{xy}\frac{\partial v}{\partial x}+\tau_{yy}\frac{\partial v}{\partial y}+\tau_{zy}\frac{\partial v}{\partial y}+\tau_{xz}\frac{\partial w}{\partial z}+\tau_{yz}\frac{\partial w}{\partial z}+\tau_{zz}\frac{\partial w}{\partial z} \quad \textbf{(II.12)}$$

Avec :

$\rho C_p\frac{DT}{Dt}$:La variation totale d'énergie

$\rho C_p U.\nabla T$: La variation d'énergie par convection

div (λ gradT) : La variation d'énergie par conduction

Φ : La dissipation irréversible due au frottement visqueux. [16]

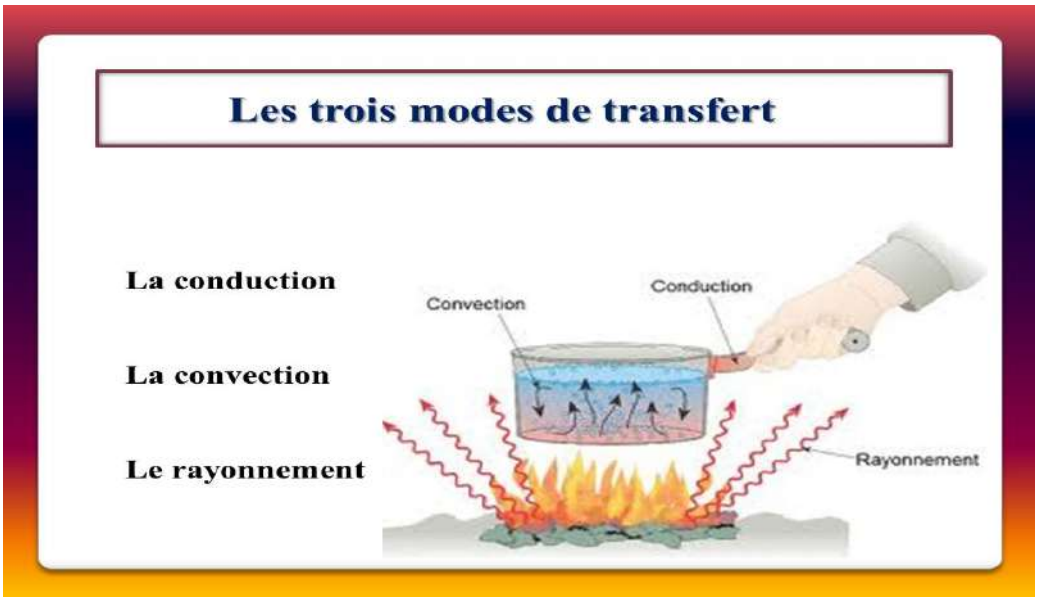
II.3. Modélisation thermique :

Un transfert thermique, appelé plus communément chaleur est l'un des modes d'échange d'énergie thermique entre deux systèmes. C'est une notion fondamentale de la thermodynamique. Contrairement au travail, la chaleur est le bilan de transferts d'énergie microscopiques et désordonnés.ne peut être ni mesurée ni observée directement, mais ses effets donnent lieu à des observations et des mesures.-

II.3.1-Différentes modes de transfert de chaleur :

La transmission de chaleur est la transmission d'énergie d'une zone à une autre sous l'influence de la différence de température, car nous avons que le flux de chaleur n'est pas seulement lié à une relation, mais concerne le mélange de différentes lois des matériaux indépendants. Le caloporteur fonctionne selon trois modes de transfert de chaleur.-

- La conduction.
- La convection.
- Le rayonnement



Figure(II.1) : Différent mode de transfert thermique

II.4. Modèle de turbulence k-ε :

Il existe différents modèles de turbulence, qui se distingue par un nombre d'équation de transport supplémentaires nécessaires pour fermer le système d'équations du problème à résoudre. Dans notre cas, on a utilisé le modèle k-ε standard qui est un modèle semi empirique basé sur le concept de Boussinesq reliant les contraintes de Reynolds au taux de déformation moyen :[15]

$$-\overline{\rho u_i' \rho u_j'} = \mu_t \left[\frac{\overline{\partial U_i}}{\partial x_j} + \frac{\overline{\partial U_j}}{\partial i}\right] - \frac{2}{3}\delta_{ij}\rho k \quad \textbf{(II.13)}$$

$\left[\frac{\overline{\partial U_i}}{\partial x_j} + \frac{\overline{\partial U_j}}{\partial i}\right]$: est le tenseur de déformation.

Où $k = \frac{U_i'^2}{2}$ représente l'énergiecinétique turbulente.

Par analogie avec la viscosité laminaire caractérisée par une vitesse (des molécules) etune distance (le libre parcours moyen), la viscosité turbulente, caractérisée par une vitesse $\sqrt{K}$ et une distance $K = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon}$ est donnée par B

$$\nu_t = C_\mu \sqrt{K} \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad \textbf{(II.14)}$$

Avec :c=0.09 et ε le taux de dissipation.

K et ε sont obtenus à partir de leur équation de transport présentée ci-dessous.

II.4.1. Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente k :

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho K U_i)}_{1} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x}\right]}_{2} + \underbrace{G_K + \rho\varepsilon}_{34} \quad \textbf{(II.15)}$$

1 : terme convectif

2 : terme diffusif

3 : taux de production

4 : taux de dissipation

II.4.2.Equation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ε :

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu t}{\sigma\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad \text{(II.16)}$$

Le terme de production $\mathbf{G_k}$est donnée par :

$$G_k = -\rho\overline{U_i U_j} = \rho\upsilon_t\left(\frac{\partial \overline{Ui}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{Uj}}{\partial x_i}\right)\frac{\partial \overline{Ui}}{\partial x_j} \qquad \textbf{(II.17)}$$

II.5.La méthode volume-of-fluide (VOF):

La méthode VOF est une méthode qui a été introduite par Hirt & Coll. en 1981 qui s'utilise pour la simulation d'écoulements entre plusieurs phases non miscibles. Il s'agit d'une méthode Eulérienne à 1 fluide, et elle est particulièrement adaptée dans le cas d'écoulements à interfaces fortement déformées, puisqu'elle permet de suivre la position de l'interface dans un maillage fixe. [5]

Le régime VOF est utilisé pour suivre le déplacement de la surface libre. Chaque élément est défini comme un volume du contrôle dans ce régime, et la fraction volumedu fluide F, définie sur chaque volume de contrôle, satisfait l'équation suivant, les mouvements de surface libre. [17]

$$\frac{\partial F}{\partial T} + u.\nabla F = 0 \qquad \textbf{En } \Omega \textbf{(II.18)}$$

F : représente le facteur de remplissage,

U : désigne vecteur vitesse,

t : représente le temps et Q.

Ω : est le domaine de calcul.

II.5.1.Calculs équilibrés et transitoires de la méthode VOF :

La formulation de la méthode VOF se fonde sur le fait que deux ou plusieurs fluides (ou phases) n'interpénètrent pas. Pour chaque phase supplémentaire que nous joutons à notre modèle, une variable est introduite. En chaque volume de contrôle,Les fractions volumiques de toutes les phases sont sommées à l'unité. Les champs pour toutes les variables et propriétés sont partagés par les phases et représentent des valeurs volumiques moyennes, la fraction volumique de chacune des phases est connue à chaque emplacement. Ainsi les variables et les propriétés en n'importe quelle cellule donnée sont purement représentant d'une des phases, ou représentant d'un mélange des phases, selon les valeurs de la fraction volumique. En d'autres termes, si la fraction volumique de K^{ieme}fluide dans la cellule est notée par C_k , elle peut prendre une des cas suivant :

- $C_k = 0$: la cellule et vide (du K^{ieme} fluide) ;
- $C_k = 1$: la cellule et vide (du K^{ieme} fluide) ;
- $0<C_k< 1$: la cellule contient l'interface entre le fluide K^{ieme} et un ou plusieurs autres fluides.

Avec :

$$C_k = \frac{\partial \Omega_k}{\partial \Omega_{maill}} \quad \textbf{(II.19)}$$

$\partial \Omega_{maill}$: représente le volume total de la maille de calcul et Ω_k le volume de la partie de la maille occupée par la phase. Basé sur la valeur locale du, les propriétés et les variables appropriées seront assignés à chaque volume de contrôle dans le domaine.

II.5.2.Equation de la fraction volumique :

Le cheminement de l'interface (s) entre les phases est accompli par la solution d'une équation de continuité pour la fraction volumique d'une (ou plus) des phases. Pour

La K^{ieme} phase, cette équation a la forme suivante :

$$\frac{1}{\rho k}\left[\frac{\partial}{\partial t}(C_k \rho_k) + \nabla.(C_k \rho_k \vec{V_k}) = S_{ck} + \sum_{p=1}^{n}(\dot{m}_{pk} - \dot{m}_{kp})\right] \quad \textbf{(II.20)}$$

est le transfert de masse à partir de la phase k à la phase p et $\dot{m}_{pk}$ est le transfert de masse à partir de la phase p à la phase k. Par défaut, la limite de source du côté droit de l'équation (II.25), S_{ck} est zéro, mais nous pouvant spécifier une source de masse constante ou définie par l'utilisateur pour chaque phase.

L'équation de la fraction volumique ne sera pas résolue pour la phase primaire ; La fraction volumique de la phase primaire sera calculée est basé sur la contraintesuivante :

$$\sum_{k=1}^{n} Ck = 1 \quad \textbf{(II.21)}$$

II.6.CONCLUSION :

Nous avons présenté dans ce chapitre les différentes équations utilisés pour résoudre un problème couplé dans le cas diphasique, où la méthode de volume de fluide (VOF) qui est une méthode de construction d'interface est utilisée. La résolution analytique de problèmes de notre est souvent impossible, donc on fait appel aux méthodes numériques. C'est l'objectif du chapitre suivant.

Chapitre III
Les méthodes discrétisation

III.1.INTRODUCTION :

Les équations de base régissant le phénomène conjugué du remplissaged'une empreinte ont été établis dans le chapitre II. On savait que la solution analytique exacte est possible pour de certains cas d'écoulements simples.Pour le cas général des écoulements turbulents en diphasique(VOF), le système d'équations ne peut être résolu directement vu la non-linéarité des équations. En raison de leur complexité, ces équations sont résolues à l'aide d'une méthode numérique. Plusieurs méthodes numériques sont disponibles dans la littérature(éléments finis, différences finies et volumes finies).

Ces méthodes tendent toutes à linéaires les systèmes d'équations en des systèmesalgébriques dont la résolution est possible.

Le but de ce chapitre n'est pas de détailler précisément chaque méthode mais plutôt de présenter les différentes approches et de justifier notre choix.

III.2. méthodes de discrétisation :

La discrétisation se fait en suivant des trois méthodes :

- ❖ Méthode des différences finies.
- ❖ Méthode des volumes finis.
- ❖ Méthode des éléments finis.

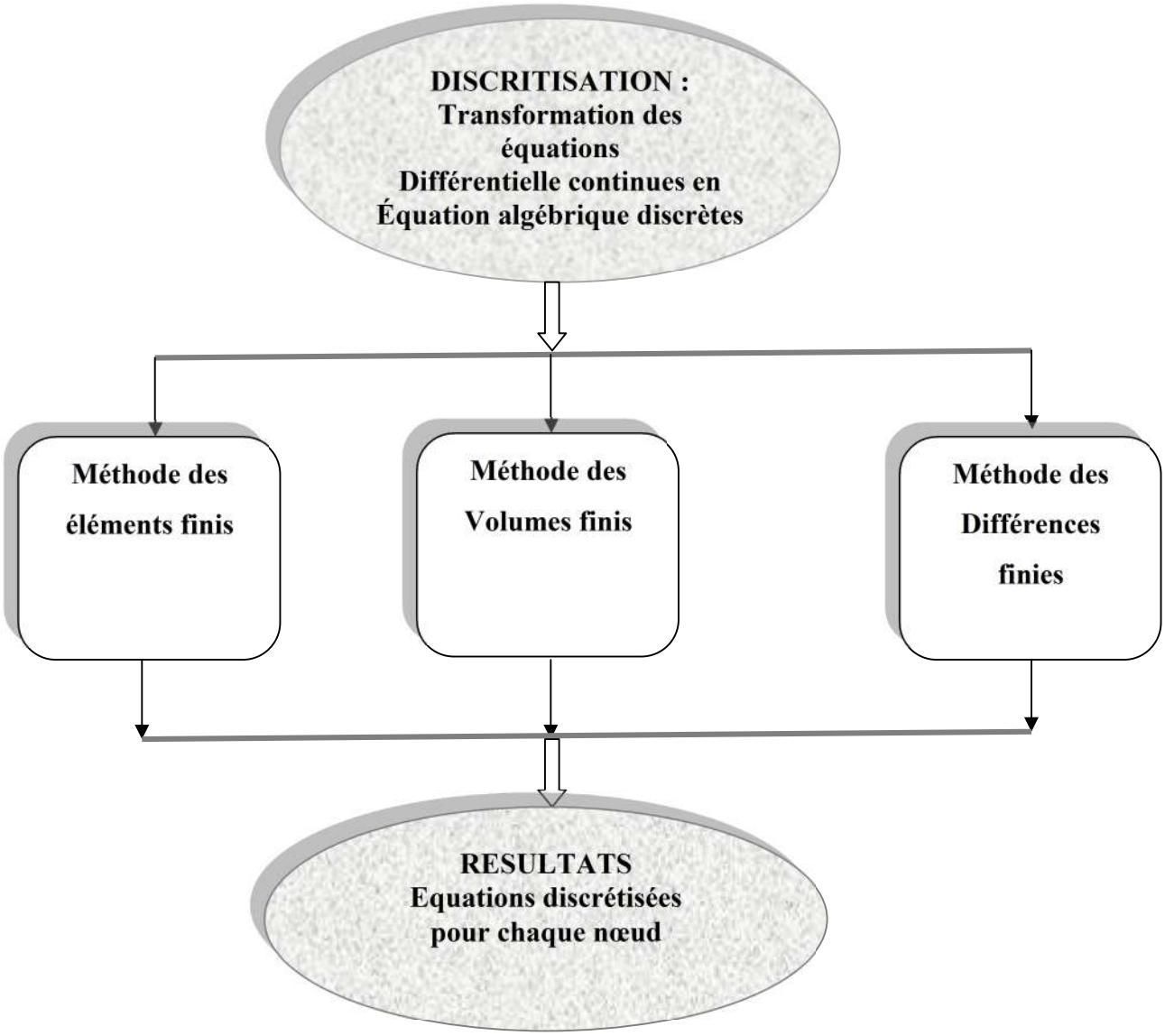


Figure (III.1) : méthode de discrétisations [18]

III.2.1 Méthode des différences finies :

La méthode des différences finies consiste à remplacer les dérivées apparaissant dans le problème continu par des différences divisées *ou* combinaisons de valeurs ponctuelles de la fonction en un nombre fini de points discrets on nœuds du maillage.

❖ Avantage :

- ✓ grande simplicité d'écriture.
- ✓ faible coût de calcul.

