REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA



Faculté de **T**echnologie

Mémoire de fin d'études de Master

Filière : Génie Mécanique
Spécialité : Ingénierie des matériaux et des surfaces

Analyse Numérique de l'effet de la présence des champs magnétique sur les défauts du remplissage des moules.

Présenté par :

Kouadri Rahim

Tahmi Tawfik

Proposé et Dirigé par :

Dr. ZIRARI Monir

Promotion 2019

Remerciements

Je tiens d'abord à présenter mes profondes gratitudes ALLAH 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.

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

Médéa, juin 2019

DIDICACE

A mes chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de mes études,

A mes chères sœurs, pour leurs encouragements permanents, et leur soutien moral,

A mes chers frères, pour leur appui et leur encouragement,

A toute ma famille pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire,

A mes amis hamza silmi, omar alache,hichem belksam, manel hammoudi,

Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux tant allégués, et le fuit de votre soutien infaillible,

Merci d'être toujours là pour moi.

ملخص:

مشروع التخرج هذا يهدف لمحاكاة عددية لملء قالب من الحديد، وذلك لتحليل العيوب الممكن حدوثها أثناء عملية القولبة. وذلك باستخدام تقنية نماذج العناصر المحدودة باعتماد على برنامج FLOTRAN. خلال محاكاة مرحلة التعبئة اعتبرت بعض الخصائص مثل الكثافة والناقلية الحرارية والحرارة النوعية للمعدن السائل والصلب كقيم ثابتة. كما عرفت هذه الحالة اضطراب بنموذج RSM .

النتائج أظهرت أهمية المحاكاة في تحليل عدة ظواهر أثناء عملية ملء القالب،والتي لايمكن ملاحظتها تطبيقيا.

الكلمات المفتاحية: ملء، مجال مغناطيسي، القالب، ضغط، المحاكاة العددية، طريقة العناصر المتناهية، تدفق، تصميم.

Résumé :

Ce projet vise l'obtention d'un diplôme de simulation numérique de mélange de remplissage du moule de fer, et d'analyser les défauts peuvent se produire pendant le processus de moulage. En utilisant la modélisation par éléments finis adoption de la technologie sur le programme FLOTRAN. Pendant la simulation, le stade de l'emballage considéré certaines propriétés telles que la densité et de la minorité thermique Elena et la chaleur spécifique du métal liquide et des valeurs fixes en acier. Il est connu comme le modèle de la turbulente RMS.

Les résultats ont montré l'importance de simulation pour l'analyse de plusieurs phénomènes pendant le processus de remplissage du moule, qui ne peut être observée appliquée.

Mots-clés: Remplissage, champ magnétique, moule, pression, simulation numérique, éléments finis; Ecoulement; Modélisation.

Abstract:

This graduation project aims to numerical simulation of mold filling iron, and to analyze the defects can occur during the molding process. Using finite element modeling technology adoption on the FLOTRAN program. During the simulation the packing stage considered some properties such as density and thermal Elena minority and specific heat of the liquid metal and steel fixed values. It is known as the turbulent model RMS.

Results showed the importance of simulation in the analysis of several phenomena during mold filling process, which can not be observed, applied.

Keywords: Filling, magnetic field, mold, pressure, numerical simulation, finite elements; Flow; Modelization.

Sommaire

Introduction Général…….....1

CHAPITRE I : Etude bibliographique

I.1 Introduction :.....3

I.2.Le Moulage :.....3

I.2.1 Moulages en moules permanents.....4

I.2.1.1 Moulage en coquille.....4

I.2.1.1.1 Principe du moulage en coquille :.....5

I.2.1.1.2 Caractéristiques du procédé :.....5

I.2.1.2 Moulage basse pression :.....7

I.2.1.2.1Caractéristiques du procédé :.....7

I.2.1.3 Moulage en coulée continue :.....8

I.2.1.3.1 Description du procédé :.....8

I.2.1.3.2 Caractéristiques du procédé :.....8

I.2.2 Moulage en moule non permanent :.....9

I.2.2.1 Moulage en sable :.....9

I.2.2.1.1 Principales étapes du procédée du moulage en sable :.....10

I.2.2.1.2 Caractéristiques du procédé :.....11

I.2.2.2 Moulage en cire perdue :.....12

I.2.2.2.1 Principe de moulage à la cire perdue :.....12

I.2.2.2.2 Caractéristiques du procédé :.....13

I.2.3 Avantages et inconvénients du moulage :.....14

I.2.3.a Avantages :.....14

I.2.3.b Inconvénients :.....14

I.2.4 Le matériau utilisé pour la fabrication des moules métalliques :.....15

I.2.5 La constitution du moule :.....15

I.3 Défaut de moulage :.....15
I.3.1 Types de défauts :.....16
I.3.1.1 Défauts formés pendant le retrait de solidification :.....16
a. Les retassures:.....16
b. criques:.....17
c. Les tapures:.....17
d. Le gauchissement:.....18
I.3.1. 2.Défauts dus au gaz :.....18
Les soufflures:.....20
I.3.1.3. Défaut du au matériau avec lequel est réalisé le moule :.....21
Pénétration:.....21
I.3.1.4 Défaut formé pendant le remplissage du moule :.....21
Défaut de remplissage:.....21
Mode de formation des gouttes froides.....21
I.3.1.5 Défaut d'élaboration :.....23
Défaut de joint.....23
I.3.1.6.Défauts métallurgiques :.....23
I.3.1.7.Défauts spécifiques à un procédé de moulage :.....24
a. Défauts de coulée continue :.....24
b. Défauts de moulage au sable (moule non permanent) :.....25
I.4 Etat de l'art :.....25
I.5 Moulage magnétique:.....28
I.5.1 Simulation et expérience :.....29
I.6 Conclusion :.....29

Chapitre II : Modélisation mathématique

II.1- Introduction:.....30

II.2.Modélisation de l'écoulement des fluides:.....30
II.2.1. Equation de continuité:.....30
II.2.2. Equation de quantité de mouvement :.....30
II.2.3 Equation de l'énergie :.....31
II.2.4 Equation électromagnétique :.....32
II.3 Modélisation thermique :.....32
II.4 Modèle de turbulence k-ε :.....32
II.4.1 Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente k :.....33
II.4.2 Equation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ε :....33
II.5 La méthode volume-of-fluide (VOF):.....33
II.5.1 Calculs équilibrés et transitoires de la méthode VOF :.....34
II.5.2 Equation de la fraction volumique :.....35
II.6 CONCLUSION :.....35

CHAPITRE III : solution numérique

III.1.INTRODUCTION :.....36
III.2. méthodes de discrétisation :.....36
III.2.1 Méthode des différences finies :.....36
III.2.2. Méthode des volumes finis :.....37
III.2.3 Méthode des éléments finis :.....37
III.3.Calcul d'interfaces :.....38
III.3.1.Maillage :.....38
III.3.1.1 les méthodes lagrangiennes :.....38
III.3.1.2. les méthodes eulérienne :.....38
III.3.1.2.1.Les méthodes de suivi de front :.....38
III.3.1.2.2.Les méthodes de suivi de volume :.....38
III.4.Simulation numérique en fonderie :.....38

III.4.1.Mise en œuvre numérique :.....38
III.4.1.1.Définition de la géométrie :.....38
III.4.1.2.Définition des matériaux et des paramètres du procédé :.....38
III.4.1.3.Maillage de la géométrie :.....38
III.4.1.4.Calculs :.....38
III.4.1.5.Visualisation et analyse des résultats :.....38
III.5.Conclusion :.....38

CHAPITRE IV RESULTATS ET DICUSSION

IV. 1.Introduction :.....46
IV.2. Identification et validation de la simulation numérique :.....46
IV.2.1.Description du domaine d'application :.....46
VI.2.2.Validation :.....47
VI.3.Effet du champ magnétique sur le moulage :.....51
VI.3.1.Expérience 1 (B=3000 tesla):.....51
VI.3.2.Expérience 2 (B=6000 tesla):.....54
VI.3.3.Expérience 3 : B=10000 tesla:.....56
VI.4.Conclusion :.....60

Conclusion générale

Liste de Figure

Figure (I.1) Exemple de coquille 4
Figure (I.2) Principales étapes du procédé de moulage en coquille 5
Figure (I.3) Pièces moulées par gravité 6
Figure (I.4) Pièces moulées à basse pression **7**
Figure (I.5) Système de moulage à haute pression 8
Figure (I.6) Schéma de machine de coulée continue horizontale 9
Figure (I.6) Principe du moulage en sable 11
Figure (I.7) Principales étapes du procédé de moulage au sable 12
Figure (I.8) : Principales étapes du procédé de moulage à la cire perdue 14
Figure (I.9) Défauts observables sur un lingot d'acier coulé 17
Figure (I.10) La forme et l'emplacement de la retassure 17
Figure (I.11) Ce défaut de retrait apparait 18
Figure (I.12) Les criques et les tapures sont dues à un tracé défectueux 18
Figure (I.14 Porosités sur un cube de lutécium de 1 cm de côté) 19
Figure (I.15) : Soufflure dans une pièce en acier moulé 20
Figure(III.1) : Présentation des méthodes de calcul d'interface 39
Figure (III.2) : Maillage carré 40
Figure(III.3): Différentes méthodes de suivi de front 41
Figure(III.4) : Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque 41
Figure(III.5) : Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret 42
Figure(III.6): Définition de la géométrie 43
Figure(III.7): Définition des propriétés des matériaux 44
Figure(III.8) : Maillage de la géométrie 45
Figure(III.9): Phase du Calcul 46
Figure(IV.1) :a) La géométrie de moule et de la cavité b) maillage adoptée pour la simulation2D. 47
Figure(IV.2) : Représentation Spatiale des Champs de pression lors du remplissage 50
Figures (IV.3) : la variation de pression des points choisis en fonction de temps de remplissage dans un champ magnétique 50
Figure (IV.4) : Volume de fraction pendant le remplissage du moule 51
Figure (VI.5) : détection des défauts de remplissage dans l'empreinte 51

Figures (IV.6) : Volume de fraction pendant le remplissage du moule avec un champ magnétique à environ B=3000 tesla. 52
Figure (IV.7) : détection des défauts de remplissage dans l'empreinte. 53
Figures (IV.8) : La variation de Pression avec champ magnétique B=3000 tesla. 53
Figure(VI.9) : les points choisis à une section du moule. 53
Figures (IV.10) : la variation de la pression des points choisis en fonction de temps de remplissage après l'ajout d'un champ magnétique estimé à B=3000 tesla. 54
Figures (IV.11) : Volume de fraction pendant le remplissage du moule avec un champ magnétique à environ B=6000 tesla. 55
Figures (IV.12) : La variation de Pression avec champ magnétique B=6000 tesla. 56
Figure (IV.13) : la variation de la pression des points choisis en fonction de temps de remplissage après l'ajout d'un champ magnétique estimé à B=6000 tesla. 56
Figures (IV.14) : Volume de fraction pendant le remplissage du moule avec un champ magnétique à environ B=10000 tesla. 57
Figures (IV.15) : La disparition des défauts de remplissage de l'empreinte. 58
Figures (IV.16) : La variation de Pression avec champ magnétique B=10000 tesla. 58
Figures (IV.17) : la variation de la pression des points choisis en fonction de temps de remplissage après l'ajout d'un champ magnétique estimé à B=10000 tesla 59
Figures (IV.18) : Comparaison des résultats 60

Liste des tables

Tab. IV.1 : Propriétés d'alliage de fer 49
Tab. IV. 2 : Propriétés des matériaux de moule (acier) 49

Nomenclature

Notation	Signification	Unité
p	pression	[Pa]
T	Température	[K]
t	variable du temps	[s]
u	vitesse suivant x	[$m.s^{-1}$]
v	vitesse suivant y	[$m.s^{-1}$]
w	vitesse suivant z	[$m.s^{-1}$]
x, y, z	coordonnées cartésiennes	[m,m,m]
ρ	masse volumique	[$Kg.m^{-3}$]
ρ_0	masse volumique de référence	[$Kg.m^{-3}$]
α	coefficient d'expansion thermique	[k^{-1}]
B	Induction magnétique	tesla
J	Densité du courant	[A/ m^2]
f_z ,f_r	Champ magnétique axial	
μ	viscosité dynamique	[Kg. $m^{-1}.s^{-1}$]
k	énergie cinétique turbulente	[m^2/s^2]
A	section	[m^2]
dt	temps élémentaire	[s]
$\boldsymbol{\sigma}$	constante de Stephan Boltzmann	[W.$m^{-2}.K^{-4}$]
$\boldsymbol{\varepsilon}$	coefficient d'émission de la surface	

$\boldsymbol{\nu}$	La viscosité cinématique	$[m^2/s^2]$
$\boldsymbol{\partial\Omega_{mail}}$	le volume total de la maille de calcul	$[m^3]$
$\boldsymbol{\Omega_k}$	le volume de la partie de la maille occupée par la phase	
∇	Opérateur de gradient	
∂	Opérateur de dérivée partielle	

Abréviation

2D	Deux Dimensions
VOF	Volume Of Fluid (volume de fluide)
MAC	Marker And Cells (méthode de marqueur de volume)
TVD	Total Variation Diminishing
MMC	Le moulage magnétique

INTRODUCTION GENERALE

Introduction:

La fonderie consiste à couler un métal ou un alliage liquide dans un moule afin de reproduire une pièce dans ses formes intérieures et extérieures, en limitant dans la mesure du possible les travaux de finition après refroidissement. Ce procédé de mise en forme par coulée des métaux est utilisé dans de nombreux secteurs, les techniques utilisées dépendent du matériau, des dimensions et des caractéristiques géométriques de la pièce à obtenir, et des quantités à produire. Cependant quelque soit le procédé employé, la simulation de la coulée permet de vérifier l'adéquation entre la pièce souhaitée et les moyens utilisés. Cette ressource offre une présentation générale de la simulation de fonderie depuis l'apport de ces calculs numériques jusqu'aux possibilités d'obtention de différents résultats en fonction des objectifs en passant par l'évocation de la physique nécessaire aux calculateurs.

