République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie de la matière

MÉMOIRE DE MASTER

Option: Conception Mécanique (CAO)

THÈME

Simulation Numérique Du Remplissage Sous Pression Des Moules Par La Méthode EF/VOF

Proposé et dirigé par :

Dr : ZIRARI Mounir
Dr : GUEMANA Mouloud

présentés par :

1. DAOUDI Moussa
2. DHAOUILahcen

Promotion 2013-2014

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 2014

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 2014

DAOUDI-Moussa
DHAOUI-Lahcen

ملخص:

تواجهصناعة المسابكتحدياتجديدة لتقديممنتجات ذات جودة عالية، في هذه الدراسة أوالتجربةالعدديةالتي أجريت على أساسطريقةEF\VOF، وملء أقدام لقالب معدني، أسبقيةعدةالتكوينوأظهرتالنتائجالمعقدةهندسية أوالتأثير المباشر للتوجه العقبات التي تحول دونتدفقمع تشكيلالعيوب.

كلمات المفتاح:التمثيلالعددي، مقطع من بصمة القالب، العناصرالمحدودة، حجمالمائع (VOF)،تعبئة القالب، وعيوب السباكة.

Résumé :

L'industrie de la fonderie fait face à de nouveaux challenges pour fournir des produits de qualité, dans cette étude on réalise des expériencesnumériques basées sur la méthode des EF\VOF, du remplissage des empreintes d'un moule métallique, en préséance de plusieurs configurations géométriques complexes ou ces résultats ont montrés l'influence directe de l'orientation des obstacles à l'écoulement sur la formation des défauts.

Mots-clés : remplissagedemoule, simulation numérique, Elémentsfinis, écoulement, modélisation, défauts de remplissage.

Abstract:

Thefoundryindustryisfacingnew challengesto providequalityproducts,in this studythenumericalexperimentsbased on the methodofEF\VOFisproduced,filling the footprintsof a metalmold,precedence ofseveralcomplexgeometryoPPrtheresultsshowed thedirect influence ofthe orientation of theobstaclesto the flowon the formation ofdefects.

Keywords: moldfilling, digital simulation, finite elements, flow modeling, filling defects**.**

SOMMAIRE

CHAPITRE I : étude bibliographique

I.1 INTRODUCTION.....3
I.2 Le moulage 4
I.2.1. Le Moule (outil) :
……..4I.2.2Moulage en moule non permanent.....4
I.2.3Moulage en moule permanent 5
I.3 LES TECHNIQUES DE MOULAGE.....6
I.3.1 Moulage aux sables 6
I.4Classification des procédés de moulage 6
I.4.1 Moulage aux sables à durcissement thermique.....7
I.4.1.1 Chauffage et durcissement du sable en dehors de l'empreinte 7
I.4.1.2 Chauffage et durcissement du sable dans l'empreinte.. 8
I.4.1.2.1 Procédé Croning.....8
I.4.1.2.2 Procédés en boites chaudes ou en boîtes tièdes (figure 5) 9
I.4.2 Moulage aux sables à durcissement chimique et physique.....10
I.4.2.1 Sables autodurcissants (durcissement chimique) 10
I.4.2.2 Moulage par congélation (durcissement physique) 10
I.4. 3 Moulage avec modèles perdus.....12
I.4. 3.1 Moulage en polystyrène expansé 12
I.4. 3.1.1 Moulage avec modèles en polystyrène pour grosses pièces unitaires.....13
I.4. 3.1.2 Moulage avec modèles en polystyrène pour pièces de série.....13
I.4.4 Moulage à la cire perdue, dit aussi moulage de précision 14
I.4. 5 Moulage en moules métallique 15
I.4.5.1 Caractéristiques générales.....15
I.4.5. 2 Différents procédés de moulage en coquille 15

I.4.5.2.1 Moulage en coquille par gravité.....16

I.4.5.2.2 Moulage sous pression.....17

I.4.5.2.2.1 Principe de fonctionnement 19

I.4.5.2.3 Moulage par forgeage
liquide.....19I.5Procèdesspéciaux.....
.....20

I.5.1 Moulage avec refroidisseurs.....21
I.5.2 Moulage par centrifugation.....21
I.5.3 Moulage de pièces bimétalliques.....23
I .6 Défauts de moulage
I .6.1 Défauts affectant la surface.....23
I .6.2 Défauts affectant la masse (volume) 26
I.6.2.1. Les inclusions d'air.....26
I.6.2.1. Les soufflures.....26
I.6.2.2.Les retassures.....27
I.6.2.3.Mal venus.....27
I.7 conclusion.....28

Chapitre II : Modélisation mathématique

II. 1. Introduction……...…29
II.2.Équations gouvernantes de la dynamique de la chaleur ……...……..29
II.2.1.Equation de continuité …….29
II.2.2.Equation de quantité de mouvement……30
II.2.3.Equation de conservation d'énergie…….....31
II.3.Modélisation numérique d'écoulements à surface libre……..…....31
II.3.1.Méthodes à maillage mobile ……..…..32
II.3.2.Méthodes à maillage fixe……..…...32
II.4. Modélisation thermique ……..…..32
II.4.1. Introduction ……32
II.4.2. Différentes modes de transfert de chaleur……..33
II.4.2.1. Transfert de chaleur par conduction. ……..33
II.4.2.1.1. Cas des gaz ……..35
II.4.2.1.2. Cas des liquides ……...35
II.4.2.1.3. Cas des solides…….35
II.4.2.1.4. Loi de Fourier …….35
II.4.2.2. Transfert de chaleur par convection……...35
II.4.2.3. Transfert de chaleur par rayonnement……...36
II.5. Les conditions aux limites ……...38
II.5.1. Condition de Dirichlet……...38
II.5.2. Condition de Neumann……..38

II.5.3. Condition de Robin-Fourier……...39
II.6. Conclusion …….…..39

CHAPITRE III : solution numérique

III.1Introduction.....40
III.2 Le calcul numérique (modélisation et simulation) 40
III.3 Discrétisation des équations différentielles 42
III.3.1 Méthodes de discrétisation.....43
III.3.1.1 Méthode des différences finies 44
III.3.1.2 Méthode des volumes finis 44
III.3.1.3 Méthode des éléments finis 45
III.4 Calcul d'interfaces 45
III.4.1 Maillage 46
III.4.1.1 Les méthodes lagrangiennes 46
III.4.1.2 Les méthodes eulérienne.....47
III.5 Les méthodes de suivi de front 47
III.5.1 Les méthodes de suivi de volume 48
III.6 CONCLUSION 49

CHAPITRE IV RESULTATS ET DICUSSION

IV.1. Introduction 50

IV.2. Description du domaine d'application 50

IV.3. Les conditions initiales 51

IV.4. Les conditions limitent 51

IV.5. Validation 51

IV.6. simulation en régime transitoire 53

IV.6.1 Champ de température 55

IV.6.2 Champ de pression.....57

IV.6.3 Champ de température 61

IV.6.4 Champ de pression.....63

IV.6.5Champ de température 68

IV. 6.6 : champ de pression.....69

IV.7 Comparaison entre la première et la deuxième et la troisième partie.....72

IV. 7.1 : champ de température 72

IV. 7.2 : champ de pression……..73

IV. 8 Les défauts des moulages pour les trois simulations.....75

IV. 9Les solutions proposéessur les trois simulations……...76

IV. 10Conclusion 76

Conclusion générale

Liste des figures

Chapitre I

Figure(I.1): Eléments constitutifs d'un moule…….4

Figure(I.2): Principe de moulage en moule non permanent……5

Figure (I. 3): exemple moulage en moule permanent……....5

Figure (I.4) : Fabrication des noyaux en boîtes chaudes……8

Figure(I.5) : Moulage par congélation……..10

Figure(I.6): Moulage au polystyrène expansé……...11

Figure(I.7): Principales étapes du procédé de moulage à la cire perdue……...13

Figure (I.8): leMoulage en coquille par gravité……..16

Figure (I.9):Une coupe de moulage sous pression……...17

Figure (I.10) : Moulage par forgeage liquide……19

Figure (I.11):Machine de coulée sous pression centrifuge à axe vertical……....20

Figure (I.12) : Les défauts des surfaces…….…...23

Figure (I.13) :Les défauts des détachements dans le moule…….23

Chapitre II

Figure (II-1): Différent mode de transfert thermique…….…..33

Figure (II-2) : Conductivité thermique……..…35

Figure (II-3) : Le transfert thermique par rayonnement……...37

Chapitre III

Figure (III.1) : le principe de calcule numérique……41

Figure (III.2) : les types de grilles numériquement……....42

Figure (III.3) : méthode de discrétisations……..…43

Figure (III.4) : un exemple de maillage triangulaire……..46

Figure(III.5) : la méthode lagrangienne…….46

Figure (III.6) : la méthode eulérienne……....47

Figure (III.7) : Différentes méthodes de suivi de front……..…47

Figure(III.8):Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque…….....48

Figure(III.9) : Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret…....49

Chapitre IV

Figure(IV.1) : Géométries de moule et de la cavité……..50

Figure(IV.2) : Volume de fraction pendant le remplissage du moule ; a) Modèle de Zhao HaidongOhnakaItsuo, Zhu Jindong ; b) Notre modèle……...52

Figure(IV.3) : Représentation spatiale de remplissage du moule (vof)……....54

Figure(IV.4) : Représentation spatiale de champ de température dansle domaine de calcul…….55

Figure(IV.5) :la variation de température dans le temps pour de différent position……56

Figure(IV.6) : Représentation spatiale de champ de pression dans le domaine de calcul.....58

Figure(IV.7) : la variation de pression dans le temps pour de différent position…….59

Figure(IV.8) : Représentation spatiale de remplissage du moule (vof)……60
Figure (IV.9) : Représentation spatiale de champ de température dans le domaine de calcul……..62
Figure(IV.10) : la variation de température dans le temps pour de différent position….62
Figure(IV.11) : Représentation spatiale de champ de pression dans le domaine de calcul……....64
Figure (IV.12) : la variation de pression dans le temps pour de différent position…..…65
Figure (IV.13) : Représentation spatiale de remplissage du moule (vof)…….....67
Figure (IV.14) : Représentation spatiale de champ de température dans le domaine de calcul……....68
Figure (IV.15) : la variation de température dans le temps pour de différent position....69
Figure (IV.16) : Représentation spatiale de champ de pression dans le domaine de calcul……....70
Figure (IV.17) : la variation de pression dans le temps pour de différent position……..71
Figure (IV.18) : Comparaison entre les Champs des températures dans chaque point pour les trois simulations…….……..…...72
Figure (IV.19) : Comparaison entre les Champs des pressions dans chaque point pour les trois simulations…….…….…...74
Figure (IV.20) :Représentation le défaut d'inclusions d'air de moulage sur le niveau de l'empreinte complète pour la première simulation…….....75
Figure (IV.21) : Représentation le défaut des inclusions d'air de moulage sur L'angle 90° de l'empreinte pour la deuxième simulation……..……..…75
Figure (IV.22) : Les solutions proposées sur les trois simulations……..…76

Liste des tables

Tableau (IV.1) : les propriétés thermiques de l’aluminium……..51

Tableau (IV.2) : Propriétés du matériau de moule……...51

Nomenclature

Notation	Signification	Unité
Cp	Capacité thermique	[J/Kg.K]
H	Coefficient de transfert thermique	[W/m^2.K]
L	Chaleur latente de fusion	[J/Kg]
N	Vecteur normal à S	[m,m,m]
P	Périmètre	[m]
S, A	Surface	[m^2]
T	Température	[K]
t	temps	[s]
t_0	temps à la position initiale	[s]
V	Volume	[m^3]
λ	Conductivité thermique	[W/m.K]
ρ	Masse volumique	[Kg/m^3]
μ	La viscosité dynamique	[Kg/m]
q	Source volumique	
F	Fraction volumique	
m	La mass	[Kg]
h	Distance [m]	
$F21$, $F23$et $F22$	Le déplacement du segment de la cellule 2 ver 1et 3 [m]	
r	Paramètre de calcule d'interface	
ε	Coefficient d'émission de la surface	
σ	Constante de Stephan Boltzmann	[W.$m^{-2}k^{-4}$]
φ	La densité de flux thermique	[W/m^2]

$.\gamma$	La fréquence	[Hz]
γ	La viscosité cinématique	$[m^2/\ s^2\ ]$
G	Coefficient d'échange dans les termes de transport	
E	Energie	[J]
h	La constante de Plank	$[Js^{-1}]$
u	Composante de la vitesse moyenne dans la direction X [m /s]	
v	Composante de la vitesse moyenne dans la direction Y [m /s]	
w	Composante de la vitesse moyenne dans la direction Z [m /s]	
X, Y, Z	Coordonnées cartésienne	

Abréviation

2D	Deux Dimensions
3D	Trois Dimensions
EDP	Equations aux Dérivées Partielles
EF	Elément Finis
VF	Volume Finis
MDF	Méthode des Différences Finis
VOF	Volume Of Fluid (volume de fluid)
CIAM	Construction de l'Interface Affine par Morceaux
SLIC	Simple Ligne Interface Calculation
MAC	Marker And Cells (méthode de marqueur de volume)
TVD	Total Variation Diminishing
CFL	Courant- Friedrich- Lewy
VC	Volume de Contrôle
CL	Condition aux Limites

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Depuis que les hommes savaient réaliser la fusion des métaux, ils aient à donner à ceux-ci la forme des objets dont ils avaient besoin, par coulée du métal liquide dans des moules. Ainsi, le métal en se solidifiant conserve la forme de l'empreinte, dont il été coulé.
Parmi les plus anciens procédés de moulage, on site le moulage en sable, puis le moulage en moule métallique, dont le développement a mis en évidence, outrel'affranchissement de la sujétion du sable et des châssis, l'avantage de possibilités dedémoulage dans tous les sens. Ainsi, est née la technique du moulage en coquille par gravitédont le principe de remplissage est réalisé sous la seule action de poids du métal coulé.

Cette technique elle-même a donné naissance à la coulée sous pression aux alentours de1830, et qui a connu depuis le début du vingtième siècle, une série continue des phases dedéveloppement. Et les trente dernières années ont marqué, à cet égard, un essorparticulièrement important.

L'industrie de la fonderie comme celle de tous les procédés de fabrication fait face continuellement à de nouveaux challenges. Elle doit être réactive pour fournir des produits dontle cycle de vie est de plus en plus court. Ainsi le contrôle de qualité des pièces est un impératifpour livrer des pièces conformes au client.

Cette qualité peut être définie comme son aptitude à satisfaire les exigences spécifiées par le cahier des charges du client. Elle dépend de la conception de la pièce par le donneur d'ordres, et du soin apporté à sa réalisation par le fondeur, qui doit maîtriser un grand nombre de paramètres de fabrication. La recherche de cette qualité passe entre autres par la reconnaissance et la description des anomalies ou défauts qui peuvent se produire au cours du processus de fonderie, indispensables pour la mise en place d'actions correctives.

Dans cette étude nous proposons d’analysée par simulation numérique l’influence des formes géométrique complexe situées à l’intérieures de l’épreinte sur les défauts de remplissage.

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

Le premier chapitre est consacrent à une étudebibliographiques tandis que le second présente lamodélisation mathématique d'un problème physique.

Pour le troisième chapitre nous présent les méthodes discrétisation des équations de modèle utilise (Navier-Stokes, conservation de masse, d'énergie).

Le quatrième chapitre présente les résultats de la simulation numérique de l'étude proposé. Avec de commentative.

En fin, on achève notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I
Etude bibliographique

I.1 Introduction

Le terme fonderie définit aussi bien les installations métallurgiques dans lesquelles on fond les métaux et où on les coule dans des moules pour leur donner la forme des objets à fabriquer, que l'ensemble des opérations nécessaires à leur production.

C'est, tout à la fois, un art et un métier dont les origines remontent à plusieurs millénaires avant notre ère, utilisant et mettant en œuvre des techniques aussi diverses que variées, comme le moulage, le noyautage, la métallurgie, la fusion et la coulée des métaux et alliages métalliques, les traitements thermiques, la finition, le parachèvement des pièces, etc.

Le moulage sous pression est l'art de produire des pièces de dimensions précises en Introduisant de force un alliage fondu ou pâteux dans l'empreinte d'un moule permanent.

Son but est d'assurer la venue d'une bonne pièce, de reproduire le maximum de détails, D'éviter le maximum d'usinage, de respecter avec précision les cotes, ceci dans les meilleures conditions de prix de revient. Le métal liquide est soumis à une pression appropriée qui le force à rentrer dans le moule

Les moules sont fixés sur les plateaux des machines dont les mouvements constituent Un cycle réglable ils doivent résister à la fois aux efforts mécaniques qui les sollicitent et aux Phénomènes d'érosion qui résultent de l'injection des alliages liquides .

La température de fusion constitue l'obstacle principal à la coulée des métaux.

Pratiquement, malgré de timides essais pour les alliages ferreux, la fonderie sous pression ne mente œuvre que des alliages non ferreux.

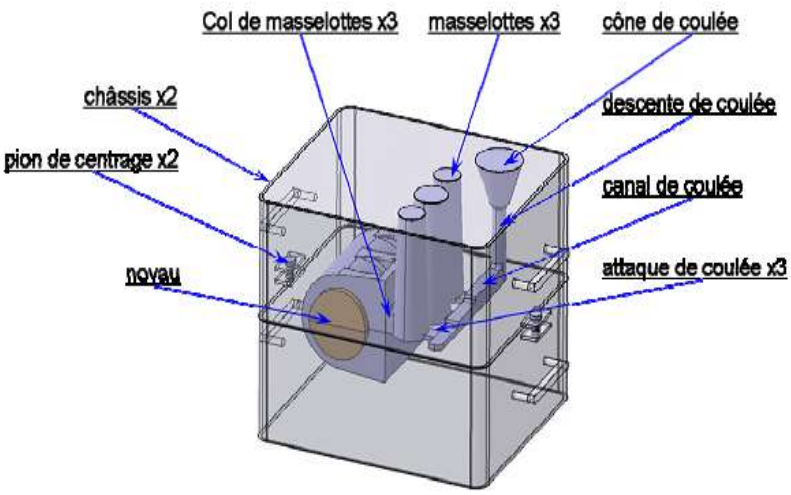
La nécessité d'étudier spécialement les pièces de fonderie dans leur conception et leurs formes est particulièrement importante dans le cas de la coulée sous-pression.

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.le Moule (outil) :

Le moule est un élément servant à la fabrication d'autre élément par les techniques de Moulage (fig. I.1).



Figure(I.1): Eléments constitutifs d'un moule

I.2.2 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.

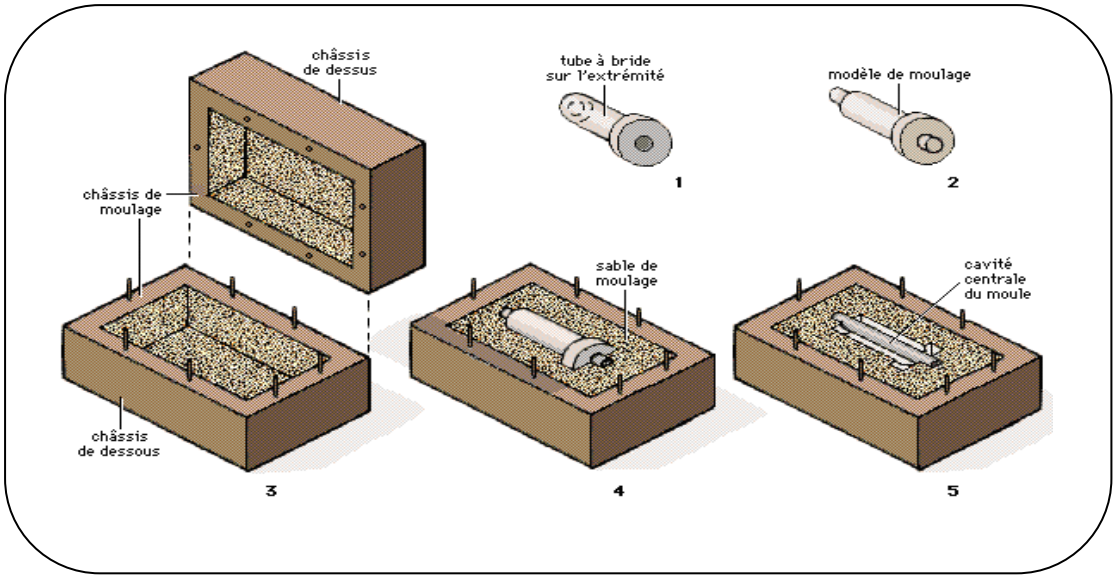


Fig. (I.2): Principe de moulage en moule non permanent

I.2.3 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.[2]

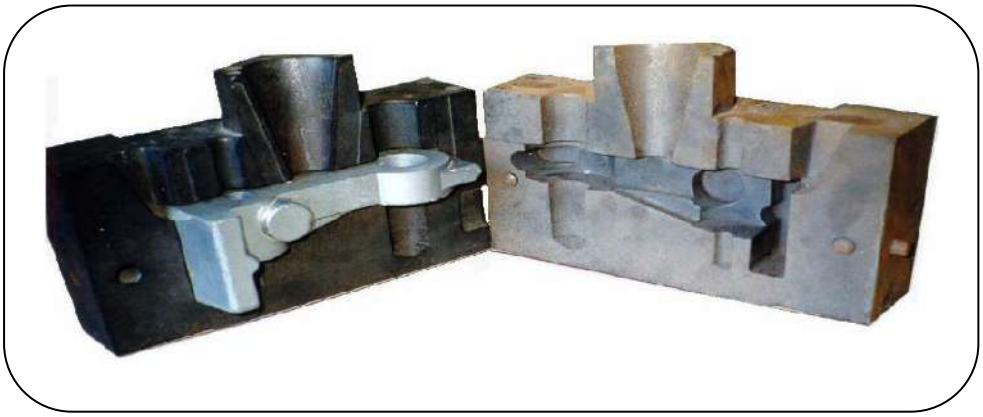


Fig. (I. 3): exemple sur moulage en moule permanent[3]

I.3 Les techniques de moulage :

L'opération de moulage est une des plus importantes du processus industriel de la fonderie. Elle détermine en effet, d'après le modèle, les formes de la pièce à couler, ses dimensions et leur précision, ses états de surface, son refroidissement, et joue un rôle prépondérant sur de très nombreux paramètres influant sur sa qualité.

De très nombreux procédés de moulage existent (figure 1) et cette très grande variété des Procédés impose de les classifier pour permettre leur présentation. Nous les classons généralement en fonction des modes de moulage et de durcissement des matériaux utilisés au moment de la fabrication du moule ou des noyaux et de la nature des modèles qui doivent être compatibles avec les procédés employés :

- moules sables (non permanents)
  - modèles permanents (bois, métal, etc.)
  - modèles perdus (polystyrène, cire, etc.)
- moules métalliques (permanent)
- procédés spéciaux

I.3.1 Moulage aux sables :

On utilise soit du sable silico-argileux naturel, soit du sable synthétique formé d'un mélange de grains de silice et d'argile, 5 à 10 % suivant les alliages moulés, humidifiée pour former un lait d'argile qui enrobe les grains en les agglomérant entre eux et de divers adjuvants.

On peut distinguer trois grandes familles de sables:

- les sables naturels (peu utilisés maintenant)
- les sables étuvés, surtout pour le moulage à l'unité de pièces importantes
- les sables synthétiques, sables verts, utilisés directement après leur préparation. [4]

I.4 Classification des procédés de moulage :

Les procédés de moulage sont classés suivant le mode de serrage employé, qui détermine, toutes les installations de production des moules, moulage main, moulage machine et moulage mécanisé.

.

I.4.1 Moulage aux sables à durcissement thermique :

La matière première de base pour les procédés à durcissement thermique reste le sable siliceux suffisamment pur, mélangé à des liants organiques (huiles siccatives, résines), le sable étant serré ou soufflé dans une boîte à noyaux ou contre une plaque-modèle.
Le chauffage du mélange provoque la prise ou polymérisation des liants et le durcissement du sable. On distingue deux procédés:

- le chauffage du sable en dehors de l'outillage après démoulage

- le chauffage du sable par contact avec un outillage chauffé

I.4.1.1 Chauffage et durcissement du sable en dehors de l'empreinte :

Le sable est mélangé avec deux liants pour lui donner la cohésion à vert (conservation de sa forme après démoulage de la boîte à noyaux) et la résistance mécanique finale après cuisson à 250°C.