❖ Inconvénients :

- ✓ Limitation de la géométrie des domaines de calculs.
- ✓ difficultés de prise en compte des conditions aux limites portant sur les dérivées ou les gradients de l'inconnue.
- ✓ en général absence de résultats de majoration d'erreurs. [5]

III.2.2. Méthode des volumes finis :

Le principe de cette méthode est de subdiviser le domaine de calcul en un nombre de Volume de contrôle juxtaposé. Chacun de ces derniers englobe un "nœud principal".
La méthode des volumes finis intègre, sur des volumes élémentaires de forme simple, les équations écrites sous forme de loi de conservation. Elle fournit ainsi de manière naturelle des approximations discrètes conservatives et est donc particulièrement bien adaptée aux équations de la mécanique des fluides : équation de conservation de la masse, équation de conservation de la quantité de mouvement, équation de conservation de l'énergie.
Sa mise en œuvre est simple si les volumes élémentaires sont des rectangles (ou des Parallélépipèdes rectangles en dimension 3). [5]

❖ Avantage :

- ✓ Préservation du caractère conservatif des équations sur chaque volume de contrôle (continuité des flux aux interfaces), valable pour n'importe quelle finesse du maillage ;
- ✓ Mise en œuvre relativement facile ;
- ✓ Applicable aux géométries complexes ;
- ✓ Temps de calcul et stockage mémoire raisonnable (matrice de type bande) [5]

❖ Inconvénients :

- ✓ Moins précis que les méthodes spectrales.
- ✓ on dispose de peu de résultats théoriques de convergence. [5]

III.2.3 Méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis consiste à approcher, dans un sous-espace de dimension finie, un problème écrit sous forme variationnelle (comme rninimisation de l'énergie, en général) dans un espace de dimension infinie. La solution approchée est dans ce cas une fonction déterminée par un nombre fini de paramètres comme, par exemple, ses valeurs en certains points (les nœuds du maillage). [5]

❖ Avantages :

- ✓ Traitement possible de géométries complexes.
- ✓ détermination plus naturelle des conditions aux limites.
- ✓ possibilité de démonstrations mathématiques de convergence et de majoration d'erreurs.

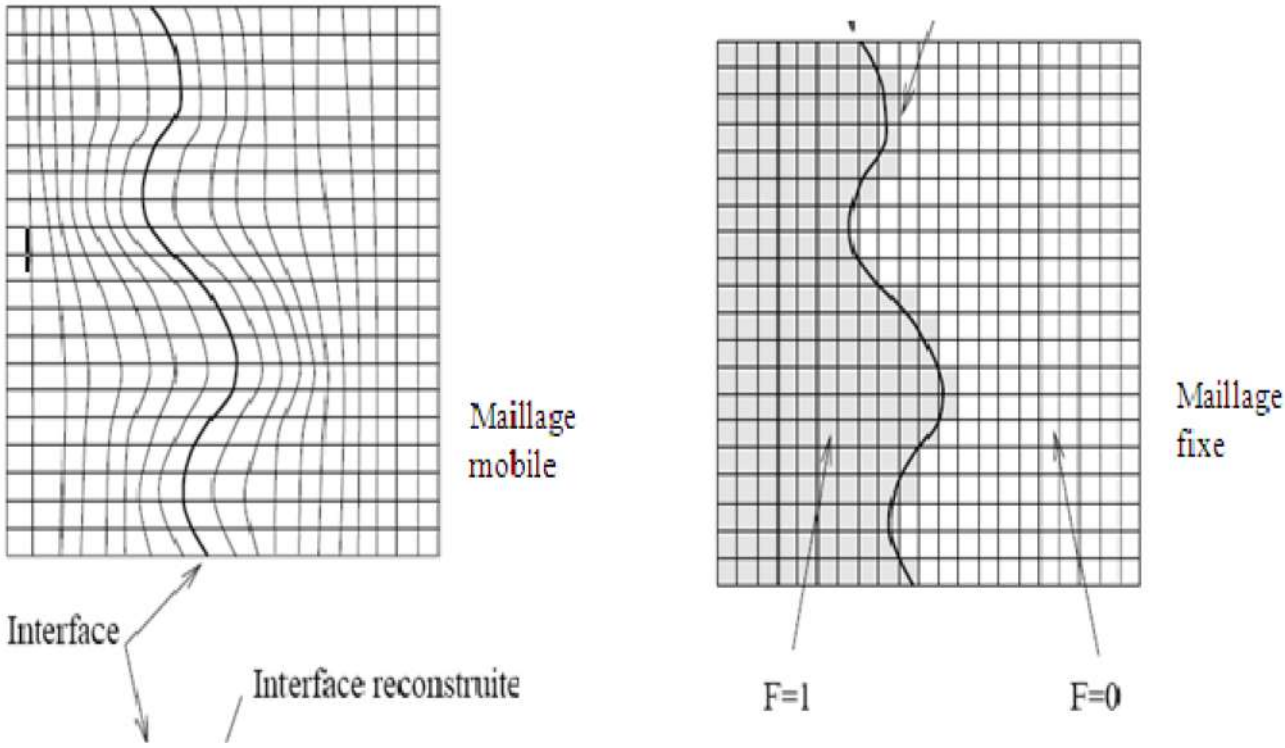
❖ Inconvénients :

- ✓ Complexité de mise en œuvre
- ✓ coût en temps de calcul et en mémoire.

Dans ce qui suit on se limite a examiné uniquement la méthode des éléments finis, nous venons de décrire succinctement l'approche globale de cette méthode. Par la suite, nous exposerons les principales étapes mathématiques de discrétisation de l'équation de chaleur par cette dernière.

III.3.Calcul d'interfaces :

Les techniques de calcul d'interfaces peuvent être très différentes en fonction du problème à résoudre, et se divisent généralement en deux principales familles en fonction de maillage (figure III.2) que l'on va utiliser : la méthode lagrangienne (sur maillage mobile) et la méthode eulérienne (sur maillage fixe).



a)méthode Lagrangienne **b) méthode Eulérienne [19]**

Figure(III.2) : Présentation des méthodes de calcul d'interface

III.3.1.Maillage :

Le maillage est la première étape de la méthode des éléments finis. C'est une étape fondamentale qui conditionne tout le reste du calcul : le temps de calcul et les ressources nécessaires (mémoire vive, mémoire virtuelle, temps processeur), la précision des résultats, la stabilité du modèle (possibilité de divergence dans le cas de calculs non-linéaires).L'objet de cette opération c'est de procéder à une simplification d'un système par un modèle représentant ce système et, éventuellement, son environnement (le milieu), dans l'optique de simulations de calculs ou de représentations graphiques (figure III.3). [20]

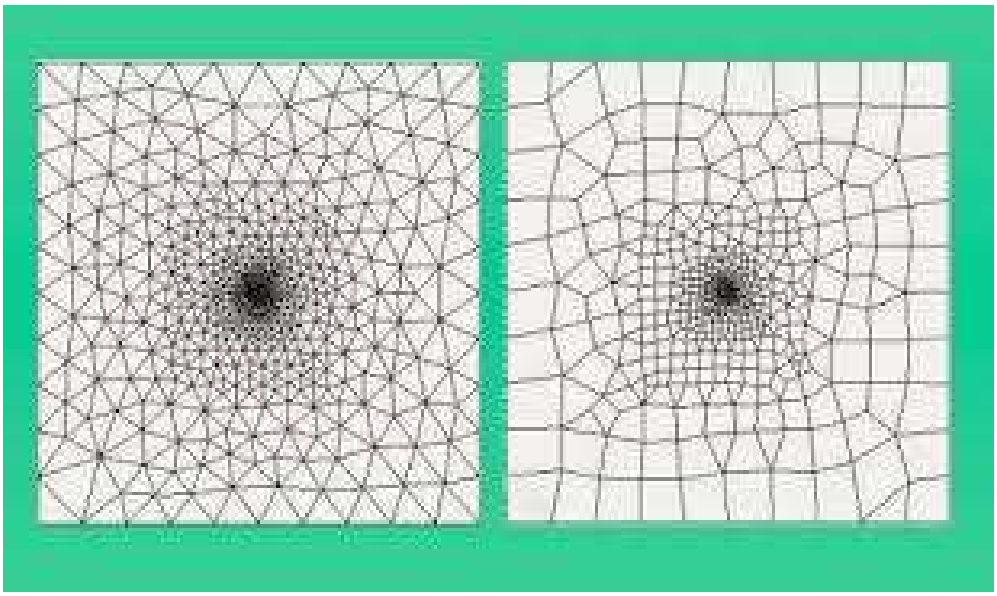


Figure (III.3) : Maillage mixte [5]

Toutes ces opérations sont assistées par des logiciels dédiés à éléments finis.

III.3.1.1 les méthodes lagrangiennes :

Les méthodes lagrangiennes, sur maillage mobile permettent de représenter l'interface comme une réelle discontinuité et de suivre son évolution de manière très précise. Le transport de l'interface s'effectue soit en déformant le maillage au cours du calcule soit en régénérant le maillage après avoir advecté l'interface. Le principal avantage de cette méthode est de suivi très précis de l'interface qui permet d'imposer très facilement et avec rigueur les conditions aux limites de l'interface. Ces méthodes sont limitées aux écoulements ou l'interface ne subit pas de grandes déformations, car cela conduit a des maillages trop déformés. [20]

III.3.1.2. les méthodes eulérienne :

Les méthodes eulériennes sont en général utilisées sur un maillage fixe. Dans ces méthodes, une fonction de présence permet de localiser la présence de volume. L'interface est alors reconstruite à partir de chargement des propriétés physiques. Les méthodes eulériennes peut être classées en deux catégories:

- Les méthodes de suivi de front
- Les méthodes de suivi de volume

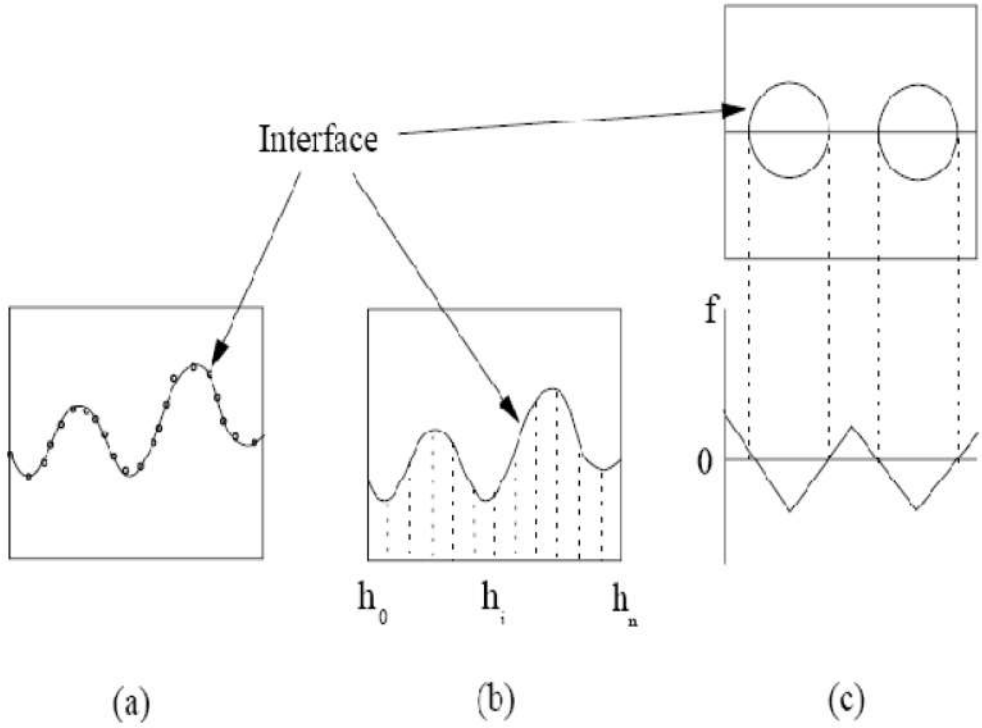
III.3.1.2.1.Les méthodes de suivi de front :

Il existe différente méthode pour marquer l'interface:

a) Marqueurs de surface

b) Fonction de hauteur

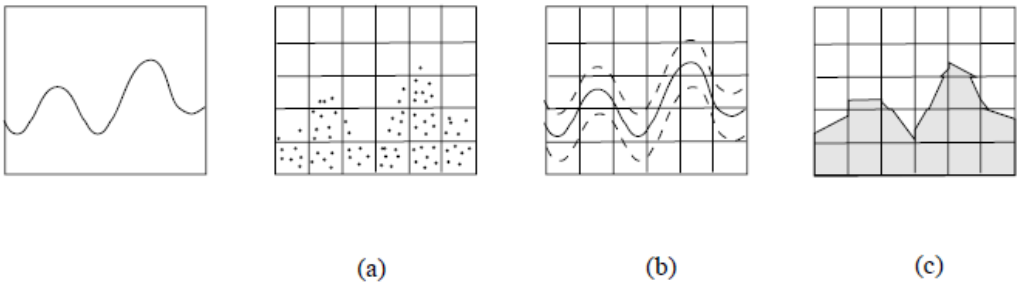
c) Méthode de ligne de niveau (lève set)



Figure(III.4): Différentes méthodes de suivi de front, [19]

III.3.1.2.2.Les méthodes de suivi de volume :

Dans les méthodes de suivi de volume, le fluide est utilisé comme marqueur en utilisant une fonction de présence. C'est là que se situe le principal défaut de ces méthodes car la position de l'interface n'est pas connue explicitement.



Figure(III.5) : Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque :

(a) Méthode MAC

(b) schéma TVD

(c) Méthode VOF

Nous utilisons pour la méthode VOF (volume of fluid) une fonction scalaire dont la valeur varie entre zéro et un pour repérer les deux fluides. Cette fonction scalaire représente le volume occupé par le fluide dans une cellule de calcul, donc une maille pleine de fluide à unevaleur de un et une maille vide zéro. Si la valeur de la fraction volumique est comprise entre ces deux valeurs, cela indique la présence de l'interface et on connaitra directement la proportion occupée par le fluide (figure III.6).

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.32	0.00
0.00	0.42	0.01	0.45	0.82	0.01
0.48	1.00	0.46	0.00	1.00	0.88
1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Figure(III.6) : Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret. [21]

III.4.Simulation numérique en fonderie :

Le procédé de fonderie peut être considéré comme étant une succession d'étapes différentes.

- ✓ le remplissage de la cavité décrit par la dynamique des fluides et l'équation de Navier Stockes.
- ✓ Le refroidissement et la solidification décrite par les transferts de chaleur et l'équation de fourrier.

La simulation numérique consiste à résoudre ces équations sur un ou plusieurs sous domaines (pièces, moule, noyaux,...) en appliquant des conditions initiales et des conditions au limites. Dans le cas particulier des géométries simples, une solution analytique peut être trouvée en simplifiant le modèle. Les approximations effectuées doivent être en concordance avec la réalité. Lorsque la solution analytique est trop complexe, ou les approximations excessives, la résolution numérique permet de trouver une solution approchée. [22]

III.4.1.Mise en œuvre numérique :

A l'heure actuelle, il existe un certain nombre de codes industriels conviviaux, aux meilleurs performants, permettant la prédiction d'écoulement fluides par la résolution des équations de Navier-Stokes grâce aux méthodes des volumes finis, des différences finies ou des éléments finis (ANSYS , FLUENT,CFX-F3D, PHOENICS, STAR-CD, TRIO….). Pour notre travail, nous avons eu recours au code ANSYS, [24]

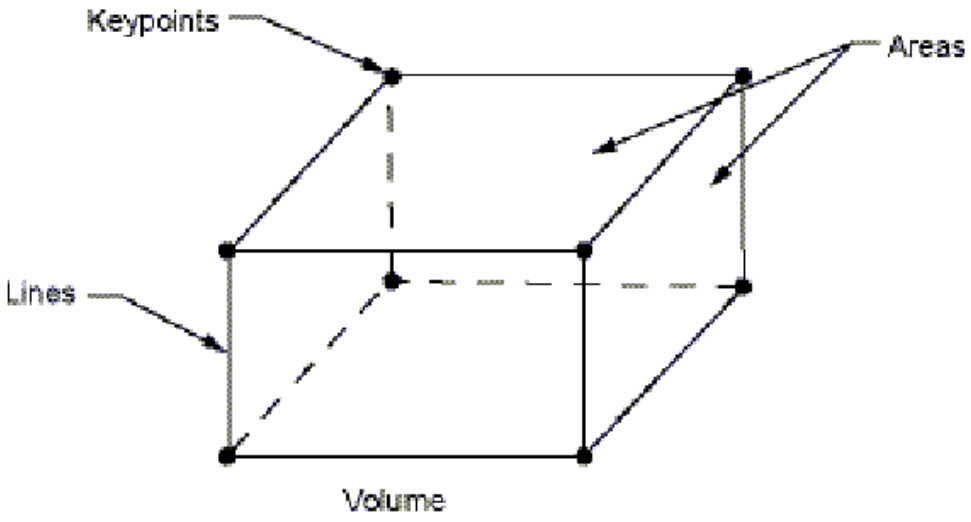
Le programme ANSYS a été dans l'utilisation commerciale depuis 1970 et a été utilisé intensivement dans l'espace, véhicules à moteur, la construction, le service électronique, d'énergie, la fabrication, nucléaire, les plastiques, le pétrole, et les industries en acier. En outre, beaucoup de sociétés de consultation et centaines d'universités utilisent ANSYS pour l'analyse, recherche, et l'utilisation éducative, ANSYS est identifiée dans le monde entier pendant qu'un des programmes le plus extensivement utilisés et capables de son type. [23]

La mise en œuvre d'une simulation de fonderie se fait en plusieurs phases : définition de la géométrie, maillage, définition des matériaux et des paramètres du procédé, calculs,

visualisation et analyses des résultats. [23]

III.4.1.1.Définition de la géométrie :

La première étape dans la mise en œuvre d'une simulation numérique en fonderie est la définition de la géométrie.