Le procédé de remplissage d'un moule, est une configuration de base utilisée dans de nombreuses applications industrielles. Cette opération a fait l'objet de beaucoup de travaux et recherches scientifiques qi se basent sur deux méthodes, soit expérimentalement, ou numériquement.il est vraisemblable que la première méthode est le plus sure, néanmoins elle reste handicapée par le cout élevé du matériel et la difficulté de réalisation.

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 rébut ou non. Beaucoup de défauts peuvent être éliminés par un traitement ultérieur.

Le processus de moulage sous pression le métal est injecté dans le moule métallique sous un fort champ magnétique afin d'obtenir en très grande série, en épousant l'empreinte gravée dans le moule. le moule métallique est monté dans des ensembles mécanisés et automatisés, les presses de fonderies sous-gravité, machines qui assurent la manœuvre des divers éléments du moule, la régulation de sa température, la coulée de l'alliage, l'extraction de la pièce ou de la grappe de pièces.

La présente étude concerne la modélisation numérique des procédés de remplissage de moulage. Quelques travaux ont proposé des méthodes basées aux éléments finis, les limites de cette approche se sentent lors des divisions ou fusions des fronts d'écoulement. Actuellement, les méthodes de modélisation développées sont basées sur une approche de type éléments finis couplé à des volumes de contrôle.

Dans le cas particulier des géométries simples. Lorsque la solution analytique est trop complexe, ou les approximations excessives, la résolution numérique permet de trouver une solution approchée. La méthode numérique adoptée est basée sur une discrétisation type éléments finis VOF.

Ce mémoire est composé sur quatre chapitres :

- Le premier chapitre représente des généralités sur le moulage, il contient les techniques et les différents types de moulage, on représente les défauts lié au remplissage
- Le second chapitre donne des aspects théoriques du transfert de la chaleur et de mécanique de fluide. Tout d'abord, les lois fondamentales du transfert de la chaleur seront présentées, aboutissent à l'équation de la chaleur.
- régissant le comportement d'un système thermique. Ensuite nous avons faire une formulation des équations de Navier-Stokes qui régissent le mouvement turbulence d'un fluide incompressible visqueux.
- Le troisième chapitre est consacré à la simulation numérique ou les trois méthodes de discrétisation sont exposées ainsi que le chois de la méthode et la discrétisation du modèle mathématique.
- Le quatrième chapitre est consacré à la résolution, validation et la discutions des résultats numériques obtenus.

Et finalement terminer le travail par une conclusion générale et recommandation.

CHAPITER I
ETUDE
BIBLIOGRAPHIQUE

I.1 Introduction :

Le moulage est un des plus anciens procédés de mise en forme des métaux. Son utilisation remonte à environ 5000 ans av. J.-C. Cette technique est largement utilisée à travers le monde de nos jours, avec une production mondiale de plus de 90 millions de tonnes en 2011, tous métaux confondus (environ 85000 tonnes en Suisse). Les pièces produites couvrent une vaste gamme de taille et de masse, allant des dents qui composent les fermetures-éclairs aux hélices de navires. Les nombreux alliages utilisés permettent d'obtenir des propriétés physiques et mécaniques très variées. Parmi les avantages de cette méthode, citons la possibilité de produire des pièces à géométrie complexe, un coût de production faible, très peu de pertes de matière lors de la production, et une adaptation aisée à la production de masse. Quelques désavantages sont l'état de surface et les tolérances des pièces obtenues, souvent moins bonnes qu'avec d'autres méthodes, ainsi que des questions relatives à la protection de l'environnement, dus aux rejets et aux pollutions que peuvent générer les fonderies.

Après explication des concepts de base entrant en jeu, nous présentons les principales méthodes de moulage ainsi que les caractéristiques des pièces obtenues. Nous terminons par une étude de coût de production d'une pièce réalisée par une de ces techniques. [3]

I.2.Le Moulage :

Le moulage des métaux consiste à verser du métal fondu dans un moule réalisé selon la pièce à produire, à le laisser solidifier puis à récupérer la pièce de métal. Pour une bonne compréhension du procédé, quelques principes physiques entrant en jeu doivent être compris. Il s'agit essentiellement du flux de métal lors du remplissage du moule, de la solidification et du refroidissement du métal et de l'influence du matériau qui constitue le moule. [3]

Les étapes du moulage semblent simples :

1. Fondre le métal

2. Le verser dans le moule

3. Le laisser refroidir

I.2.1 Moulages en moules permanents

Les techniques de moulages en moules permanents se basent sur l'utilisation des moules en métal généralement en acier ou en fonte. Les deux méthodes principales entrant dans cette catégorie se différencient par la manière dont le moule est rempli de métal fondu. Il peut être versé, remplissant le moule par gravité, ou injecté sous pression. Il existe également d'autres méthodes de moulage en moules permanents, comme le moulage par centrifugation. Ces méthodes sont caractérisées par un faible coût de production, mais un investissement initial important. Elles conviennent donc particulièrement à la production de grandes séries.

L'utilisation de moules en métal restreint le choix des alliages pouvant y être coulés à ceux dont le point de fusion est inférieur à celui du métal du moule. Les plus courants sont les alliages de zinc, cuivre, aluminium ou magnésium, mais également les aciers et les fontes, suivant le moule utilisé.

Les pièces obtenues sont précises, grâce à la grande rigidité du moule et présentent de bons états de surface. [3]

I.2.1.1 Moulage en coquille

On appelle coquille (fig. I.1) un moule métallique divisé en deux parties suivant le plan de joint et contenant une ou plusieurs empreintes qui lui donnent des formes extérieures. Pour l'obtention des formes intérieures, les trous, les orifices, On coule directement le métal liquide à l'aide d'une louche ou d'une petite poche de coulée par gravité dans l'empreinte du moule métallique qui peut comporter ou non des noyaux métalliques ou destructibles suivant les pièces à fabriquer et leur complexité. [1]



Figure (I.1) Exemple de coquille [2]

I.2.1.1.1 Principe du moulage en coquille :

Le moulage en coquille (Figure I.2) est un procédé de fonderie utilisant un moule métallique et une coulée par gravité. C'est le procédé qui est utilisé en général pour les grandes séries. Il est plutôt réservé aux alliages légers à bas points de fusion (alliages d'aluminium, zinc...) car la coulée dans les moules de pièces dont la température de fusion est trop élevée provoque la dégradation rapide des éléments du moule.

Le procédé se décompose comme suit. Les matrices du moule (a), préalablement usinées, moulées ou obtenues par Electro Erosion par Enfonçage sont préparées à la coulée du métal par chauffage (application d'un revêtement sur l'empreinte afin d'éviter le collage des pièces) puis assemblées (b). La mise et le maintien en position sont en général assurés par des actionneurs pneumatiques. La coulée est alors réalisée (c). La conductivité et la capacité thermique du métal étant importantes, la vitesse de refroidissement de l'alliage dans le moule est très élevée. La solidification a donc lieu très rapidement et les matrices sont séparées (d).

La pièce avec les reliquats du système de remplissage et d'alimentation forme alors une grappe (e) qu'il conviendra d'extraire puis d'ébarber (f). Le cycle reprend ensuite. [2]

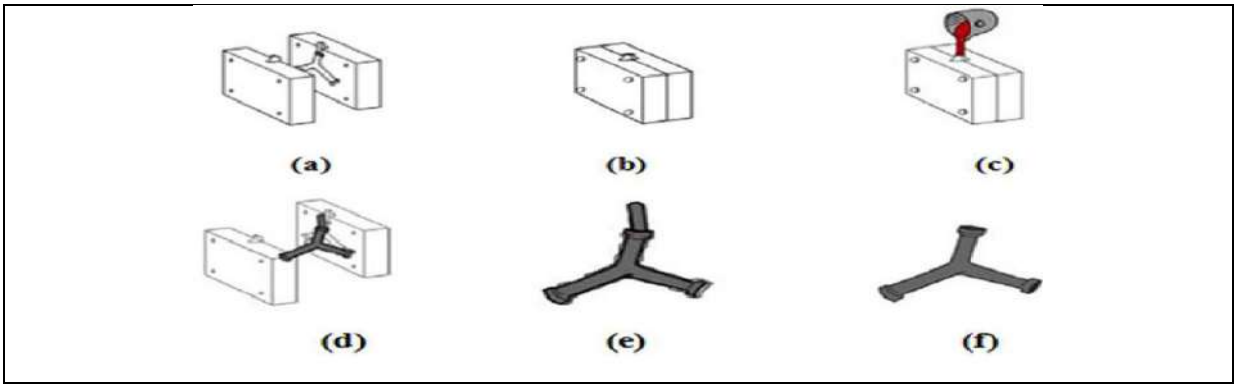


Figure (I.2) Principales étapes du procédé de moulage en coquille, (a) : matrices de moule, (b) : assemblage, (c) réalisation de la coulée, (d) : séparation des matrices, (e) : formeur de grappe (f) : d'extraire puis d'ébarber [2]

I.2.1.1.2 Caractéristiques du procédé :

Pour mieux définir ce procédé, on peut donner les avantages techniques qu'il apporte par rapport au moulage en moules non permanents. Pour cela, il faut considérer que la permanence du moule, imposant les métaux comme matériaux constitutifs, entraîne les caractéristiques suivantes d'une coquille :

- rigidité de l'empreinte ;

- grande précision dimensionnelle et d'état de surface des éléments moulants ; conductibilité thermique élevée des mêmes éléments (l'utilisation de noyaux en sable aggloméré est possible puisque la charge métallo-statique est la même qu'en moules non permanents, par contre ces noyaux ont une conductibilité thermique différente que le reste du moule). Il en découle donc pour les pièces moulées en coquille :

Un bon état de surface : il faut noter cependant que celui-ci n'est pas la réplique exacte de l'empreinte métallique puisque cette empreinte est recouverte d'un enduit protecteur qui affecte l'état de surface de la pièce ; des bonnes caractéristiques mécaniques : conséquence de la vitesse de refroidissement et de solidification plus élevée de l'alliage ;

Génération des contraintes résiduelles à l'état brut de coulée qui demandent un traitement thermique de stabilisation de la pièce ;

Une grande précision dimensionnelle résultant de la rigidité de la coquille et les moyens d'usinage utilisés pour la fabrication de celle-ci.