- **Avantages**

- Le sable préparé est très fluide, il a donc une excellente aptitude au soufflage dans la boîte à noyaux

- Le noyau durci à la cuisson a une grande cohésion, mais il faut le renforcer par une armature métallique

- Le débourrage des noyaux après coulée est très facile

- **Inconvénients**

- Faible précision dimensionnelle, le noyau se déforme au démoulage et à la cuisson, ce qui oblige souvent à prévoir un râpage des noyaux pour pouvoir respecter les cotes principales

- On constate aussi un dégagement gazeux important qui oblige à prévoir des tirages d'air

- Ces noyaux sont généralement protégés par un enduit réfractaire qu'il faut sécher soigneusement avant la coulée

I.4.1.2 Chauffage et durcissement du sable dans l'empreinte :

L'utilisation de mélanges de sable sec et de résines thermodurcissables permet d'obtenir

directement dans des empreintes chauffées à 200-240 °C des noyaux ou des carapaces, avec des temps de production de l'ordre de quelques minutes

I.4.1.2.1 Procédé Croning :

- **Avantage :**

  - Précision des pièces
  - Dessin des pièces
  - Qualité
  - Nature des alliages
  - Stockage facile des noyaux et carapaces sans reprise d'humidité.

- **Inconvénients :**

- Tendances à la piqûre dans les angles des pièces
- Difficultés d'emploi du moulage avec les métaux non ferreux
- Coûts relativement importants pour le sable, les outillages et les investissements

I.4.1.2.2 Procédés en boites chaudes ou en boîtes tièdes (figure 4) :

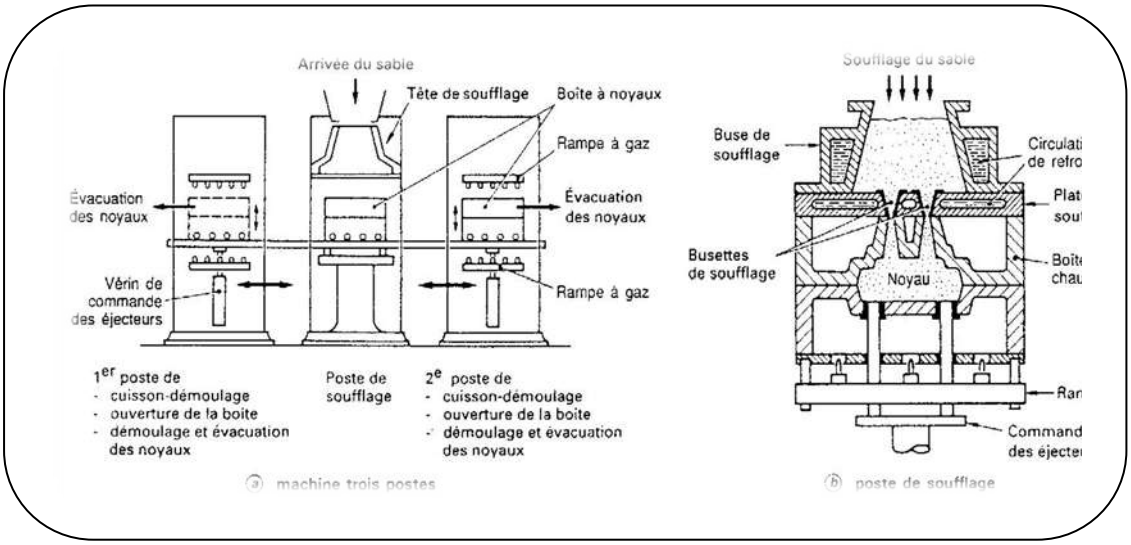


Figure (I. 4) : Fabrication des noyaux en boîtes chaudes

- **Avantages**

- Aucune nécessité d'additions spéciales au sable, ni d'armatures de renfort des noyaux
- Stabilité du noyau, pas de gauchissement
- Températures plus basses, donc opérations plus courtes

- Résistance élevée du noyau, diminuant les risques de casse en cours de manipulation
- Cadences de fabrication élevées et coûts diminués
- Meilleure précision dimensionnelle
- Etuve inutile, simplification des matériels de mise en oeuvre
- Bon état de surface des pièces pour les parties en contact avec les noyaux

➢ Inconvénients

- Tirages d'air importants dans les noyaux nécessaires pour évacuer tous les gaz produits à la coulée
- Épaisseur maximale du sable traité ne dépassant pas une soixantaine de millimètres, ce qui conduit à faire les gros noyaux sous forme de deux coquilles assemblées et collées
- Nécessité d'un contrôle précis et constant des températures des outillages
- Refroidissement des buses et des plateaux de soufflage, ce qui en augmente la complexité et le coût
- Durée d'utilisation réduite des sables mélangés
- Ventilation nécessaire de tous les postes de travail (odeur et nocivité des émanations gazeuses)

I.4.2 Moulage aux sables à durcissement chimique et physique :

Dans les procédés modernes à prise chimique, à liants organiques ou minéraux, on a cherché à supprimer l'étuvage des moules ou la cuisson des noyaux qui conduisent à des déformations, nuisent à la qualité des pièces et nécessitent des matériels importants. En outre, ces opérations induisent des manutentions très nombreuses, d'un coût très élevé, aussi bien en fabrication de pièces unitaires qu'en fabrication de pièces de série.

I.4.2.1 Sables autodurcissants (durcissement chimique) :

Ces sables durcissant directement au contact avec les modèles uilisent pour les plus anciens des liants minéraux (ciment, plâtre, silicate). Les nouveaux procédés à liants organiques (résines synthétiques) sont plus performants. Ils ont amélioré considérablement la fonderie de pièces unitaires notamment, permettant de développer l'emploi des modèles en polystyrène, source de productivité importante dans cette spécialité.

➢ Sables au ciment :

Le ciment est employé comme liant en substitution de l'argile, le durcissement se fait Lentement, par un mécanisme de prise hydraulique et il faut éliminer l'excès d'eau par séchage ou chauffage.

➢ Avantage :

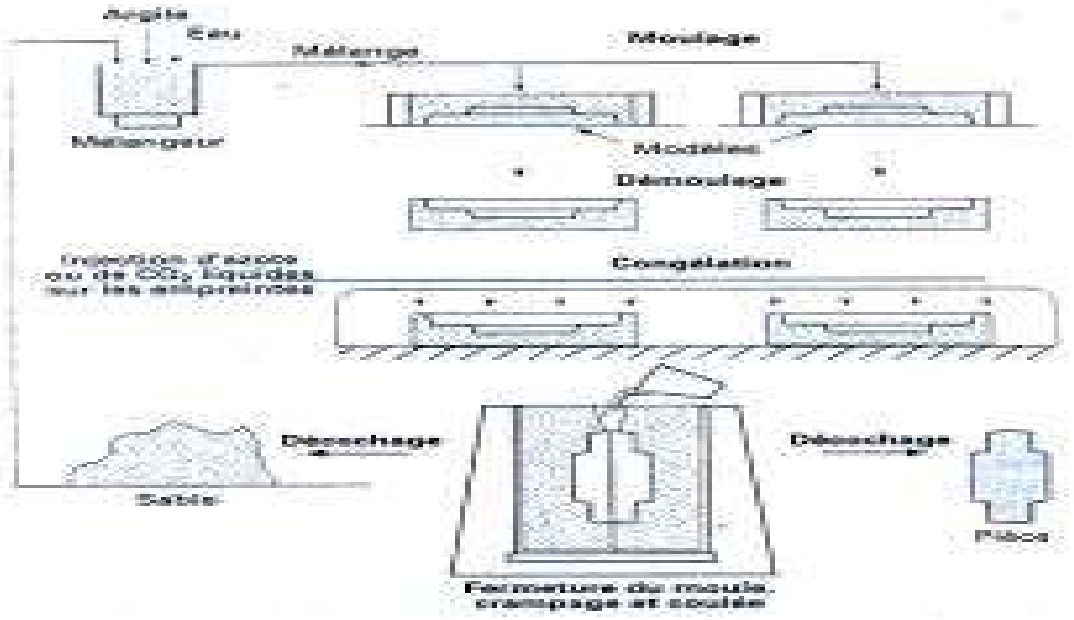
- suppression de l'étuvage
- grande perméabilité du sable évitant certains défauts (soufflures et piqûres)
- propriétés réfractaires du moule élevées
- peu ou pas de réaction moule-métal
- qualité superficielle des pièces
- excellente conservation des moules et noyaux
- ce procédé permet la coulée de tous les alliages

➢ **Inconvénients :**

- contrôle rigoureux du sable - Un entretien continu des outillages
- Une emprise au sol importante étant donnée les temps de prise assez longs

I.4.2.2 Moulage par congélation (durcissement physique) :

Ce procédé consiste à lier les grains de sable par de la glace. Le matériau de moulage est Constitué essentiellement par du sable siliceux mélangé à 4 % en masse de bentonite et 4 à 6 % en masse d'eau (figure5).



Figure(I.5) : Moulage par congélation

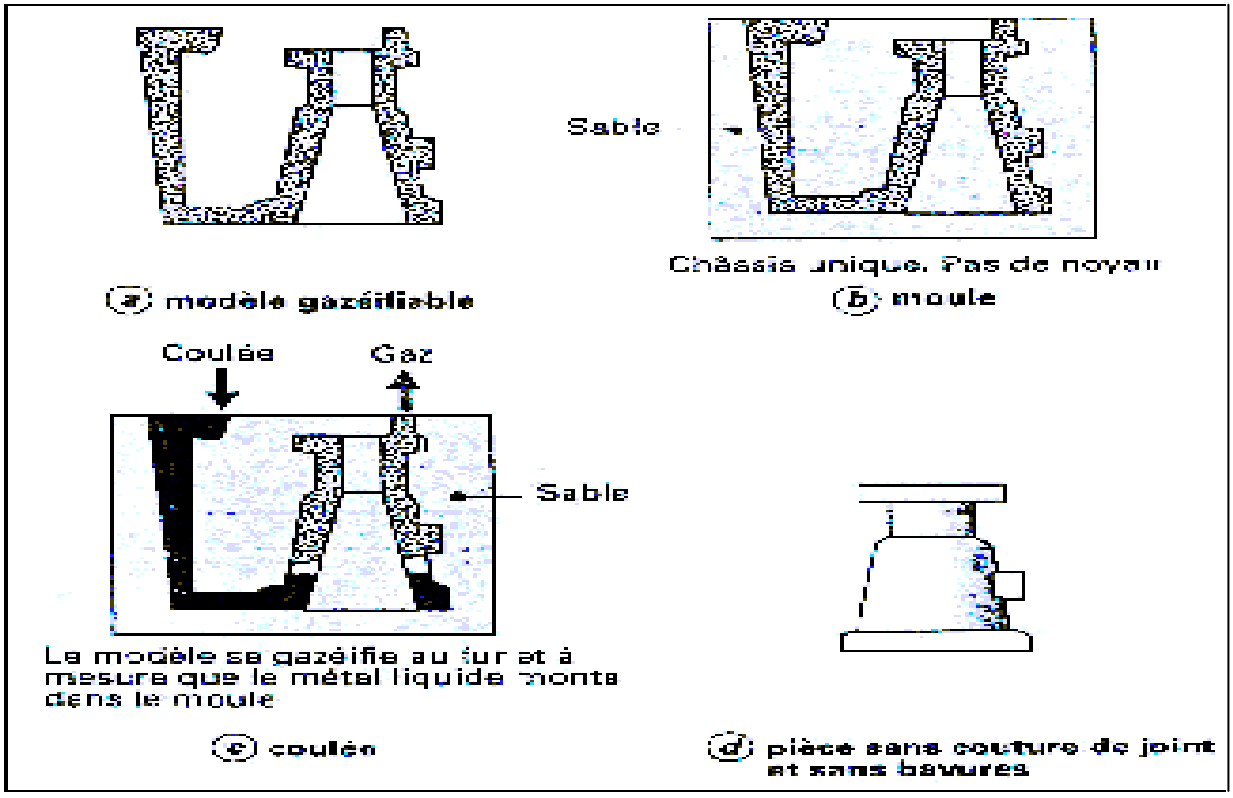
La congélation de l'eau est obtenue par injection d'azote ou de C02 liquides sur les surfaces de L'empreinte après démoulage. La cohésion du mélange initial étant peu élevée, le démoulage est relativement délicat et la précision dimensionnelle n'est pas très bonne. Pour toutes ces raisons, ce procédé est limité à des moulages de formes simples, de faible masse et de relief peu prononcé.

L'utilisation de modèles en tous matériaux est possible ainsi que la coulée de tous alliages, ferreux et non ferreux, en série.

I.4. 3 Moulage avec modèles perdus :

I.4. 3.1 Moulage en polystyrène expansé :

Ce procédé, appelé aussi moulage à modèle perdu, moulage à modèle gazéifiable ou lost foam (figure6).



Figure(I.6): Moulage au polystyrène expansé

Le principe de ce procédé consiste à fabriquer un modèle en polystyrène expansé, noyé ensuite dans le sable de moulage. À la coulée, le métal liquide vaporise le modèle et remplit peu à peu l'empreinte, d'où le nom de procédé avec modèle gazéifiable. Utilisé au départ pour la fabrication des grosses pièces unitaires (outils d'emboutissage par exemple), il s'est ensuite développé plus progressivement dans le domaine des pièces de grandes séries, tant en aluminium qu'en fonte et en acier, pour lesquelles de très nombreuses installations sont maintenant en production industrielle.

I.4. 3.1.1 Moulage avec modèles en polystyrène pour grosses pièces unitaires :

- **Avantage :**

Les pièces coulées peuvent être de grande taille (50 tonnes), en fonte, acier, alliages non ferreux. Ce procédé convient particulièrement bien pour la fabrication des grosses pièces unitaires ou de très petites séries.

Il faut noter que la disparition des modèles simplifie les problèmes posés par leur stockage (magasins à modèles, manutention, etc.). L'apparition des sables autodurcissants a également contribué de façon importante à son développement.

I.4. 3.1.2 Moulage avec modèles en polystyrène pour pièces de série :

Il en diffère pourtant en de nombreux points :

- Les modèles en polystyrène sont injectés et sont pour la plupart montés en grappes
- L'enduisage est obligatoire
- La coulée se fait toujours à moule plein

Le matériau de moulage, du sable siliceux sec, est versé dans des bacs, autour des modèles, et compacté par vibrations mécaniques.

- **Avantages :**

- Précision des pièces
- Masselottage considérablement réduit, grâce à la rigidité du moule;
- Réduction des prix de revient, due à la suppression du noyautage, à la simplification des opérations de moulage, de décochage et d'ébarbage et à la diminution de la mise au mille
- Investissements modérés
- Amélioration de l'environnement; les fonderies sont moins bruyantes et moins polluantes

- **Inconvénient :**

- Une mise au point assez longue (au moment du lancement d'une nouvelle pièce)
- Des difficultés pour le collage et des risques de déformation des modèles

I.4.4 Moulage à la cire perdue, dit aussi moulage de précision :

Les modèles sont réalisés en matières fusibles (cire, urée, polystyrène...), assemblés en

grappes, recouverts de couches réfractaires et éliminés ensuite par dissolution ou par voie thermique.

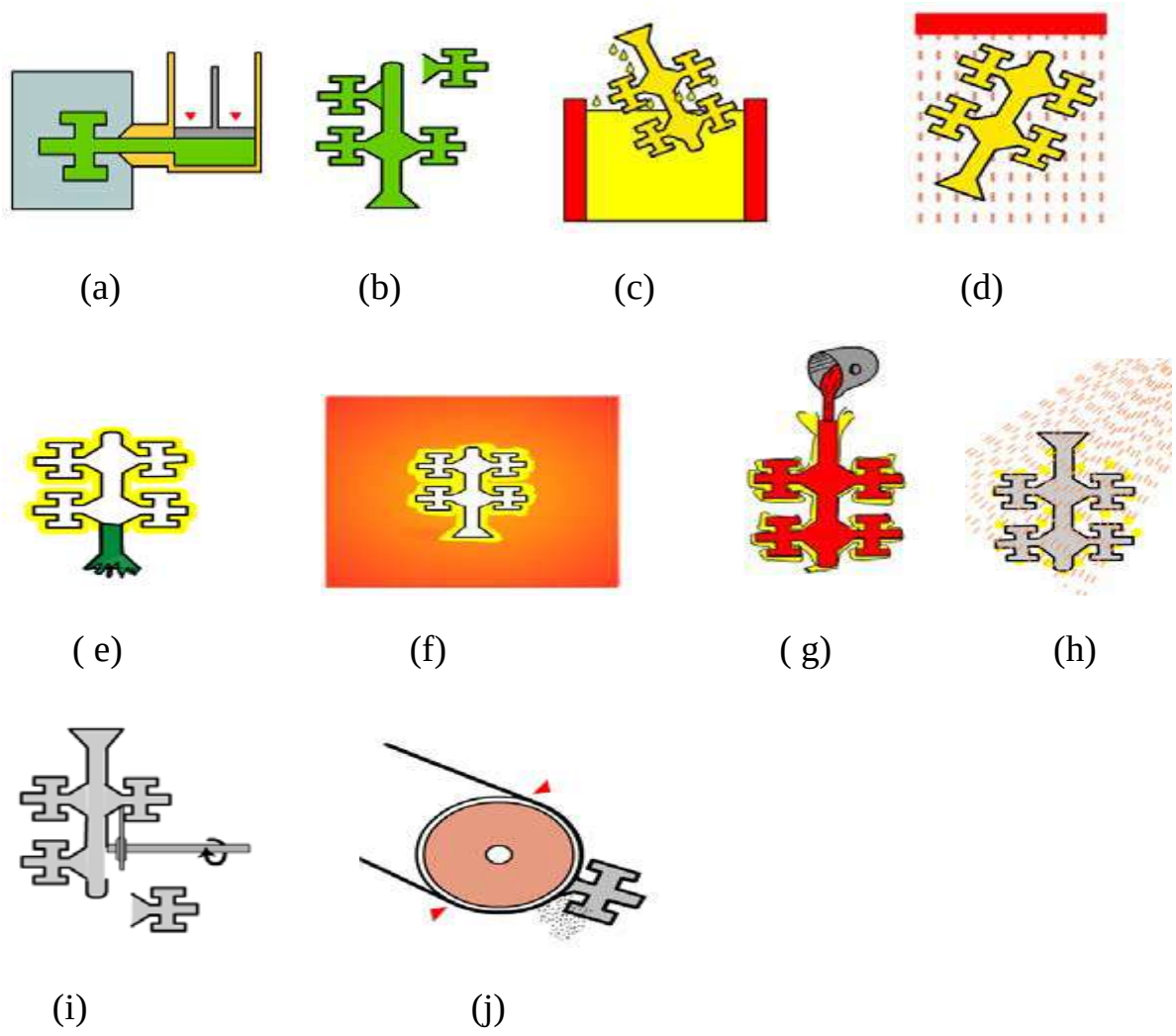
- **Avantages**

-II permet la coulée de tous les alliages non ferreux et ferreux.

-II permet également une très grande liberté de conception des pièces

-Sa souplesse d'application permet la coulée de toutes sortes de pièces, allant de moins de 1 g à plus de 100 kg et de plus d'un mètre de long.

-Les états de surface sont excellents, les précisions dimensionnelles très bonnes.



Figure(I.7): Principales étapes du procédé de moulage à la cire perdue

I.4. 5 Moulage en moules métallique :[3]

Dans les procédés de moulage au sable étudiés précédemment, les moules et les noyaux Doivent être refaits après chaque coulée, ce qui pose de nombreux problèmes et nécessite des

Installations importantes pour la production des moules neufs et de nombreuses manutentions. On s'est efforcé de réaliser des moules ou des éléments de moules capables de supporter plusieurs coulées successives, appelés moules permanents ou coquilles.

I.4.5.1 Caractéristiques générales :

- Rigidité de l'empreinte
- Grande précision dimensionnelle
- Excellent état de surface des éléments moulants
- Conductivité thermique élevée des empreintes qui donnent aux pièces moulées
- Un meilleur état de surface
- Des caractéristiques mécaniques plus élevées de l'alliage coulé, conséquence d'une vitesse de refroidissement et de solidification plus élevée, donnant un grain plus fin et une matière plus compacte; mais des contraintes résiduelles à l'état brut peuvent nécessiter un traitement thermique de détente des pièces surtout pour les métaux ferreux
- Une plus grande précision des dimensions des pièces avec la possibilité de faire venir, bruts de fonderie, des trous de fixation et de permettre une réduction appréciable des surépaisseurs d'usinage

II faut noter que, pour certaines fabrications, le noyautage au sable reste obligatoire

.

I.4.5. 2 Différents procédés de moulage en coquille :

Ces procédés sont classés et différenciés suivant le mode de mise en oeuvre du métal liquide:

- Moulage en coquille par gravité : la coulée se fait par gravité, directement dans le godet de coulée de la coquille
- Moulage en coquille basse pression : le métal est injecté dans l'empreinte grâce à 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 à 150 MPa) ou forgeage liquide
- Moulage en coquille centrifugée : il est utilisé principalement pour la fabrication de pièces cylindriques creuses

I.4.5.2.1 Moulage en coquille par gravité :[2]

On coule directement le métal liquide à l'aide d'une louche ou d'une petite poche de coulée dans l'empreinte d'un moule métallique qui peut comporter ou non des noyaux métalliques ou en sable suivant les pièces à fabriquer et leur complexité.

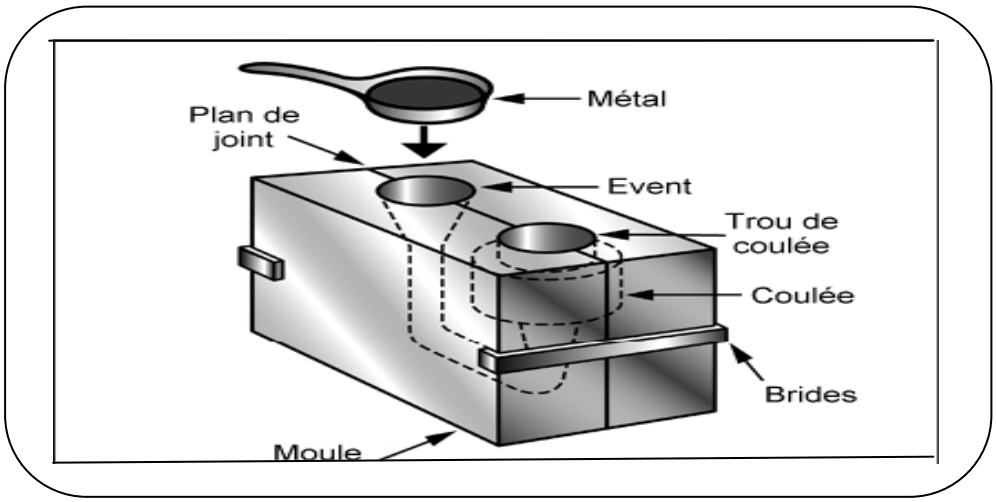
➢ Avantage :

Un tel procédé fournit des pièces propres, de beaux aspects, lisses, étanches et compacts, aux cotes très proches des dimensions finales. La précision des pièces est améliorée par rapport à celle des moulages au sable, d'où économie de matière, usinage réduit, tolérances des cotes plus serrées facilitant l'usinage sur machines-outils automatiques. Les pièces peuvent présenter des formes extérieures compliquées. Le refroidissement rapide leur donne une structure plus fine du métal donc à de meilleures caractéristiques mécaniques.

➢ Inconvénients :

Par contre, il faut noter que ce procédé nécessite l'emploi de masselottes nombreuses et importantes, parfois difficiles à positionner dans le moule.

Le temps de solidification des masselottes est long et le coût de transformation du métal liquide est assez élevé. Les outillages sont chers. II faut également noter que les installations de coulée en coquille par gravité sont nettement moins polluantes que les installations de moulage au sable.



Figure(I.8): le Moulage en coquille par gravité[5]

I.4.5.2.2 Moulage sous pression :

Dans ce procédé le métal liquide est injecté dans le moule de la machine à:mouler sous pression (30-100MPA). Ce procédé permet d'obtenir des pièces ayant une configuration très compliquée avec des dimensions très précises, ce qui permet de supprimer partiellement ou totalement l'opération d'usinage.

A cause des coûts très élevés des moules, le moulage sous pression est rentable seulement pour des productions en série Donc les machines à mouler sous pression permettent de réaliser de très grandes séries et avec des cadences de production extrêmement rapides (1000 pièces de faible volume/heure) et sont destinés surtout pour les alliages à base de Plomb, Zinc, Aluminium, Magnésium, Cuivre etc.…

Les machines quelque soit le type comprennent toujours un dispositif de fermeture et d'ouverture du moule avec serrage énergique au moment de l'injection du métal sous pression. Le moule comprend deux blocs (chape), l'un fixé sur le bâti de la machine et sur lequel l'empreinte doit être minimum et l'autre est monté sur le chariot mobile de la machine à mouler et comportant la majeure partie de l'empreinte, ainsi que les éjecteurs qui éjectent la pièce moulée.