Figure(III.7): Définition de la géométrie

Les points qui définissent les sommets de modèle s'appellent les keypoints et sont les entités de modèle plein de " bas-ordre ". Si, en établissant notre modèle plein, vous créez d'abord nos keypoints, et employons ensuite ces keypoints pour définir les entités " évoluées "de modèle plein (c'est-à-dire, lignes, secteurs, et volumes), vous seraient constituant votre modèle " du fond." Des modèles établis du fond vers le haut sont définis dans le système du même rang actuellement actif. [23]

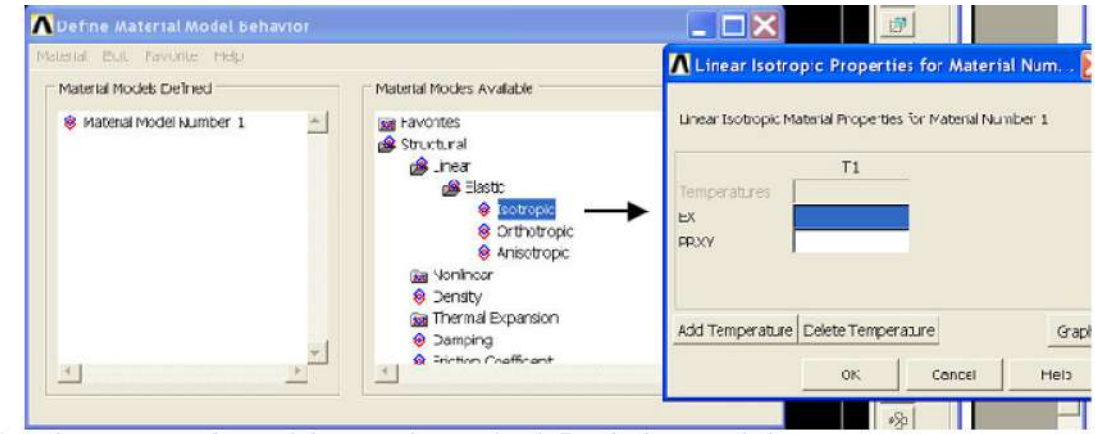
III.4.1.2.Définition des matériaux et des paramètres du procédé :

Les résultats de la simulation dépendent beaucoup de l'adéquation entre les données qui vont être renseignées dans cette partie et les valeurs réelles. ANSYS possède des bases de données matériaux qui ne sont soit peu fiables soit incomplètes. Il est nécessaire de réaliser des expériences permettant de déterminer les valeurs de températures (solidus, liquidus, eutectique), d'enthalpie, de la chaleur massique, de la masse volumique, de la fraction solide, de la conductivité thermique (moule, métal, poteyages), de la viscosité, des résistances thermiques de contact métal/moule, des caractéristiques hydrauliques des filtres,

etc. pour valider les bases de données du logiciel ou pour ajouter de nouveaux matériaux à la base de donnée.

Pour définie les propriétés matérielles :

Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models

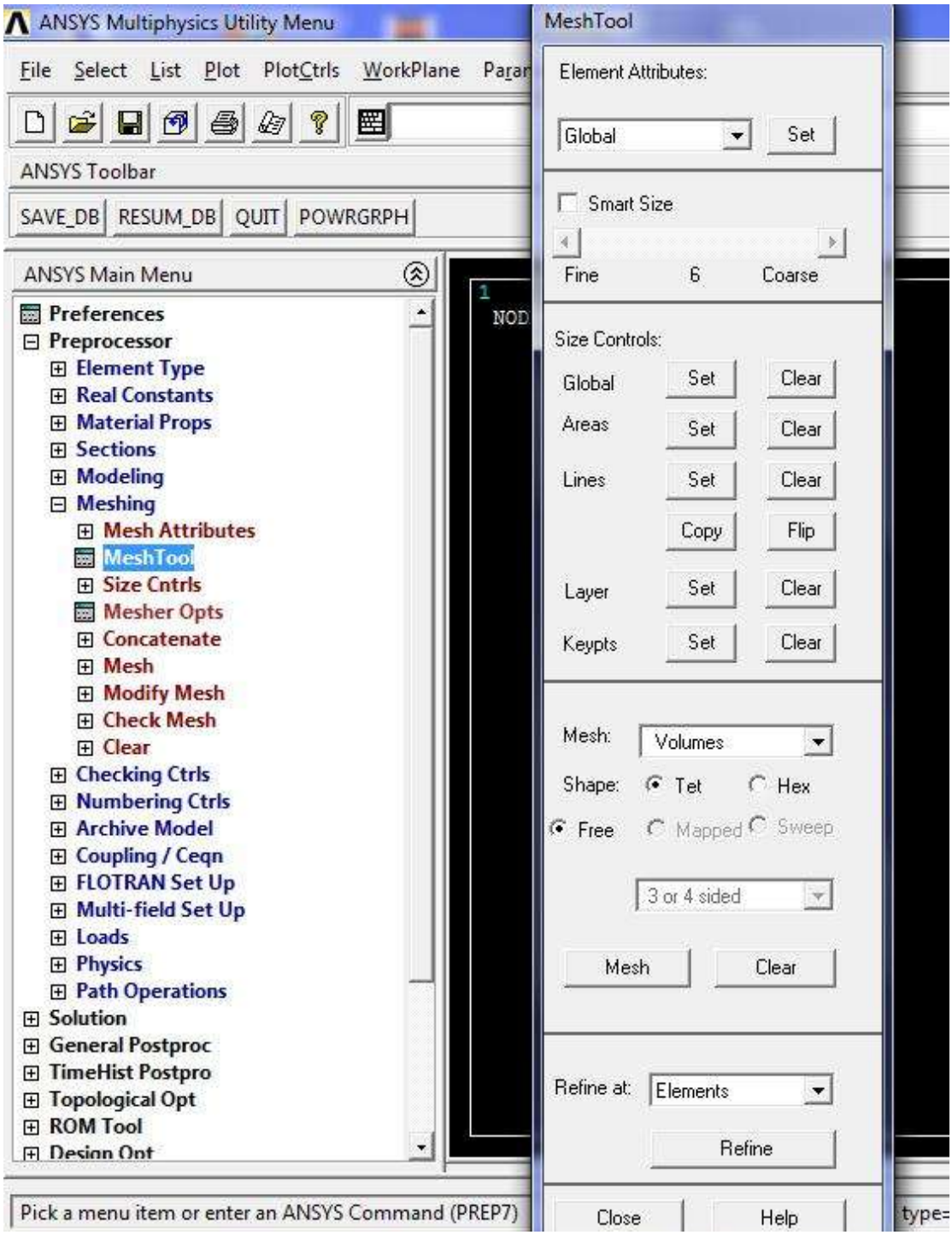


Figure(III.8): Définition des propriétés des matériaux

Les conditions aux limites d'échanges thermiques entre le moule et le milieu environnant, les circuits de refroidissement, les tirages d'air doivent aussi être renseignées. Il est possible d'utiliser des modèles simplifiés sur ANSYS pour déterminer l'influence qualitative et quantitative de chaque milieu extérieur sur la thermique du moule. Ce calcul préliminaire peut être utile pour simplifier la géométrie et éliminer des paramètres qui n'ont pas d'importance compte tenu de la précision attendue. [23]

III.4.1.3.Maillage de la géométrie :

Une fois la géométrie définie, elle doit être subdivisée en un nombre fini de petits volumes sur lesquels seront résolues les équations. Il existe deux grands types de maillage:



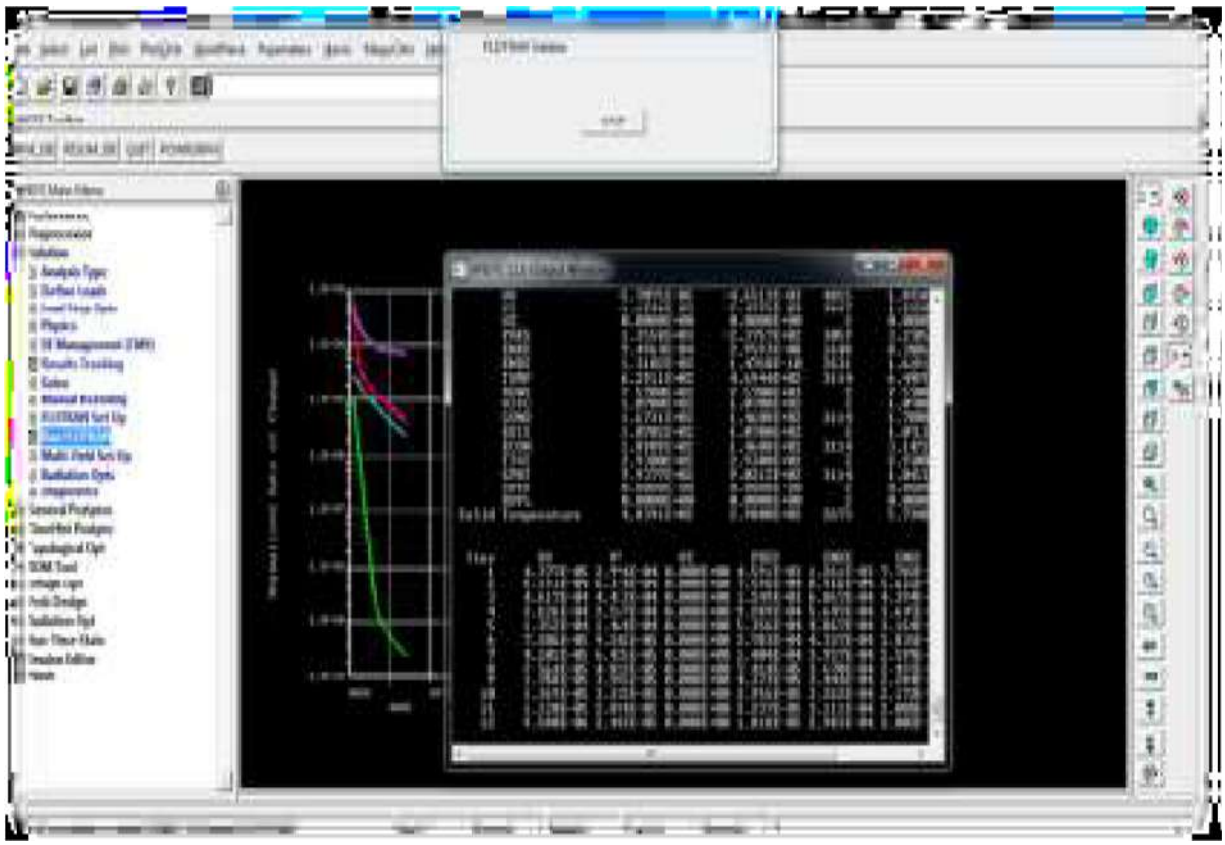
Figure(III.9) : Maillage de la géométrie

Les maillages non structurés permettent la résolution des équations par la méthode des éléments finis. Ils sont constitués de tétraèdres ou d'hexaèdres, représentent presque parfaitement n'importe quelle surface complexe et autorisent facilement des raffinements locaux. Ils sont parfaitement adaptés aux calculs thermiques et mécaniques.

La finesse du maillage est un facteur important : plus le maillage est fin, meilleure sera la solution. Mais le temps de calcul deviendra de plus en plus long. Il faut trouver un compromis finesse du maillage/temps de calcul. Il est possible d'utiliser un maillage grossier pour la mise au point des données, lors de la prise en main du logiciel et de ne utiliser un maillage très fin que pour le calcul final. [23]

III.4.1.4.Calculs :

Dans cette étape les équations régissant le remplissage, la solidification et le refroidissement de la pièce sont résolues sur le maillage en utilisant les conditions aux initiales et les conditions aux limites définies dans l'étape précédente.



Figure(III.10): Phase du Calcul

III.4.1.5.Visualisation et analyse des résultats :

Les logiciels de simulation sont dotés d'interfaces (post processeurs) de visualisation des résultats, de sorties graphiques ou d'animations pour aider l'utilisateur dans l'interprétation des résultats.

III.5.Conclusion :

Dans ce chapitre on a fait un aperçu sur les méthodes numérique utilisées pour le traitement des problèmes thermiques, Tout d'abord les différentes méthodes de discrétisation ont été abordées. Ensuite, nous avons donné brièvement une théorie sur les éléments finis. Celle-ci correspond à la méthode utilisée par notre simulateur de référence (ANSYS).

En effet, il s'agissait uniquement d'exposer la démarche générale et les concepts qui seront nécessaires à la bonne compréhension des travaux ultérieurs (la simulation numérique de remplissage des moules qui saura introduire dans le prochain chapitre).

Chapitre IV

Résultats et discussion

IV. 1.Introduction :

Le chapitre IV porte sur l'étude du transfert de chaleur et de l'écoulement du fluide chaud (fer) qui s'écoule dans un moule pour reproduire , après refroidissement ,une pièce donnée .le champ de température transitoire de la paroi de moule (l'acier) et de trajectoire de fer avec la comparaison de la présence ou l'absence de champ magnétique est évalué par un modèle CFD ,appliqué sur le code ANSYS/ mechanical APDL ,il s'agit ici de réaliser une expérience numérique du remplissage d'un moule en 2D d'une pièce .

IV.2. Indentification et validation de la simulationnumérique

Dans cette partie dont l'objectif est d'assures le bon déroulement de notre simulation numérique, nous comparons nos résultats à ceux obtenue dans les même contions par Thierry BARRIERE, Boasheng LIU, Jean-Claude GELIN [24], et de notre résultats nous avons varié tous les propriétés thermiques de fluide : la densité, la viscosité dynamique et la conductivité thermique en fonction de température. La géométrie de moule montre sur la figure si après.

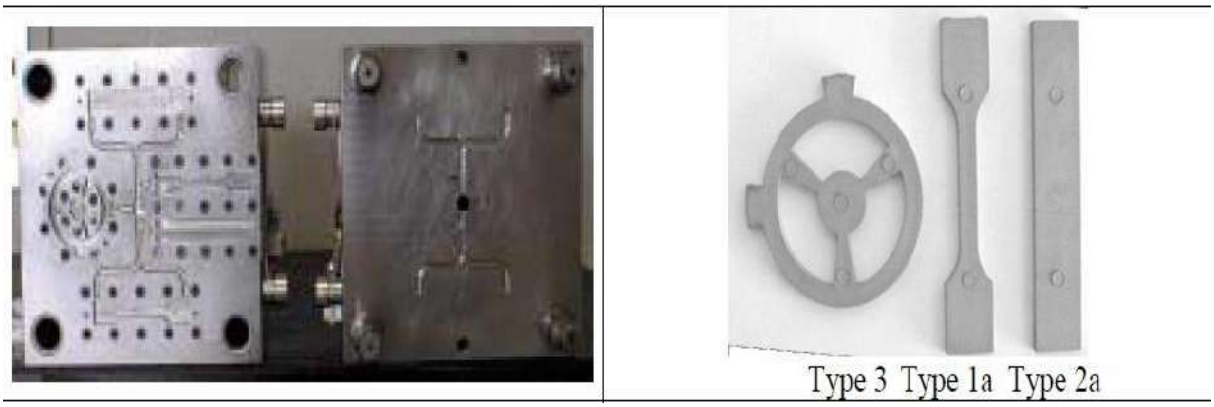


Figure.**IV.1** : le moule multi-empreinte de validation.