Certaines formes habituellement usinées sont obtenues brutes de moulage comme les trous de fixation et les surfaces d'appui des têtes de vis en particulier. On peut noter aussi une réduction générale des surépaisseurs d'usinage. [1]

- Exemple de pièces moulées par gravité:



Figure (I.3) Pièces moulées par gravité [2]

I.2.1.2 Moulage a basse pression :

Le moule est placé directement sur le four de coulé. L'alliage liquide contenu dans un creuset étanche en graphite est refoulé dans le moule par une pression d'air comprimé ou d'azote appliquée sur la surface du métal. Le métal monte dans le tube d'injection réfractaire et pénètre dans le moule par un trou de coulée situé à la partie inférieure du moule. La pression est maintenue pendant tout le temps de la solidification de la pièce puis, au moment où l'on relâche la pression, tout le métal resté liquide dans le tube d'injection redescend dans le four, Les moules sont généralement métalliques, mais les faibles pressions qui ne dépassent pas 0,1 MPa, et qui sont de l'ordre de 40 à 60 KPa pour des pièces en aluminium par exemple, autorisent l'emploi de moules et de noyaux en sable aggloméré. [1]

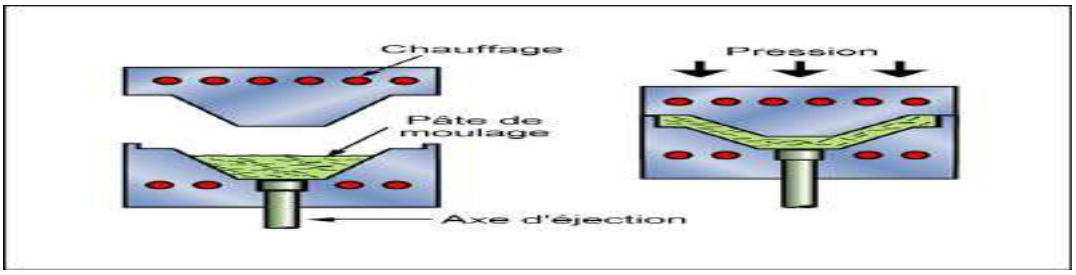


Figure (I.4) Pièces moulées à basse pression [2]

I.2.1.3 Moulage à haute pression :

Le moulage à haute pression (pressure die casting) se divise en deux catégories de base : le procédé à chambre chaude (hot-chambre procès) et celui à chambre froide (cold-chambre procès).

Le procédé à chambre chaude (figure I.6) utilise un piston, qui force le métal fondu dans le moule à travers un col de cygne (gooseneck). Le piston est donc immergé dans un bain de métal fondu, maintenu à température par un four à creuset, d'où le terme « chambre chaude ». Les pressions utilisées sont de l'ordre de 15 MPa (150 atm). Comme dans le cas du moulage à basse pression, la pression est maintenue jusqu'à solidification du métal dans le moule. Le fait que le piston et le système d'injection soient immergés dans le métal en fusion limite l'utilisation de ce procédé aux métaux à bas point de fusion, en général des alliages de zinc, magnésium, étain ou plomb.

Cette limitation est levée en utilisant le procédé à chambre froide (figure I.6), adapté à la production de pièces en acier ou en alliages d'aluminium ou de cuivre. A chaque cycle de

production, la quantité de métal fondu correspondant au volume à injecter dans le moule est versée devant le piston, par un orifice de remplissage. On peut verser le métal fondu manuellement ou à l'aide d'un système de coulée automatisé. La pression appliquée lors de l'injection est comprise entre 20 et 70 MPa, mais peut atteindre 150 MPa. 10

Pour ces deux techniques de moulages à haute pression, les machines utilisées sont classées principalement en fonction de la force qu'elles exercent sur le moule pour contrer l'effet des pressions appliquées lors de l'injection. On trouve des machines capables d'exercer des forces de fermetures comprises entre 0.2 et 30 MN (20 à 3000 tonnes-force).

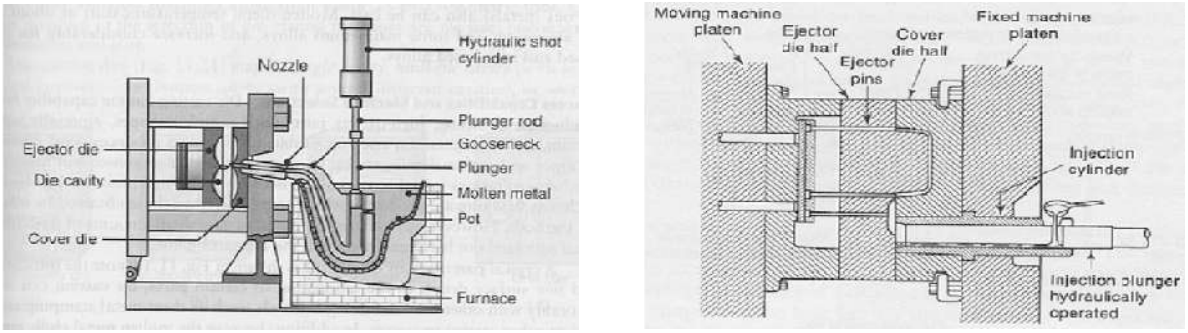


FIGURE (I.5) : Système de moulage à haute pression

I.2.1.4 Moulage en coulée continue :

I.2.1.4.1 Description du procédé :

Après fusion et traitement éventuel dans un four de maintien, le métal liquide est coulé dans une filière ou une coquille, refroidie par circulation d'eau, ayant la forme du profil à fabriquer. A la sortie de cette filière, une couche solidifiée assure la tenue de l'ensemble jusqu'à la fin de la solidification. La pellicule d'alliage solidifiée, d'épaisseur contrôlée, présente un certain retrait lors de sa solidification, ce qui facilite son décollement de la coquille, alors que le métal au centre du profilé est encore liquide, formant une sorte de V plus ou moins effilé. La barre profilée, totalement solidifiée à une distance également réglée à partir de la coquille (longueur de V), est tirée au moyen de galets commandés qui servent également de guides pour soutenir la barre encore chaude en la maintenant rectiligne, l'extraction des barres peut se faire à vitesse constante ou par à-coups. Après solidification, et toujours en continu, les barres sont tronçonnées à la longueur voulue, voir la (figure I.5). [1]

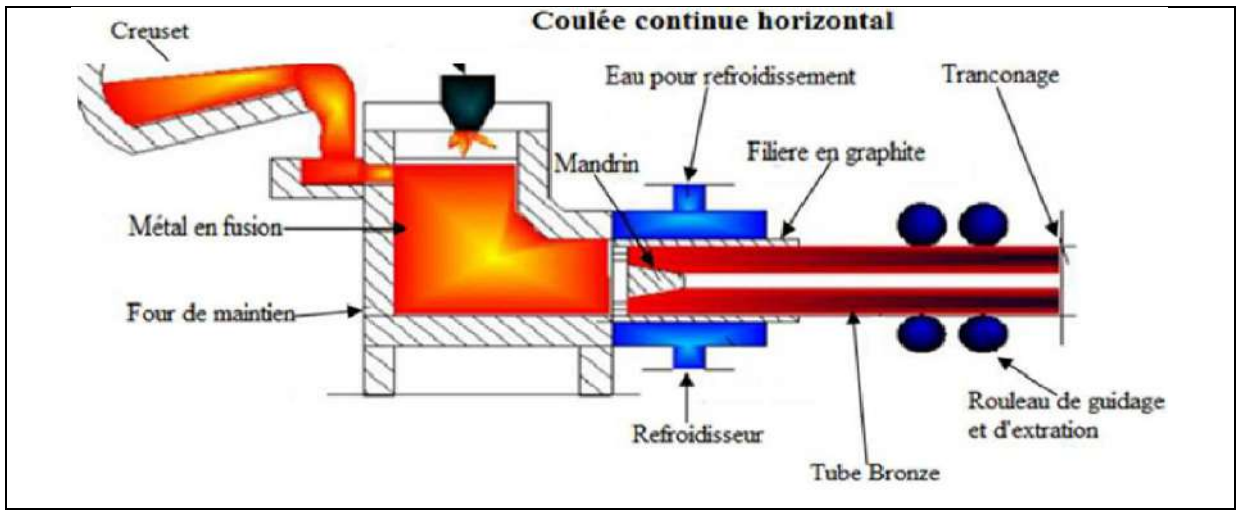
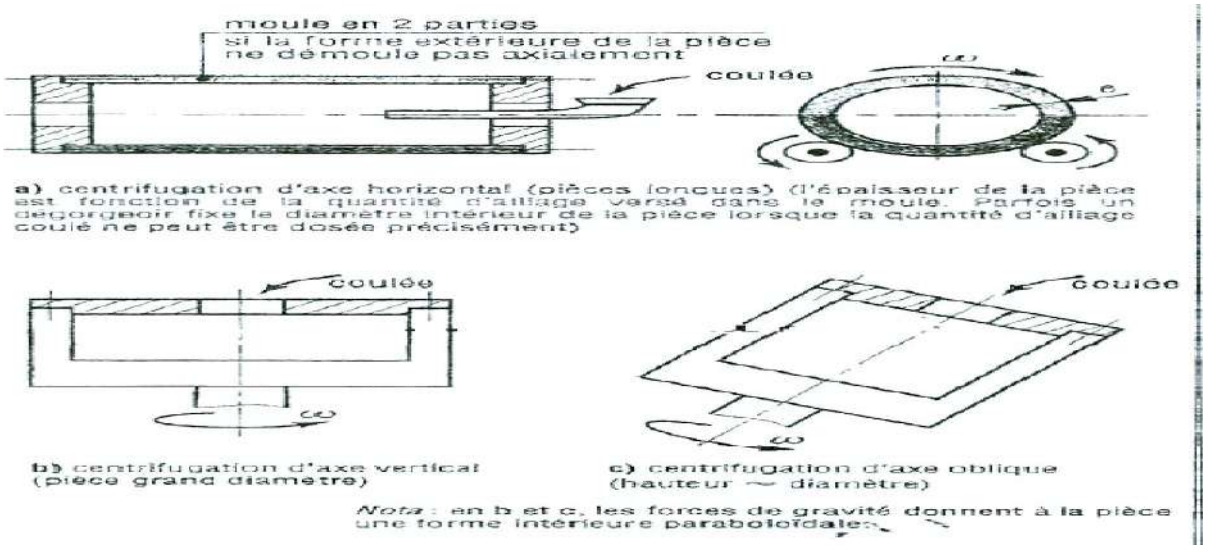


Figure (I.6) Schéma de machine de coulée continue horizontale [1]

I.2.1.5 Moulage par centrifugation :

La même surface moulante permet la réalisation d'une centaine à plusieurs milliers de pièces. La centrifugation en moules non permanents nécessite au contraire la réfection de la surface moulante avant chaque coulée. La machine de centrifugation est d'axe horizontal, vertical ou oblique. Le moule est directement entraîné en rotation. Les moules (appelés aussi coquilles) sont métalliques (fonte, acier, cuivre) ou en graphite. Les accélérations appliquées à l'alliage coulé sont de plusieurs dizaines de fois l'accélération de la pesanteur (g).



I.2.2 Moulage en moule non permanent :

Moule non-permanent est un moule qui ne sert qu'une seule fois, pour réaliser une pièce. Pour chaque pièce brute de coulée produite, le moule est détruit.

La structure d'un moule non permanent est principalement réalisée avec des matériaux de moulage, composée d'une ou de plusieurs parties et offrant après assemblage un évidement appelé empreinte. Cette empreinte correspond à la future pièce brute, tout en tenant compte du système d'attaque, du système d'alimentation et du retrait à l'état solide Les formes intérieures des pièces sont généralement données par des noyaux, qui sont des éléments démoule réalisés séparément avec un outillage spécial, cette structure est désagrégée (décochage) pour extraire la pièce brute solidaire du système de remplissage et du système de masselotte, la réalisation d'une autre pièce conduise à la fabrication d'un autre moule. Les techniques les plus employées sont le moulage au sable et la cire perdue. [1]

I.2.2.1 Moulage en sable :

C'est l'un des procédés les plus courants du moulage des métaux et qui consiste à utiliser un modèle en métal, ou en bois pour former une empreinte en tassant un sable relativement fin, additionné d'un liant, afin d'obtenir un moule réfractaire.

Le moule se compose de deux parties essentielles:

- Un châssis inferieur rempli du sable dans lequel se trouve en creux la partie principale de l'empreinte du modèle.