La chape B est solidaire de bâti de la machine, l'autre chape A est montée sur un chariot qui assure la fermeture et l'ouverture du moule. Lorsque le moule est fermé, le piston P2 est au niveau inférieur du trou de coulée et le piston Pi est en position haute. Le métal versé dans le cylindre et ensuite pressé par le piston Pi emplit le moule jusque dans ses moindres détails. Après refroidissement, le piston P2 monte et sectionne le talon de coulée, le chariot recule entraîne avec lui la pièce hors de la chape B et le porte broches la détache.

Le moulage sous pression peut se faire sans dépouille et il assure une précision d'un dixième de mm évitant tout usinage pour certaines pièces d'automobile, d'appareils ménager ou électriques, d'horlogerie, de jouets

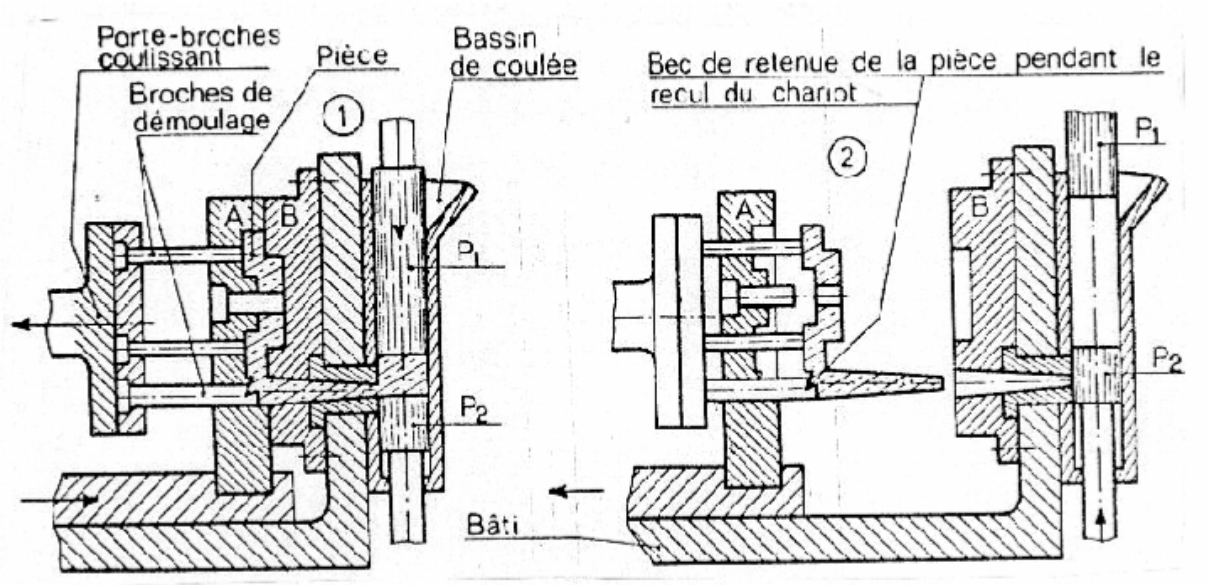


Fig. (I.9): Une coupe de moulage sous pression [6]

Pour résister aux fortes pressions de moulage, les moules sont façonnées dans des aciers spéciaux, pour maintenir la température du moule constante, ces derniers sont refroidit ou chauffés.

Il est possible d'insérer dans le moule avant chaque coulée des éléments métalliques afin :

- D'assurer une plus grande résistance, dureté ou autres propriétés (axe en acier, bague en bronze etc..).
- De réaliser des conduites qui ne peuvent pas être noyautées (tube).
- D'assurer un assemblage qui serait plus difficile et coûteux par d'autres moyens.

Le poteyage de l'empreinte du moule est nécessaire afin d'éviter le collage des pièces et faciliter le démoulage. L'application du produit de poteyage est effectuée sur les parties de l'empreinte la où il y a risque d'étamage (broche, points chauds etc..) on évitera ainsi le dépôt de poteyage qui serait du à une application massive et ponctuelle. La composition du produit de poteyage est variable peut être d'un mélange de plomb, d'eau, silicate de soude etc.

I.4.5.2.2.1 Principe de fonctionnement :

La chape solidaire du bâti de la machine est la chape fixée sur le chariot mobile assurant la fermeture et l'ouverture du moule forment principalement le moule de coulée.

Après la mise en place du noyau s'il y a lieu et lorsque le moule est fermé, le métal liquide est versé manuellement à l'aide d'une louche ou automatiquement dans l'orifice de

coulée. Ensuite commence le mouvement d'injection qui se compose de 3 phases réglables et dépendantes l'une de l'autre.

1ere Phase : Approche lente du piston de conduite du métal vers 1('empreinte du moule.

2eme Phase : Mouvement à grande vitesse du deuxième piston pour injection, ou remplissage du moule.

3eme Phase : Pression de maintien (après remplissage du moule, elle agit sur le métal encore liquide en donnant une densité plus élevée à la pièce coulée).

Après refroidissement le piston revient dans sa position initiale et suivi par l'ouverture du moule, qui s'effectue par déplacement du chariot avec la chape mobile, ce dernier entraînera avec la pièce refroidit hors du moule fixe et le détachement de la pièce s'effectuera par éjection. Tout le cycle de l'opération s'effectue automatiquement. Les paramètres essentiels pouvant exercés une influence sur la qualité des pièces coulées sous pression sont :

- Température de coulée du métal liquide.
- Température du moule.
- Volume du dosage.
- Pression d'injection.
- Durée du cycle d'injection.
- Réglage de la machine.

I.4.5.2. 3 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.

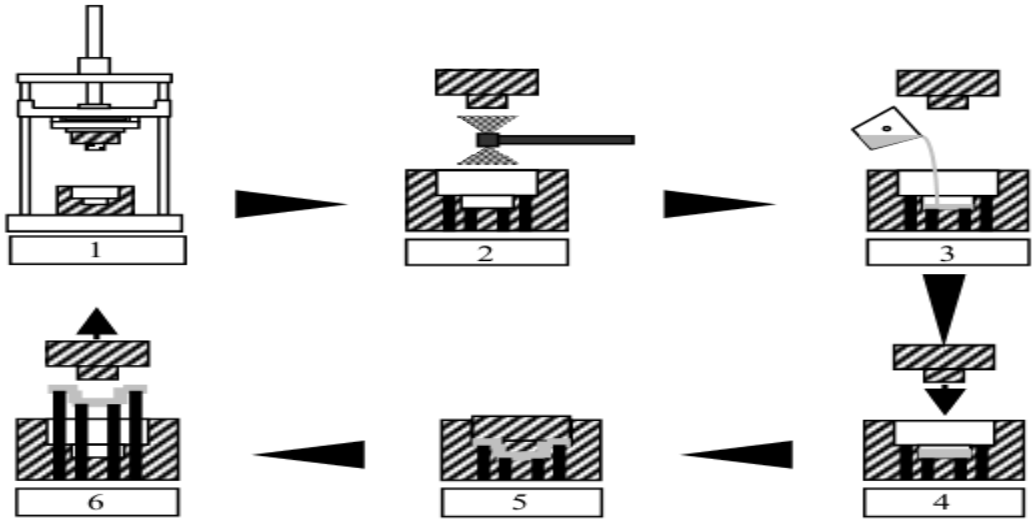


Figure (I.10) : Moulage par forgeage liquide

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.5 Procèdes spéciaux:[4]

Nous avons classé dans ce paragraphe un certain nombre de procédés de moulage spéciaux faisant appel à des techniques originales qui permettent d'améliorer les performances des pièces moulées ou de fabriquer certaines pièces ou produits particuliers :

- Le moulage avec refroidisseurs
- Le moulage par centrifugation
- Le moulage de pièces bimétalliques

I.5.1 Moulage avec refroidisseurs :

Les refroidisseurs sont des masses métalliques, de dimensions réduites, dont le rôle est decréer 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.5.2 Moulage par centrifugation :

Utilisé dans la presque totalité des cas pour fabriquer des corps creux cylindriques sans noyau, le moulage par centrifugation consiste à couler le métal liquide dans un moule animé d'un mouvement de rotation autour de son axe principal. Les masses liquides sont soumises à une force centrifuge F =($m*w^2$) R tendant à les éloigner de l'axe de rotation et à les plaquer contre les parois du moule (w vitesse de rotation angulaire, R rayon, m masse).

Les moules peuvent être en sable ou en coquille métallique, montés sur des machines à axe horizontal, vertical (figure 11) ou oblique.

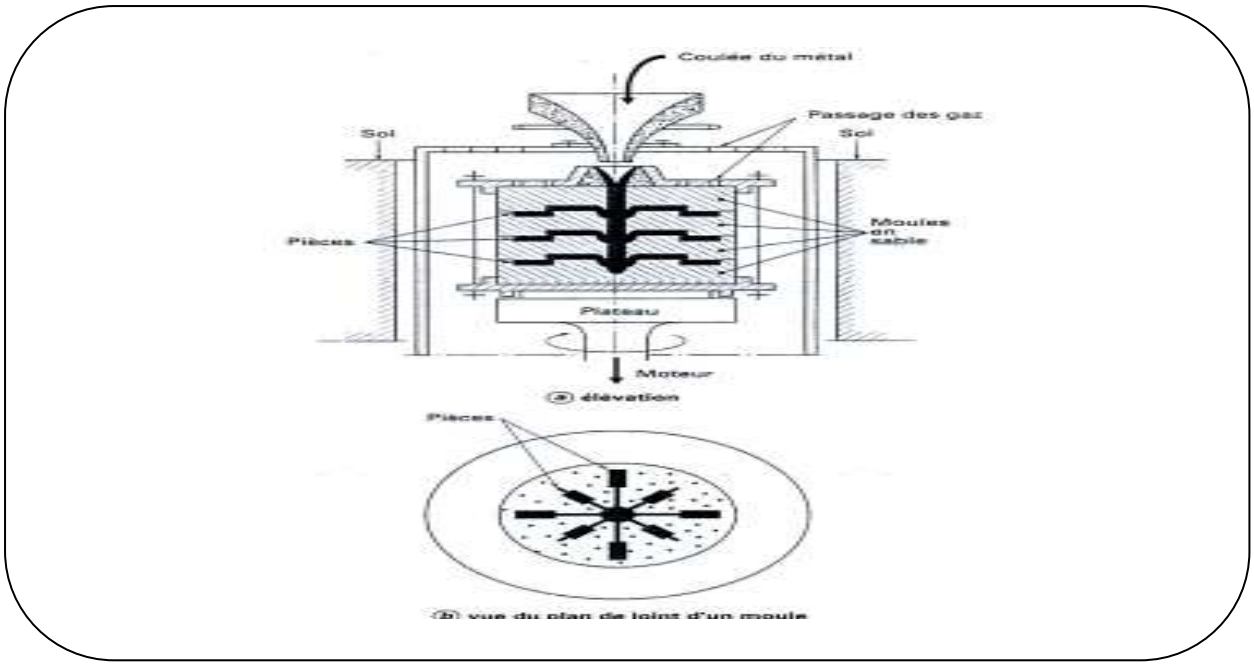


Figure (I.11): Machine de coulée sous pression centrifuge à axe vertical

Les pièces obtenues par centrifugation possèdent de très bonnes qualités physiques et Mécaniques. La force centrifuge exercée pendant toute la solidification de l'alliage permet de limiter les retassures et d'obtenir un alliage à structure plus fine, plus compacte et plus homogène que dans la coulée par gravité.

Ce procédé permet une diminution de la mise au mille par la suppression presque systématique des dispositifs de remplissage et d'alimentation.

La centrifugation permet également de réaliser, dans un même moule, des pièces en alliages composites centrifugés en couches successives. La couche précédente solidifiée sert alors de moule pour la suivante (bimétal, multimétaux) et chaque alliage est alors employé spécifiquement en fonction de ses propriétés.

➢ Avantages

La centrifugation est un procédé très répandu pour la fabrication des corps creux cylindriques, et également (mais beaucoup plus rarement) pour la fabrication de petites pièces diverses.

- Accroissement de la propreté inclusionnaire du métal par l'épuration physique sous l'effet de la force centrifuge pendant la solidification
- Métal plus compact, diminution de certains défauts (soufflures, inclusions)
- Structure plus fine et meilleures propriétés mécaniques de l'alliage
- Obtention d'une bonne précision dans les formes, réduction de l'ébarbage et de l'usinage des pièces
- Mise au mille faible (rendement métallique de 90 à 95 % au lieu de 50 à 55 % en coulée statique)
- Très grande productivité des installations que l'on peut assez facilement automatiser

➢ Inconvénients

Toutefois, grâce à tous ces avantages spécifiques, à la qualité des pièces produites, et malgré des coûts d'outillages plus élevés, la centrifugation reste, sans doute, le meilleur moyen de production pour des pièces un peu spéciales en bronze ou en aciers spéciaux pour diverses industries (extraction pétrolière, hydraulique, construction navale, nucléaire, sidérurgie, etc.). II est à noter que le procédé offre moins d'intérêt pour les alliages à faible masse volumique, la vitesse de rotation du moule étant obligatoirement très élevée.

I.5.3 Moulage de pièces bimétalliques :

Les pièces bimétalliques s'obtiennent en coulant successivement deux alliages différents pour obtenir, en finale, une seule pièce à deux composants. Après coulée du premier alliage, on doit attendre sa solidification pour couler le second et obtenir ainsi la pièce finale. Grâce à la présence des deux alliages, on peut fabriquer des pièces ayant des caractéristiques différentes suivant l'endroit considéré.

- **Avantages**

- Il n'est plus nécessaire de fondre une quantité de métal largement supérieure à la masse de la pièce brute

- Il n'y a pas de mélange entre les deux métaux qui sont donc rigoureusement indépendants, le métal secondaire est homogène et l'analyse du coeur et des tourillons correspond à l'analyse de la coulée

- La zone de liaison, qui présente souvent des caractéristiques mécaniques médiocres, est réduite à une épaisseur d'environ 1 à 3 mm, ce qui garantit une liaison parfaite entre les deux métaux

I .6 Défauts de moulage :[4]

La diminution ou l'élimination des défauts des pièces moulées est une question économique importante. Une solution rapide peut aider à augmenter la qualité des pièces moulées et diminuer le pourcentage de rébus

Les défauts de fonderie sont classés selon leurs aspects et leurs formes d'apparition. Chaque défaut peut entraîner une diminution de la qualité, c'est l'étendu du défaut et la destination d'utilisation de la pièce qui décident, si cette dernière est considérée comme rébus ou non. Beaucoup de défauts peuvent être éliminés par un traitement ultérieur

- Dans cette partie nous allons traiter les types de défauts rencontrés le plus souvent.

I .6.1 Défauts affectant la surface :

Ce sont des défauts non souhaités tels que saillies, bavures, épaissement qui sont visibles à l'œil nu et se différencie suivant leur forme et leur cause de formation.

Ils n'affectent généralement pas la qualité de la pièce, mais exigent des opérations supplémentaires d'usinage.

Ce sont le plus souvent les bavures, épaisse ment, saillie etc..leur formation s'effectue le plus souvent dans le plan de joint du moule, noyau (figure suivant) :

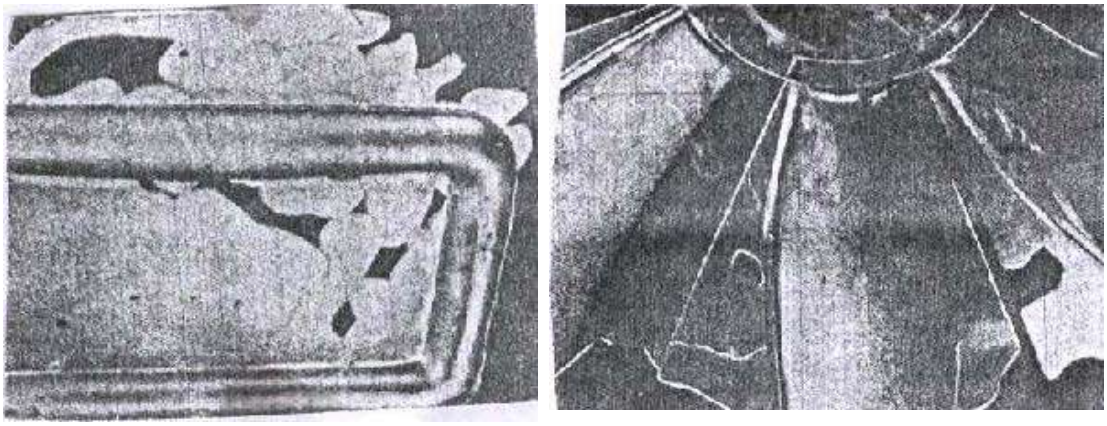


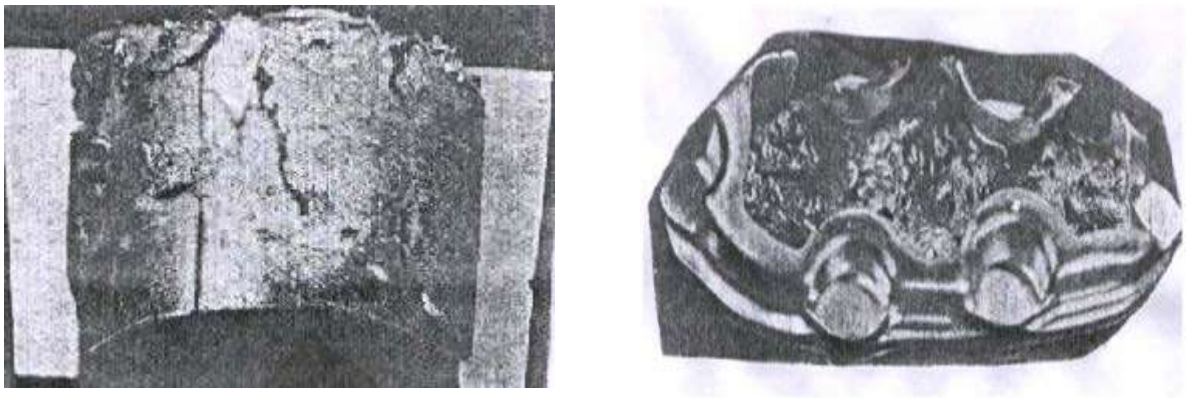
Figure (I.12) : Les défauts de surface

Et aussi à cause du décollement (détachement) dans le moule ou fissuration du sable de moulage ou sable de noyau figures suivant :

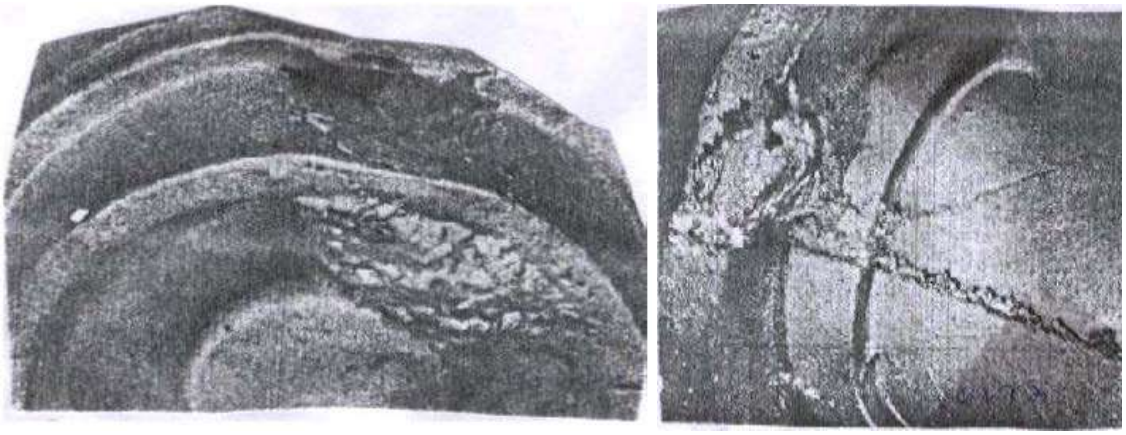


Figure (I.13) : Les défauts de détachement dans le moule

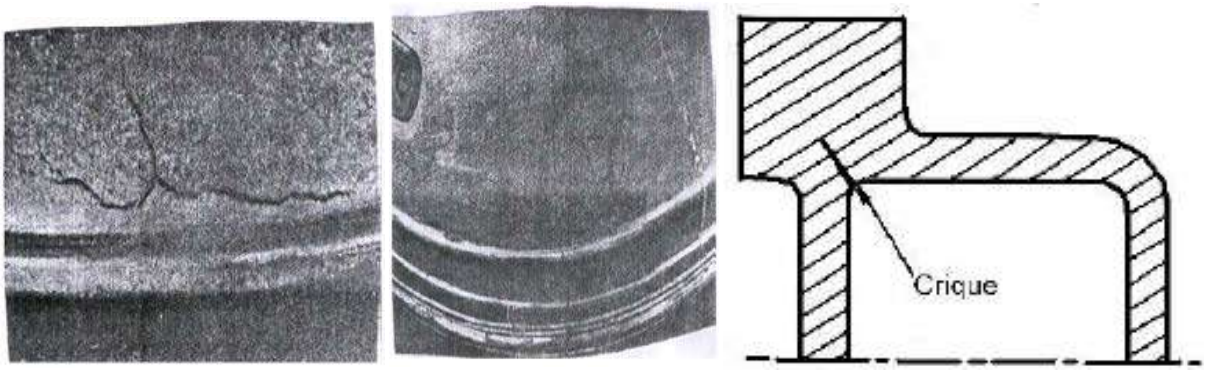
- Ou encore à des arrachements de sable



- Ecrasement du moule et du noyau :



Les criques, fêlures et ruptures sont dues aux tensions internes provenant des retraits de refroidissement et apparaissent souvent après une longue période d'utilisation et à la suite de chocs comme le montrent les figures suivant:

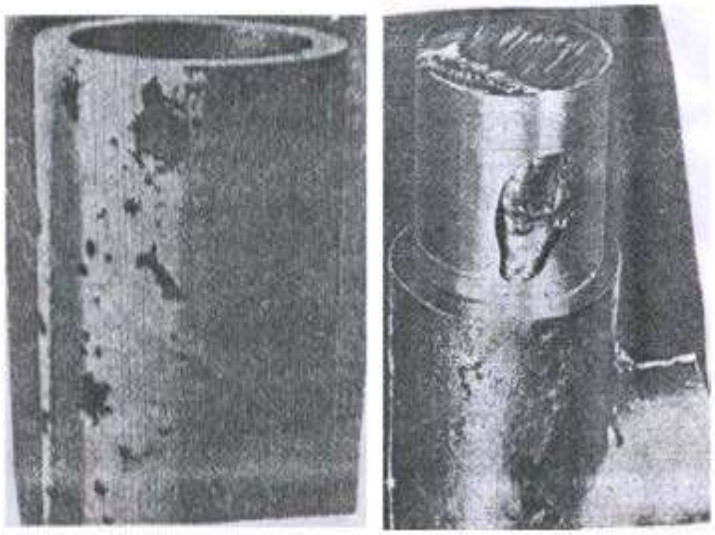


- D'autres types de défauts pouvant exister sur les pièces moulées :
  - Rugosité superficielle.
  - Différence de forme et de dimension.
  - Pièce moulée incomplète.
- Un autre type de défaut est celui des brûlures du sable apparaissant lors de la coulée à haute température. Ce type de défaut n'est pas rencontré dans les alliages d'aluminium (figure suivent).