De cette validation procédé de coulée d'expérience (a) alliage de aluminium, et Les résultats de simulation sont les suivantes :

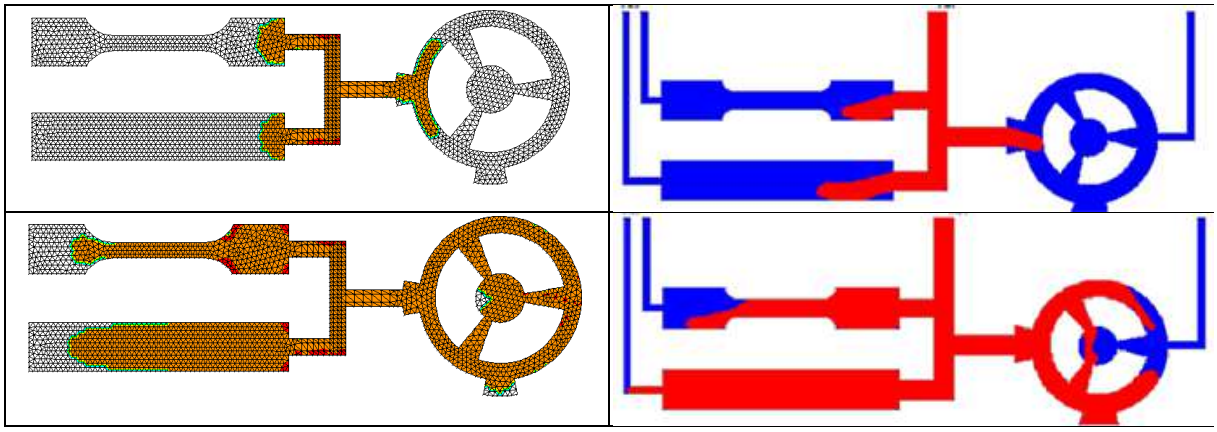


Figure.IV.2 : (a) Champs de fraction volumique de résultats de simulation Thierry BARRIERE, Boasheng LIU, Jean-Claude GELIN. **(b)** simulation notre analogique par le code de ANSYS.

IV.3. Les conditions initiales :

La température initiale du métal liquide était de 1900 k(Point de fusion de fer 1538 c).

- La température de moulea été considérée égale à celle de l'environnement.
- Le métal liquide et le moule de l'acier ont été stabilisés dans des conditions normales de la pression atmosphérique.

IV.4. Les conditions limitent :

- La vitesse d'injection du fer liquide a été fixée à 10 m/s.
- L'algorithme de VOF a été employé pour le remplissage de moule.
- Le temps total pour le remplissage de moule est de 0.0253s avec un pas de temps de 0.0001s
- La solution en 2D a été considérée.

Tableau (IV.1) : les propriétés thermiques de fer

Densité (kg/m3)	Chaleur spécifique (j/kg.k)	Viscosité (kg/m.s)	Conductivité thermique (w/m.k)
6980	438	0.00544	80.2

Tableau (IV.2) : les propriétés de matériaux du moule en acier

Densité (kg/m3)	Chaleur spécifique (j/kg.k)	Viscosité (kg/m.s)	Conductivité thermique (w/m.k)
8000	400	/	25

Les propriétés du métal liquide utilisé dans la simulation de remplissage du moule sont énumérées dans le Tableau 1. Afin de simuler l'écoulement de métal liquide dans le moule en acier, avec taille de maillage pour les différentes expériences (0.003m) qui assure l'indépendance solution maillage, ainsi que les conditions suivantes ont été considérées:

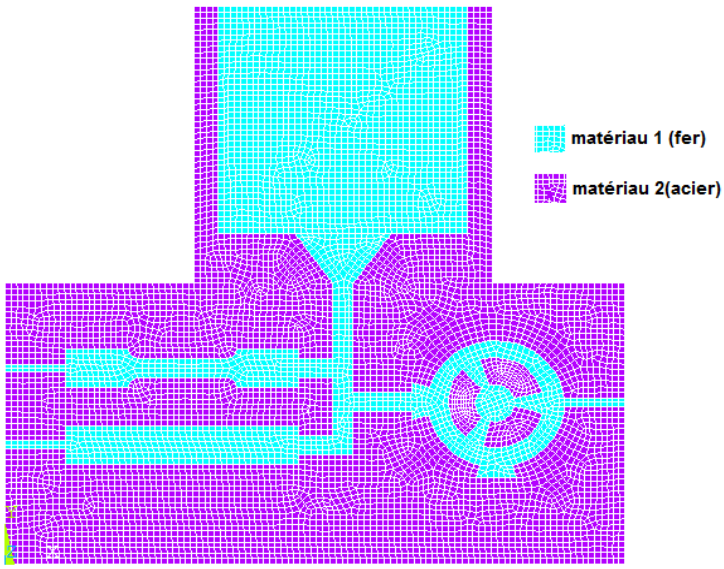
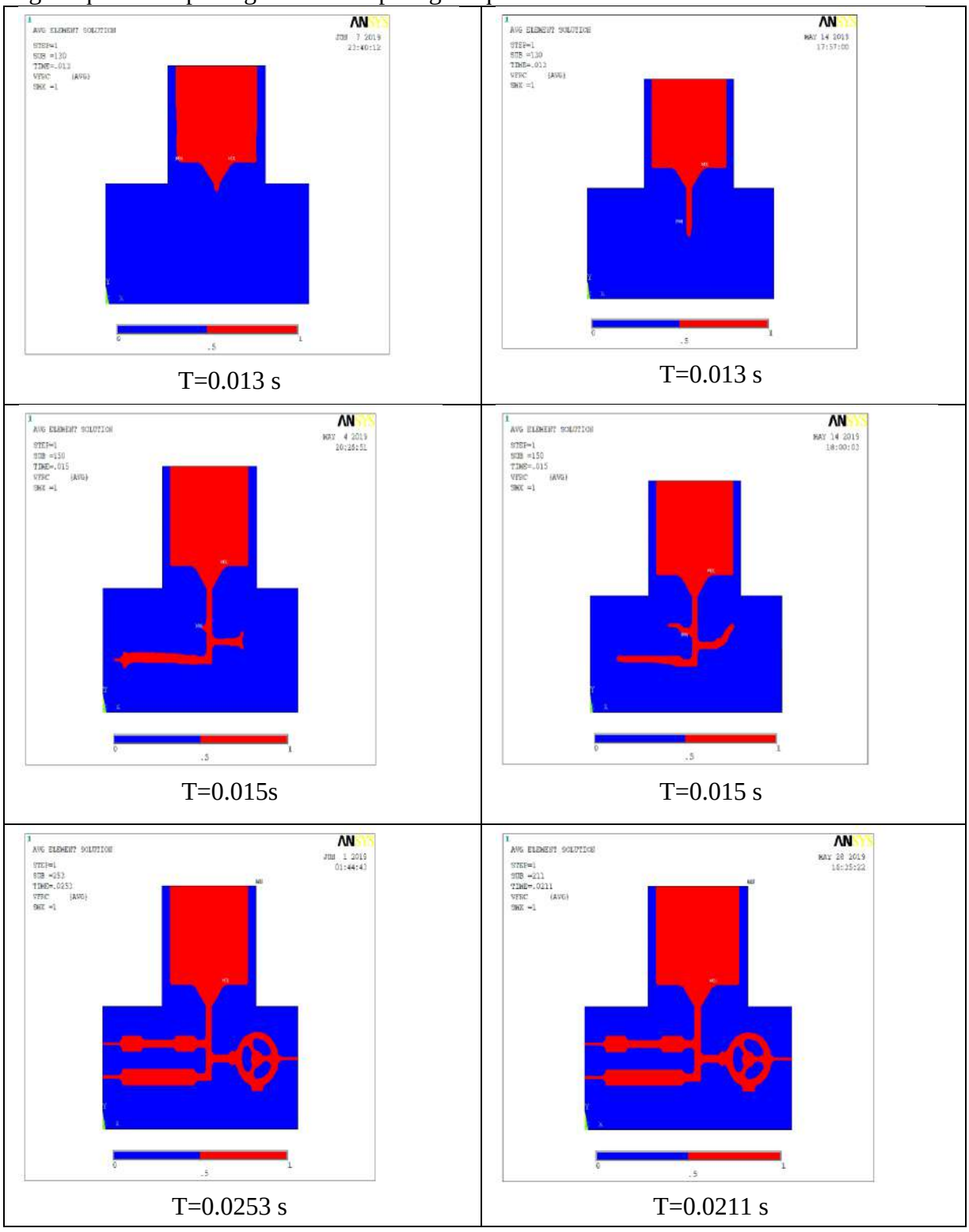


Fig. (IV.2) :le maillage de la géométrie

IV.5. Influence su champ magnétique: Dans cette partie dont l'objectif est d'assurer le bon déroulement de notre simulation numérique, nous comparons nos résultats à ceux obtenue dans les mêmes conditions de simulation par remplissage du moule avec champ magnétique et remplissage sans champ magnétique



T=0.013 s | T=0.013 s

T=0.015s | T=0.015 s

T=0.0253 s | T=0.0211 s

[A] **[B]**

Fig. (IV.3) Volume de fraction pendant le remplissage du moule ; a) Modèle de l'absence de champ magnétique; b) Modèle de la présence de champ magnétique.

L'écoulement du métal dans les conduites est montré sur la figure IV.3. Au début, l'écoulement est lent, mais quand la section diminue la vitesse augmente. Le liquide continue jusqu'à le chargement complet du moule.

IV.6. interprétation des résultats de simulation :

1ére **Partie :** le remplissage de métal liquide dans le moule sans champ magnétique pour déférent temps

Dans cette partie on choisi un seul point de remplissage par gravitée déterminés les paramètres lié au remplissage de les empreintes. (Température, pression et le temps de remplissage)

Remplissage (Volume fraction) : la figure (VI.4) représente l'historique de l'écoulement au cour de remplissage.

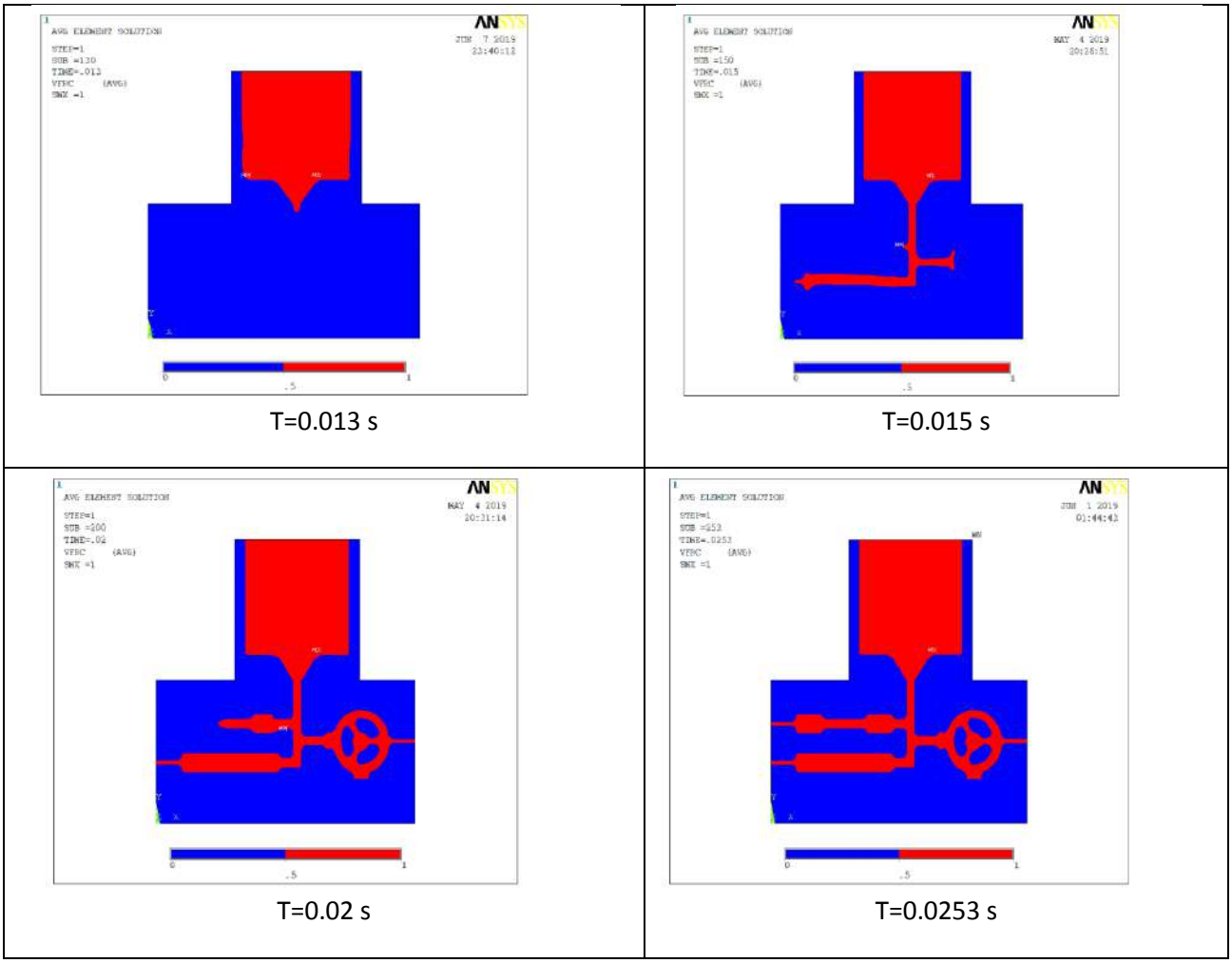
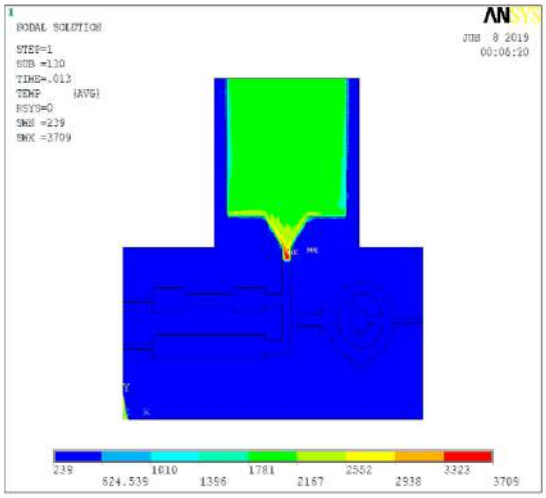


Fig. (IV.4) Représentation spatiale de remplissage du moule (vof)

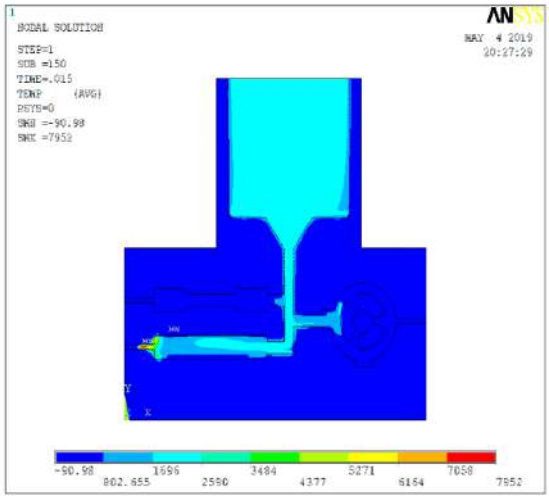
D'ou la couleur rouge représente la cellule complètement rempli par le liquide, et la couleur bleu représente la cellule complètement vide.