- Un châssis supérieur qui sert de couvercle et qui peut aussi contenir une partie de l'empreinte. Le métal liquide est coulé dans l'empreinte par un trou de coulée aménagé à cet effet. Après solidification par refroidissement naturel, on obtient une pièce ayant la forme de l'empreinte. [1]

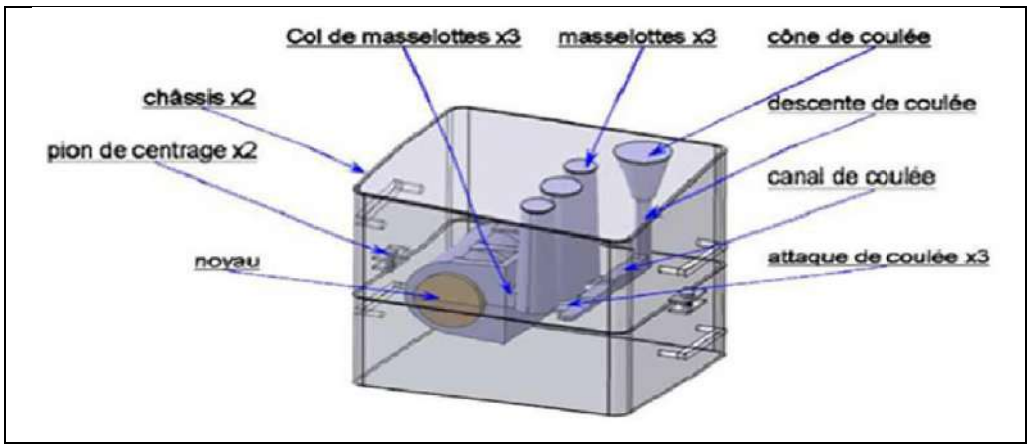


Figure (I.7) Principe du moulage en sable [2].

I.2.2.1.1 Principales étapes du procédée du moulage en sable :

Le moulage en sable (Figure. I.7) est un procédé de fonderie utilisant un moule destructible et une coulée par gravité (assez rarement par centrifugation). C'est le procédé qui permet la production des pièces de plus grande taille. Il offre au concepteur plus de liberté que le moulage coquille au niveau de la complexité des formes mais la qualité des surfaces est comparativement plus mauvaise que celle obtenue par les autres procédés présentés ici et sa mise en œuvre est plus complexe. Le procédé se décompose comme suit.

Des plaques modèles en bois ou plastiques, répliques partielles de la pièce finale souhaitée sont placées dans des châssis métalliques (a). Relativement à la pièce finale souhaitée, les dimensions des plaques modèles sont augmentées afin de compenser le retrait volumique engendré lors de la solidification du métal. Les formes du système de coulée doivent également être prévues. Le volume restant des châssis est alors rempli (b) avec un sable spécifique (base de silice, argile avec un taux d'humidité contrôlé et éventuellement des additifs chimiques ou liants). Suivant la nature du sable utilisé, un compactage manuel ou mécanique est effectué (sable à vert) ou une réaction chimique de durcissement aussi appelée prise est déclenchée (sable aggloméré prise chimique à froid ou prise à chaud). Les modèles sont séparés de leur empreinte en sable (c). Les châssis sont ensuite réunis en y insérant éventuellement des noyaux de sable qui permettront de créer les formes intérieures (d). La mise en position des châssis, afin d'avoir les empreintes bien en regard, doit être prévue et on utilise pour cela des pions de centrage. Le maintien en position des châssis est assuré par leur propre masse. Si celle-ci est Si celle-ci est insuffisante, on ajoute des masses de serrages supplémentaires posées sur le châssis supérieur (e). La coulée est alors réalisée (f). Le flux

thermique au contact métal/sable entre l'alliage et le moule étant très faible, la solidification est donc lent. On sépare ensuite les châssis de la pièce en détruisant le sable du moule et du noyau par vibrations (g). Là encore, la grappe récupérée (h) devra être ébarbée puis sablée ou grenaillée afin d'obtenir la pièce brute finale (i). [2]

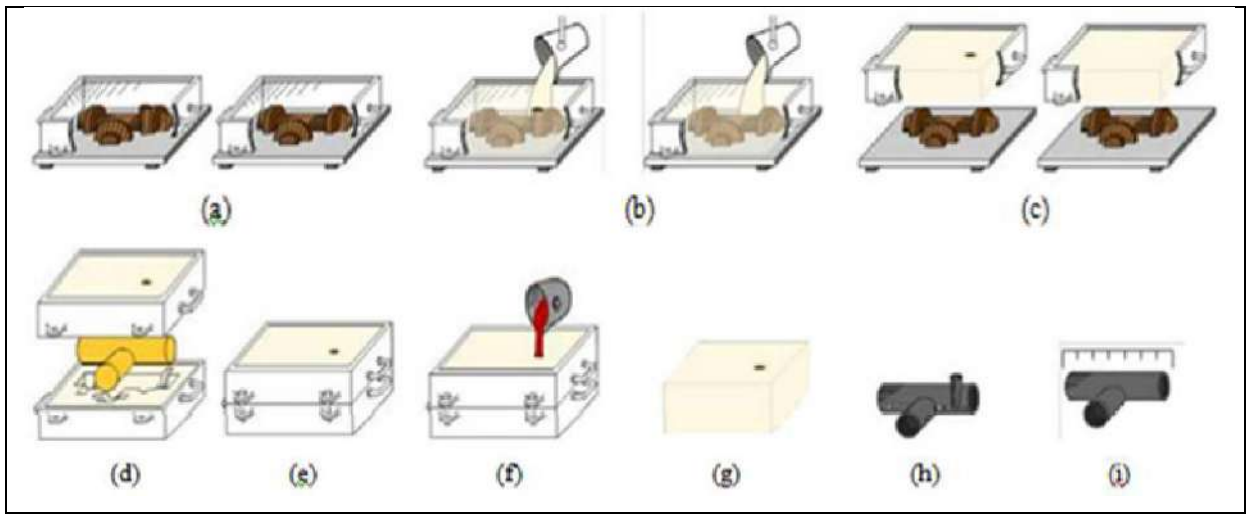


Figure (I.8) Principales étapes du procédé de moulage au sable, (a): châssis métalliques,(b): remplissage de châssis,(c): séparation de modèle,(d): insertion de noyaux de sable,(e): mise en position des châssis : La réalisation de la coulée,(g): détruisant le sable du moule,(h): récupération de la grappe,(i): pièce final [2]

I.2.2.1.2 Caractéristiques du procédé :

1). Le moulage en sable présente les avantages suivants:

- Il peut être utilisé pour des pièces de 150 à 200 tonnes.
- Il permet de réaliser une grande variété de formes.
- On peut couler des métaux ayant une température de fusion dépassant 1100°C.

2). Ce type de moulage comporte les inconvénients suivants:

La surface de la pièce moulée contient du sable, ce qui cause une usure rapide des outils de coupe.

- Les pièces du moulage en sable ont des propriétés mécaniques bien plus faibles que celles du moulage en moule métallique à cause du refroidissement / environnement du métal. Ainsi, aucune direction des grains n'est obtenue et la pièce moulée résiste mal aux efforts de

traction et de pliage, c'est pour cela que ce genre de procédés est limité au bloc moteur complexe, aux culasses et toutes pièces généralement creuses.

- Lors du refroidissement, les pièces sont portées à se déformer à cause de la variation des épaisseurs ou du refroidissement inégal.

I.2.2.2 Moulage en cire perdue :

La fonderie en cire perdue, parfois appelée fonderie de précision, est une méthode qui ressemble au moulage au sable, mais qui présente l'avantage de réaliser des pièces avec une précision bien meilleure. Le moule est réalisé en céramique à partir de modèles en cire. Des modèles de la pièce à réaliser sont fabriqués en cire, par différentes méthodes suivant L'importance de la série : injection pour des grandes série, prototypage rapide, moules silicones. Les modèles sont ensuite reliés sous forme de grappes de pièces par des éléments en cire qui représentent les futurs canaux d'alimentation. Cet assemblage est plongé plusieurs fois dans un bain appelé barbotine, puis recouvert de sable réfractaire afin de former une couche suffisamment résistante pour supporter la coulée du métal. L'ensemble est placé dans un four pour éliminer la cire, puis cuire la céramique. Enfin le métal choisi est coulé dans le moule ainsi formé, puis le moule est cassé et les pièces séparées de la grappe. La précision des modèles en cire perdue et la gestion des dilatations dues à la température détermineront la précision de la pièce finie.

I.2.2.2.1 Principe de moulage à la cire perdue :

Le moulage à la cire perdue (Figure. I.8) est un procédé de fonderie utilisant un moule céramique destructible et une coulée par gravité. C'est le procédé le plus complexe dans sa mise en oeuvre et celui qui est utilisé en général pour les séries de pièces plutôt de petite taille et/ou de formes très complexes. La variété des formes qu'il autorise en fait le procédé de prédilection des artistes. Son coût de revient est élevé mais est contrebalancé par le fait qu'il puisse donner des pièces, c'est-à-dire finies et ne nécessitant pas (ou peu) d'opérations d'usinages supplémentaires. Le procédé se décompose comme suit : dans une matrice d'injection préalablement réalisée, on injecte de la cire liquide (a) qui, une fois solidifiée donnera le modèle de la future pièce. Plusieurs modèles sont en général coulés simultanément sur une grappe. On constitue donc au préalable la grappe en soudant les modèles en cire sur le dispositif de coulée (b). Les grappes sont d'abord trempées dans la barbotine, (liquide base de silice colloïdale, solution hydrolysée de silicate d'éthyle) (c) puis le sable réfractaire est

pulvérisé sur les grappes encore humides (d). Après séchage, les opérations (c) et (d) sont recommencées plusieurs fois constituant une carapace céramique autour de la grappe. La cire des modèles est éliminée par fusion dans une étuve (e) Les carapaces sont cuites (f) dans un four à haute température (+ 1 000°C) afin de leur donner des caractéristiques mécaniques leur permettant de résister aux sollicitations lors de la coulée. La carapace chaude est placée sous le creuset et le métal est coulé (g). Après refroidissement, la carapace en céramique est détruite par vibrations et grenaillage (h). Les pièces sont séparées des barreaux d'alimentation par tronçonnage (i). Les attaques de coulée sont supprimées par meulage (j). La qualité des surfaces de la pièce est généralement telle, qu'elle est directement utilisable.

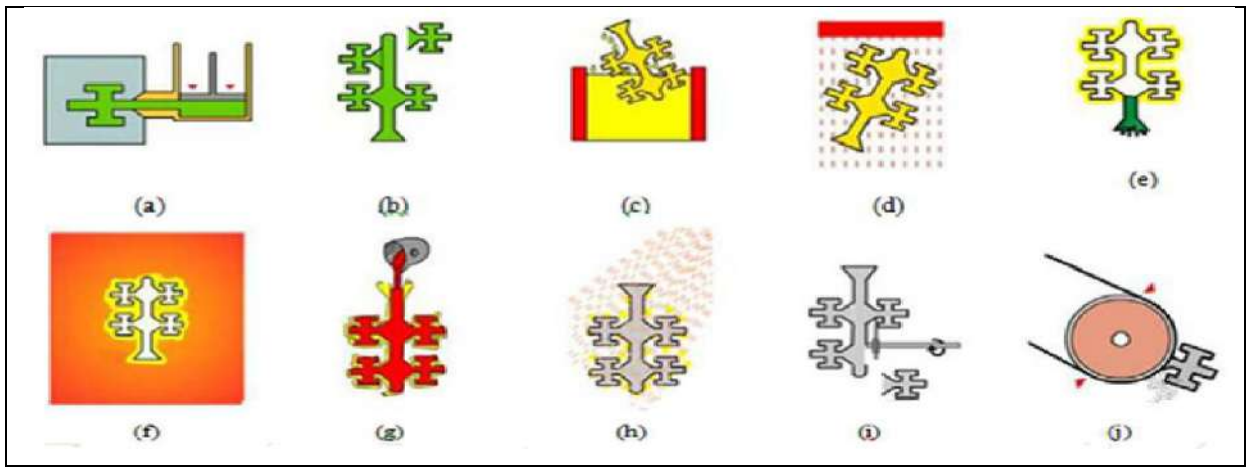


Figure (I.9) : Principales étapes du procédé de moulage à la cire perdue, (a) :injection de la cire liquide, (b) :soudé les modèles, (c) :les grappes trempée dans le sable, (d) : pulvérisé le sable réfractaire, (e) : fusion dans une étuve, (f) : les carapaces sont cuites, (g) :placement les carapaces sous le creuset, (h) : refroidissement et détruire les carapaces, (i) :séparation des pièces : supprimer les attaque de coulée [2]

I.2.2.2.2 Caractéristiques du procédé :

L'avantage de ce procédé c'est que ce dernier permet l'obtention de tolérances serrées permettent de minimiser les usinages et donc les coûts. En plus, le choix de matériaux est très varié, y compris des nuances non usinables. En plus, ce procédé possède les propriétés et les avantages suivants :-reproduction de formes complexes avec une grande précision de détail et de taille.