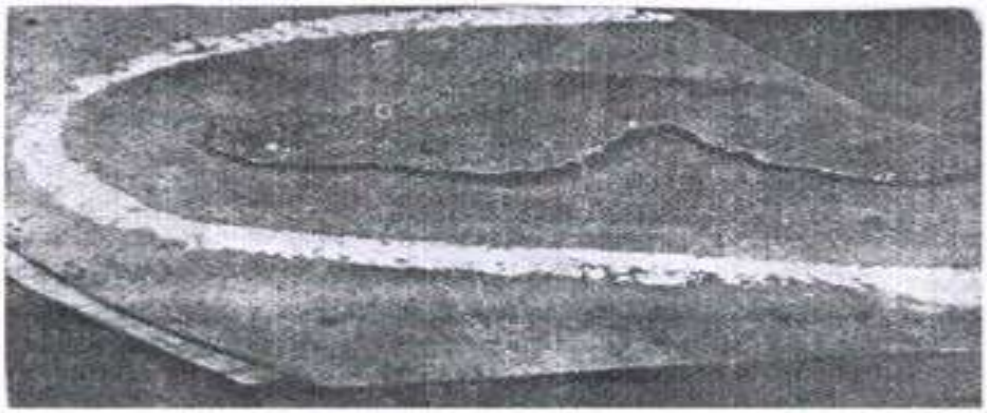
I .6.2 Défauts affectant la masse (volume) :

Ils ne sont pas tous perceptibles à l'œil nu, mais leur présence influe sur les propriétés mécaniques des pièces. Parmi ces défauts, on distingue

I.6.2.1. Les inclusions d'air :



I.6.2.2. Les soufflures :

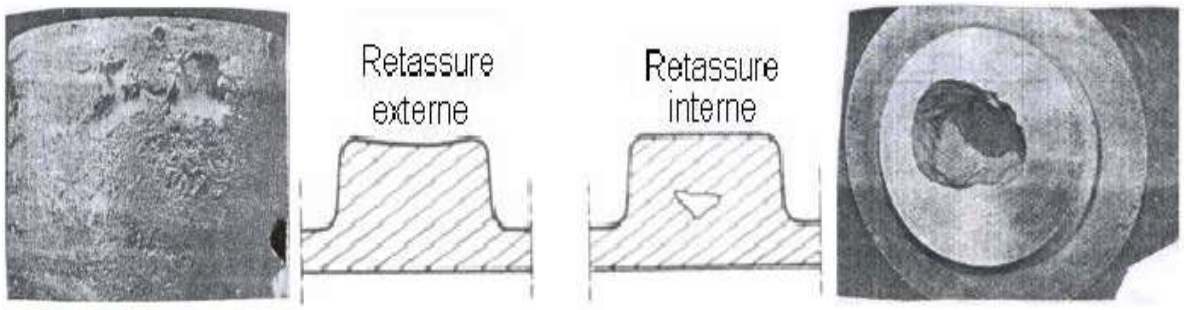


Les gaz dissous dans le métal liquide provoquant des creux et le plus souvent à cause d'une serre du sable de moulage localement trop prononcée. Des exemples de soufflures sont donnés sur les figures suivantes :



I.6.2.3.Les retassures :

Presque tous les métaux et alliages présentent à de basses températures une grande densité qu'aux hautes températures, ce qui conduit à une contraction du volume (défaut) lors du refroidissement, c'est à dire, les parois minces se refroidissent en premier et les masses adjacentes se creusent. Ce retrait du métal est appelé retassure. Les exemples sont donnés dans les figures suivantes :



I.6.2.4.Mal venus :

On appelle « mal venue » toute solution de continuité dans une pièce moulée. Ce défaut est dû à un remplissage incomplet du moule par le métal liquide.

Les causes peuvent être les suivantes :

- métal trop froid;
- mauvaise coulabilité du métal;
- interruption de la coulée;
- coulée trop lente;
- métal oxydé;

- système d'alimentation défectueux;
- manque de tirage d'air du moule;
- 2moule trop froid;
- épaisseurs de pièce trop faibles.

I.6 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. Aussi nous avons traité les défauts rencontrés le plus souvent en moulage.

La diminution ou l'élimination des défauts des pièces moulées est une question économique importante.

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 lesphénomènes physiques comme les écoulements de fluides, est généralement écritesous 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 :

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

ou dans une notation plus compacte :

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

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

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

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 le produisent. 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 :

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

Suivant OY :

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} + w\frac{\partial v}{\partial z}\right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\right) + (\rho - \rho_0) g_x \text{ .} \qquad \text{(II.5)}$$

Suivant OZ :

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

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

$$\tau_{yx} = \tau_{xy} = \mu\left[\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x}\right] ; \tau_{yz} = \tau_{zy} = \mu\left[\frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y}\right] ; \tau_{xz} = \tau_{zx} = \mu\left[\frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x}\right] .$$

$$\tau_{xx} = \mu\left[2\frac{\partial u}{\partial x}\right]; \tau_{yy} = \mu\left[2\frac{\partial v}{\partial y}\right]; \tau_{zz} = \mu\left[2\frac{\partial w}{\partial z}\right] . \qquad \text{(II.7)}$$

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 :

$$\rho c_p \frac{DT}{Dt} = \rho c_p U.\nabla T + div(\lambda\ grad T) + \emptyset \quad \text{(II.8)}$$

ou :

$$\emptyset = \tau_{xx}\frac{\partial u}{\partial x} + \tau_{yx}\frac{\partial u}{\partial y} + \tau_{zx}\frac{\partial u}{\partial z} + \tau_{xy}\frac{\partial v}{\partial x} + \tau_{yy}\frac{\partial v}{\partial y} + \tau_{zy}\frac{\partial v}{\partial z} + \tau_{xz}\frac{\partial w}{\partial x} + \tau_{yz}\frac{\partial w}{\partial y} + \tau_{zz}\frac{\partial w}{\partial z} \quad \text{(II.9)}$$

Avec :

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

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

$div(\lambda\ grad T)$:La variation d'énergie par conduction.

$\emptyset$:La dissipation irréversible due au frottement visqueux.

II.3.Modélisation numérique d'écoulements à surface libre :

Les écoulements à surface libre fortement déformable concernent des domaines d'activités aussi variés que le déferlement d'une vague, l'atomisation d'un jet ou la confection de revêtement par dépôt et solidification. La caractérisation de tels phénomènes est difficile à mener expérimentalement car les échelles spatiotemporelles mises en jeu sont souvent difficiles à atteindre. La mise en œuvre par simulation numérique directe d'un modèle d'écoulement à surface libre apparaît donc comme une solution intéressante.

La résolution numérique des équations de Navier-Stokes incompressibles dansleur formulation eulérienne diphasique non-miscible nécessite le repérage del'interface entre les différents fluides en présence. Beaucoup de méthodes ont été employées pour trouver l'allure de la surface libre et peuvent être classifiées dans deux grandes classes :

II.3.1.Méthodes à maillage mobile :

Dans les méthodes à maillage mobile ou à suivi d'interface (interface-tracking méthodes) le maillage est réajusté chaque fois que la surface libre est déplacée. Ces méthodes sont conceptuellement les plus intuitives puisqu'elles consistent à utiliser un maillage qui épouse la forme des interfaces. Comme la forme des inclusions évolue au cours du temps, le maillage change lui aussi. Avec une telle discrétisation, l'ensemble des conditions de saut aux interfaces peuvent être imposées naturellement et en respectant exactement la géométrie des surfaces. Ces méthodes sont donc très précises. Elles ont néanmoins l'inconvénient d'être difficiles à mettre en œuvre. Dans les méthodes explicites, qui doivent employer de petits pas de temps, ces méthodes sont souvent ignorées.

II.3.2.Méthodes à maillage fixe :

Le calcul est exécuté sur un maillage fixe, qui se prolonge au delà de la surface. Dans le cas des méthodes à maillage fixe, seul un maillage eulérien discrétise l'ensemble du domaine physique considéré. Les équations d'évolution des fluides et celles des interfaces sont résolues sur ce maillage fixe.

La forme de la surface libre est déterminée par les cellules qui sont partiellement remplies. Ceci est réalisé soit par le suivie des particules de masse négligé (massless) introduites dans la phase liquide près de la surface libre au début (Marker and Cell ou MAC, décrite par Harlow et Welch 1965), ou bien en résolvant une équation de transport pour la fraction liquide (volume of fluide ou VOF, décrite par Hirt et Nichols en 1981). Nous avons utilisé pour notre part une variante de la méthode VOF, basée sur une résolution mathématique de l'équation de transport de la fraction volumique.

II.4. Modélisation thermique :

II.4.1. Introduction :

Le transfert d'énergie se produit chaque fois qu'un gradient de température existe à l'intérieur d'un système, ou lorsque deux systèmes de températures différentes sont mis encontact. Le processus par lequel le transfert de l'énergie s'effectue est désigné par le termegénérale de ' transmission de la chaleur' la grandeur transférée appelée chaleur, ne peut êtreni mesurée ni observée directement, mais ses effets donnent lieu à des observations et

desmesures. L'écoulement de la chaleur comme la production de travail phénomène quiimplique la variation de l'énergie interne.

II.4.2. Différentes modes de transfert de chaleur :

Le transfert de chaleur peut être défini comme la transmission de l'énergie d'une région à une autre sous l'influence d'une différence de température. Cet écoulement de chaleur est régi non seulement par une relation unique, mais plutôt par une combinaison de différentes lois physiques indépendantes. Les ouvrages traitant du transfert de chaleur introduisant généralement trois modes de transmission de chaleur :

- La conduction
- Le rayonnement
- La convection

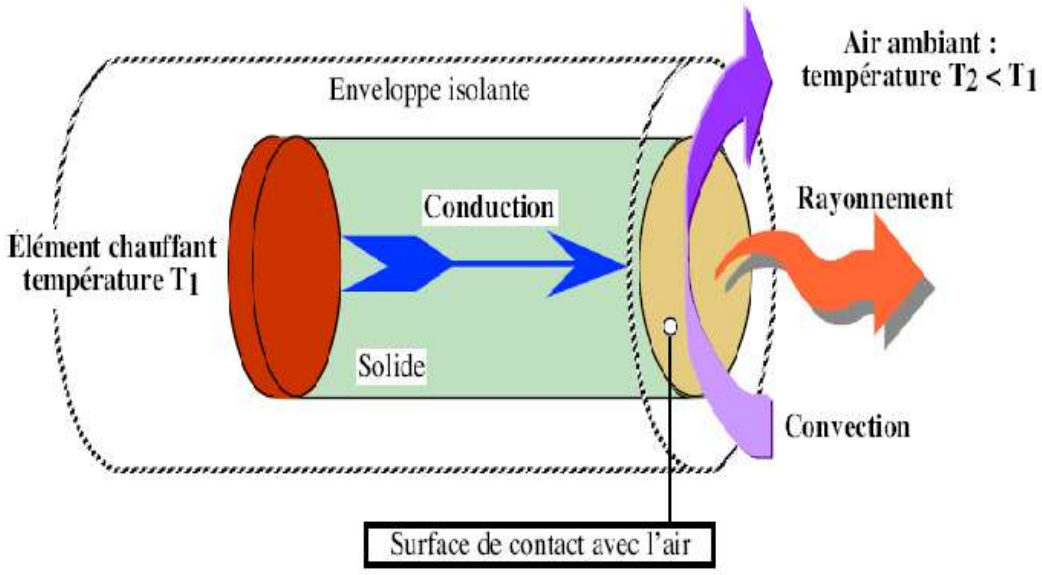


Fig. (II-1): Différent mode de transfert thermique [9]

II.4.2.1. Transfert de chaleur par conduction :

La conduction est définie comme étant le mode de transfert de chaleur provoqué par la différence de température entre deux régions d'un milieu solide, liquide ou gazeux. L'effet macroscopique observable est une égalisation des températures du système. Cependant si certaines zones sont maintenues à température constante par apport de chaleur (réservoir de

chaleur) ou évacuation de chaleur (puits de chaleur), il s'établit un transfert continu de la chaleur de la région chaude vers la région froide.

II.4.2.1.1. Cas des gaz :

En un point M(x, y, z) du volume d'un gaz, la température T(x, y, z) est associée à l'énergie des molécules du gaz se trouvant à proximité de ce point. Les molécules d'un gaz sont animées d'un mouvement de translation aléatoire, d'un mouvement de vibration et de rotation interne. L'ensemble de ces mouvements forme le phénomène d'agitation thermique, au quel est associée une énergie proportionnelle à la température. Lors des collisions, les molécules voisines interagissent entre elles et s'échangent de l'énergie des molécules les plus énergétiques vers les molécules les moins énergétiques. Il s'effectue alors un transfert de chaleur. On parle de diffusion d'énergie.

II.4.2.1.2. Cas des liquides :

L'origine du transfert de chaleur est identique à celui des gaz. Néanmoins, les molécules sont plus proches et donc, les interactions sont plus fortes et fréquentes.

II.4.2.1.3. Cas des solides :

Dans ce cas, la conduction est attribuée à un transfert d'énergie sous la forme de vibrations du réseau cristallin [9]

II.4.2.1.4. Loi de Fourier :

Fourier apparente la conduction de chaleur à l'écoulement d'un fluide qui a lieu desrégions chaudes vers les régions froides et dont les seules manifestations dans la matière setraduisent par des variations de températures (effet macroscopique). Les dilatations desdispositifs seront négligées.

Considérons un milieu cylindrique homogène de section S et de longueur L (fig. II. 2), les deux faces du cylindre sont maintenues respectivement à la température T_2 (sourcechaude) etT_1. (Source froide). Il se produit un transfert d'énergie orienté de la source chaudevers la source froide.

Le milieu étant homogène, en régime permanent, la température se répartit de manière uniforme [9]

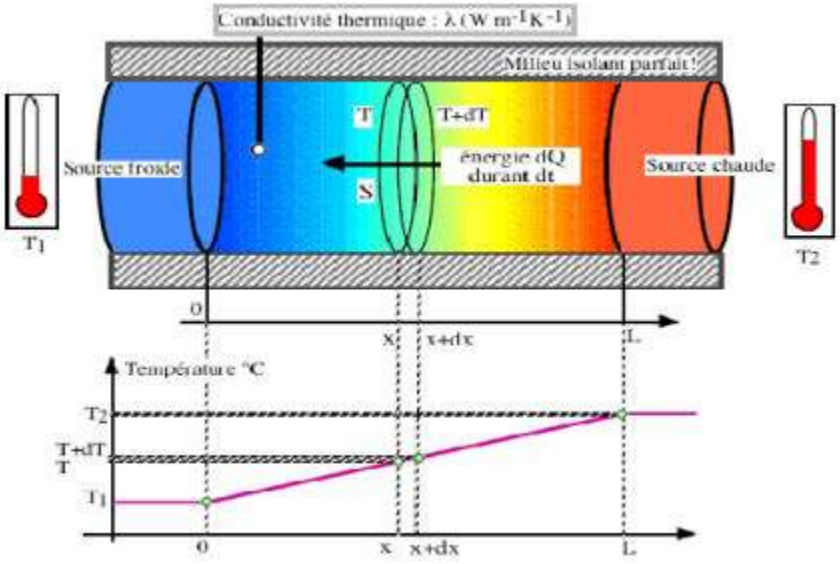


Fig. (II-2) : Conductivité thermique [9]

En régime permanent, la loi de Fourier exprime la quantité de chaleur élémentaire dQ qui traverse en x une surface S d'épaisseur dx durant le temps dt

$$dQ = -\lambda A \frac{dT}{dx} dt \text{(II.10)}$$

dQ : Énergie élémentaire en Joule

λ: Conductivité thermique du matériau en W.m^{-1}.K^{-1}.

A :Section en m^2

dt :Temps élémentaire en s

$\frac{dT}{dx}$: Gradient de température en x en K.m^2

II.4.2.2. Transfert de chaleur par convection :

Le transfert de chaleur par convection apparaît entre deux phases dont l'une au moinsest mobile, en présence d'une différence de température. Le mouvement des phases peut êtreprovoqué par une dégradation d'énergie mécanique, le transfert de chaleur est dit deconvection forcée. Le mouvement peut être provoqué par l'existence même du transfert

dechaleur par suite de l'apparition dans le milieu d'une différence de masse volumique, letransfert de chaleur est dit de convection naturelle ou libre [9]

La convection naturelle apparaît spontanément, elle se produit dans un fluide au seindu quel existe un gradient de température. C'est le cas dans une pièce où l'air chaud produitau niveau du sol va monter au plafond tandis que l'air froid va descendre. Le mouvement estdû au fait que l'air chaud est moins dense que l'air froid et monte donc sous l'effet d'uneforce d'Archimède. Autre exemple : mouvement de l'eau dans une casserole chauffée par uneplaque électrique.

La convection forcée se produit quand le mouvement du fluide est imposé par uneintervention extérieure, par exemple une pompe ou un ventilateur (cas des radiateurs devoiture, des montages électroniques refroidis ou chauffés par ventilateur, etc.).

II.4.2.3. Transfert de chaleur par rayonnement :

On entend par rayonnement thermique, l'émission d'énergie susceptible de setransmettre dans le vide, il s'agit du rayonnement électromagnétique. Dans la pratique, lerayonnement s'effectue en présence d'un gaz, c'est la raison pour laquelle le rayonnement estrarement le seul type d'échange thermique mis en jeu : la convection et la conduction sontégalement présentes. Cependant aux hautes températures, le rayonnement prend uneimportance prépondérante.

Le rayonnement des corps est dû à des transitions énergétiques par exemple des états de vibrations quantifiées de la chaîne d'atomes. Lorsque l'état du système passe d'un niveau énergétique E au niveau E+dE, il y a émission d'un photon de fréquence ν. tel que hν.= dEavec h = 6.6 10-34 js^{-1}la constante de Plank. Par exemple un rayonnement infrarouge ayant une longueur d'onde de 1µm correspond à une fréquence ν.= c/λ.= 3.1014 Hz et possède une énergie de dE = hν.= 1.10^{-19} J soit 1.23 eV.

Si un corps rayonne, il émet donc de l'énergie et sa température doit baisser.Cependant dans la pratique un corps n'est jamais isolé. Il est en équilibre avec le milieu quil'entoure et par conséquent il reçoit lui-même de l'énergie et sa température atteint unéquilibre. Le rayonnement émis est alors une caractéristique de cette température. C'est parexemple le cas

de la Terre et du soleil. Le soleil réchauffe la terre par rayonnement (λ = 400nm) et la terre remet un rayonnement de manière à assurer une température de l'ordre de300K.

On peut exprimer le phénomène global du rayonnement de la façon suivante.Considérons en figure II.3 un mur de surface S dont les deux faces sont respectivementmaintenues aux températures T1 et Ts. (T1 >Ts). Ce mur est donc soumis à un phénomène deconduction. On suppose que seule la surface située à droite échange de la chaleur parrayonnement avec le milieu ambiant à la température Ta [9]

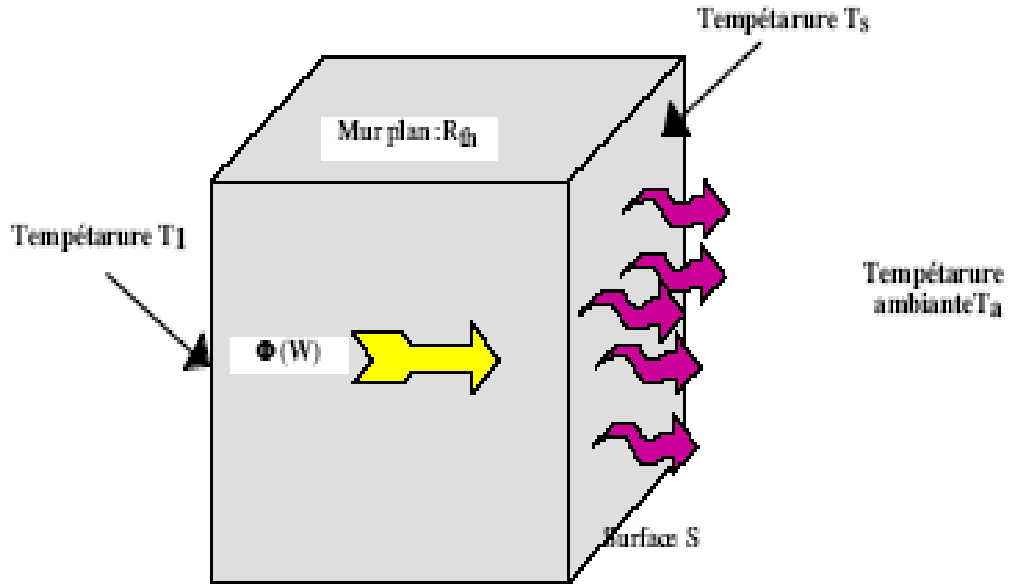


Fig. (II-3) : Le transfert thermique par rayonnement [9]

D'après la loi de Stéphan, le flux de chaleur échangé entre la surface S et le milieu ambiant peut S'écrire :

$$\varphi(w) = \varepsilon.\sigma.A(T_s^4 - T_a^4) \text{(II.11)}$$

σ :Constante de Stephan Boltzmann 5,67 x 10^{-8}W.$m^{-2}.K^{-4}$

A :Surface d'échange (m^2)

ε : coefficient d'émission de la surface (ε= 1 pour un corpe noir,ε<<1 corps brillant)

T_s :Température de surface du corps

T_a :Température ambiante.

II.5. Les conditions aux limites :

Les conditions aux limites (CL) peuvent avoir plusieurs formes. Elles traduisent les transferts entre les différentes parties du corps et son milieu environnant. Usuellement, on distingue quatre types de conditions :

II.5.1. Condition de Dirichlet :

Qui fixent la température T_s à la surface des corps (ou sur une partie de la surface) à chaque instant :

$$T_s = T(x_s, y_s, z_s) \text{(II.12)}$$

Ou x_s, y_s, z_s décrivent la surface.

Ce type de conditions facilite beaucoup les calculs. Cependant, elles sont assezéloignées de la réalité physique car il est très difficile d'imposé une température sur unesurface. Ceci n'est possible que dans le cas d'un contact parfait avec un autrecorps isotherme à température maintenue constant. On utilise quand même ce type de CL pour la conduction dans un corps en contact avec un fluide très turbulent [7]

II.5.2. Condition de Neumann :

Qui spécifient la connaissance du flux surfacique dans chaque point de la surface du corps étudié et à chaque instant :

$$\varphi_s = Q(x_s, y_s, z_s, t) \text{(II.13)}$$

Dans le cas le plus simple du régime stationnaire, le flux surfacique reste constant et donc :φ_s =Q_s =cst

La condition de ce type permet de tenir compte d'un flux surfacique absorbé par rayonnement à la surface d'un corps (par exemple les objets métalliques chauffés à de hautes températures dans des fours, le rayonnement solaire absorbé par des corps solides [7]

II.5.3. Condition de Robin-Fourier :

Ces conditions donnent la température environnante du corps Te et la loi qui décrit letransfert thermique entre le corps et sont environnement. Ce type de transfert qui a lieu à lasurface du corps est très complexe, étant donné le grand nombre de variables qui sontimpliquées. La loi de newton établit la relation entre la densité de flux thermique transféré à lasurface du corps, de température Tc, vers son milieu environnant de température Te(Te<Tc) :

$$\varphi = h\,(T_c - T_e)[W/m^2] \text{(II.15)}$$

Où hest un facteur de proportionnalité appelé coefficient de transfert thermique [7]

II.6. Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre la prévision numérique d'écoulement turbulentde fluide incompressible en régime variable et les différentes mode de transfert thermique quiinflue sur le mole avec la méthode de volume de fluide (VOF) qui est une méthode deconstruction d'interface. L'équation qui gère cet écoulement n'est pas résolueanalytiquement donc on fait appel aux méthodes numériques. Ce qui est l'objectif du chapitresuivant.

Chapitre III
Solution numérique

III. 1. Introduction :

Au chapitre II, les équations de base régissant les phénomènes d'écoulement de fluide, et de Transfert de chaleur ont été établis. On savait que pour certains cas d'écoulements simples une Solution analytique exacte est possible. Pour le cas général des écoulements turbulents, le systèmed'équations de Navier-Stokes ne peut être résolu directement vu la non-linéarité des équations etl'apparition des contraintes de Reynolds. Des différentes méthodes numériques ont été utilisées pourla résolution analytique des équations différentielles partielles qui régissent ce type d'écoulement.Parmi les méthodes on cite, la méthode des différences finies, la méthode des éléments finis et laméthode des volumes finis.

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

Dans ce chapitre, en se basant sur la méthode des éléments finis. Cette dernière seraappliquée à la résolution de notre problème thermique par notre simulateur ANSYS.