On remarque apparition des turbulences à l'intérieur du moule(t=0.015 s). Après le temps t=0.0253 s le moule est complètement remplie

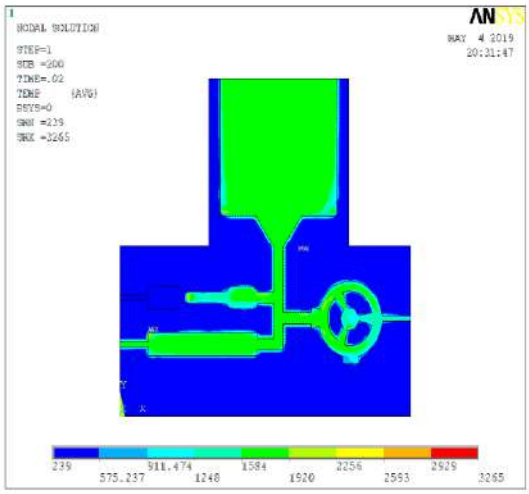
IV.6.1 Champ de température :la figure (IV.4) montre une représentation spatiale duchamp de température pendant le remplissage de moule.



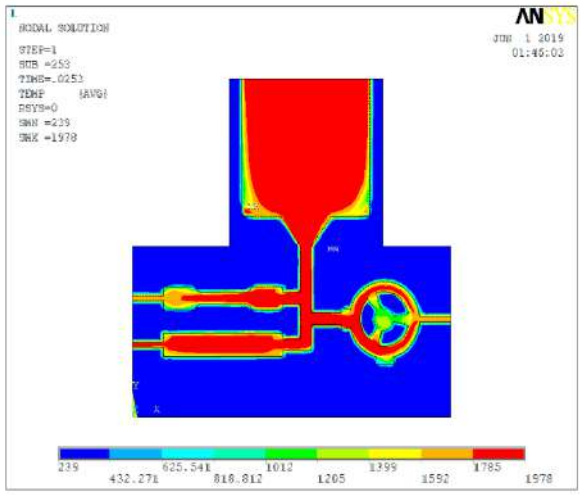
T=0.013s



T=0.015s



T=0.02s



T=0.0253 s

Fig.(IV.5) Représentation spatiale de champ de température dans le domaine de calcul

La température de métal à injecté initialement à 1900 k, de fait de l'interaction dynamique /thermique d'un part et d'autre par les frottements pariétale ainsi, on remarque quela température audémarrage la valeur est 1486 K après elle est augmente progressivement à une température de 1785 kala fin du remplissage

IV.6.2l'emplacement des capteurs pour l'analyse :

Pour connaître la variation des grandeurs physique (la température, la pression, la vitesse, …) pour déférents zones préférable, on a choisies des points différents dans la pièce.

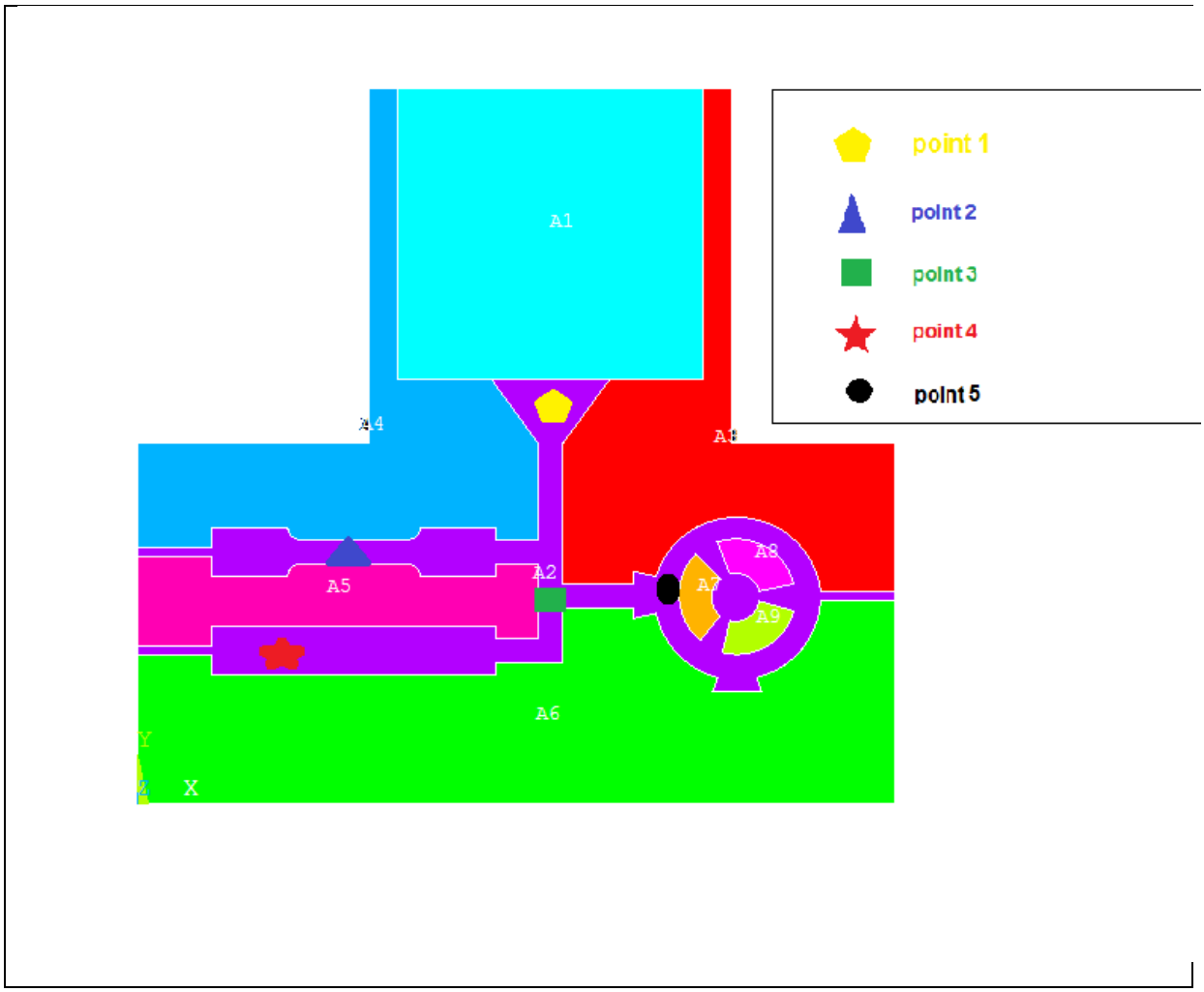


Fig.(IV.6): les points choisis à une section du moule

La variation de la température de quelque point d'après les calculs numériques,
les graphes de température obtenue sont les suivants :

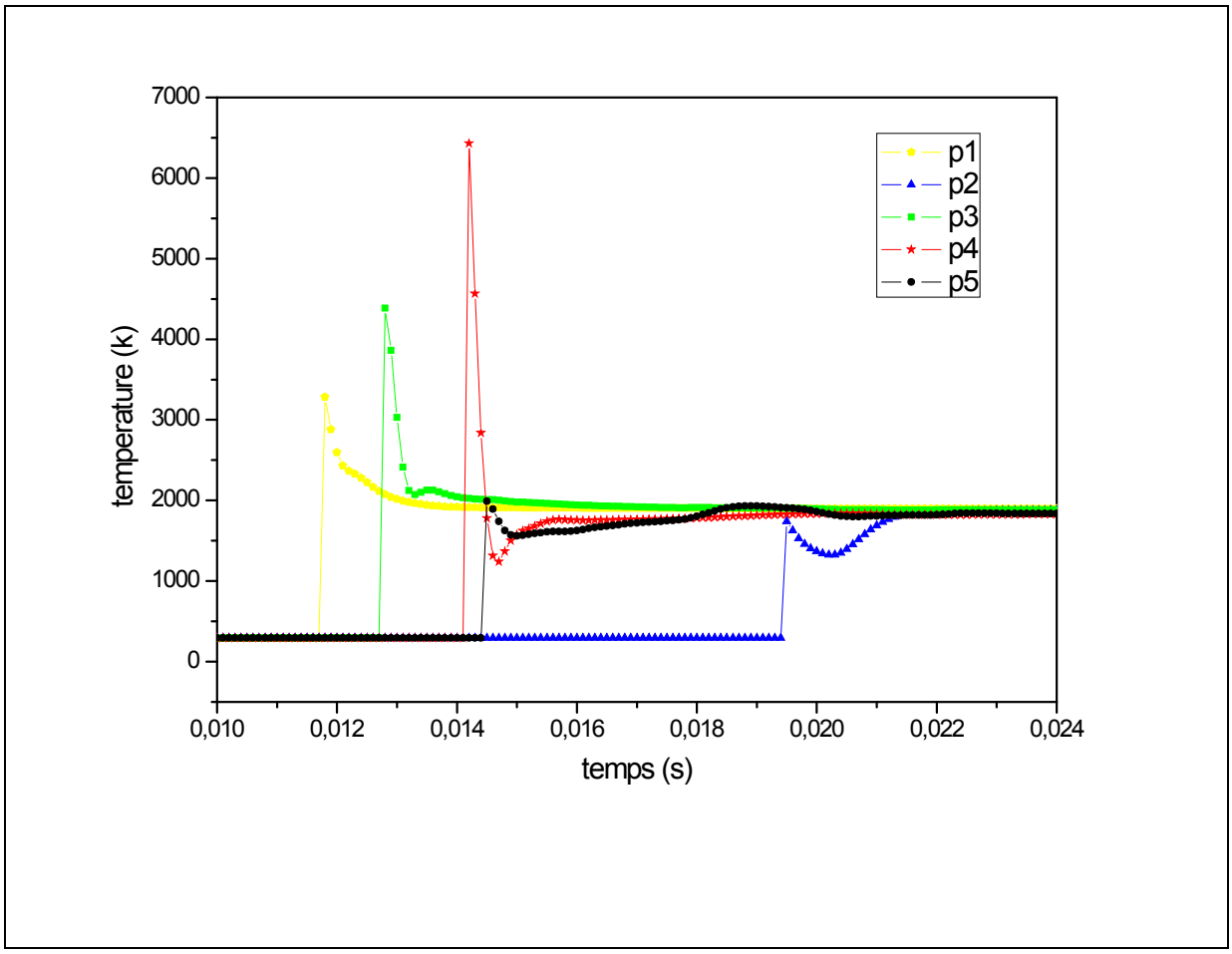


Fig.(IV.7)la variation de température dans le temps pour de différent position

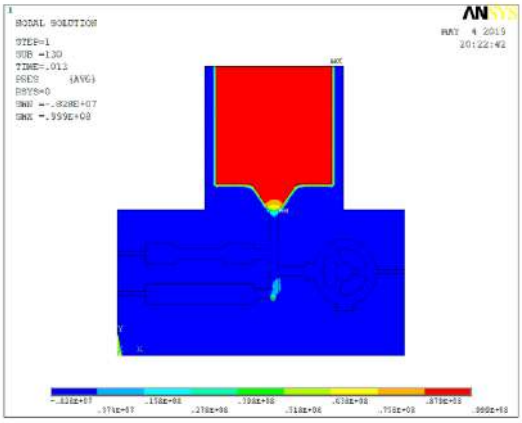
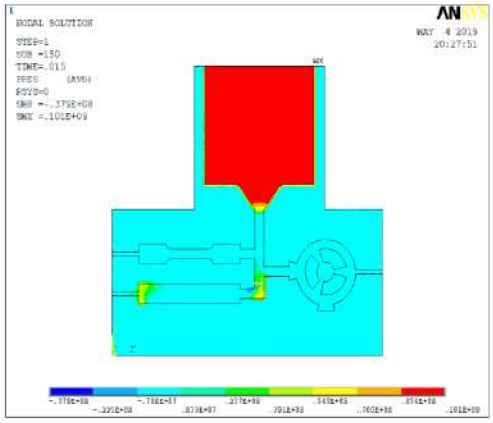
Remarque : la température commence par une valeur constante(T=250k) dans tous lespoints.

- point (1) : la température augmente rapidement jusqu'à T=3500k presque (t=0.012s) à cause du Convergence de section, puis elle chute jusqu'à T=2000 K (t=0.014s). Après la température se stabiliseà une valeur de 2000k pour t=0.024 s

- point(2) : la température constante T=250 k jusqu'à (t=0.019s) Après elle va augmente rapidement jusqu'à T=1900k puis la température diminue jusqu'à T=1500k a (t=0.02s) Après la température se stabilise à une valeur de 2000k pour t=0.024 s
- point(3) : la température augmente jusqu'à T=4500K (t=0.013s) à cause du convergence de section de empreinte et après elle est diminuerjusqu'à T=2000k etAprès la température se stabilise à une valeur de 2000k pour t=0.024 s

- point (4) : à t=0.014 S la température augmente jusqu'à la valeur(T=6500k) à cause du la grande pression de l' empreinte et après certain temps la température a t=0.016 S elle se stabile à une valeurde T =2000 kpour t=0.024 S
- point (5) : à t=0.014 S la température augmente jusqu'à la valeur (T=2000k) et après certain temps la température elle a diminue jusqu'à T=1500k Après la température se stabilise à une valeur de 2000k pour t=0.024 s

IV.6.3 Champ de pression: la figure (IV.6) représentation spatiale de pression dansle moule en fonction de temps.

	
T=0.013s	T=0.015s

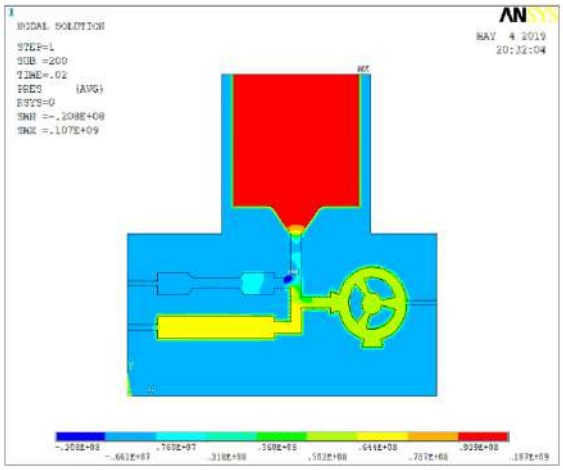
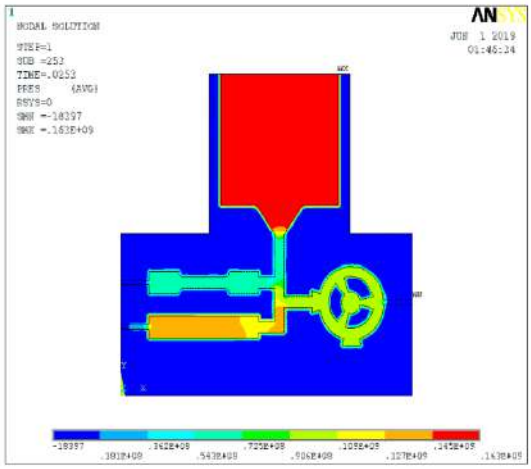
	
T=0.02s	T=0.0253s

Fig.(IV.8)Représentation spatiale de champ de pression dans le domaine de calcul

La figure (IV.8) représenté le champ de pression au cours du remplissage,au démarrage la valeur de la pression est 87.5 MPa ,et elle diminuer jusqu'à une valeur 54.3MPa au niveau des emprentes . à caus de libération de liquide.