- grande liberté et flexibilité de design, de la pièce simple à la pièce complexe
- précision dimensionnelle accrue, brut de fonderie

- élimination ou forte réduction de l'usinage
- réduction du risque d'inclusion et de craqures
- surface de peau excellente, brut de fonderie

Le procédé permet de respecter certains propriétés métallurgiques telles que la grosseur et l'orientation des grains, ce qui permet d'augmenter la dureté de la pièce et ainsi d'éviter le forgeage.

I.2.3 Avantages et inconvénients du moulage non permanent :

I.2.3.a Avantages :

- Permet de réaliser des pièces de formes complexes
- Permet de réaliser des formes intérieures et extérieures
- Suivant les procédés de moulage on peut obtenir des pièces dont les dimensions sont plus ou moins proches de la pièce finie
- On peut réaliser des pièces de très grande dimension
- Certains procédés de moulage permettent une production en très grandes séries.

I.2.3.b Inconvénients :

Les inconvénients dépendent des procédés de moulage :

- Limitation des propriétés mécaniques des pièces (matériau)
- Faible précision dimensionnelle et mauvais état des surfaces pour certains procédés

(ex : moulage en sable)

- Procédés dangereux du fait de la manipulation de métaux en fusion
- Problèmes environnementaux (fumées…)

I.2.4 Le matériau utilisé pour la fabrication des moules métalliques :

Pour la fonderie avec moule permanent, celui-ci est réalisé en métal (acier ou fonte). On appelle souvent ce moule « coquille ».

Contrairement au moulage sable, il n'y a pas de décochage de la pièce, mais un démoulage.

C'est donc toujours le même moule qui est utilisé pour réaliser toutes les pièces d'une série.

Le moule est en :

- acier (5 % de chrome) ou en fonte en moulage coquille gravité (ou basse pression)

- acier (5 % de chrome) de type X38 CrMoV5 (désignation normalisée) en moulage sous pression. L'acier, après usinage, subit un traitement thermique constitué d'une trempe et de deux (ou trois) revenus. La dureté finale visée est de 45 à 55 HRC environ.

I.2.5 La constitution du moule :

- de la carcasse (en acier moins noble) qui a pour rôle de maintenir les empreintes et d'assurer le bridage sur le plateau de la machine à mouler.

- des empreintes en contact avec le métal liquide. Ces empreintes sont traitées thermiquement et peuvent faire l'objet de traitements de surface.

- d'un système d'éjection (pour sortir des pièces) constitué d'éjecteurs et d'une batterie d'éjection (plaque, contreplaque, ...).

I.3 Défaut de moulage :

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

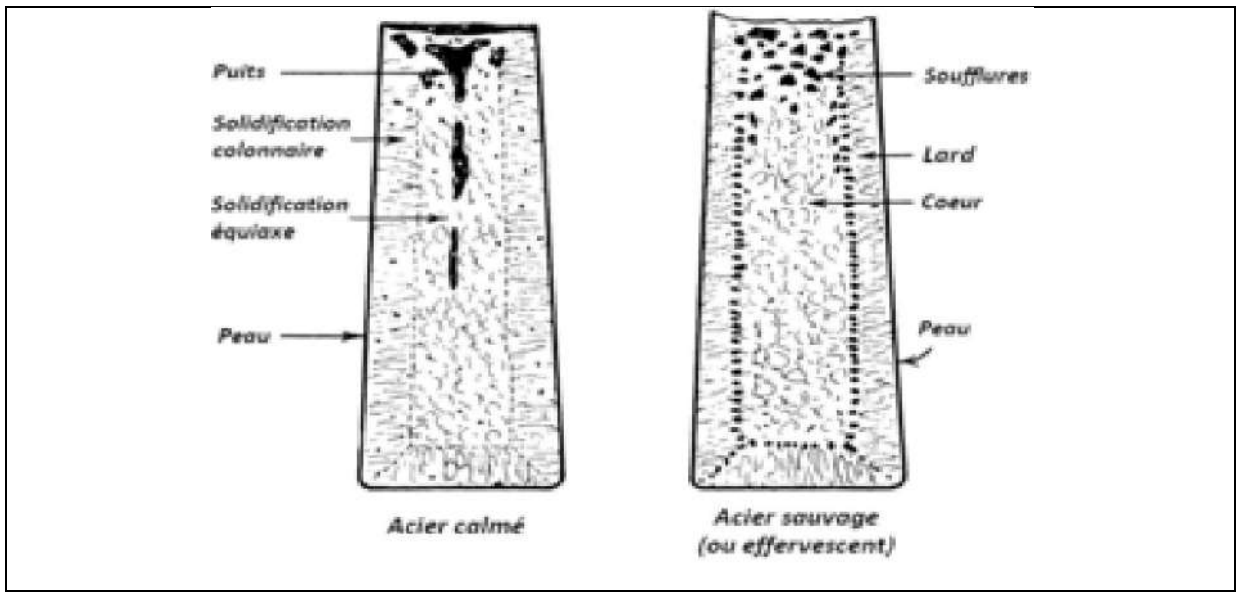


Figure (I.10) Défauts observables sur un lingot d'acier coulé

I.3.1 Types de défauts :

On peut distinguer cinq catégories de défauts, en se fondant sur leur mécanisme de formation : les défauts formés pendant le retrait lié à la solidification, ceux dus au gaz, ceux liés au matériau avec lequel est réalisé le moule, ceux formés pendant le remplissage du moule et les défauts métallurgiques. L'apparition d'un défaut peut toutefois résulter de la combinaison de plusieurs phénomènes. Un correctif apporté au procédé pour éviter la formation d'un défaut peut aussi créer un défaut d'un autre type. [4]

I.3.1.1 Défauts formés pendant le retrait de solidification :

a. Les retassures: Cavités ouvertes ou fermées à contours rugueux, localisées dans les dernières portions de métal solidifié. Elles sont dues aux contractions de volume subies par le métal liquide au cours de la solidification. [5]

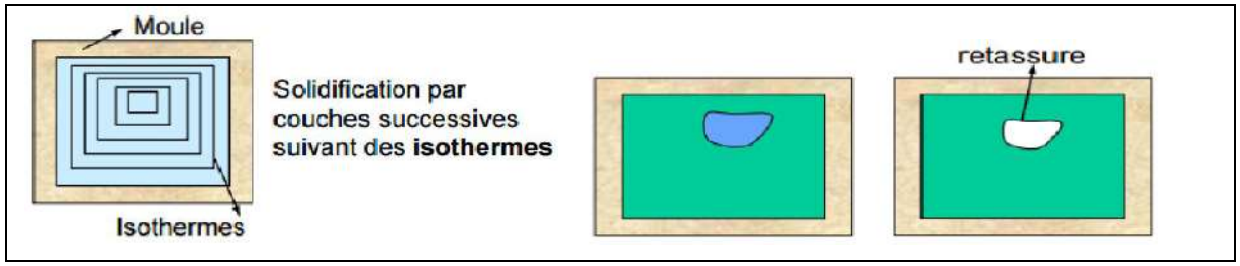


Figure (I.11) La forme et l'emplacement de la retassure dépendent des conditions de refroidissement. [5]

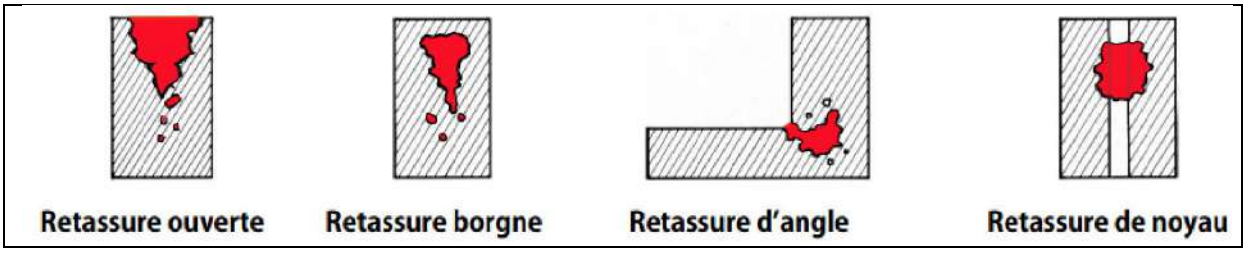
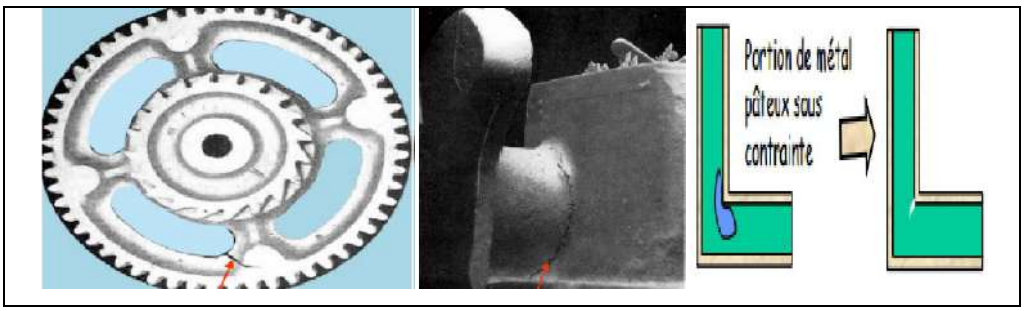


Figure (I.12) Ce défaut de retrait apparait lorsque le métal liquide ne parvient plus à compenser les contractions dues à la solidification du métal: on lutte contre sa formation par un dimensionnement et un positionnement correct de la (des) masselotte(s), qui va (vont) alimenter la pièce en métal liquide au cours du retrait. Si la (les) masselotte(s) est (sont) correctement conçue(s), elle(s) sera(ont) la (les) dernière(s) zone(s) solidifiée(s) et il est normal qu'elle(s) soit(ent) constellée(s) de défauts dus au retrait. [5]

b. criques: Il s'agit d'une déchirure à chaud qui se produit au cours de la solidification en présence de contraintes mécaniques. Elle se développe généralement dans les parties chaudes. [5]



c. Les tapures: Il s'agit d'une déchirure qui se produit au cours du refroidissement du solide, en présence de contraintes mécaniques. Elle se développe généralement dans les parties encore chaudes et est due à une contraction thermique. [5]

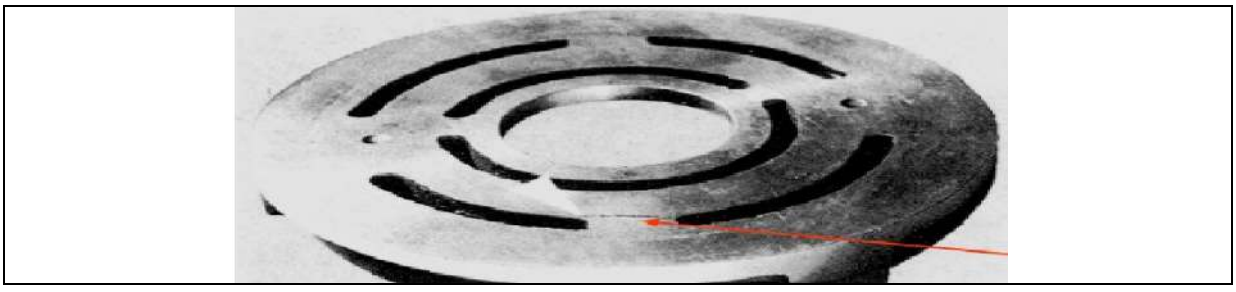
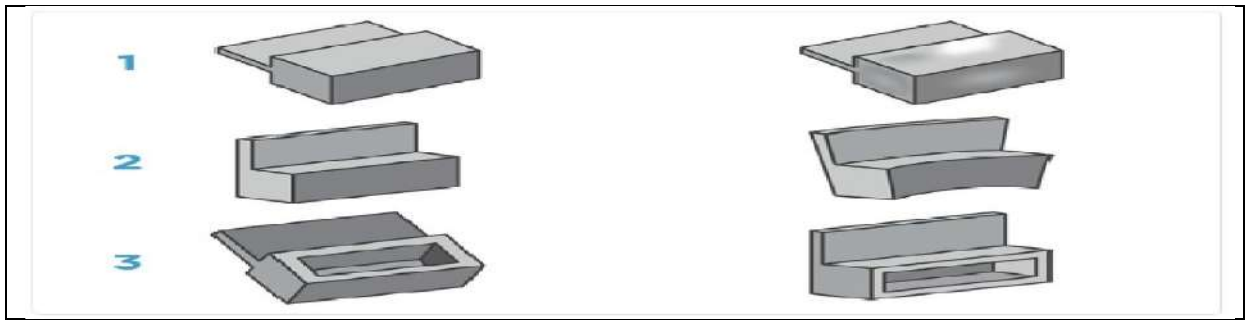