III.2. Le calcul numérique (modélisation et simulation) :

Le modèle mathématique constitué par une équation différentielle aux dérivées partielles(EDP) est transformé, à l'aide d'une méthode de discrétisation dans un système algébrique.L'algorithme de résolution numérique implique la méthode d'intégration temporelle et dedécouplage, comme par exemple, les algorithmes SIMPLE, SEMPLER, SIMPLEC et PISO Leprincipe du calcul numérique est illustré à la figure suivant :[10]

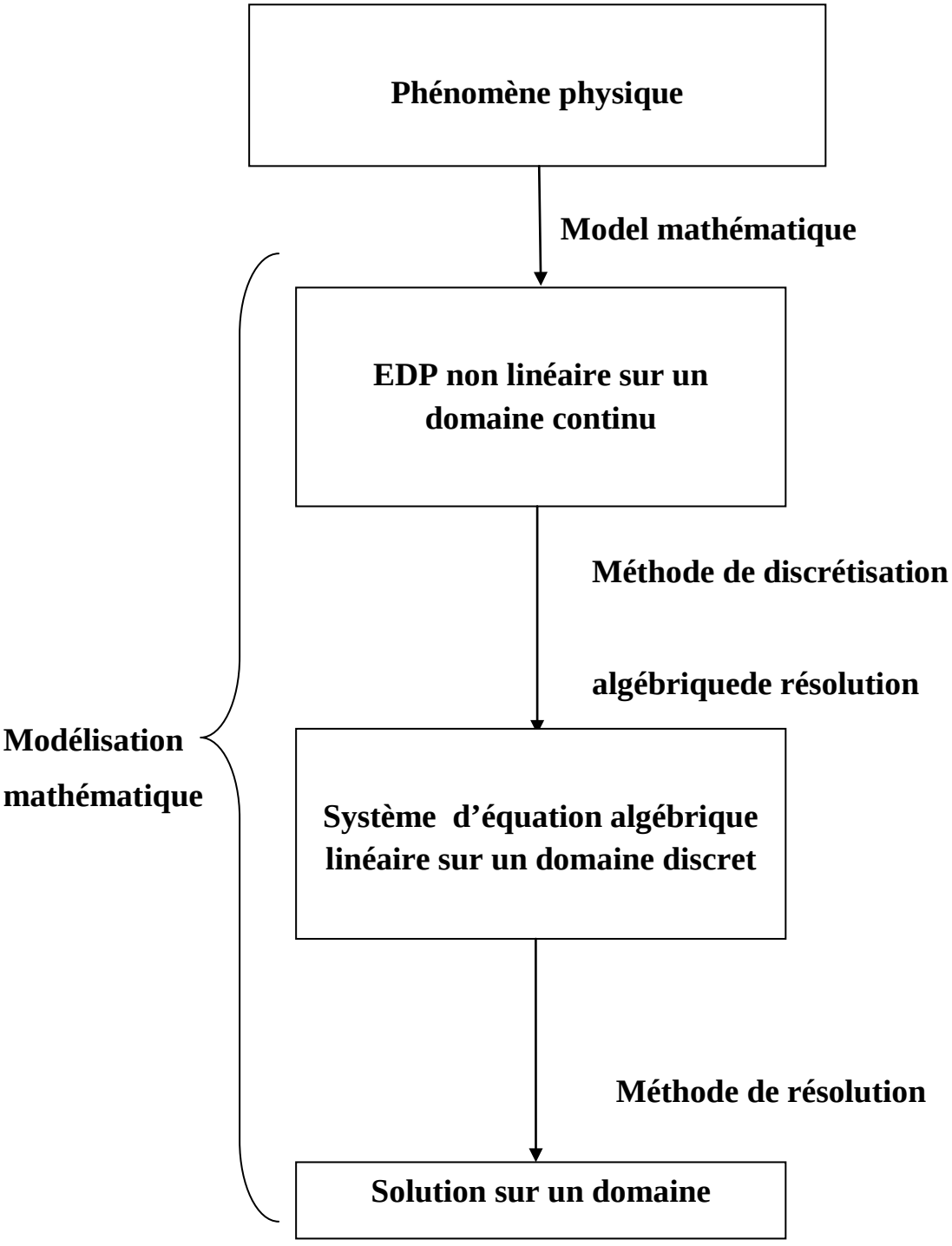


Figure (III.1) le principe de calcule numérique

III .3.Discrétisation des équations différentielles:

Toutes les méthodes numériques présupposent la discrétisation du domaine géométrique afinde passer d'un problème continu à une infinité d'inconnues à un problème discret ne comptantqu'un nombre fini d'inconnues.Après avoir sélectionné les équations différentielles à résoudre, il est nécessaire detransformer ces équations différentielles en équations algébriques ou les variations continues desvariables de l'écoulement sont représentées par des valeurs à des ponts discrets dans le temps et dansl'espace. Les locations discrètes dans l'espace sont représentées par des points nodaux (ou noeuds)choisis dans une grille numérique qui subdivise le domaine de l'écoulement. Selon la nature etla géométrie de l'écoulement la grille numérique peut appartenir d'une des familles degrilles suivantes :[11]

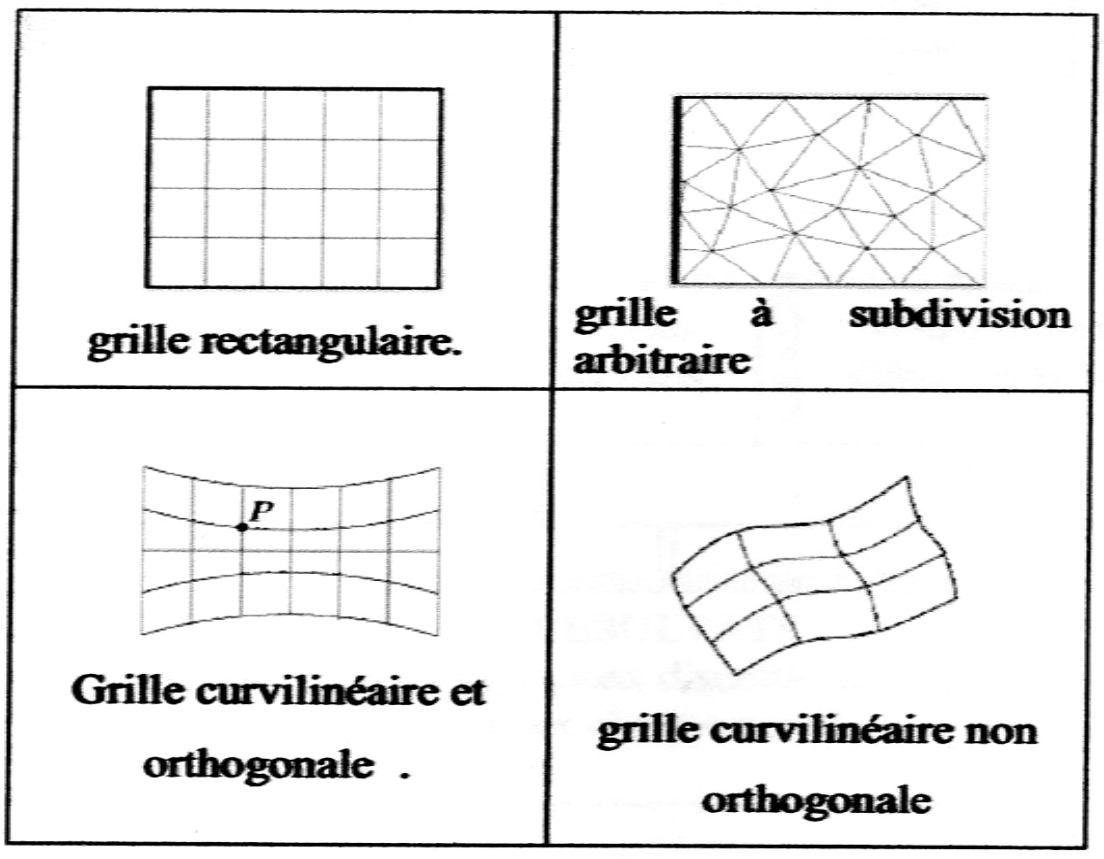


Figure (III.2) : les types de grilles numériquement

Le choix d'une structure de grille détermine la flexibilité géométrique de la procédurenumérique à utiliser et doit être fait selon la méthode de discrétisation choisie.

III.3.1. méthodes de discrétisation :

La discrétisation se fait en suivant des trois méthodes :

- ✓ Méthode des déférences finies
- ✓ Méthode des volumes finis
- ✓ Méthode des éléments finis

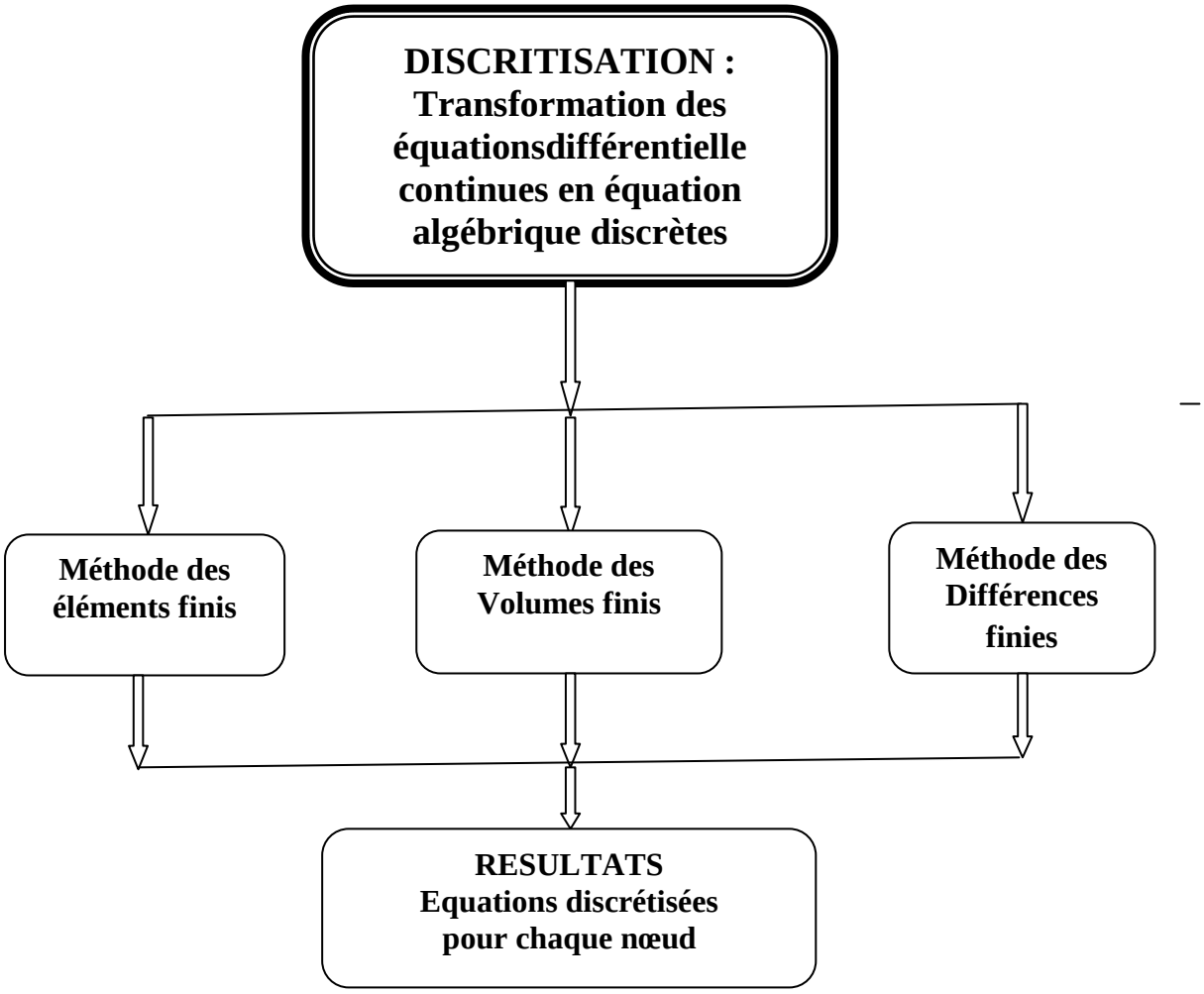


Figure (III.3) méthode de discrétisations [11]

La méthode numérique comporte trois pas distincts :

• L'approximation de la variable inconnue par différents types de fonctions simples;

• Discrétisation par la substitution de l'approximation dans les équationsdifférentielles et l'obtention d'un système d'équations algébriques ;

• Résolution du système d'équations algébriques.La principale différence entre les quatre méthodes numériques consiste dansle type d'approximation de la variable inconnue et dans le processus de discrétisation.[12]

Examinons rapidement les avantages et les inconvénients de chacune de ces méthodes.

III.3.1.1 Méthode des différences finies :

La méthode des différences finies consiste à remplacer les dérivées apparaissant dans leproblème continu par des différences divisées *ou* combinaisons de valeurs ponctuelles de lafonction en un nombre fini de points discrets on noeuds 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.[12]

III.3.1.2 Méthode des volumes finis :

Le principe de cette méthode est de subdiviser le domaine de calcul en un nombre de volume de contrôle juxtaposés. Chacun de ces derniers englobe un "noeud principal".[10]

La méthode des volumes finis intègre, sur des volumes élémentaires de forme simple, leséquations écrites sous forme de loi de conservation. Elle fournit ainsi de manière naturelle desapproximations discrètes conservatives et est donc particulièrement bien adaptée aux équations dela mécanique des fluides : équation de conservation de la masse, équation de conservation de laquantité de mouvement, équation de conservation de l'énergie.

Sa mise en oeuvre est simple si les volumes élémentaires sont des rectangles (ou desparallélépipèdes rectangles en dimension 3).[12]

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 oeuvre relativement facile ;
- Applicable aux géométries complexes ;
- Temps de calcul et stockage mémoire raisonnable (matrice de type bande) [10]

Inconvénients :

- Moins précis que les méthodes spectrales.
- on dispose de peu de résultats théoriques de convergence.[10]

I1I.3.1.3 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) dansun espace de dimension infinie. La solution approchée est dans ce cas une fonction déterminéepar un nombre fini de paramètres comme, par exemple, ses valeurs en certains points (les nœuds dumaillage).[12]

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 dechaleur par cette dernière.

III.4.Calcul d’interfaces :

Les techniques de calcul d’interfaces peuvent être très différentes enfonction du problème à résoudre, et se divisent généralement en deux principales familles enfonction de maillage (figure III.4) que l’on va utiliser : la méthode lagrangienne (sur maillagemobile) et la méthode eulérienne (sur maillage fixe).

III.4.1. maillage :

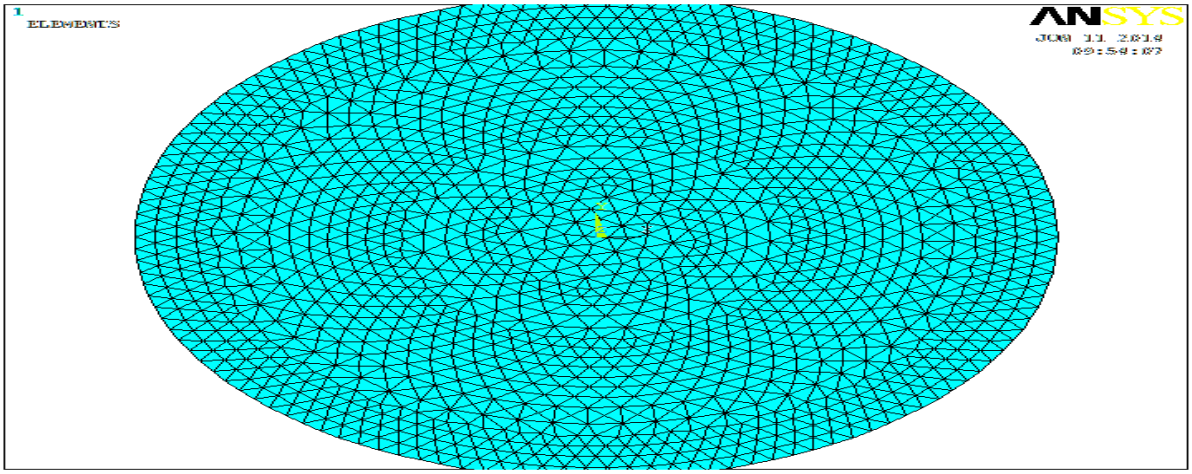


Figure III.4 : un exemple de maillage triangulaire

L'opération de maillage consiste à diviser le domaine O en sous-domaines appelés Mailles. H faut donc :

- Définir le domaine Ω
- Le diviser en mailles Ωi, telles que l'ensemble des Ωi soit une partition de Ω.[13]

D'habitude l'on choisit un maillage carré on triangulaire mais rien interdit de choisir desmaillages plus complexes. Il n'est pas non plus nécessaire que le maillage soit régulier et l'on atendance à resserrer le maillage près des endroits d'intérêts (par exemple aux endroits où l'on

Pense que la solution va beaucoup varier), cependant il faut veiller à avoir des élémentsfaiblement distordus (se rapprocher d'un polygone régulier). Plus ce maillage est resserré plus lasolution que l'on obtient par la méthode des éléments finis sera précise et proche de la « vraie »solution de l'équation aux dérivés partiels.[14]

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

III.4.1.1 les méthodes lagrangiennes :

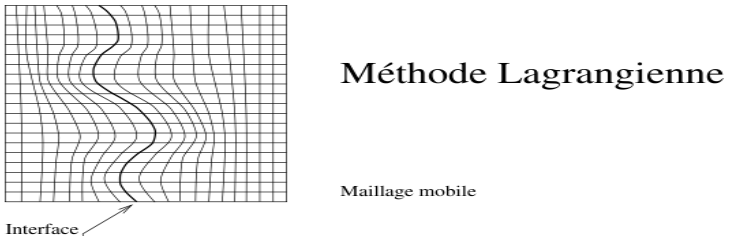
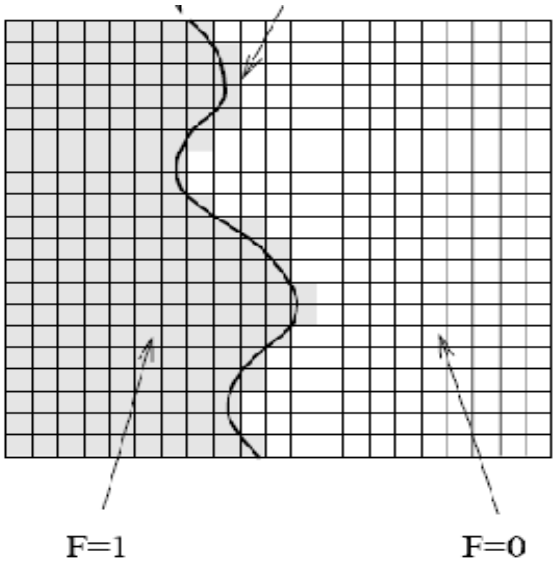


Figure III.5 : la méthode lagrangienne

Les méthodes lagrangiennes, sur maillage mobile permettent de représenter l'interface Comme une réelle discontinuité et de suivre son évolution de manière très précise. Letransport de l'interface s'effectue soit en déformant le maillage au cours du calcule soit enrégénérant 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 oul'interface ne subit pas de grandes déformations, car cela conduit a des maillages tropdéformés.

III.4.2.1. les méthodes eulérienne :



Méthode Eulérienne

Maillage fixe

Figure III.6 : la méthode eulérienne

III.5. Les méthodes de suivi de front :

Il existe différente méthode pour marquer l'interface :

- Marqueurs de surface
- Fonction de hauteur
- Méthode de ligne de niveau (level set)

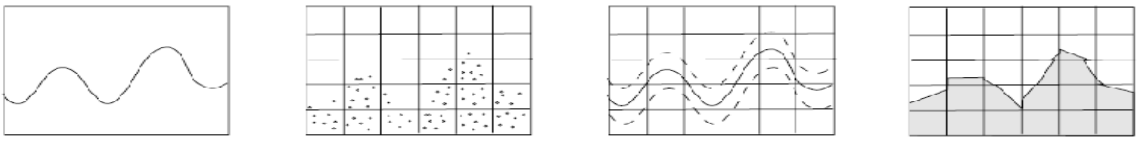


Figure III.7 : Différentes méthodes de suivi de front [15]

III.5.1. Les méthodes de suivi de volume :

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

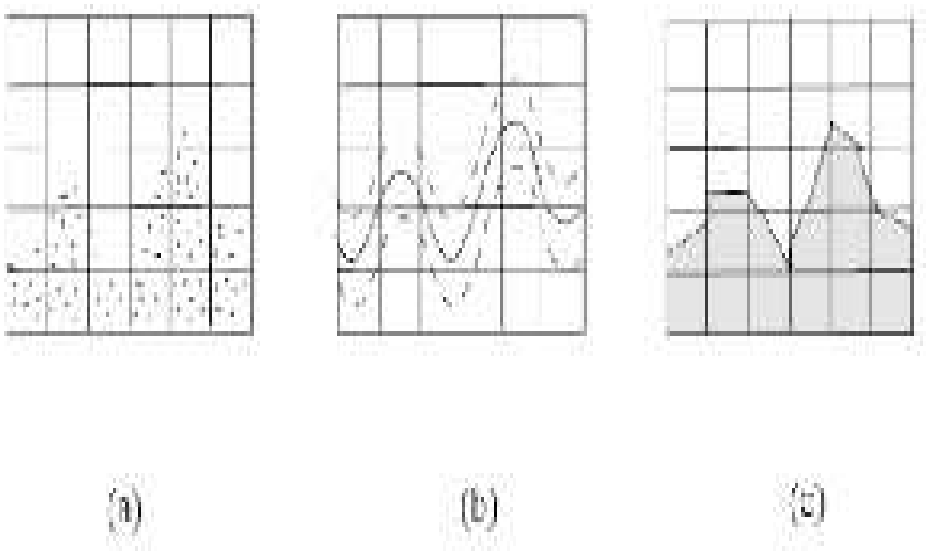


Figure III.8: Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque. [16.17]

a) Méthode de marqueur de volume

b) Schémas TVD

c) Méthode de volume de fluide (VOF)

Nous utilisons pour la méthode VOF (volume of fluid) une fonction scalaire dont lavaleur varie entre zéro et un pour repérer les deux fluides. Cette fonction scalaire représentele volume occupé par le fluide dans une cellule de calcul, donc une maille pleine de fluide àne valeur de un et une maille vide à une valeur zéro. Si la valeur de la fraction volumique estcomprise entre ces deux valeurs, cela indique la présence de l'interface et on connaitrairectement la proportion occupée par le fluide (figure III.9).

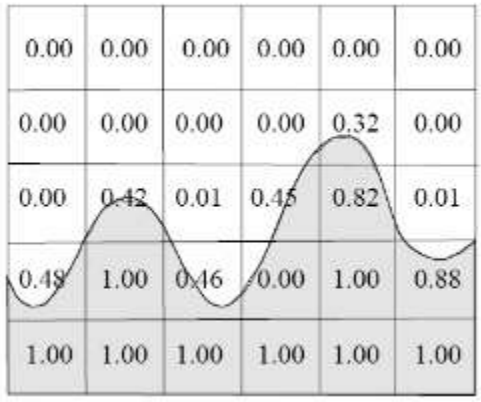


Figure III.9. Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret.[18]

III.6. Conclusion :

Ce chapitre présente un panorama au traitement numérique des problèmesthermiques. Tout d'abord les différentes méthodes de discrétisation ont été abordées.

Ensuite, nous avons donné brièvement une théorie sur les éléments finis. Celle-cicorrespond à la méthode utilisée par notre simulateur de référence (ANSYS),

En effet, il s'agissait uniquement d'exposer la démarche générale et les concepts quiseront nécessaires à la bonne compréhension des travaux ultérieurs (la simulationnumérique 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 (l'aluminium) 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 l'aluminium est évalué par un modèle CFD ,appliqué sur le code ANSYS/FLOTRAN ,il s'agit ici de réaliser un modèle en 2D d'une pièce pour traiter des problème en éléments finis de méthode volume de fluide (VOF).

IV.2. Description du domaine d'application :

La géométrie modélisée est représentée à la figure IV.1

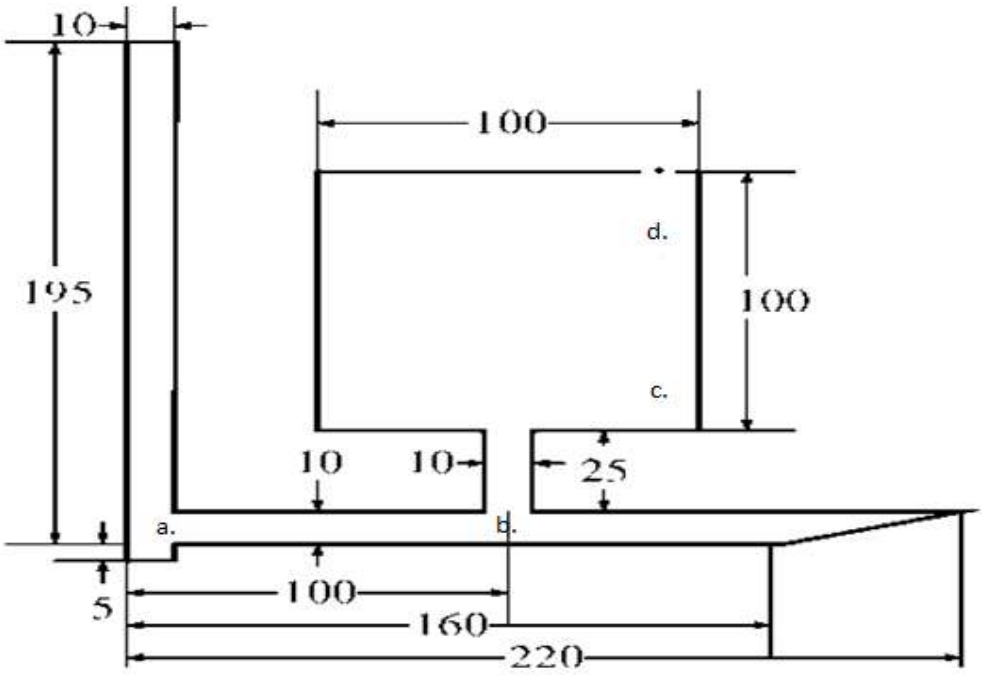


Fig. (IV.1) Géométries de moule et de la cavité

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, les conditions suivantes ont été considérées:

IV.3. Les conditions initiales :

La température initiale du métal liquide était de 900 k.