D'après les calculs numériques,onbetune le graphe suivant :

La variation de la pression de quelque point : dans cette partie nous avons présenté latrajectoire de chaque point qu'on a déjà sélectionné à la première simulation (fig. IV.8)

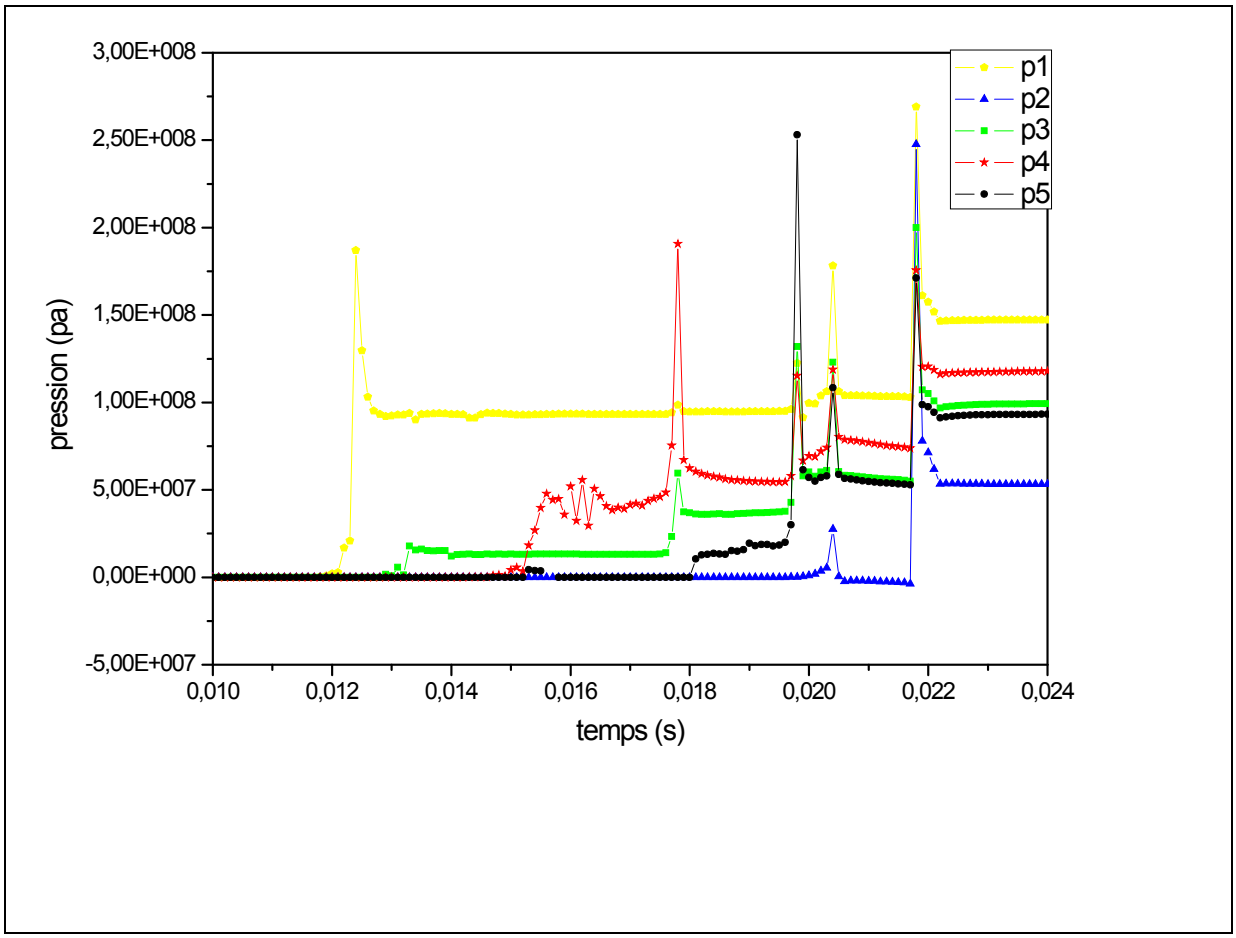


Fig. (IV.9) la variation de pression dans le temps pour de différent position

Remarque :la pression toujours commence de la pression atmosphérique (p= 0Pa)

La variation de la pression est affichée dans le moule comme elle est illustrée sur la figure(IV.9), la valeur de la pression, augmente jusqu'à une valeur maximale de250MPagrâce à la convergence de la section .Il y a aussi une diminution jusqu'à une valeur de 50 M Pa à cause de dépression à travers les buses d'air de liquide.

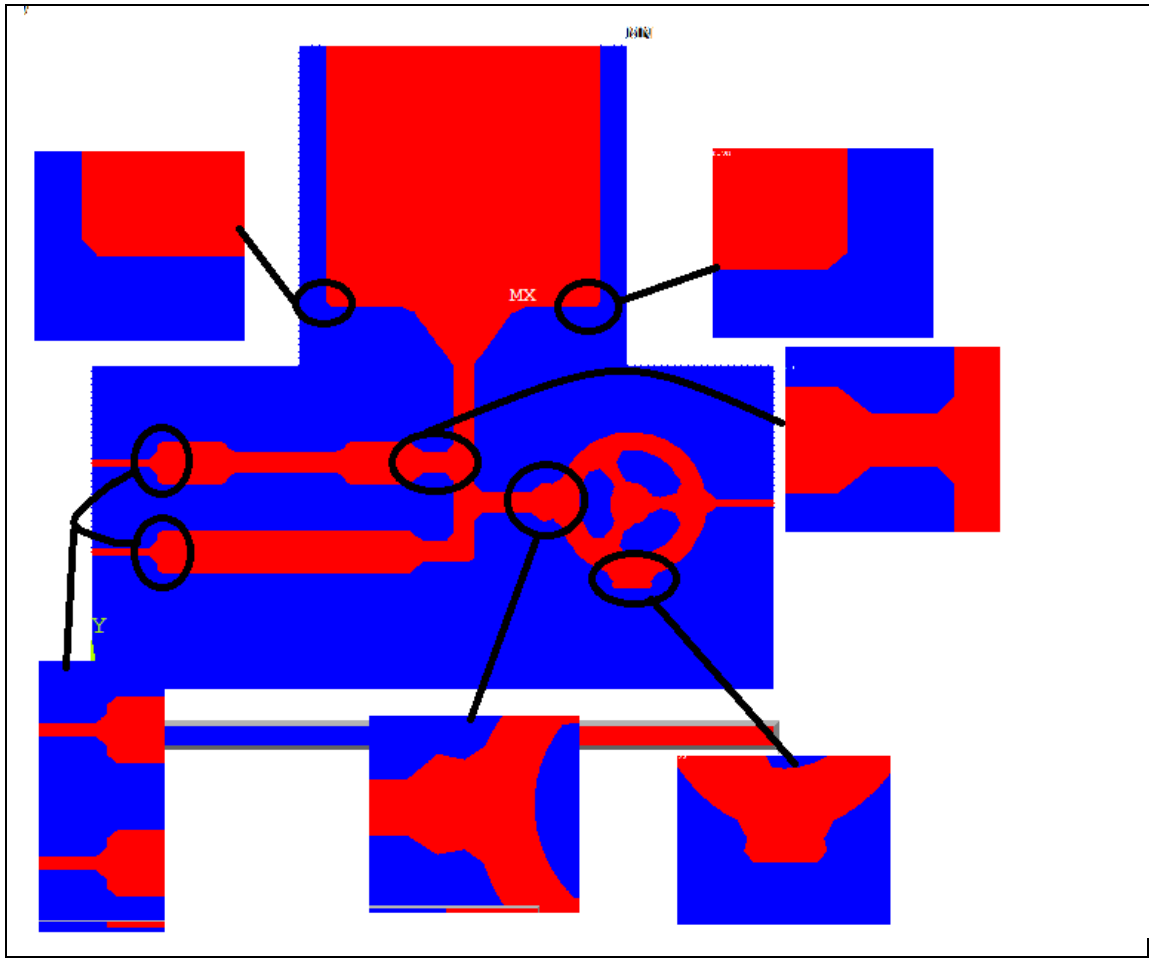


Figure (VI.10) : détection des défauts de remplissage dans les empreintes.

2 émePartie : le remplissage de métal liquide dans le moule avec champ magnétique pour un seul point

Dans cette partie on a choisi un seul point de remplissage par champ magnétique déterminés les paramètres lié au remplissage de les empreintes. (Température, pression et le temps de remplissage)

Remplissage (Volume fraction) : la figure (VI.11) représente l'historique de l'écoulement au cour de remplissage.

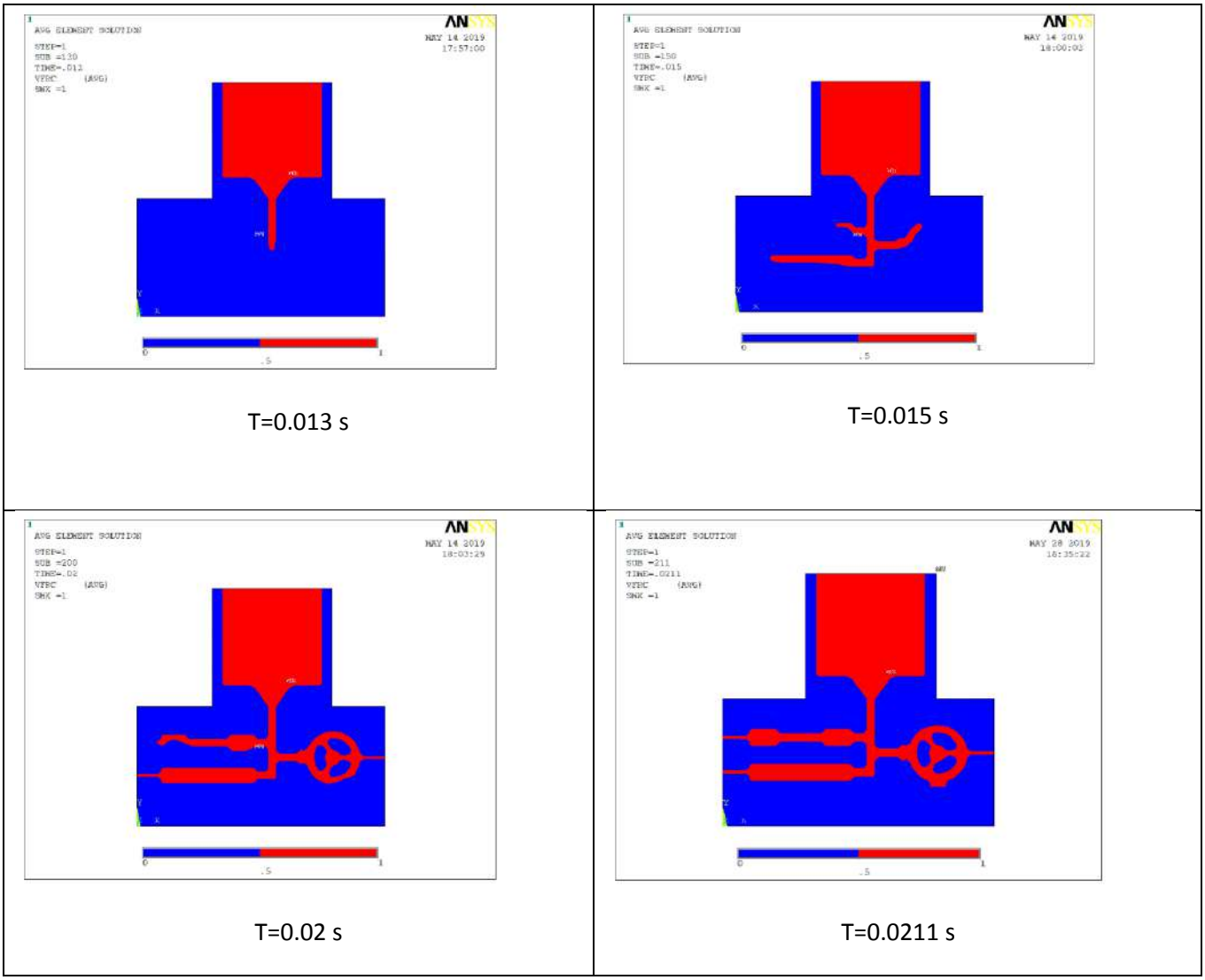


Fig. (IV.11) Représentation spatiale de remplissage du moule (vof)

D'ou la couleur rouge représente la cellule complètement rempli par le liquide, et la couleur bleu représente la cellule complètement vide.

on remarque apparition des turbulences à l'intérieur du moule(t=0.015 s).avec changement de remplissage ou niveau de les empreintes a (t=0.015 s et t=0.02 s) par apport la 1ere expérience sans champ magnétique Après le temps t=0.0211 s le moule est complètement remplie

IV.6.4 Champ de température :la figure (IV.12) montre une représentation spatiale duchamp de température pendant le remplissage de moule.

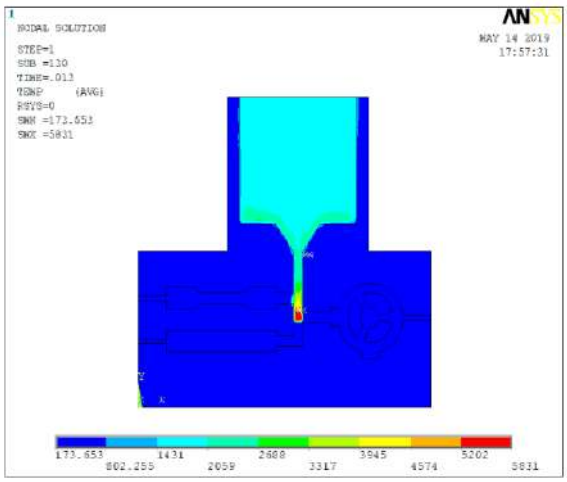
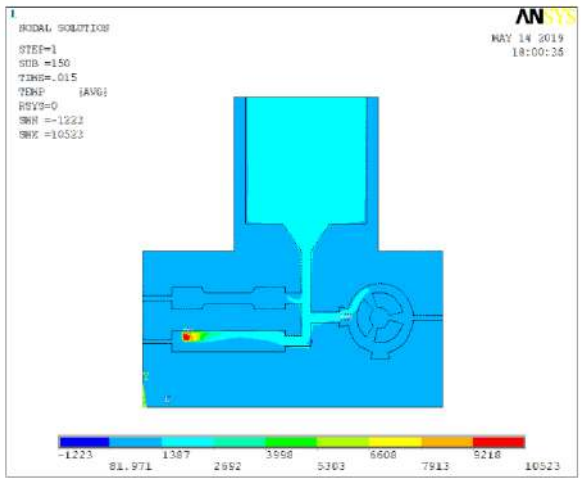
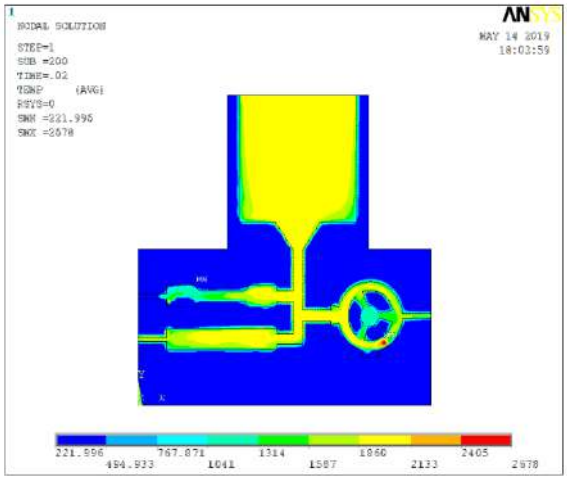
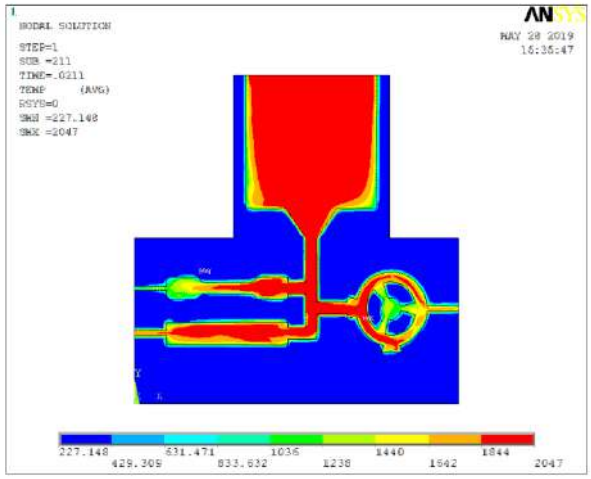
<table>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>T=0.013s</td><td>T=0.015s</td></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>T=0.02s</td><td>T=0.0211s</td></tr>
</table>

Fig.(IV.12) Représentation spatiale de champ de température dans le domaine de calcul

La température de métal à injecté initialement à 1900 k, de fait de l'interaction dynamique /thermique d'un part et d'autre par les frottements pariétale ainsi, on remarqueque la température au démarrage la valeur est 1431 K après elle est augmente Progressivement à une température de 1844 k a la fin du remplissage

La variation de la température de quelque point : dans cette partie nous avons présenté la trajectoire de chaque point qu'on a déjà sélectionné à la première simulation (fig.IV.13)