Figure (I.13) Les criques et les tapures sont dues à un tracé défectueux (différences d'épaisseur importantes, moulage trop ramifié) ou à l'état du moule (rigidité, déformation, rugosité, etc).

d. Le gauchissement: Une pièce conçue avec des parois trop minces pour le matériau cible risque fortement de se gondoler. Ce phénomène est désigné par le terme de « gauchissement » et peut être évité aisément en suivant les mêmes règles que pour la retassure, c'est-à-dire en respectant les indications générales d'épaisseur de paroi. [5]



I.3.1. 2.Défauts dus au gaz :

Les « porosités », ou les « soufflures » si le défaut est plus important et ponctuel, sont les principaux défauts de moulage dus au gaz, et correspondent à la formation de bulles de gaz dans le métal pendant sa solidification. [5]



Figure (I.14) Porosités sur un cube de lutécium de 1 cm de côté

Ce phénomène est dû au fait que la plupart des matériaux peuvent contenir une plus grande quantité de gaz dissous à l'état liquide qu'à l'état solide. Le gaz dissous est donc rejeté au moment de la solidification, jusqu'à former des bulles. Lors du retrait volumique de solidification, une partie du gaz dissous en phase liquide ne parvient pas à s'échapper correctement du métal, et vient générer les défauts observés (porosités visibles sur la photo du cube de lutécium). Ces bulles sont facilement décelables lorsqu'elles débouchent à la surface de la pièce : elles apparaissent comme une « piqure » ou un cratère. Cependant, elles peuvent également rester piégées au sein du métal, affaiblissant alors dangereusement la pièce moulée. Les bulles de gaz sont susceptibles d'engendrer des contraintes internes aux pièces moulées.

L'azote, l'oxygène et l'hydrogène sont les gaz les plus fréquemment trouvés dans les soufflures. Dans l'aluminium en fusion, l'hydrogène est le seul gaz susceptible de se dissoudre dans des quantités suffisantes pour créer des bulles de gaz : pour des pièces de quelques kilos, le dégagement d'hydrogène génère une porosité avec des cavités mesurant de 0,01 à 0,5 mm, qui dépassent même 1 mm de diamètre sur les grosses pièces moulées. [4]



Figure (I.15) Soufflure dans une pièce en acier moulé.

Pour limiter l'absorption de gaz par le métal en fusion, on peut traiter le métal avant la coulée, en le maintenant sous une couche de laitier, sous vide ou sous une atmosphère de gaz peu solubles, comme l'argon. On limite aussi la solubilité des gaz en travaillant avec des surchauffes (écart entre la température de coulée et celle du liquidus) faibles. Réduire les turbulences au moment de la versée du métal dans le moule, en travaillant la forme des canaux d'alimentation et la vitesse de remplissage est également favorable. Sécher le moule évite aussi les reprises en hydrogène. On dimensionne donc la pièce moulée ainsi que le moule associé selon les paramètres Physico-chimiques de l'environnement.

Lorsque le métal a, malgré les précautions prises, absorbé trop de gaz pour donner des pièces saines, il est possible de le traiter. Différentes méthodes peuvent être employées. La précipitation, qui consiste à faire réagir le gaz dissous avec un élément plus réactif que le métal en fusion, est une des plus courantes. L'élément ajouté, après avoir réagi avec l'oxygène, va former un oxyde qui va flotter à la surface du métal liquide. Cette méthode est très efficace vis-à-vis de l'oxygène : une addition de phosphore désoxyde le cuivre liquide ; le ferromanganèse, le silicium ou l'aluminium sont utilisés pour désoxyder l'acier. On peut également garnir les parois du moule d'un élément ayant ce rôle. Une autre méthode consiste

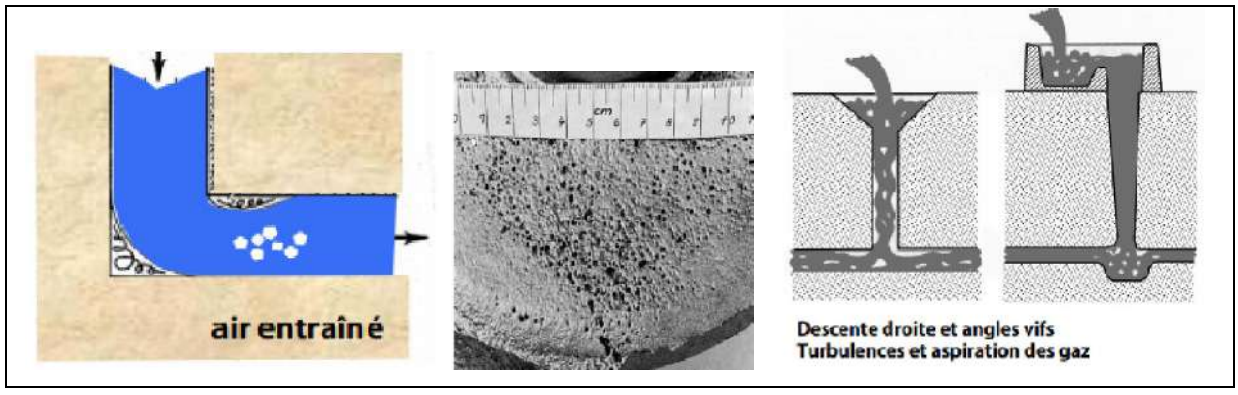
à dégazer le métal en le soumettant au vide : le gaz s'échappe alors comme les bulles s'échappent d'une boisson gazeuse lorsqu'on ouvre la bouteille note. Il est également possible de saturer le bain d'un gaz peu soluble (comme l'argon) pour chasser les autres gaz. Ces méthodes pneumatiques sont fréquemment utilisées pour ôter l'hydrogène de l'acier liquide note. [5]

La détection des soufflures est difficile. Elles peuvent être confondues avec des cavités produites par d'autres phénomènes (retrait dû à la solidification, etc) lorsqu'elles sont remplies de gaz. Les méthodes de détection utilisées actuellement sont la radiographie, le contrôle par ultrasons et la magnétoscopie. En somme toute, on utilise des méthodes de Contrôle non destructif afin de caractériser l'état d'intégrité des structures moulées sans les dégrader.

Les soufflures: Cavités à parois lisses crées et occupées par les gaz provenant de l'air entraîné pendant le remplissage et non évacué (mauvaise perméabilité du moule), de la réaction métal liquide/moule/poteyage, formées lors des réactions d' élaboration ou provenant du moule (humidité,...). Les soufflures apparaissent comme une piqure ou un cratère. Elles peuvent également rester piégées au sein du métal, affaiblissant alors dangereusement la pièce moulée. [5]

Pour limiter l'absorption de gaz par le métal en fusion, on peut traiter le métal avant la coulée, en le maintenant sous vide ou sous une atmosphère de gaz peu solubles comme l'argon. On limite aussi la solubilité des gaz en travaillant avec des surchauffes, en réduisant les turbulences au moment de la versée du métal dans le moule, en travaillant la forme des canaux d'alimentation et la vitesse de remplissage et en stockant le moule dans un endroit sec pour éviter les reprises en hydrogène.

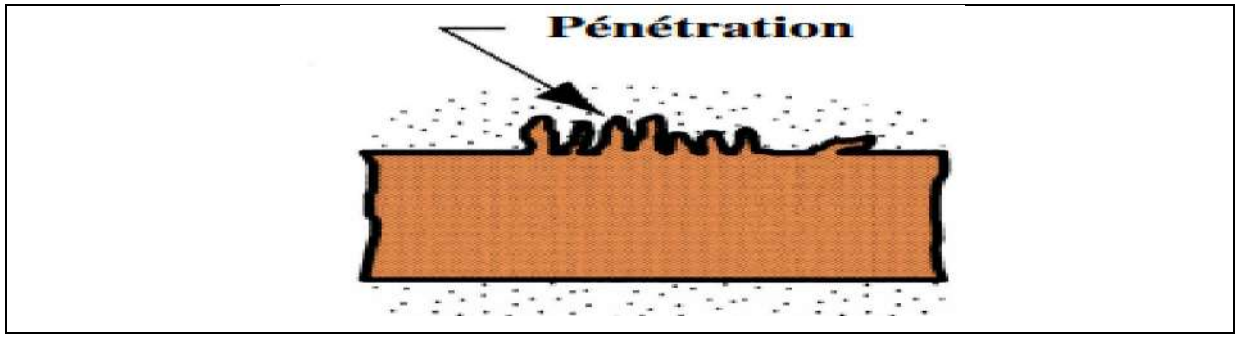
Les méthodes de détection des soufflures utilisées actuellement sont la radiographie, le contrôle par ultrasons et la magnétoscopie.



I.3.1.3. Défaut du au matériau avec lequel est réalisé le moule :

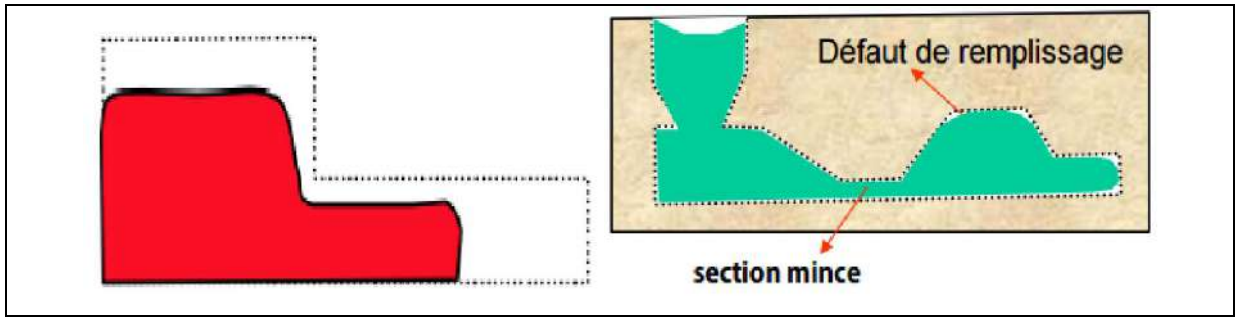
Pénétration: quand le métal coulé est très fluide, il peut pénétrer dans les porosités du sable.

La surface de la pièce est un mélange de métal et de sable.



I.3.1.4 Défaut formé pendant le remplissage du moule :

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



On recense les « gouttes froides », les « manques », les « malvenues »… [5]

Mode de formation des gouttes froides

Concernant le défaut des gouttes froides, défaut également appelé "repli", il existe en fonderie sous pression deux modes de formation. Le premier mode de formation -le mieux connu- est lié à la pulvérisation et au refroidissement rapide du flot de métal sur le moule. Le

deuxième mode de formation, mis plus récemment en évidence, est provoqué par l'apparition de soufflures ou de manques (sous l'effet de la pression de multiplication) pendant la solidification par du liquide eutectique encore en phase liquide ou pâteuse. Il s'agit dans les deux cas d'une soudure incomplète apparaissant lors de la jonction de deux parties du métal liquide. Selon la géométrie du moule, le flot de métal en phase liquide se divise en deux coulées, avant de se retrouver bout à bout : la jointure des deux coulées n'est pas complète et les deux parties de la moulée ne sont pas parfaitement solidaires. Ce défaut est accentuée lorsque la température de coulée est trop faible, ou que la température du moule est insuffisante. En vue d'éradiquer ce défaut, il convient d'augmenter la vitesse de remplissage du moule, d'augmenter la température du moule, d'augmenter la température de coulée, et de modifier l'emplacement des attaques de coulées. En dernier lieu, il convient de repenser la géométrie de la pièce et de redimensionner le moule. [5]

Le mode de formation le mieux connu et sans doute le plus répandu en fonderie sous pression est le refroidissement rapide du flot de métal en phase liquide. Le flot de métal liquide vient heurter une paroi de moule très brutalement. Des gouttelettes se détachent alors et se solidifient séparément. Elles sont ensuite rejointes par le flot de métal principal et sont incluses dans la pièce. La microstructure des gouttes froides est alors localement plus fine (car s'étant solidifiée très rapidement). Dans certains cas (illustration cube de lucétium) plus rare, mais permettant de mettre en évidence le phénomène, les gouttes froides restent isolées (dans une soufflure par exemple ou en surface de pièce).