- La température de moulea été considérée égale à celle de l'environnement.
- La vitesse varie
- La vitesse du liquide a été fixée à zéro sur les parois du moule.
- 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 :

- L'algorithme de VOF a été employé pour le remplissage de moule.
- Le temps total pour le remplissage de moule est de 2.6s avec un pas de temps de 0.01s.
- La solution en 2D a été considérée.

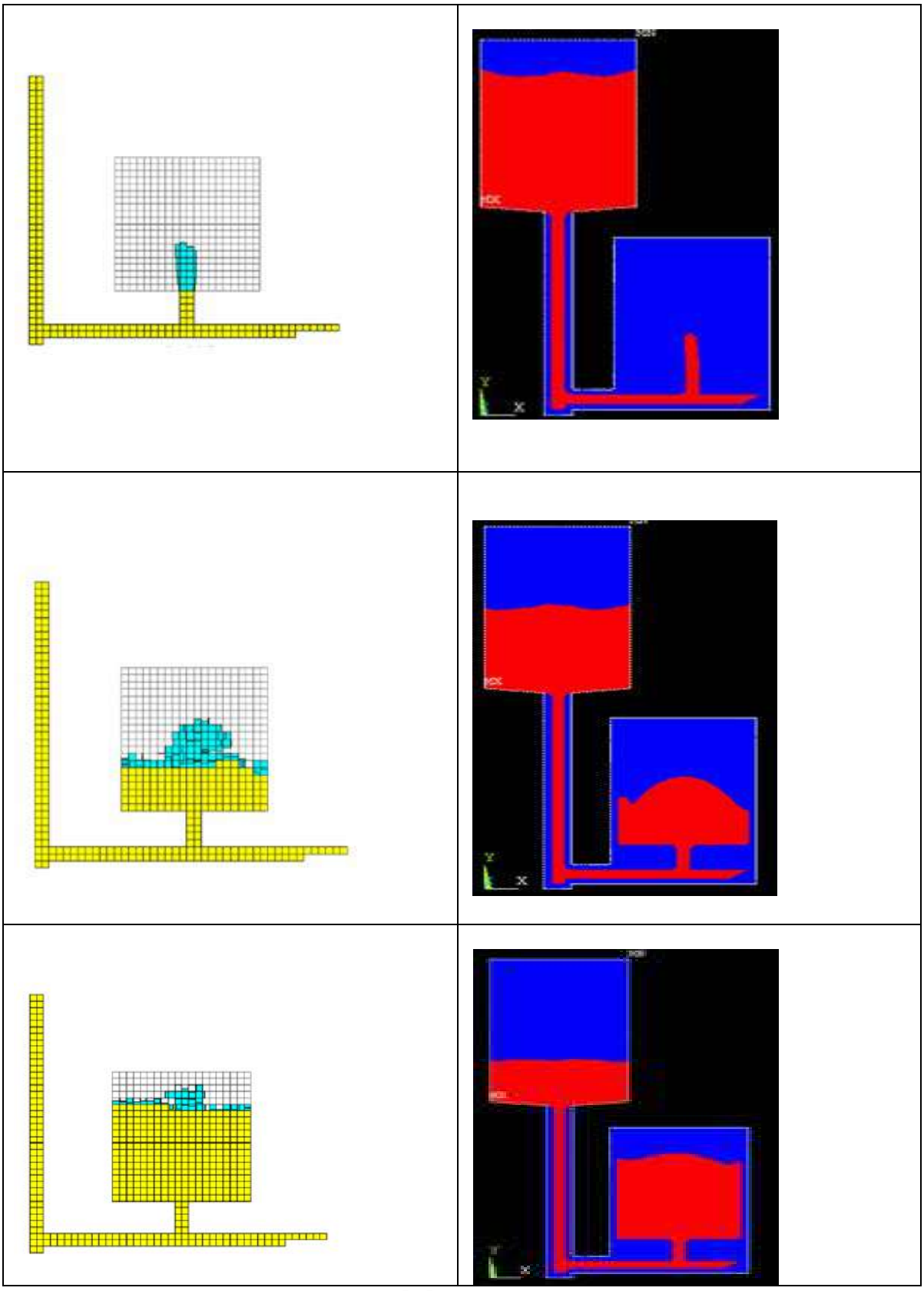
Tableau (IV.1) : les propriétés thermiques de l'aluminium

Densité (kg/m)	**Chaleur spécifique (J/Kg/c)**	**Viscosité (Kg/m/s)**	**Conductivité thermique (w/m/c)**
2570	**400**	**0.0032**	**144.5**

Tableau (IV.2) : Propriétés du matériau de moule

Densité (kg/m)	**Chaleur spécifique (J/Kg/c)**	**Viscosité (Kg/m/s)**	**Conductivité thermique (w/m/c)**
7800	**4**	**/**	**17.6**

IV.5. Validation : 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 desimulation par, Zhao Haidong , Ohnaka Itsuo ,ZhuJindong, "these: Modeling of mold filling of Al gravity casting and validation with X-ray in-situ observation " 12 January 2007 .



[A] [B]

Fig. (IV.2) Volume de fraction pendant le remplissage du moule ; a) Modèle de Zhao Haidong Ohnaka Itsuo, Zhu Jindong ; b) Notre modèle.

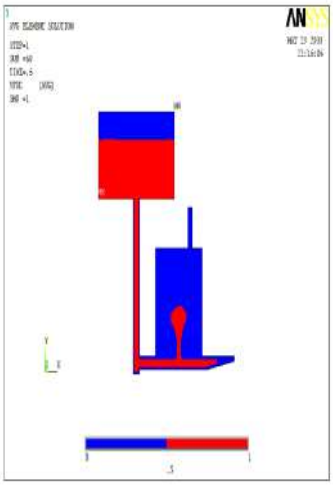
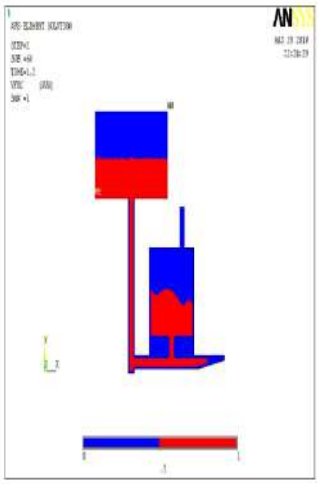
L'écoulement du métal dans les conduites est montré sur la figure IV.2. Au début, l'écoulement est lent à cause de la diminution de la section (convergente), mais quand la section diminue la vitesse augmente. Le liquide continue jusqu'à le chargement complet du moule.

IV.6. simulation en régime transitoire :

1^{ére} Partie : le remplissage de métal liquide dans le moule pour un seul point

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

Remplissage (Volume fraction) : la figure (VI.3) représente l'historique de l'écoulement au cour de remplissage.

	
t=0.6s	t=1.2s

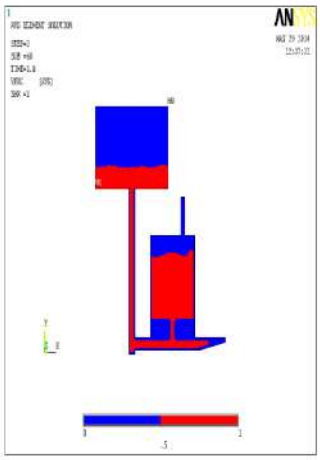
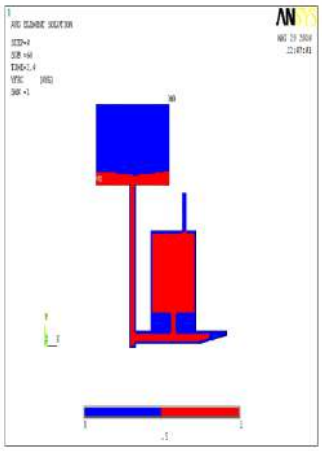
	
t=1.8s	t=2.4s

Fig. (IV.3) Représentation spatiale de remplissage du moule (vof)

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

Au début le liquide déplace sur la surface du moule interne, on remarque que le liquide se jette à travers la sortie du moule. D'autre part, au cours de remplissage, on remarque apparition des turbulences à l'intérieur du moule(t=1.2 s). Après le temps t=2.4s l'empreinte est complètement remplie

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

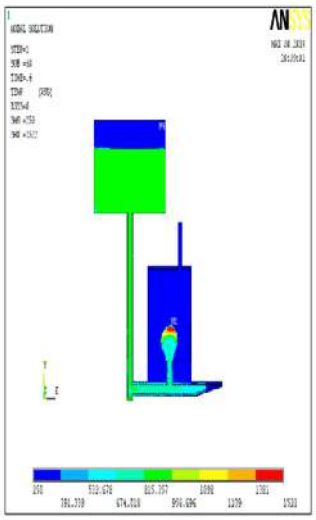
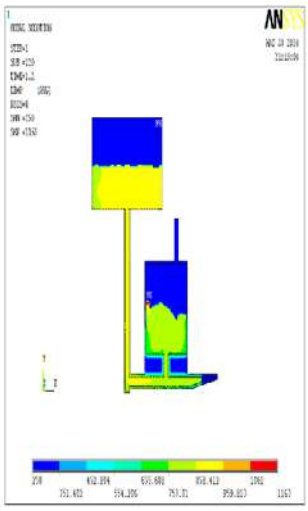
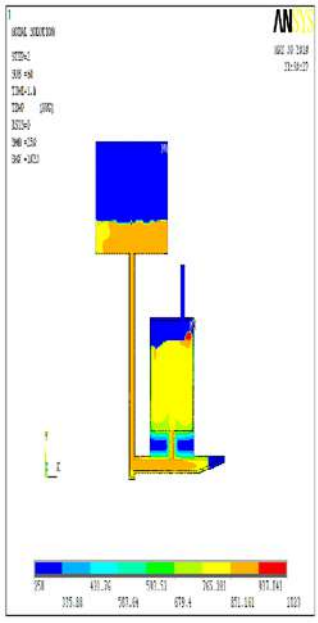
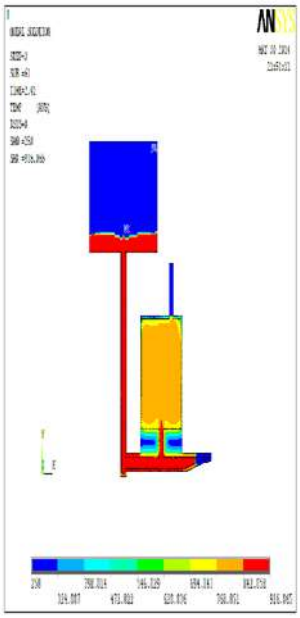
<table>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>t=0.6s</td><td>t=1.2s</td></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>t=1.8s</td><td>t=2.4</td></tr>
</table>

Fig.(IV.4) Représentation spatiale de champ de température dans le domaine de calcul

La température de métal à injecté initialement à 1163°C, de fait de l'interaction dynamique /thermique d'un part et d'autre par les frottements pariétale ainsi, on remarque que la température chute progressivement à une température de 324 °C au niveau de l'empreinte (température inferieure à la température de fusion de l'aluminium).

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.5)

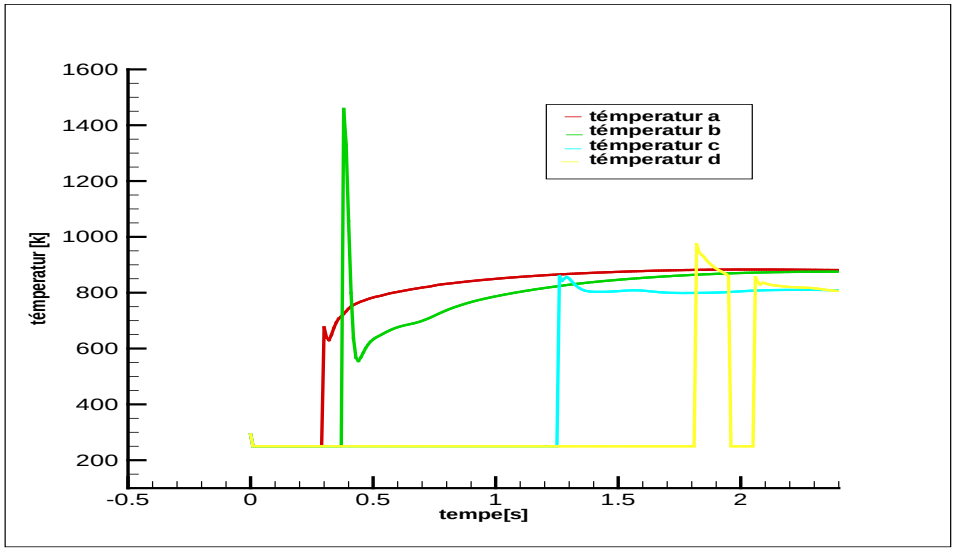
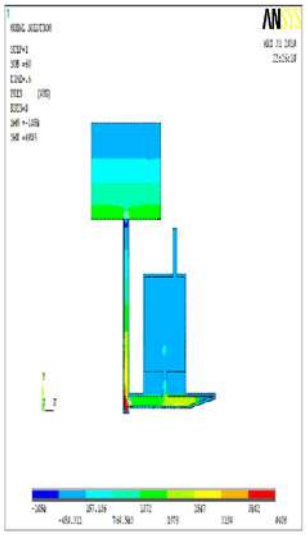
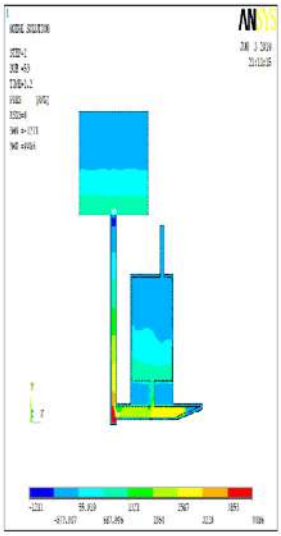


Fig. (IV.5).la variation de température dans le temps pour de différent position

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

- point (a) : la température augmente rapidement jusqu'à T=675k (t=0.3s) à cause du convergence de section, puis elle chute jusqu'à T=630K (t=0.32s). Après elle va : la température augmente jusqu'à T=881k(t=2.38s)à cause de la convergence de section et après certain temps la température stabile suivant une pente jusqu'à t=2.4s (T=881k).
- point(b) : la température augmente jusqu'à T=1458k (t=0.38s) à cause de la convergence de section et après certain temps la température diminue suivant une pente jusqu'à t=0.6s (T=676k) à cause de la convergence de section, puis elle va stabiliser à la valeur T=874k (t=2.2s)

- point(c) : la température augmente jusqu'à T=859K (t=1.2s) à cause du convergence de section et après certain temps la température diminue suivant une pente jusqu'à t=1.89s (T=799k) Après elle va : la température augmente jusqu'à t=810k(t=2.2s)) à cause du convergence de section et après certain temps la température diminue suivant une pente jusqu'à t=2.2s (T=808k) à cause de la convergence de section, puis elle va stabiliser à la valeur T=808k (t=2.4s) .
- point (d) : à t=1.8s la température augmente jusqu'à la valeur T=973k) à cause du convergence de section et après certain temps la température diminue suivant une pente jusqu'à t=1.9s (T=250k) à t=2.2 (T=810) et se stabilise à cette valeur jusqu'à t=2.4s
- **IV.6.2Champ de pression** : la figure (IV.6) représentation spatiale de pression dans le moule en fonction de temps.

	
t=0.6	t=1.2

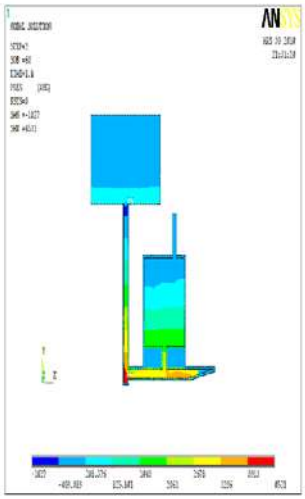
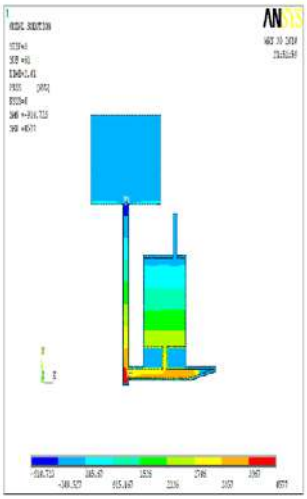
	
t=1.8	t=2.4

Fig. (IV.6) Représentation spatiale de champ de pression dans le domaine de calcul

La figure (IV. 6) représenté le champ de pression au cours du remplissage, l'empreinte est soumise à la pression, de 2586Pa, après un certain temps la pression augmente régulièrement jusqu'à la valeur maximale de 4469Pa ;ceci est due à la convergence de la section juste avant la sortie. Après, il y a une diminution de la pression à cause de libération de liquide vers échappement.

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.6)

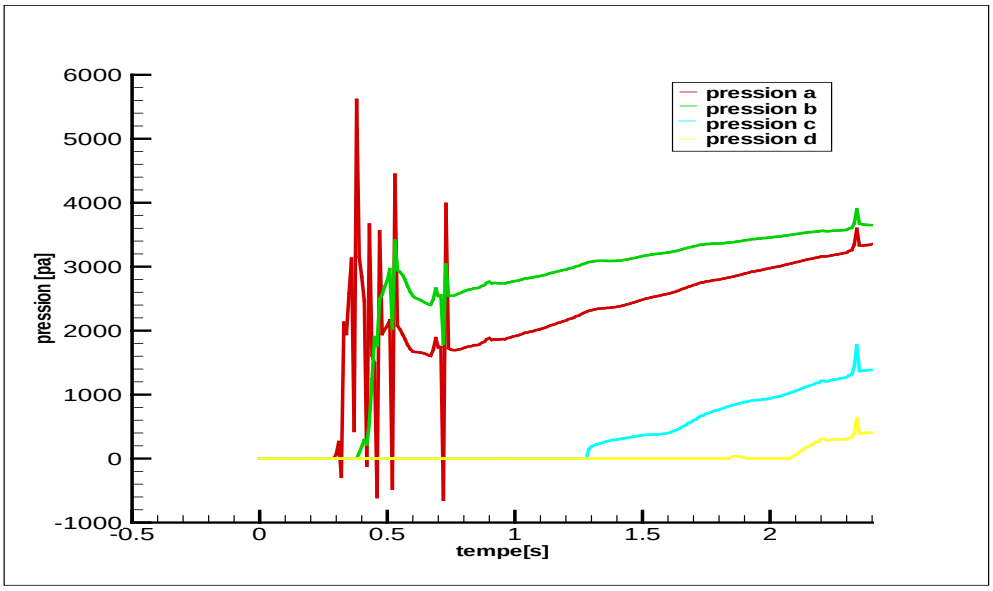


Fig. (IV.7)la variation de pression dans le temps pour de différent position

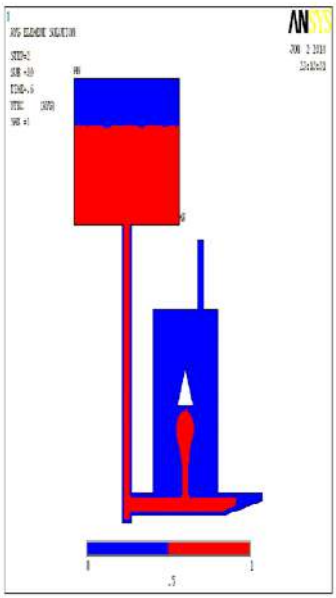
Remarque :la pression toujours commence de la pression atmosphérique (p= 0Pa).

- point (a) : la pression augmente rapidement jusqu'à p= 5608Pa (t=0.38s) à cause de la convergence de section et après un certain temps la pression diminue progressivement jusqu'à p= 2157Pa (t=1.2s) car l'effet de libération de liquide dans l'empreinte. Après elle augmente jusqu'à p=3353Pa.
- point (b) : la pression augmente rapidement jusqu'à p= 3409Pa (t=0.53s) et après un certain temps la pression diminue progressivement jusqu'à p= 2954Pa (t=1.2s) , après elle augmente jusqu'à p=3650 Pa
- point (c) : la pressionstabiliser jusqu'à p= 0Pa (t=1.2s) à cause de la convergence de section et après un certain temps la pression augmente progressivement jusqu'à p= 1386Pa (t=2.4s).
- point (d) :la pressionstabiliser jusqu'à p= 0Pa (t=1.8s) à cause de la convergence de section et après un certain temps la pression augmente progressivement jusqu'à p= 407Pa (t=2.4s).
- **2ére Partie : le remplissage de métal liquide dans le moule pour un seul point Puis géomètre interne vide sur l'empreinte(le sens de la tête de triangle vide interne verticalepositif sur l'empreinte).**

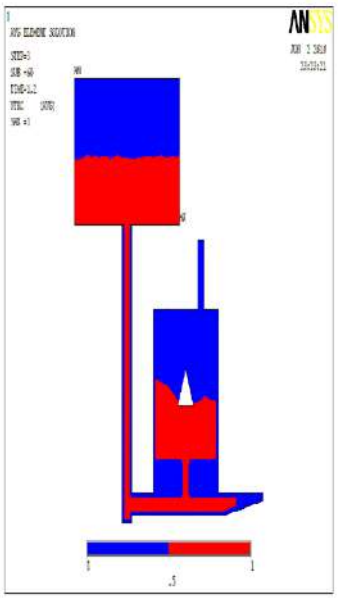
Dans cette partie on choisi un seul point de remplissage Puis géomètre interne videsur l'empreinte(le sens de la tête de triangle vide interne verticale positif sur l'empreinte).