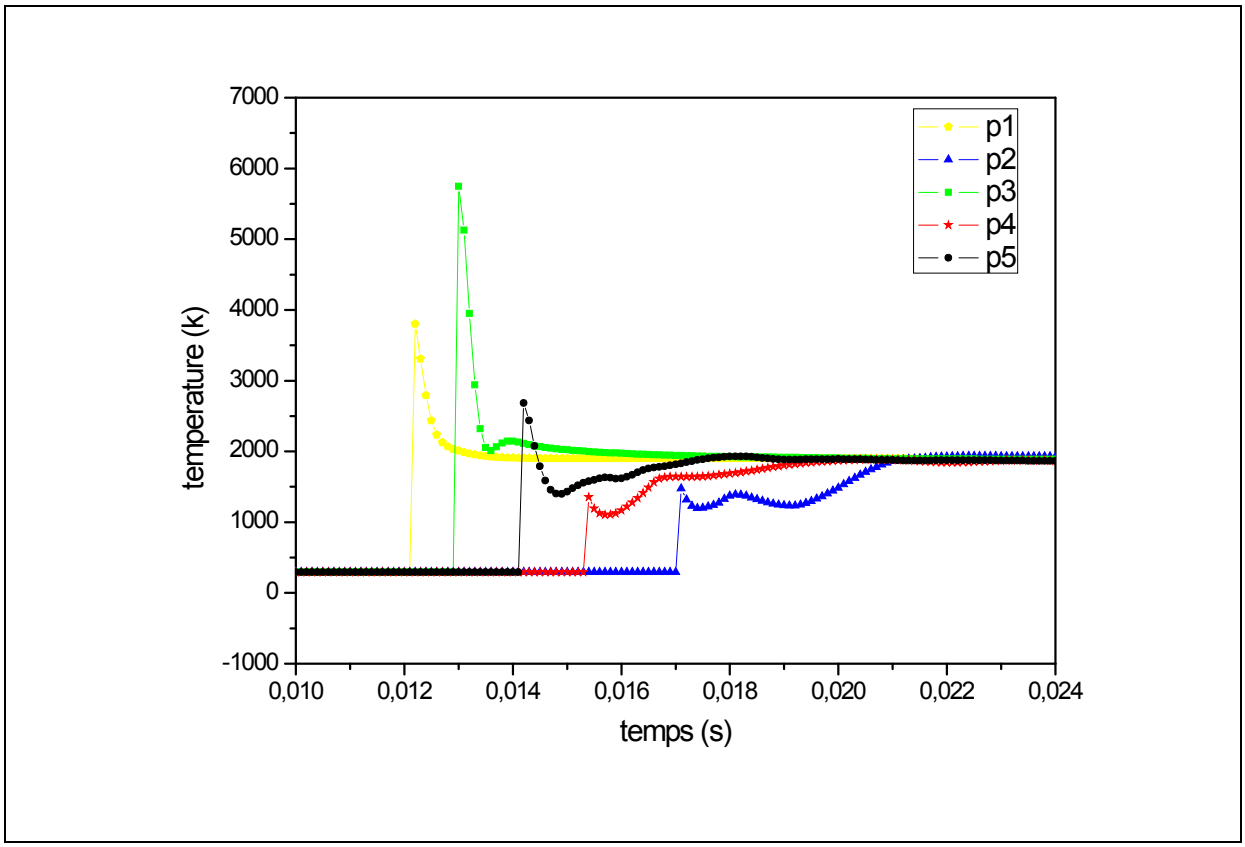


Fig.(IV.13) variation de température dans le temps pour de différent position

Remarque : la température commence par une valeur constante(T=250k) dans tous lespoints.

- point (1) : la température augmente rapidement jusqu'à T=3500k (t=0.012s) à cause du

  Convergence de section, puis elle chute jusqu'à T=1750K (t=0.015s). Après la température se stabilise à une valeur de 2000 k pour t=0.024 s

- point (2) : la température constante T=250 k jusqu'à (t=0.017s) Après elle augmente rapidement jusqu'à T=1500k puis la température augmente jusqu'à T=2000k a (t=0.02s) Après la température se stabilise à une valeur de 2000 k pour t=0.024 s

- point (3) : la température augmente rapidement jusqu'à T=5900k (t=0.013s) à cause du

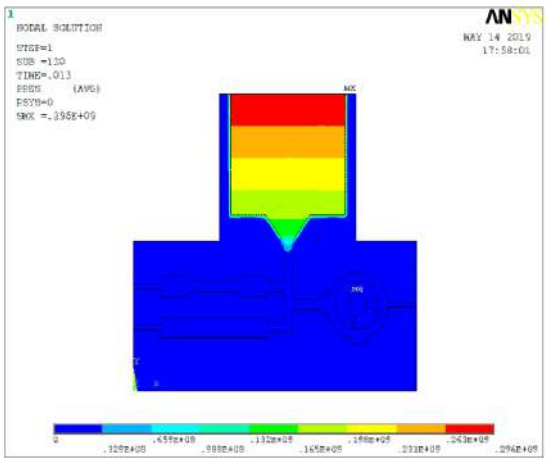
  Convergence de section, puis elle chute jusqu'à T=2000K (t=0.015s). Après la température se stabilise à une valeur de 2000 k pour t=0.024 s

- point (4) : la température augmente jusqu'à T=1500k (t=0.017s) et reste consentante a valeur T=2000 K jusqu'à t=0.024 s

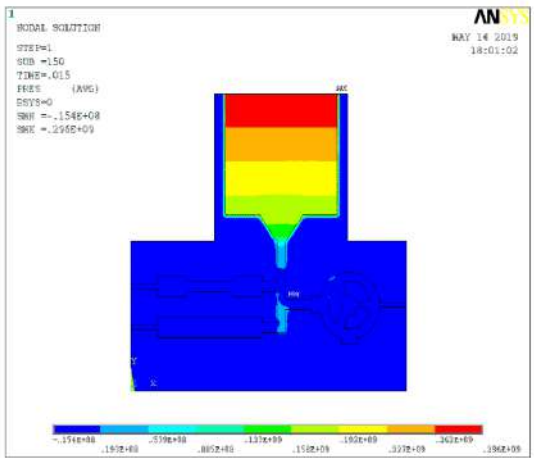
- point (5) : la température augmente rapidement jusqu'à T=2500k (t=0.014s)

  , puis elle chute jusqu'à T=1500K (t=0.015s). Après la température se stabilise à une valeur de 2000 k pour t=0.024 s

IV.6.5 Champ de pression: la figure (IV.11) représentation spatiale de pressiondans le moule en fonction de temps.



T=0.013s



T=0.015s

Fig. (IV.14) Représentation spatiale de champ de pression dans le domaine de calcul

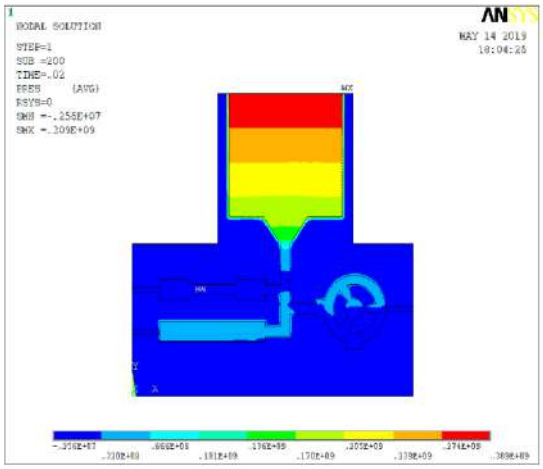
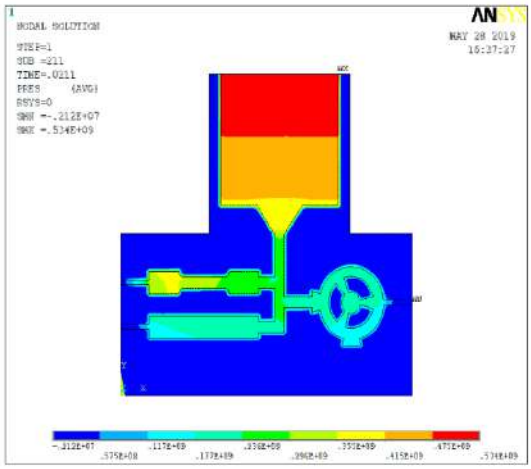
	
T=0.02s	T=0.0211s

Fig. (IV.14) Représentation spatiale de champ de pression dans le domaine de calcul

La figure (IV.14) représenté le champ de pression au cours du remplissage, au démarrage la valeur de la pression est 263 MPa ,et elle diminuer jusqu'à une valeur 177M Pa au niveau de les emprentes à caus de libération de liquide.

D'après les calculs numériques,onbetune le graphe suivant :

La variation de la pression de quelque point : dans cette partie nous avons présenté la trajectoire de chaque point qu'on a déjà sélectionné à la première simulation (fig. IV.15)

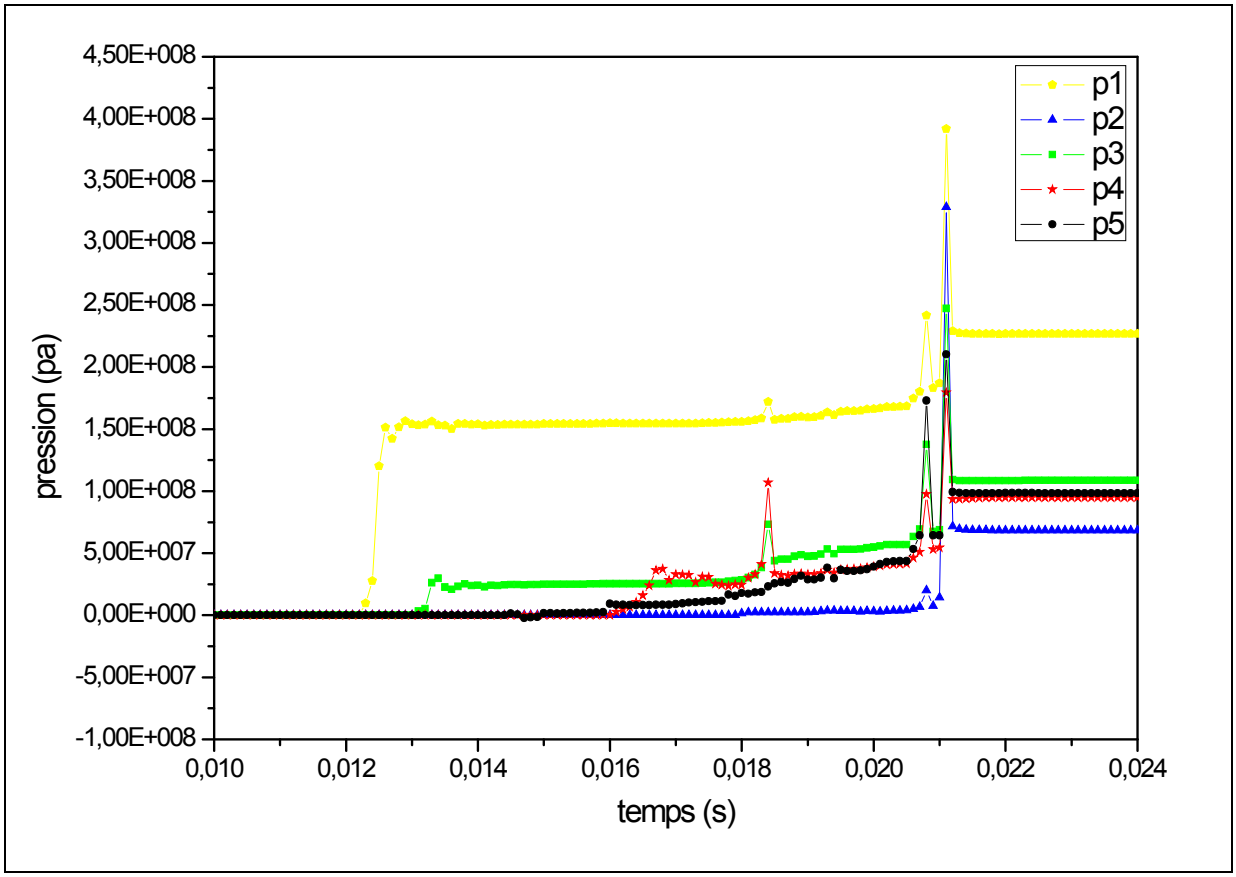


Fig. (IV.15)la variation de pression dans le temps pour de différent position

Remarque :la pression toujours commence de la pression atmosphérique (p= 0Pa)

La variation de la pression est affichée dans le moule comme elle est illustrée sur la Figure(IV.15), la valeur de la pression est elle augmente jusqu'à une valeur maximale 400 M Pa grâce à la convergence de la section .Il y a aussi une diminution jusqu'à une valeur de 100M Pa à Caus de libération de liquide.

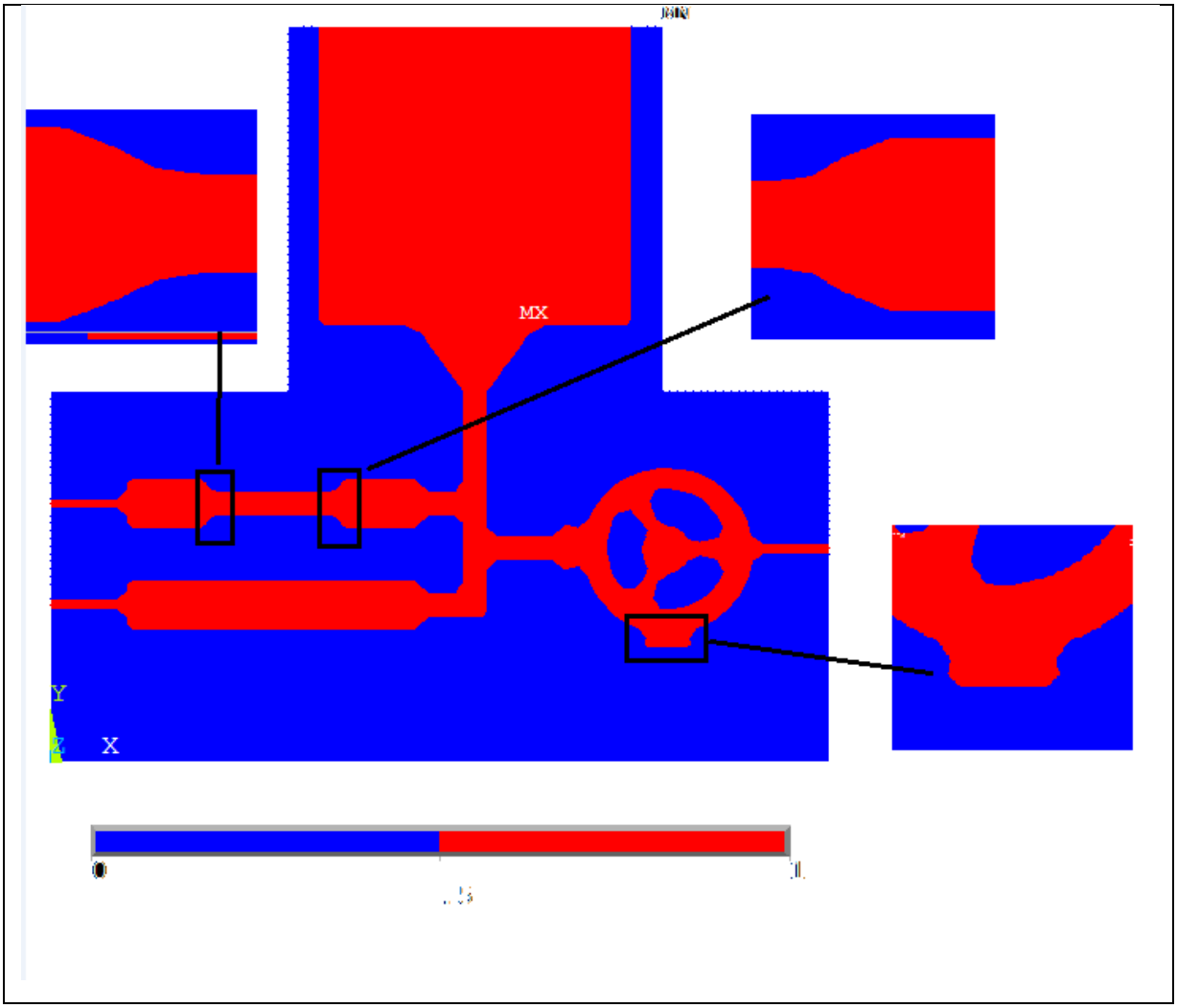


Figure (VI.15) : détection des défauts de remplissage dans les empreintes.