L'impact des gouttes froides sur la diminution des caractéristiques mécaniques est très faible par rapport à d'autres défauts internes (retassures, soufflures) ou externes (reprises). Des gouttes froides en grand nombre traduisent cependant un problème de remplissage.

Mode de formation des malvenues

Les malvenues correspondent à l'absence de matière dans la pièce moulée. Ce défaut se forme généralement suite au non remplissage de la totalité de l'empreinte du moule. Cela peut être expliqué par une solidification précoce du métal coulé et par un phénomène de reflux de pression. Pour contrer le problème de la solidification prématurée du métal, il convient d'augmenter la vitesse de remplissage du moule. Lorsque ceci semble techniquement difficile, il est également possible d'augmenter la température de coulée. Pour contrer le problème du reflux de pression, qui entraîne une pression inégale au sein de la moulée ainsi qu'un état physique instable, il convient de prévoir dans la conception du moule des dégagements,

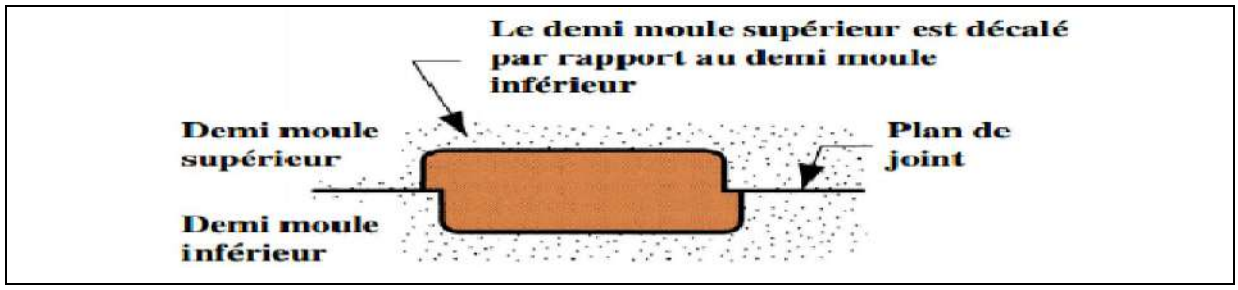
permettant d'évacuer tout surplus de pression engendré par les flots de métal en phase liquide et par les gaz libérés au cours du refroidissement.

Mode de formation des manques de matière

Ce défaut, peu commun et facile à rectifier, correspond à un manque de matière dans le moule. En effet, lors de la solidification d'un métal, c'est-à-dire son passage de la phase solide vers la phase liquide, on observe une rétractation volumique, qui s'explique par une diminution de l'agitation moléculaire généré par une baisse de température. Dans ce cas de figure, il suffit simplement de couleur davantage de métal dans les canaux d'alimentation du moule. Il n'est pas toujours envisageable de couler à nouveau du métal liquide sur une pièce déjà en cours de solidification (variation de propriétés mécaniques). On risque également de voir apparaître un autre défaut de fonderie : les reprises, correspondant à une mauvaise refusions de flots de métal. Dans les faits, en fonderie, l'ajout de masselottes ou le redimensionnement de ces dernières permet de pallier tout manque de matière. [5]

I.3.1.5 Défaut d'élaboration :

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



I.3.1.6.Défauts métallurgiques :

On recense les criques qui peuvent être internes ou débouchâtes. Les criques sont des petites fissures, dues à un retrait irrégulier du métal au cours de sa solidification. Elles se forment principalement dans les angles. Afin d'y remédier, il faut veiller à l'uniformité des épaisseurs des parois (évider de la matière si nécessaire) et arrondir les angles de moulage.

Les criques sont du à la rupture à chaud qui est un défaut majeur en solidification qui amène de nombreuses pièces au rebut en moulage. La rupture à chaud correspond à

l'apparition de criques en fond de zone pâteuse (dans les régions à haute fraction de solide) quand ces régions subissent des déformations qui favorisent la mise en traction des films liquides résiduels. L'ouverture de ces criques fait apparaître soit des filets ségrégés, soit des fissures dans la pièce solidifiée quand la pression interstitielle de liquide est insuffisante pour compenser les ouvertures.

L'influence de l'alliage s'exprime en premier lieu à travers sa composition chimique : de manière générale plus l'alliage a un intervalle de solidification important, plus il est sensible à la fissuration à chaud. Ainsi, par exemple, les effets de la micro-ségrégation tiennent une place importante, et certains éléments (e.g. le soufre et le phosphore) peuvent se révéler avoir une influence tout à fait néfaste. D'autre part, le rôle de la transformation ferrite-austénite est connu. Le retrait associé à cette transformation génère des déformations dans les régions environnantes. Les nuances pour lesquelles la transformation ferrite-austénite a lieu à haute température montrent des déformations plus importantes du fait de la moindre consistance du métal, ce qui peut alors affecter la zone pâteuse et provoquer la rupture.[4]

I.3.1.7.Défauts spécifiques à un procédé de moulage :

a. Défauts de coulée continue :

Dans la coulée continue de produits plats (brames), la « crique longitudinale » est une fissure débouchant située au milieu de la grande face de la brame. Elle fait de 5 à 30 mm de profondeur et est longue de plusieurs mètres. Elle est typique d'un refroidissement inadapté en lingotière, et engendre souvent une « percée » de la peau solidifiée, incident de production coûteux et spectaculaire note.

On rencontre également des « criques transversales », généralement liées à un cintrage ou un décintrage inadapté du produit. Les « gouttières » et le « bombé » sont des déformations longitudinales, respectivement concaves et convexes, typiques d'une mauvaise géométrie de la lingotière. Les « criques internes » sont dues à un mauvais soutien ou guidage du produit dans le refroidissement secondaire : leur position permet d'identifier rapidement l'élément défaillant de la machine.

Au centre du produit, il est fréquent de trouver une « zone de ségrégation », où sont piégés les composés à bas point de fusion. On limite la nocivité de cette zone avec des brasseurs électromagnétiques ou un soutien actif du produit.

b. Défauts de moulage au sable (moule non permanent) :

Les défauts de moulage au sable sont principalement des défauts de surface et des défauts visuels dus à la granulométrie des parois du moule. Pour obtenir une meilleure précision dimensionnelle et un meilleur état de surface, il convient généralement de résiner certaines parties du moule, et notamment les parties fonctionnelles. Ensuite, selon la composition chimique du métal coulé, des défauts de remplissage du moule peuvent apparaître. Si les cavités du moule sont trop étroites, le remplissage des empreintes sera incomplet et la pièce finale (brut de fonderie) incomplète également. [4]

Un des défauts des moulages est l'apparition de croûte sur la pièce moulée. Les croûtes sont une mince couche de métal qui se forme sur la pièce à cause du moulage. Elles sont faciles à enlever et révèlent généralement une encoche dans la surface moulée. Un autre défaut similaire est l'arrachement, qui sont des boucles qui se produisent dans la chape des pièces coulées dans le sable. Tous ces défauts sont d'ordre visuel et ne justifient pas la mise au rebut de la pièce. Ces défauts sont causés par des températures de coulée trop élevées ou par des carences en matériaux carbonés. [4]

Un autre défaut du au moulage au sable est la combustion qui se produit lorsque les oxydes métalliques interagissent avec les impuretés dans les sables siliceux. Il en résulte des particules de sable incrustées dans la surface de la pièce finie. Ce défaut peut être évité en réduisant la température du métal liquide, en utilisant un nettoyant pour le moule et en utilisant divers additifs dans le mélange de sable. [4]

I.4 Etat de l'art :

Un moulage réussi demande beaucoup de réflexion et de goût. Avant toute opération, il faut étudier minutieusement les formes, en sentir les moindres détails. Avec un peu d'expérience, cette observation attentive du modèle alliée à un peu de pratique permet de déterminer le choix de la technique, et des produits à utiliser.

De nombreux auteurs ont publié des essais de coulabilité. TI [6] met l'accent sur les études à caractère physique, qui visent à dégager les principaux facteurs. D'après Courty (1931) [6], West en 1898 est le premier à rendre compte du comportement des métaux coulés dans des moules en sable. Il coule le métal fondu dans une empreinte horizontale en forme de coin, et considère la distance parcourue comme une mesure de la coulabilité. Une éprouvette en forme de canal cylindrique rectiligne a été introduite par Ruff en 1936, mais à cause de sa

longueur, elle se révèle particulièrement sensible aux écarts de niveau. Evans (1951) a essayé une éprouvette en "V" inversée. L'éprouvette en forme de spirale permet d'éviter les effets d'écarts de niveau. Courty (1931) [6] fait une revue des nombreuses variantes expérimentales. Krynitsky (1953) [6] passe en revue différents dispositifs. Il met en évidence la nécessité de contrôler l'écoulement, en particulier la pression métallostatique. Portevin, Bastien et leurs collaborateurs (1934) ont utilisé un dispositif plus complet publié par Courty (1931) [6] .Le métal liquide remplit initialement une petite cuve à trop plein. Le petit creuset renversé sur le tube d'attaque joue le rôle de soupape automatique. Ce dispositif est considéré dès 1934 comme la référence pour les alliages d'aluminium. Le système dit "spirale de Courty" reprend la même idée. En 1956, Ragone cite la spirale comme un essai standard pour les fontes et les aciers. La montre le dispositif utilisé par Recht (1990) [6] et l'éprouvette correspondante. Cependant, à cause de la diversité des cas techniques se rapportant à la coulabilité, d'autres formes d'éprouvettes ont été mises au point. Ainsi, Olivier (1981) a établi une éprouvette en forme de grille moulée en sable. Par ses "barreaux de différentes sections, et par un système d'attaques adaptées, cette éprouvette est considérée comme plus représentative pour évaluer l'aptitude des aciers moulés à la bonne venue (Marie Thérèse Léger, 1981). Parallèlement à ces essais à caractères techniques, de nombreux essais simplifiés sont destinés plus spécialement à l'analyse physique du phénomène. Ragone, Mc Adams et Taylor (1956) introduisent l'injection dans un tube par aspiration sous dépression contrôlée. Taylor (1956), puis Flemings (1964) et leurs collaborateurs, Lu et al ont fait des mesures sur des métaux purs (Sn, Pb, Zn, Mg, Cu), ainsi que sur des alliages d'aluminium et de cuivre. Le tube moule est alors en verre, ou éventuellement en silice. Prates et Biloni (1972) ont repris le cas d'une empreinte en forme de tube moule rectiligne, à section rectangulaire, attaqué par du métal liquide mis en charge par engorgement d'un entonnoir. Le moule est une coquille démontable, en cuivre, en acier doux ou en acier inox .Le métal est un alliage aluminium-cuivre. Lang (1972) applique le même moule coquille à des métaux purs (Sn, Pb, Zn, Mg, Cu), ainsi qu'à des alliages d'aluminium. Ces essais consistent à injecter le métal liquide dans un tube de section trapézoïdale d.e diamètre hydraulique 6,65 mm. [6]

Le moulage magnétique (MMC) est une application de l'électromagnétisme au processus de coulée. La poudre ferreuse constitue le moule formé par l'application d'un champ magnétique. L'application d'un champ magnétique qui induit des liaisons magnétiques entre les particules ferreuses qui donne de la force à la moisissure réduit le temps écoulé dans le processus de pilonnage. De plus, la rupture du moule devient plus facile en utilisant un champ

magnétique, car il est nécessaire de couper l'alimentation pour réduire le champ magnétique et les ruptures de moule. Le procédé MMC utilise un moule monobloc et un motif thermocol, ce qui offre l'avantage que les produits moulés sont exempts de défauts associés à la ligne de joint (Geffroyet. Al.2013)[7]. De plus, les produits ont de meilleures tolérances dimensionnelles que les produits obtenus par les méthodes conventionnelles. La quantité d'usinage requise est moindre, ce qui réduit le temps et les coûts nécessaires à la finition du produit. Les propriétés mécaniques telles que la résistance à la traction, la résistance aux chocs et la dureté des produits coulés à partir de MMC ont des valeurs plus élevées que celles des produits coulés en sable (P. Gnanvel). La raison de cette amélioration pourrait être le taux de solidification plus élevé du moule ferreux, car sa conductivité thermique est supérieure à celle du moule en sable (Geffroy et. Al.2013) [7]. La pollution de l'environnement est une préoccupation majeure liée au moulage. Lors de la coulée, les déchets de fonderie sont relâchés et le sable une fois utilisé est brûlé et ne sert à rien. Les déchets de fonderie s'additionnent alors que dans MMC, la poudre ferreuse peut être réutilisée et le champ magnétique n'a aucun effet sur la santé du travailleur.