Avec une vitesse varia sur le gravite et déterminés les paramètres lié au remplissage de l'empreinte. (Température, pression et le temps de remplissage)

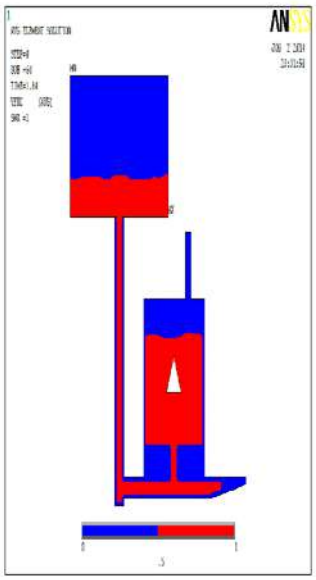
Remplissage (Volume fraction) : la figure VI.8 représente l'historique de l'écoulement à la cour de remplissage



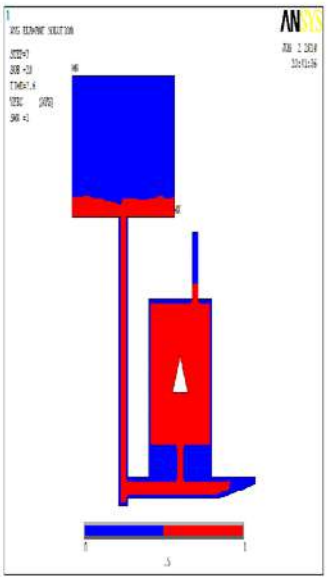
t=0.6



t=1.2



t =1.8



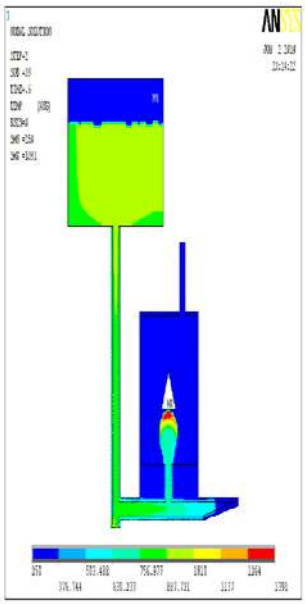
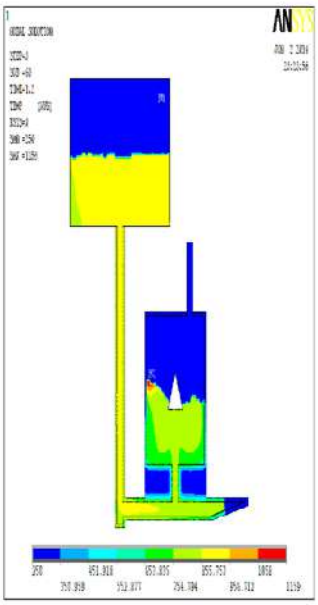
t=2.6

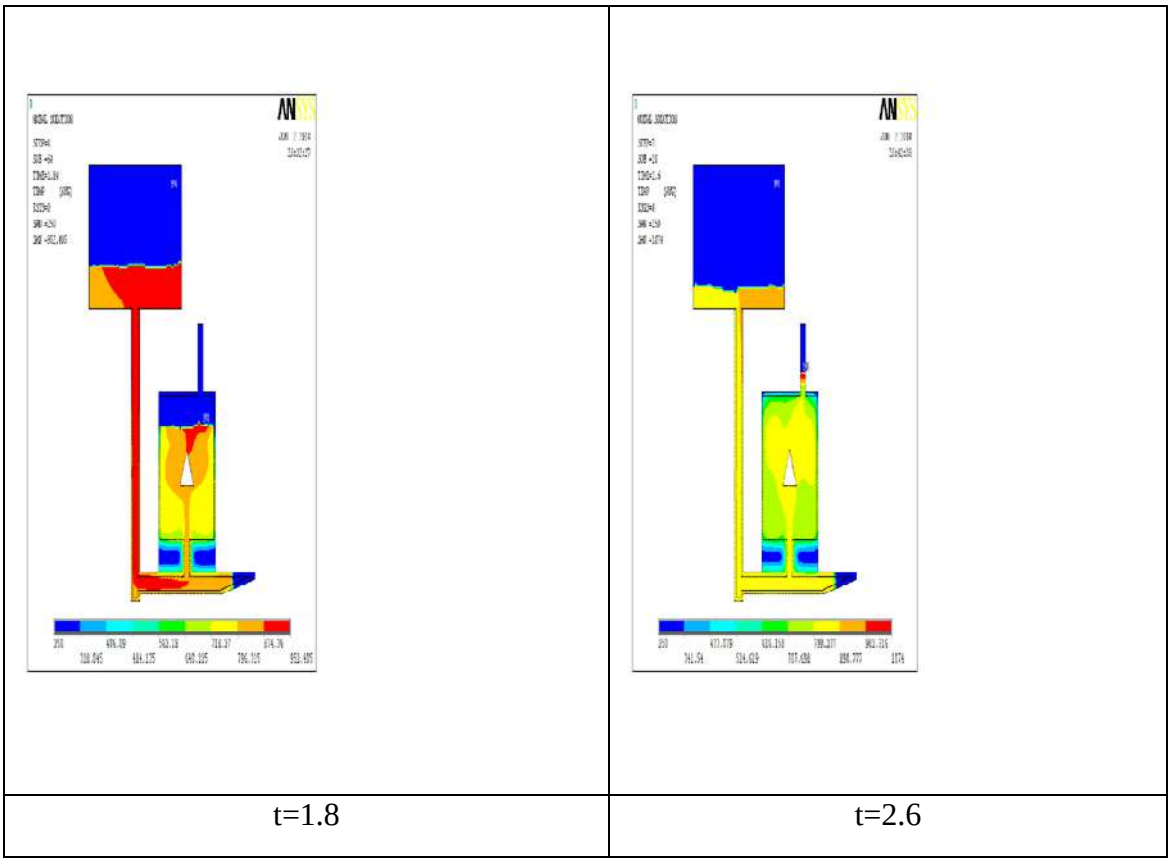
Fig. (IV.8) Représentation spatiale de remplissage du moule (vof)

D’ où la couleur rouge représente la cellule complètement rempli par le liquide, et la couleur bleu représente la cellule complètement vide.et la couleur blancest vide

Au début le liquide déplace sur la surface du moule interne, on remarque que le liquide se jette à travers la sortie du moule. D’autre part, au cours de remplissage, on remarque apparition des turbulences à l’intérieur du moule(t=1.2s). Après le temps t=2.6 s l’empreinte est complètement remplie.

IV.6.3Champ de température : la figure IV.9 montre une représentation spatiale du champ de Température pendant le remplissage de moule.

	
t=0.6	t=1.2



t=1.8	t=2.6

Fig(IV.9) Représentation spatiale de champ de température dans le domaine de calcul

La figure (IV.9) représente la répartition de la température au cours de remplissage du moule. Elle commence par une valeur maximal (1159°C), Après certaines temps la température diminue progressivement jusqu'à la valeur de 341°C.

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.10)

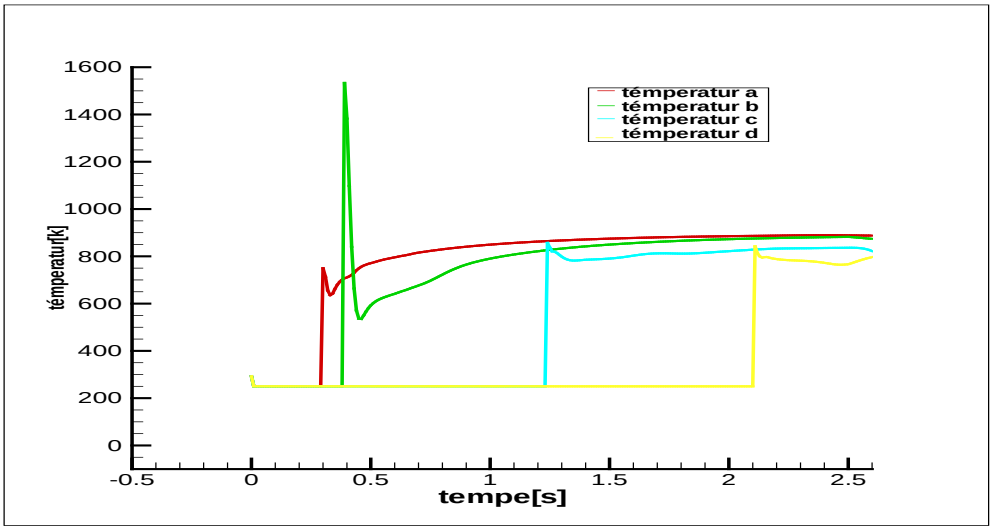
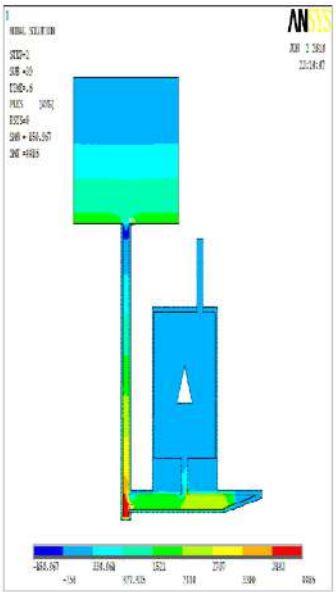
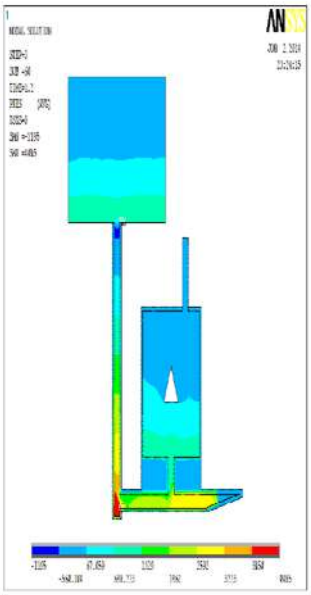


Fig. (IV.10) la variation de température dans le temps pour de différent position

- point (a) : la température augmente rapidement jusqu'à T=749k (t=0.3s) à cause du convergence de section, puis elle chute jusqu'à T=635K (t=0.33s). Après elle va augmenter progressivement jusqu'à la valeur T=887 k.
- point(b) : la température augmente rapidement jusqu'à T=1533k (t=0.39s) à cause de la convergence de section, puis elle chute jusqu'à T=549K (t=0.47s). Après elle va augmenter progressivement jusqu'à la valeur T=874k.
- point(c) : la température augmente jusqu'à T=856k à t=1.24s à cause du convergence de section, puis elle chute jusqu'à T=821K (t=2.6)
- point (d) : la température augmente jusqu'à T=842k à t=2.11s à cause du convergence de section, puis elle chute jusqu'à T=746K (t=2.6)
- **IV.6.4 Champ de pression** : la figure (IV.11) représentation spatiale de pression dans le moule enfonction de temps.

	
t=0.6	t=1.2

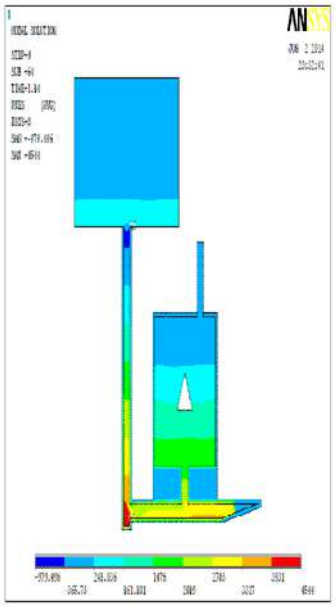
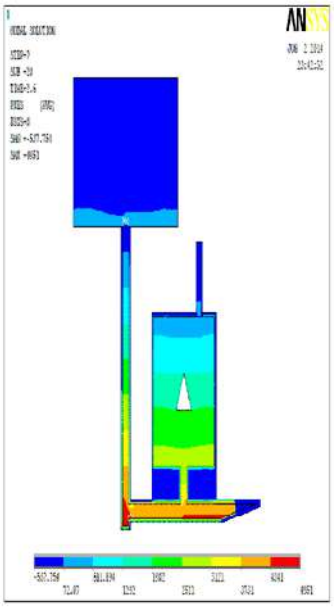
	
t=1.8	t=2.6

Fig. (IV.11) Représentation spatiale de champ de pression dans le domaine de calcul

La figure(IV.11) représenté le champ de pression au cours du remplissage, l'empreinte est soumise à la pression, de 2787Pa, après un certain temps la pression augmente régulièrement jusqu'à la valeur maximale de4486 Pa ;ceci est due à la convergence de la section juste avant la sortie. Après, il y a une diminution de la pression à cause de libération de liquide vers échappement.

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 partie (fig. IV.12)

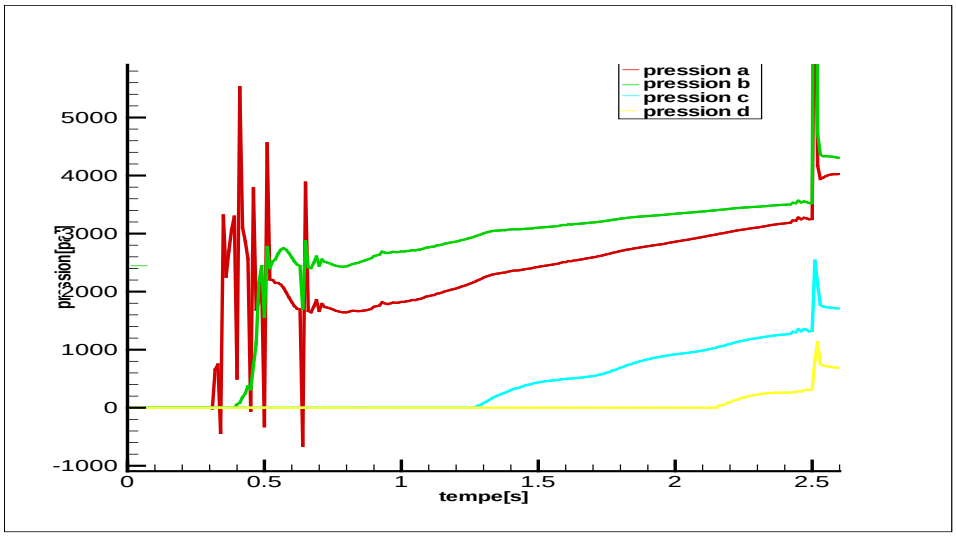


Fig. (IV.12) la variation de pression dans le temps pour de différent position

- point (a) : la pression augmente rapidement jusqu'à p= 1819Pa (t=0.6s) à cause de la convergence de section et après un certain temps la pression diminue progressivement jusqu'à p=-655Pa (t=0.64s) Après elle augmente jusqu'à p=8435Pa grâce à la convergence de section de sortie, dans ce moment elle chute jusqu'à p =4027pa puisque le liquide s'oppose à l'environnement.
- point (b) : la pression augmente rapidement jusqu'à p= 2722Pa (t=0.56s) et après un certain temps la pression diminue progressivement jusqu'à p= 1704Pa (t=0.64s) , après elle augmente jusqu'à p=4712 Pa(t=2.52s), dans ce moment elle chute jusqu'à p =4305pa.
- point (c) :la pressionstabiliser jusqu'à p= 0Pa (t=1.26s) à cause de la convergence de section et après un certain temps la pression augmente progressivement jusqu'à p= 2734Pa (t=2.51s) ,au même temps elle chute a p=1709pa.
- point (d) : la pressionstabiliser jusqu'à p= 0Pa (t=2.15s) à cause de la convergence de section et après un certain temps la pression augmente progressivement jusqu'à p= 1131Pa (t=2.52s), au même temps elle chute a p=687pa a (t=2.6s)

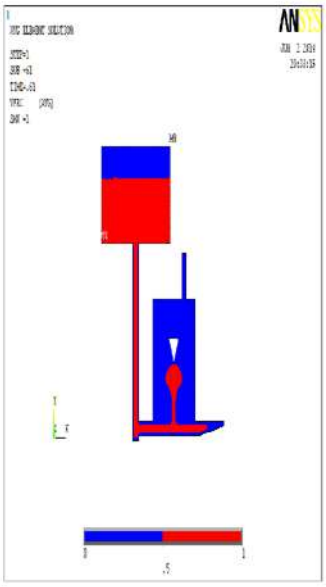
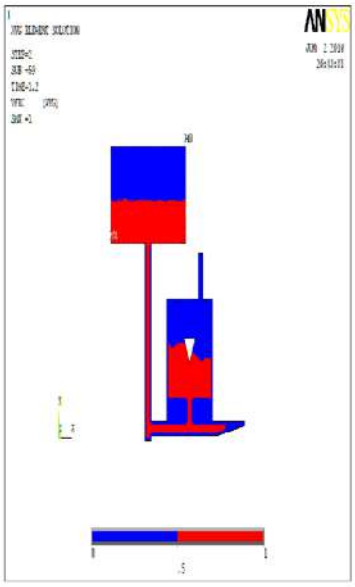
➢ $3^{ére}$ Partie : le remplissage de métal liquide dans le moule pour un seul point

Puis géomètre interne vide (le sens du triangle vide interne envers de l'empreinte para port à la simulation2)

Dans cette partie on choisi un seul point de remplissage Puis géomètre interne vide de l'empreinte (triangle vide interne de l'empreinte)

Avec une vitesse varia sur le gravite et déterminés les paramètre lié au remplissage de l'empreinte. (Température, pression et le temps de remplissage)

Remplissage (Volume fraction) : la figure(VI.13) représente l'historique de l'écoulement au cour de remplissage.

	
t=0.6	t=1.2

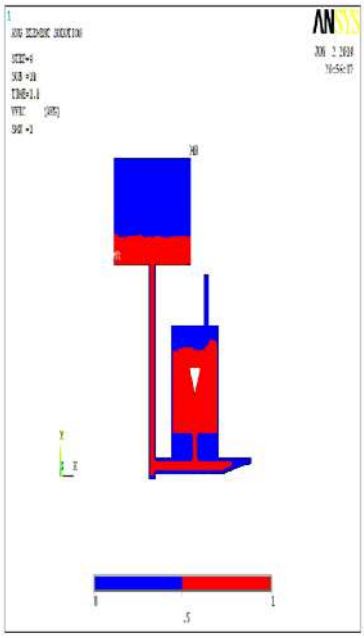
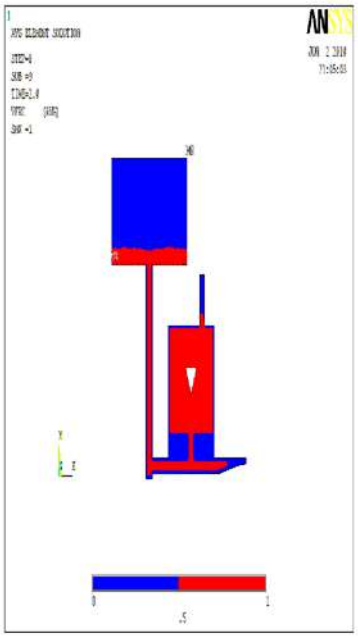
	
t=1.8	t=2.4

Fig. (IV.13) Représentation spatiale de remplissage du moule (vof)

D’ où la couleur rouge représente la cellule complètement rempli par le liquide, et la couleur bleu représente la cellule complètement vide. et la couleur blanc représente la cellule complètement vide detriangle

Au début le liquide déplace sur la surface du moule interne, on remarque que le liquide se jette à travers la sortie du moule. D’autre part, au cours de remplissage, on remarque apparition des turbulences à l’intérieur du moule(t=1.2s). Après le temps t=2.4 s l’empreinte est complètement remplie.

IV.6.5Champ de température : la figure (IV.14) montre une représentation spatiale du champ de Température pendant le remplissage de moule.

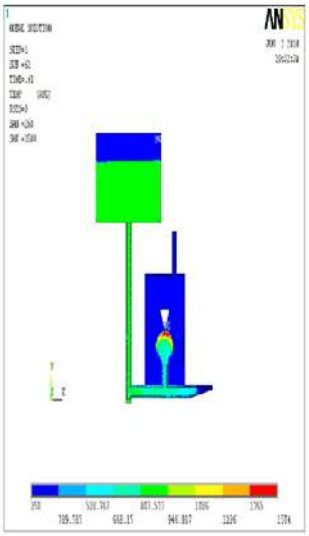
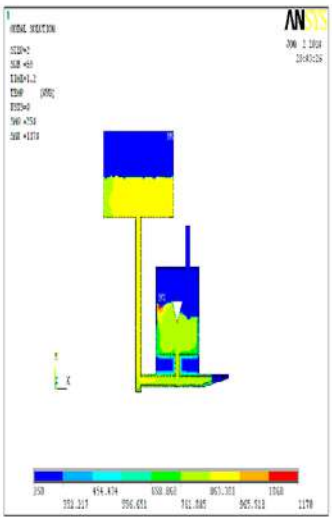
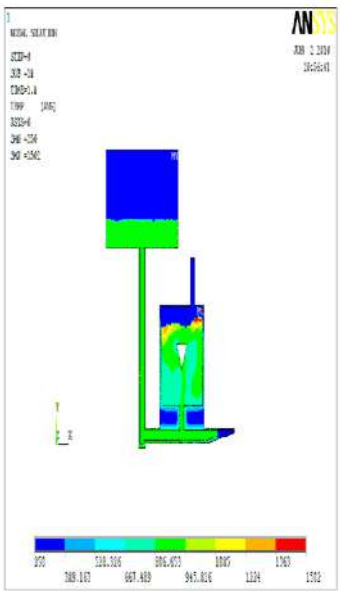
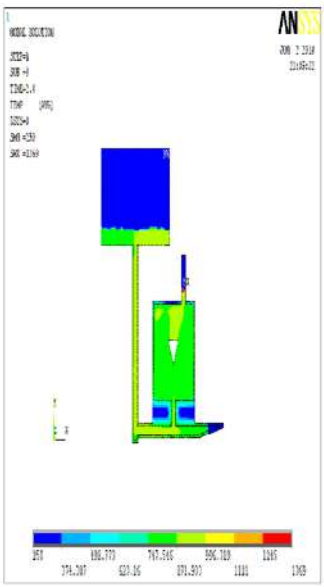
<table>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>t=0.6</td><td>t=1.2</td></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>t=1.8</td><td>t=2.4</td></tr>
</table>

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

La figure (IV.14) représente la répartition de la température au cours de remplissage du moule. Elle commence par une valeur maximal (1170C), Après certaines temps la température diminue progressivement jusqu'à la valeur de 374C.

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

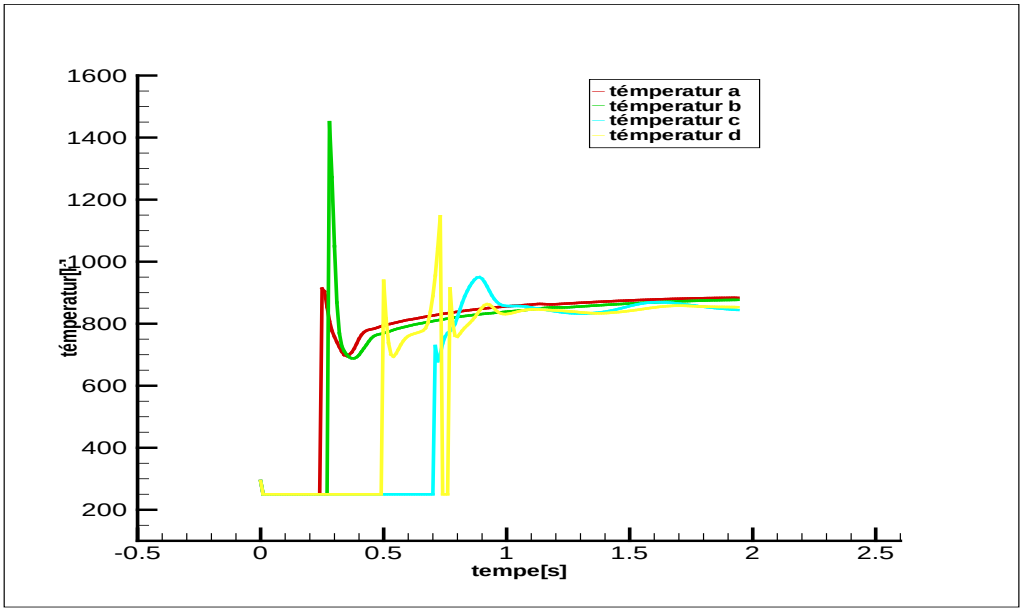


Fig. (IV.15) la variation de température dans le temps pour de différent position

- point (a) : la température augmente rapidement jusqu'à T=913k (t=0.25s) à cause du convergence de section, puis elle chute jusqu'à T=700K (t=0.36s). Après elle va augmenter progressivement jusqu'à la valeur T=883 k.
- point(b) : la température augmente rapidement jusqu'à T=1449k (t=0.28s) à cause du convergence de section, puis elle chute jusqu'à T=688K (t=0.38s) . Après elle va augmenter progressivement jusqu'à la valeur T=876k.
- point(c) : la température augmente jusqu'à T=728k à(t=0.71s) à cause du convergence de section, puis elle chute jusqu'à T=679K (t=0.72s)Après elle va augmenter progressivement jusqu'à la valeur T=846k.
- point (d) : la température augmente jusqu'à T=938k à t=0.5s puis elle croit progressivement pour atteindre la valeur T = 693k.Après elle va augmenter progressivement jusqu'à la valeur T=853k.
- **IV.6.6Champ de pression** : la figure (IV.16) représentation spatiale de pression dans le moule en fonction de temps

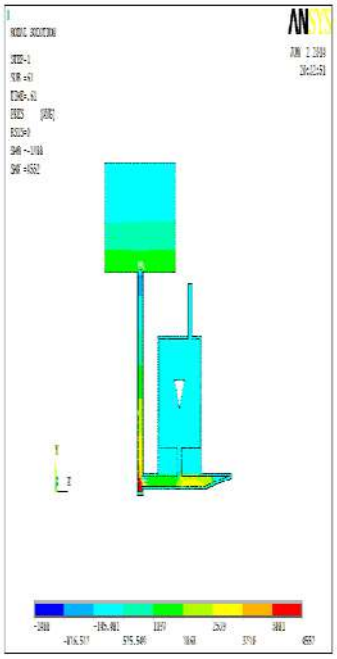
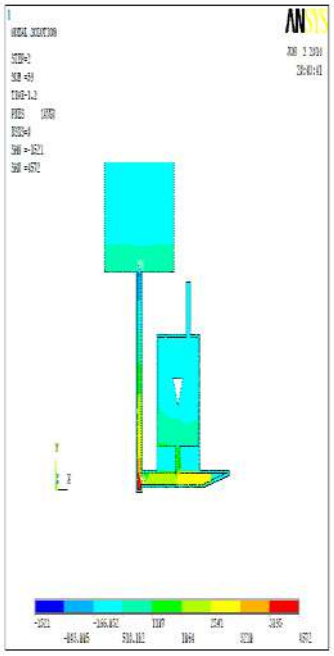
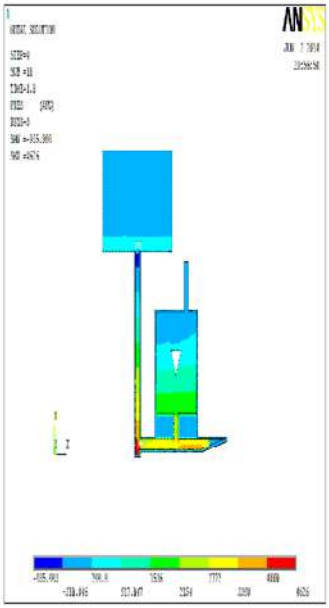
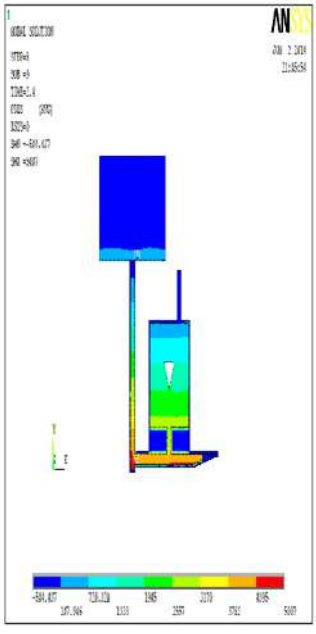
	
t=0.6	t=1.2
	
t=1.8	t=2.4

Fig. (IV.16) Représentation spatiale de champ de pression dans le domaine de calcul

La figure(IV.16) : représenté le champ de pression au cours du remplissage, l'empreinte est soumise à la pression, de 2539Pa, après un certain temps la pression augmente régulièrement jusqu'à la valeur maximale de4552 Pa ;ceci est due à la convergence de la section juste avant

la sortie. Après, il y a une diminution de la pression à cause de libération de liquide vers échappement.