On a vu que les défauts de remplissage avec champ magnétique moins que la 1ere expérience sans champ magnétique

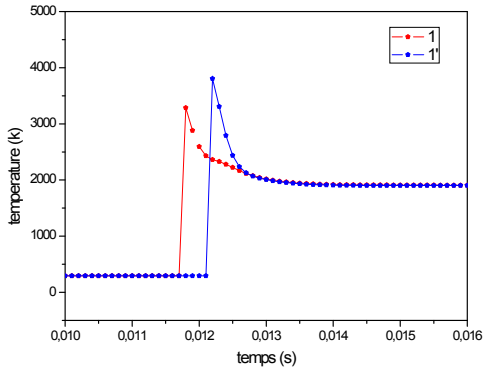
IV.7 Comparaison entre la première et la deuxième expérience :

Dans cette partie on a comparé entre les deux expériences (la première et la deuxième simulation) c'et à dire on compare par le suivie de trajectoire deremplissage ,par les capteurs installer.

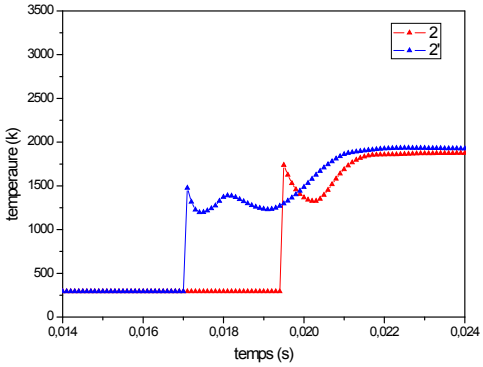
IV. 7.1 : température :

Remarque :la courbe rouge de température de 1ere simulation

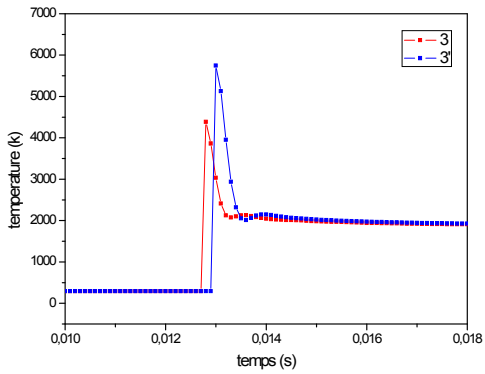
la courbe bleu de température de 2eme simulation



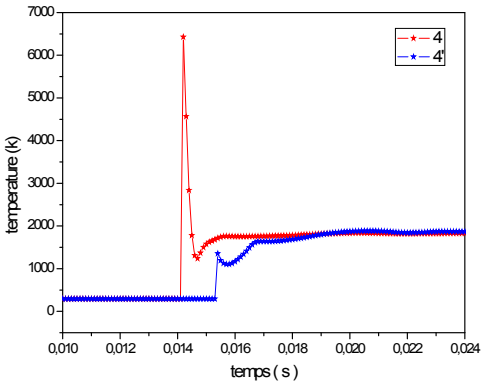
(1)



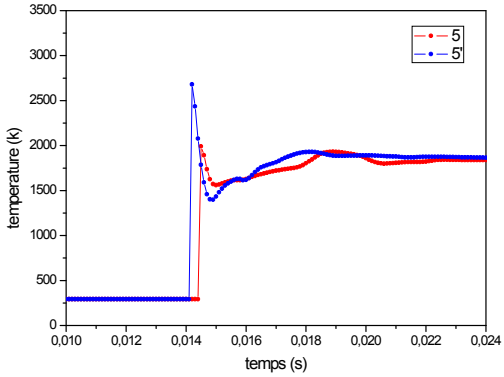
(2)



(3)



(4)



(5)

Figure (IV.16) Comparaison entre les Champs des températures dans chaque point pour les deux simulations.

Nous comparons la variation de champ des températures dans chaque point pour les deux simulations.

Remarque :le liquide en première simulation (le même point et le même temps) que la deuxième simulation.

- point(1):La variation de la température maximale de le graphe(1) avec un écart de 500 K dans les points (1,1') aprèsles températures constantes a même valeur de 2000 k

Citons que le liquide en première simulation se refroidi avant ceux qui de deuxième simulation.

- Point2 : La variation de la température maximale du graphe (2) avec un écart de 250 K dans les points (2,2')après les températures constantes a même valeur de 1750 k

Citons que le liquide en deuxième simulation se refroidi avant ceux qui de première simulation.

- point(3):La variation de la température maximale de le graphe(3) avec un écart de 1500 K dans les points (3,3') aprèsles températures constantes a meme valeur de 2000 k

Citons que le liquide en première simulation se refroidi avant ceux qui de deuxième simulation.

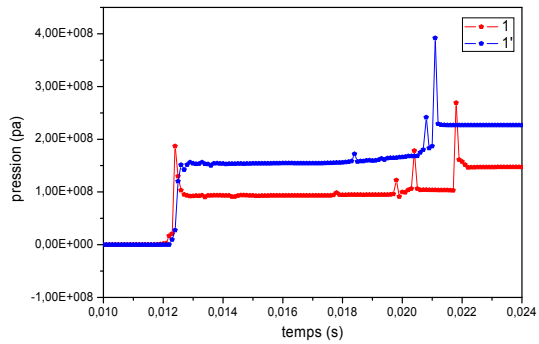
- point(4):La variation de la température maximale de le graphe(4) avec un écart de 5000 K dans les points (4,4') après les températures constante a meme valeur de 1900 k

Citons que le liquide en deuxième simulations refroidi avant ceux qui de première simulation.

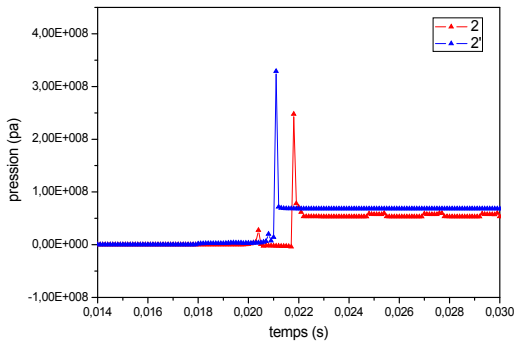
- point(5):La variation de la température maximale de le graphe(5) avec un écart de 750 K dans les points (5,5') après les températures constante a meme valeur de 1900 k

Citons que le liquide en première simulations refroidi avant ceux qui de deuxième simulation.

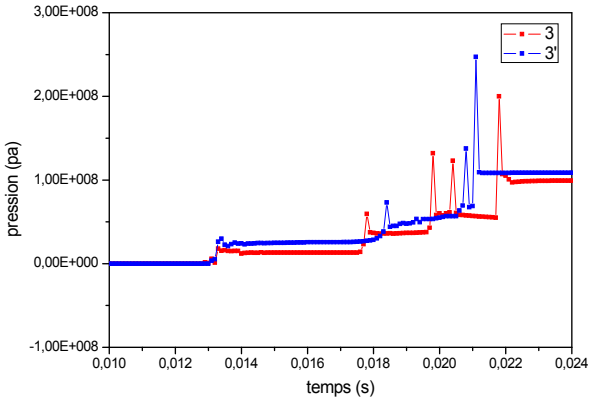
IV. 7.2 : champ de pression:



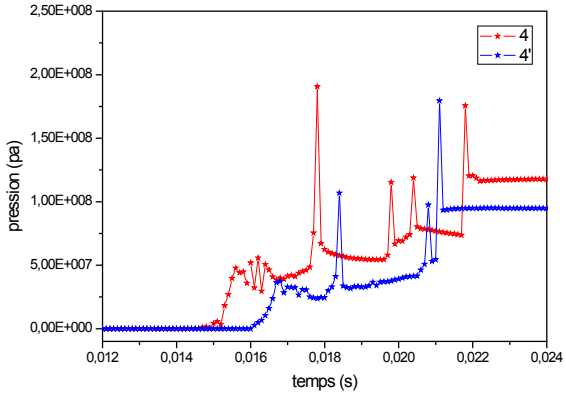
(1)



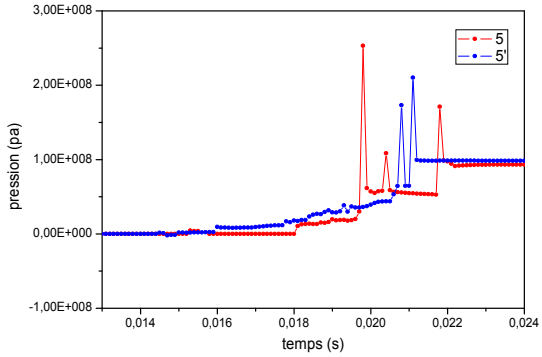
(2)



(3)



(4)



(5)

Figure (IV.17) Comparaison entre les Champs des pressions dans chaque point pour les trois simulations.

Nous comparons la variation de champ des pressions dans chaque point pour les deux simulations.

Remarque :le liquide en première simulation (le même point et le même temps) que la deuxième simulation.

- point(1):La variation de champ des pressions(la valeur maximale)de le graphe(1) avec un écart de 150M Pa dans les points (1,1')

Citons que la pressions de liquide en deuxième simulation se haut avant ceux qui de première simulation.

- Point2 : La variation de champ des pressions (la valeur maximale) de le graphe(2) avec un écart de 100 M Pa dans les points (2,2')

Citons que la pressions de liquide en deuxième simulation se haut avant ceux qui de première simulation.

- Point3 : La variation de champ des pressions (la valeur maximale) de le graphe(3) avec un écart de 50 M Pa dans les points (3,3')

Citons que la pressions de liquide en deuxième simulation se haut avant ceux qui de première simulation.

- Point4 : La variation de champ des pressions de le graphe(4) avec un petite écart de 5 MPa dans les points (4, 4')

Citons que la pressions de liquide enpremière simulation se haute avant ceux qui de deuxième simulation.

- Point5 : La variation de champ des pressions de le graphe(5) avec un écart de 50M Pa dans les points (5, 5')

Citons que la pressions de liquide en première simulation se haute avant ceux qui de deuxième simulation.

IV. 8 Conclusion :

Dans ce chapitre la ; nous avons cité deux simulation déférent la même géomètre (la premières simulation sans champ magnétique et la douzième simulation avec un champ magnétique) , pour le contrôle du remplissage des moules ; De plus les simulations avec cette expérience nous ont permis de mieux comprendre la distribution de tous les paramètres :(la pression, la température et le temps de remplissage du moule) etComparaison les défauts de remplissage et la déférence de température et la pression de chaque point à déférent simulation AprèsOn a trouvée quelques remarque :

- Le temps de remplissage avec champ magnétique plus moins que sans champ magnétique
- La température et la pression (la vitesse)a la fin de remplissage avec le champ magnétique plus élevé que sans champ magnétique
- le champ magnétique diminue les défauts de remplissage

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

On a fait cette mémoire sur le cadre d'étude et d'analysél'effet de champ magnétique sur la coulée par injection des moules et faire une comparaison en présence du champ magnétique et de son absence

Pour accomplir ce travail, des simulations numérique de remplissage ont été réalisées en utilisant une technique par éléments finis on a chois un martiaux ferromagnétique (le fer) fondu dans un moule en acier

Une première partie, nous avons exposé les techniques de moulage et on a base sur le moulage magnétique, dans la deuxième partie du présent document, la modélisation mathématique du remplissage magnétique

À cette fin, la méthode des Éléments finis et le logiciel ANSYS-CFD ont été appliqués. Le processus de remplissage du moule a été simulé dans des conditions atmosphériques parfois par gravité et d'autre fois on a appliqué le champ magnétique et le métal liquide a été versé a travers un canal de moule.

Au cours de la simulation de la phase de remplissage du moule, les propriétés telles que la densité, la conductivité thermique, chaleur spécifique et la viscosité de métal liquide et de l'acier ont été considérées comme des constantes. En outre, la turbulence, l'effet de la pesanteur et la champ magnétique ont été prises en compte.

Nous avons cité deux simulation déférent la même géomètre (la premières simulation sans champ magnétique et la douzième simulation avec un champ magnétique)

Les résultats suivants ont été ensuite déterminés : la variation de température, la variation de pression, et également le paramètre fraction volumique.

Après On a trouvée que :

- Le temps de remplissage avec champ magnétique plus moins que sans champ magnétique
- La température et la pression (la vitesse) a la fin de remplissage avec le champ magnétique plus élevé que sans champ magnétique
- le champ magnétique diminue les défauts de remplissage

Référence bibliographique

[1]http://lyc-plagourgue.ac-reunion.fr.

[2] Estelle ZAEZ «Etude Numérique du Remplissage 3D en Fonderie » Thèse de doctorat à l'Ecole des Mines de paris ; 2003.

[3] Arnaud DELANO « simulation numérique de la fonderie du front plat DC » ENSAM – Meknès-ENSAM Cluny

[4] Pierre CUENIN « Moulage-Noyautage » Article de techniques d'ingénieur; 1994.

[5] -http://www.google.dz.

[6]-D. Gelin, M. Vincent, « Eléments de fabrication », Les Editions Foucher, 1995.

[7] André LE NËZET ; Michel GARAT « Moulage des alliages d'aluminium - Sable,moulage de précision et procédés apparentés » Article de techniques d'ingénieur ; 2013

[8] Aluminium laufen S.A ; « Documentation technique : moulage en coquille », 2007, site : http/www.alu-laufen.ch/.

[9] Article de LE FEUILLAND Technique-numéro 9 ; 2003.

[10] International Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 6, Issue 5, May-2015 ISSN 2229-5518

[11] International Advanced Research Journal in Science, Engineering and Technology

2nd International Conference on Advances in Mechanical Engineering(ICAME-2016)

Amrutvahini College of Engineering, Sangamner

Vol. 3, Special Issue 1, March 2016

[12]-Pierre-Marie Geffroy : Mise en forme d'alliages ferreux et non ferreux par un procédé de fonderie assisté par un champ magnétique

[13]XabierPeña, , et al.. «Le procédé de moulage magnétique»

[14]-Nitin Kumar Chauhan, et al «Magnetic mould casting: technical review andmethodology»

[15]-Messaoudi nawel«Analyse des défauts par simulation numérique du remplissage sous pression des moules par méthode ef/vof » diplôme de diplôme Master 2 en génié Mécanique ; Université de Yahia Fers de Médéa ; 2014 2015.

[16] -Arnaud DelanoKwayep De Petntang ; «Simulation numérique de la fonderie du Front Plate DC» ENSAM-Meknès ; 2001.

[17]-JU MIN KIM, KYUNG AHN, SEONG JAE LEE, and SEUNG JONG LEE, (numerical simulation of moving free surface problems in polymer processing using volume –of-fluid) university Seoul, Korea

[18]- MATENE ELHACENE, (méthode numérique de résolution des équations de Navier stokes) Diplôme d'ingénieur d'état en génie climatique.

[19]http://fr.wikipedia.org/wiki/Maillage.

[20]- YKRELEF Hichem « Étude de la distribution des défauts du remplissage des moules par simulation numérique ». Diplôme de magister ; Université de Yahia Fers de Médéa ; 2011.

[21] -S. VINCENT. Modélisation d'écoulements incompressibles de fluides non-miscibles.Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 1999.

[22] -Arnaud DelanoKwayep De Petntang ; «Simulation numérique de la fonderie du Front Plate DC» ENSAM-Meknès ; 2001.

[23]-MAKHLOUFI MedAmine, BOUDERRADJI Mohamed ; «Analyse par numérique de l'influence des formes complexes sur l'apparition des défauts aux coures des remplissages des moules en 2D».Diplôme de master ; Université de Yahia Fers Médea ;2012-2013.