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 partie (fig. IV.17)

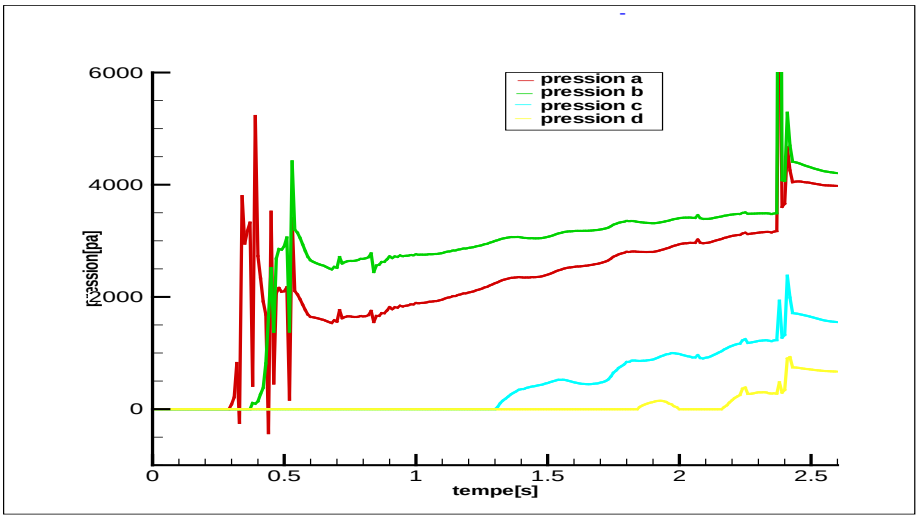


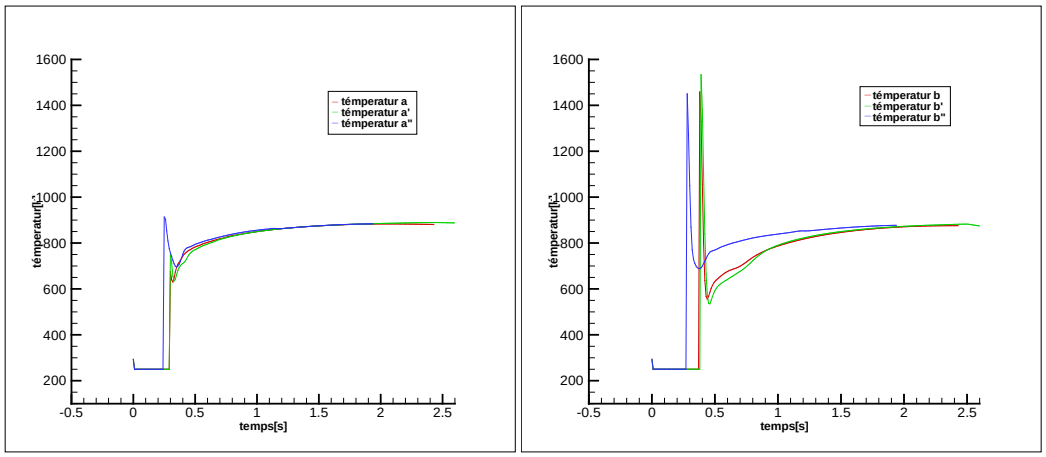
Fig. (IV.17) la variation de pression dans le temps pour de différent position

- point (a) : la pression augmente rapidement jusqu'à p= 3796Pa (t=0.34) à cause de la convergence de section et après un certain temps la pression diminue progressivement jusqu'à p= -427Pa (t=0.44s) car l'effet de libération de liquide dans l'empreinte. Après elle augmente jusqu'à p=3405 Pa(t=0.53s), grâce à la convergence de section de sortie, dans ce moment elle chute jusqu'à p =1841pa puisque le liquide s'oppose à l'environnement.
- point (b) : la pression augmente rapidement jusqu'à p= 2855Pa (t=0.48s) et après un certain temps la pression diminue progressivement jusqu'à p= 1383Pa (t=0.52s), après elle va augmente jusqu'à p=4419Pa(t=0.53s), dans ce moment elle chute jusqu' p =2444pa.
- point (c) : la pression augmente rapidement jusqu'à p= 524Pa (t=1.54)et après un certain temps la pression diminue progressivement jusqu'à p= 450Pa (t=1.64s), après elle va augmente jusqu'à p=1990Pa(t=2.42s),dans ce moment elle chute jusqu' p =1553pa.
- point (d) : la pression augmente rapidement jusqu'à p= 151Pa (t=1.93s)et après un certain temps la pression diminue progressivement jusqu'à p= 0Pa (t=2.16s) , après elle augmente jusqu'à p=929Pa(t=2.42s),dans ce moment elle chute jusqu' p =670pa.

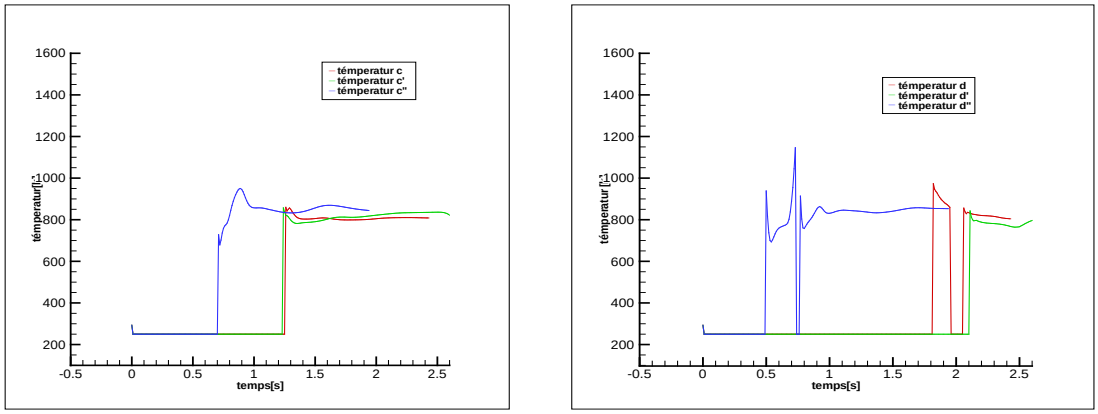
IV.7 Comparaison entre la première et la deuxième et la troisième partie :

Dans cette partie on a faire la comparaison on entre les points de chaque simulation (la première et la deuxièmela troisième simulation) c'et à dire on comparé la trajectoire de chaque points (aa'a'', bb'b'', cc'c'', dd'd'', ee'e'')

IV. 7.1 : champ de température :



(a) (b)



(c) (d)

Figure (IV.18) Comparaison entre les Champs des températures dans chaque point pour les troissimulations.

Si nous comparons la variation de champ des températures dans chaque point pour les trois simulations.

- point(1):La variation de la température de le graphe(a) avec un écart de 74K dans les points (a,a')et un écart de 82K dans les points (a,a'')et un écart de 8K dans les point(a',a'') à(t=0.3s).

Citons que le liquide en première simulationle même pointetle même temps se refroidi avant ceux qui de deuxième et troisièmesimulation.

- Point2 : La variation de la température de le graphe(b) avec un écart de 1208K dans les points (b, b') et un écart de 770K dans les points (b ,b'') et un écart de 438K dans les point (b',b'') à(t=0.38s).

Citons que le liquide en deuxième simulation le même point et le même temps se refroidi avant ceux qui de première et troisième simulation.

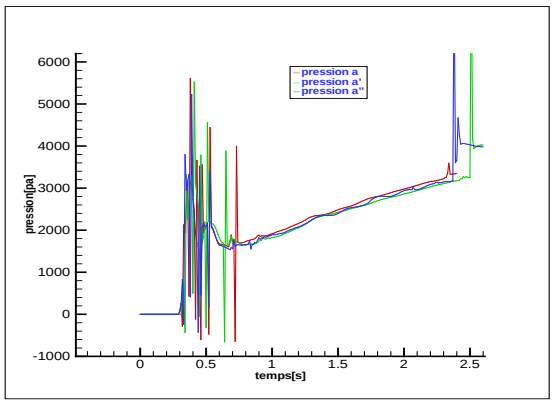
- Point3 : La variation de la température de le graphe(c) avec un écart de 39K dans les points (c, c') et un écart de 26K dans les points (c, c'') et un écart de 13K dans les point (c',c'') à(t=1.26s).

Citons que le liquide en deuxième simulation le même point et le même temps se refroidi avant ceux qui de première et troisième simulation.

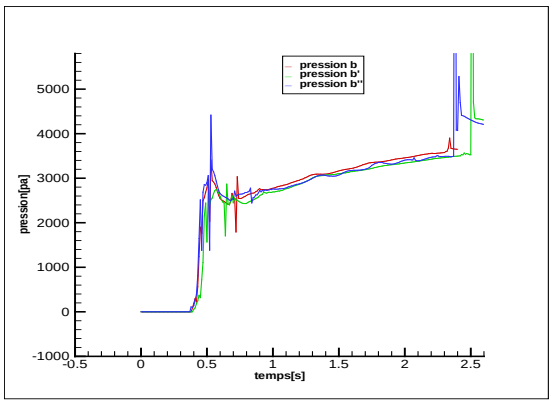
- Point4 : La variation de la température de le graphe(d) avec un écart de 773K dans les points (d, d')et un écart de 119K dans les points (d, d'') et un écart de 604K dans les point (d', d'') à(t=1.82s).

Citons que le liquide en deuxième simulationle même point et le même temps se refroidi avant ceux qui de première et troisième simulation.

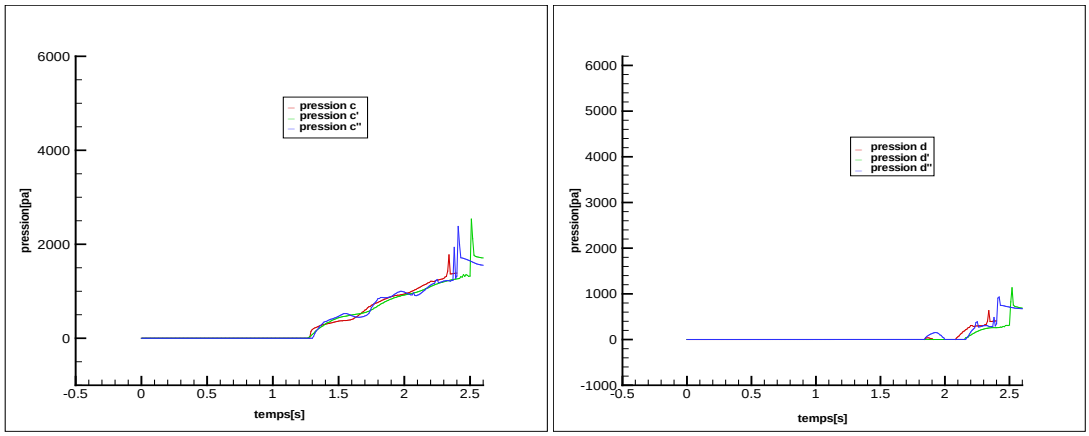
IV. 7.2 : champ de pression:



(a)



(b)



(c) (d)

Figure (IV.19) Comparaison entre les Champs des pressions dans chaque point pour les trois simulations.

Si nous comparons la variation de champ des pressions dans chaque point pour les trois simulations.

- point(1):La variation de champ des pressionsde le graphe(a) avec un écart de 67pa dans les points (a,a')et un écart de 18pa dans les points (a ,a'') et un écart de 18pa dans les point (a',a'') à (t=0.3s).

Citons que lapressions de liquide endeuxièmesimulation le même pointetle même temps se faible avant ceux qui de première et troisièmesimulation.

- Point2 : La variation de champ des pressionsde le graphe(b) avec un écart de 87pa dans les points (b, b')et un écart de 10 pa dans les points (b, b'') et un écart de 96K dans les point (b',b'') à(t=0.39s).

Citons que lapressions de liquide endeuxième simulation le même point et le même temps se faible avant ceux qui de première et troisième simulation.

- Point3 : La variation de champ des pressionsde le graphe(c) avec un écart de 97pa dans les points (c, c') et un écart de 147pa dans les points (c, c'') et un écart de 50padans les point (c', c'') à(t=1.29s).

Citons que lapressions de liquide entroisième simulation le même point et le même temps sefaibleavant ceux qui de première et deuxième simulation.

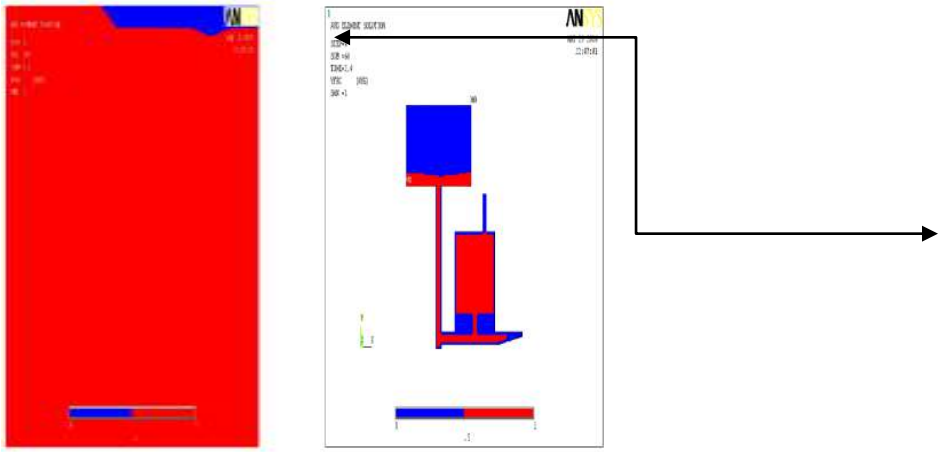
- Point4 : La variation de champ des pressions de le graphe(d) avec un écart de 26pa dans les points (d, d')et un écart de 16pa dans les points (d, d'') et un écart de 42padans les point (d', d'') à(t=1.85s).

Citons que lapressions de liquide endeuxième simulation le même point et le même temps sefaible avant ceux qui de première et troisième simulation.

IV.8 Les défauts des moulages pour les trois simulations :

On a trouvée quelques défaut en commencer par :

- Le premier défaut représente sur la fig. (IV.20)



Figure(IV.20)Représentation ledéfaut d'inclusions d'air de moulage sur le niveau de l'empreinte complète pourla première simulation

- Le deuxième défaut représente sur la Figure (IV.21)

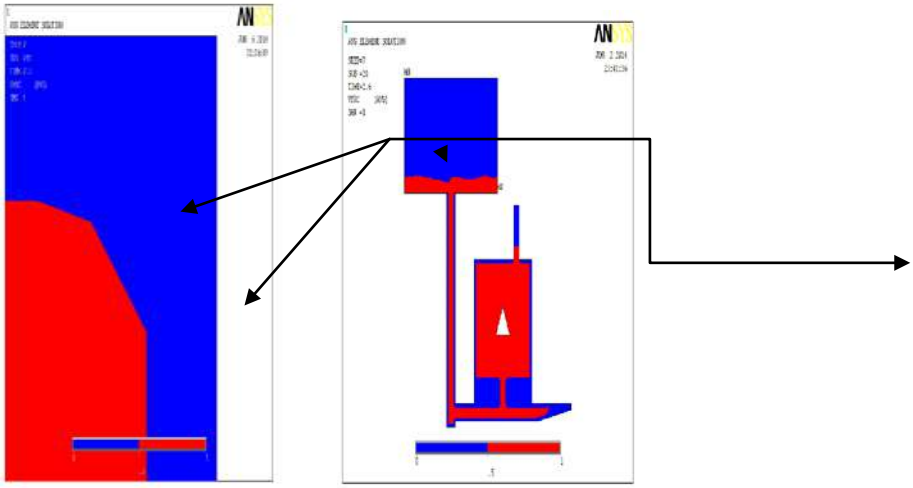


Figure (IV.21) : Représentation le défaut desinclusions d'air de moulage sur L'angle 90° de l'empreinte pour la deuxième simulation

❖ Même défaut pour la troisième simulation

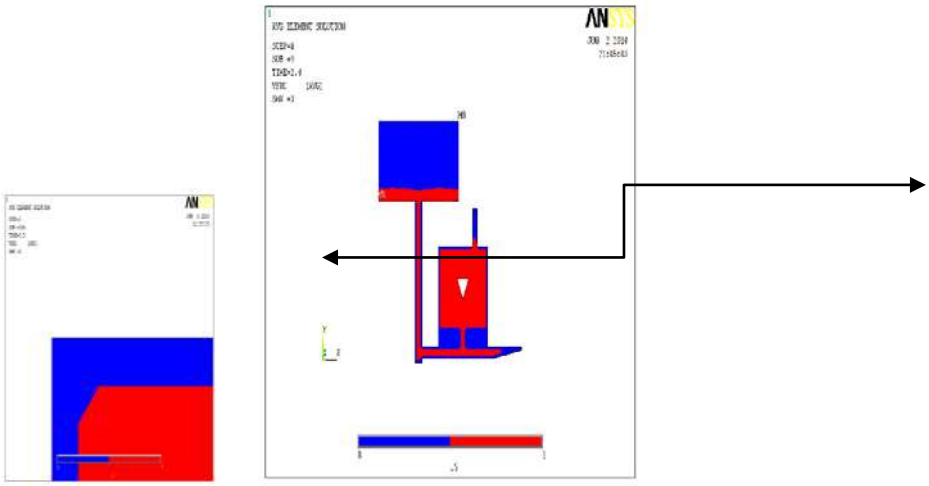


Figure (IV.22)

IV. 9Les solutions proposées sur les trois simulations

- augmente La température initiale du métal liquide
- augmente La vitesse de remplissage de moule
- augmente La l'argeur desmasselottes

IV. 10Conclusion :

Dans ce chapitre la ; nous avons cité trois simulation déférent géomètre de l'empreinte de moule, pour le contrôle du remplissage des moules et nous avons pu construire d'autres modèles simples ; 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 tempe de remplissage du moule) etComparaison la déférence de température et la pression de chaque point à déférent simulation AprèsOn a trouvée quelques défaut de moulage et la solution proposée destrois expériences .

Conclusion générale

CONCLUSION GENERALE

Cette mémoire s'appuie sur un cadre d'étude et d'analysé les défauts liés au remplissagedu moule .pour accomplir ce travail, des simulations numérique de remplissage ont étéréalisées en utilisant une technique par éléments finis.

Une première partie, nous avons exposé les techniques de moulage et on a base sur le moulage sous pression (MMSP).
Dans la deuxième partie du présent document,la modélisationmathématique du remplissagede l'aluminium fondu dans un moule en acier a été réalisée. À cette fin, la méthode des
Éléments finis et le logiciel ANSYS-CFD ont été appliqués. Le processus deremplissage du moule a été simulé dans des conditions atmosphériques par gravité et le métalliquide a été versé a travers un canal de moule.

Au cours de la simulation de la phase de remplissage du moule, les propriétés tellesque la densité, la conductivité thermique, chaleur spécifique et la viscosité de métal liquide etde l'acier ont été considérées comme des constantes. En outre, la turbulence, l'effet de lapesanteur et de fluides incompressibles ont été prises en compte. Les résultats suivants ont étéensuite déterminés : la variation de température, la variation de pression, et également leparamètre fraction volumique.

Sur la base des résultats de La simulation numérique, au peutdire que l'avantage de la simulation estd'analyser plusieurs phénomènes présentes dans le processus de remplissage du moule afinde mieux comprendre et de mieux analyser ces phénomènes, et qui est affectécertainement sur la qualité de la produit final. Ainsi que, la méthode VOF s'est révélée êtreune technique puissante, pour le contrôle du remplissage des moules.
La réussite d'une simulation dépend beaucoup de la fiabilité des données thermophysiques des matériaux du moule et de la pièce mises à la disposition du code de calcul.

Grâce à ces expériences appliques dans ce travail nous avons vue comment le changement de température et de pression, en divers point appliquée au liquide, et extrait la mesure expérience grâce au travail effectue, c'est la premier expérience, et suggérons la façon d'aborder ces lacunes.

Référence :

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

[2] Sébastien BERNARD ; Vincent ROLLAND ; Michael PIELLARD ; Technique den Fonderie : Le moulage par basse pression ; DESS Ingénierie des Matériaux, Années universitaires 2001-2002 ; Projet de mise en forme ; Université de Poitiers.

[3] « Technique de la fonderie en moules métalliques - fonderie sous pression –», ETIF PARIS, 1964

[4] DOUMA Mohamed amine «simulation numérique de remplissage du moule par la méthode MEF/ » diplôme master ; Université de Yahia Fers de Médéa ; 2013.

[5] SCHMINCK Julien ;' Moulage en coquille métallique',Document citer dans [2]2010.

[6]LEKBAIRIA Mokhtar ; BETIL Younes « Simulation numérique du remplissage desmoules» mémoire de fin d'étude d'ingéniera; Université de Yahia Fers de Médéa ; 2010

[7] MEDJBER Mohamed, YKRELEF Hichem «Etude de l'écoulement

[8]Babaei R., Abdollahi J., Homayonifar P., Varahram N., Davami P. « Improved advection algorithm of computational modeling of free surface flow using structured grids» Computer Methods in applied Mechanics and Engineering, vol.195, 2006, pp.775–795.

[9] TOUMI Aboubaker, BOUDERRADJI Mohamed « L'effet de la surface intermétalliquen de SnAgCu sur la fiabilité d'un ensemble de relie semi-conducteur de puissance » diplômen d'ingénieure ; Université de Yahia Fers de Médéa ; 2009.

[10] LADJAL NAIMA MOULOUED HOURIA, (modélisation numérique pour le calcule des processeurs dynamique et thermique d'une cuve de réacteur nucléaire) Diplôme d'ingénieure ; université de yahiafares Médéa ; 2008

[11] MATENE ELHACENE, (méthode numérique de résolution des équations de Navierstokes)Diplôme d'ingénieur d'état en génie climatique

.

[12]http://docs.google.com

[13] CHANG CHRISTOPHE ,(Amélioration de modèles électrothermiques de composants de puissance de type TBH ou pHEMT et aplication à la conception optimales des modules actifs pour les radars) Université de limoges, ELECTRONIQUE (2004).

[14]http://fr.wikipidea.org.

[15] B. J. DALY. A technique for incuding surface tension for effects in hydrodynamic calculation. J. Comput. Phys., vol.4, P.97-117, 1996.

[16] H. C. YEE. Upwind and symmetricShock-CapturingSchemes. NASA, 1987.

[17] C. Hirsh. Numerical computation of internal and externalflows. John Wiley and sons,1990.

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