Par conséquent, MMC est un processus respectueux de l'environnement, car la production de déchets est minimale et due à la possibilité de réutilisation du matériau du moule. Ce processus est encore dans sa phase de recherche. Il n'existe aucune preuve de son utilisation dans aucune industrie jusqu'à présent, mais il peut remplacer les méthodes de coulée conventionnelles car ce procédé présente certains avantages par rapport à celles-ci. [7]

Additivement aux travaux réalisés ces dernières années dans le domaine du moulage par remplissage, nous allons apporter notre contribution par l'introduction du champ magnétique comme étant un nouveau paramètre dans ce domaine.

La simulation numérique est un moyen puissant d'analyse différents phénomènes physiques qui se produisent au cours de procédés de moulage et en présence de champ magnétique. Ainsi la qualité d'un produit ferreux magnétique moulé sous pression est déterminée dans une large mesure par le mécanisme de remplissage de la cavité. L'évolution de ce processus a retenu l'attention à la fois dans l'industrie et dans la littérature. En raison de son effet sur le coût d'une simulation numérique, la question de savoir si oui ou non la phase de remplissage se déroule dans des conditions isothermes doit être abordée. Cette étude analyse le processus de remplissage dans la coulée sous pression en présence de champ magnétique, produisant des forces manifestants sur le déroulement du remplissage, afin de

mettre la pertinence des conditions de remplissage dans leur contexte.et finalement les effets lors du remplissage sur la prévision des défauts vont être présentés et discutés.

I.5 Moulage magnétique:

Le moulage est un processus de fabrication, utilisé directement ou indirectement dans presque tous les secteurs. Il s'agit d'un processus de fabrication primaire qui influe sur les propriétés du produit résultant. À cette époque, il existe une demande d'innovation de procédés permettant de réduire les délais, les coûts de production sans compromettre la qualité des produits et de réduire les effets néfastes sur l'environnement. La coulée en moule magnétique est un procédé innovant qui présente un grand potentiel pour remplacer les méthodes de coulée conventionnelles en raison des divers avantages qui lui sont associés. La configuration de la MMC comprend l'enroulement du fil de cuivre de sorte qu'il se comporte comme un solénoïde à cavité creuse dans lequel le processus de coulée doit être exécuté. La configuration a été préparée avec un fil de cuivre de calibre 19 et l'enroulement est effectué jusqu'à ce que le champ magnétique requis soit créé. La configuration et les essais réalisés montrent qu'il est possible de créer une configuration similaire à grande échelle, de sorte que la MMC puisse être utilisée au niveau industriel pour exploiter ses avantages: coût réduit, délai d'exécution réduit, effet sur l'environnement réduit et propriétés améliorées. au produit résultant. [5]

Un appareil magnétique externe est utilisé dans cette étude pour permettre le contrôle de la distribution et l'orientation des fibres magnétiques conductrices lors du remplissage du polymère fondu, puis l'impact de ce traitement sur les propriétés électriques des produits est observé. En plus de conserver les propriétés de fibre de carbone, les fibres de carbone revêtues de nickel utilisées dans cette étude améliorent également considérablement la conductivité en matériau composite. En outre, le nickel lui-même est conducteur magnétique, il y a donc une chance d'utiliser champ magnétique externe pour changer l'orientation de la fibre. Par exemple, ont utilisé des fibres nickelées fibres de carbone et de fibres de carbone pour produire des matériaux composites, et les résultats ont montré que le ancien avait une conductivité plus élevée. Il a donc été conclu que l'utilisation de fibres de carbone revêtues de nickel pourrait réduire le volume requis de contenu en fibres. Le but de cet article est de développer moulage par injection assistée magnétique afin de compléter la conception du moule avec des aimants intégrés dans la diapositive via une ingénierie assistée par ordinateur. Tout d'abord, l'analyse magnétique statique est appliquée pour analyser les positions relatives

de l'aimant permanent dans le moule et le choix du matériau le bloc d'espacement, puis l'orientation des fibres magnétiques pendant le processus de remplissage du polymère fondu est simulée par analyse de couplage magnétique-fluide. Cette simulation numérique peut servir de référence pour l'évaluation du processus réel, qui pourrait être fourni pour le développement de l'application d'injection moulage en matériau composite polymère conducteur. [5]

I.5.1 Simulation et expérience :

Une disposition du moule avec un appareil magnétique sera établie dans cette étude. Une paire de aimants permanents seront conçus en utilisant l'analyse magnétique statique sous différents espacement servir de configuration d'appareil magnétique dans le moule. Après la conception du moule et la construction de l'aimant permanent intégré est terminé, l'analyse du champ d'écoulement du polymère fondu pendant le processus de remplissage de moulage par injection sera effectué, puis le champ magnétique et le champ d'écoulement seront soumis couplage séquentiel par approche de superposition afin d'étudier l'effet du moment magnétique générés par le champ magnétique externe sur l'orientation des fibres, et de simuler les comportements fibres magnétiques dans le polymère fondu pendant le processus de remplissage. [8]

I.6 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
FORMULATION MATHEMATIQUE

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.

II.2.Modélisation de l'écoulement des fluides:

Le mouvement de l'écoulement d'un fluide qui permet de traiter les fluides classiques comme l'air, l'eau, l'huile ou aussi les métaux fondus. [9]

II.2.1. Equation de continuité:

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

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

Ou dans une notation plus compacte

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

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

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

II.2.2. Equation de quantité de mouvement :

L'approximation de Boussineo suppose que la densité soit constante partout, sauf dans le terme de force de gravité ou elle varie linéairement avec la température :

$$\rho = \rho_0(1-\alpha(T-T_0)) \qquad \text{(II.4)}$$

Ici α désigne le coefficient d'expansion thermique. D'où l'équation de quantité de mouvement s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}.\nabla).\vec{v} = \alpha(T - T_0)g\overrightarrow{e_Z} - \frac{1}{\rho_0}\vec{\nabla}P + \mu\nabla^2\vec{v} + \frac{1}{\rho}\vec{J}\wedge\vec{B} \qquad \text{(II.5)}$$

Avec :

$\vec{v}$: Vecteur vitesse fluides.

$\vec{B}$: Induction magnétique.

$\vec{J}$: Densité du courant.

μ : viscosité dynamique du fluide.

ρ : Densité de charge volumique.

P : Pression.

L'équation adimensionnelle en coordonnée cylindrique s'écrit :

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial r} + w\frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r.\frac{\partial u}{\partial r}\right) - \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} - \frac{u}{r^2}\right) + f_r \qquad \text{(II.6)}$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + u\frac{\partial w}{\partial r} + w\frac{\partial w}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial r} + \left(\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r.\frac{\partial w}{\partial r}\right) + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right) + \frac{Ra}{Pr}.T + f_z \qquad \text{(II.7)}$$

Avec :
Champ magnétique axial

$f_r = -Ha_r^2.u$

$f_z = 0$

Champ magnétique radial

$f_r = 0$

$f_z = -Ha_r^2.w$

II.2.3 Equation de l'énergie :

Cette équation se fonde sur le bilan énergétique d'un gaz homogène et visqueux dans un volume arbitraire v immobile dans l'écoulement et de surface extérieur perméable.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(r.u.T) + \frac{\partial}{\partial z}(w.T) = \frac{1}{Pr}\left[\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}\left(r.\frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right] \qquad \text{(II.8)}$$

II.2.4 Equation électromagnétique :

L'équation électromagnétique en coordonnées cylindriques :

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{1}{\mu r}\frac{\partial A^*}{\partial z}\right)+\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{\mu r}\frac{\partial A^*}{\partial r}\right)-\frac{\sigma}{r}\frac{\partial A^*}{\partial t}=-J_s \qquad \text{(II.9)}$$

II.3 Modélisation thermique :

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 en contact. Le processus par lequel le transfert de l'énergie s'effectue est désigné parle terme générale de ' transmission de la chaleur' la grandeur transférée appelée chaleur, ne peut être ni mesurée ni observée directement, mais ses effets donnent lieu à des observations et des mesures. L'écoulement de la chaleur comme la production de travail phénomène qui implique la variation de l'énergie interne.

II.4 Modèle de turbulence RMS :

Il existe différents modèles de turbulence, qui se distingue par un nombre d'équation de transport supplémentaires nécessaires pour fermer le système d'équations du problème à résoudre. Dans notre cas, on a utilisé le modèle k-ε standard qui est un modèle semiempirique basé sur le concept de Boussinesq reliant les contraintes de Reynolds au taux de déformation moyen : [10]

$$\overline{-\rho u_\imath{}' \rho u_\jmath{}'} = \mu_t\left[\frac{\overline{\partial U_\imath}}{\partial x_j}+\frac{\overline{\partial U_\jmath}}{\partial i}\right]-\frac{2}{3}\delta_{ij}\rho k \qquad \text{(II.14)}$$

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

Où $k=\frac{Ui'^2}{2}$représente l'énergie cinétique turbulente.

Par analogie avec la viscosité laminaire caractérisée par une vitesse (des molécules) tune distance (le libre parcours moyen), la viscosité turbulente, caractérisée par une vitesse$\sqrt{K}$

et une distance K=$\frac{k^{3/2}}{\varepsilon}$est donnée par B

$$\nu_t=C_\mu\sqrt{K}\,\frac{k^{3/2}}{\varepsilon}C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon} \qquad \text{(II.15)}$$

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

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

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

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho K U_i)}_{1} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\bar{\mu} + \frac{\mu t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x}\right]}_{2} + \underbrace{G_K}_{3} + \underbrace{\rho\varepsilon}_{4} \qquad \text{(II.16)}$$

1 : terme convectif

2 : terme diffusif

3 : taux de production

4 : taux de dissipation

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

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon \cup_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\bar{\mu} + \frac{\mu t}{\sigma\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad \text{(II.17)}$$

Le terme de production G_k est donnée par :

$$G_k = -\rho\overline{U_\imath U_\jmath} = \rho v_t\left(\frac{\partial \overline{U_\imath}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{U_\jmath}}{\partial x_i}\right)\frac{\partial \overline{U_\imath}}{\partial x_j} \qquad \text{(II.18)}$$

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

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

Le régime VOF est utilisé pour suivre le déplacement de la surface libre. Chaque élément est défini comme un volume du contrôle dans ce régime, et la fraction volume du fluide F, définie sur chaque volume de contrôle, satisfait l'équation suivant, les mouvements de surface libre. [11]

$$\frac{\partial F}{\partial T} + \mathrm{u}.\nabla \mathrm{F} = 0 \qquad \text{En } \Omega \qquad \text{(II.19)}$$

F : représente le facteur de remplissage,

U : désigne vecteur vitesse,

t : représente le temps et Q.

Ω : est le domaine de calcul.

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

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

$C_k = 0$: la cellule et vide (du K^{ieme} fluide) ;

$C_k = 1$: la cellule et vide (du K^{ieme} fluide) ;

$0<C_k< 1$: la cellule contient l'interface entre le fluide K^{ieme} et un ou plusieurs autres fluides.

Avec :

$$C_k = \frac{\partial \Omega_k}{\partial \Omega_{maill}} \qquad \text{(II.20)}$$

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

II.5.2 Equation de la fraction volumique :

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

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

$$\frac{1}{\rho k}\left[\frac{\partial}{\partial t}(C_k\rho_k) + \nabla - \left(C_k\rho_k\vec{V}_k\right) = S_{ck} + \sum_p^n = 1\left(\dot{m}_{pk} - \dot{m}_{kp}\right)\right] \qquad \text{(II.21)}$$

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

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

$$\sum_{k=1}^{n} \mathbf{Ck=1} \qquad \text{(II.22)}$$

II.6 CONCLUSION :

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

Chapitre III
les méthodes discrétisation

III.1.INTRODUCTION :

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

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

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

III.2. méthodes de discrétisation :

La discrétisation se fait en suivant des trois méthodes :

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

III.2.1 Méthode des différences finies :

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

- **Avantage :**
  - ✓ grande simplicité d'écriture.
  - ✓ faible coût de calcul.
- **Inconvénients :**
  - ✓ Limitation de la géométrie des domaines de calculs.
  - ✓ difficultés de prise en compte des conditions aux limites portant sur les dérivées ou les gradients de l'inconnue.
  - ✓ en général absence de résultats de majoration d'erreurs. [5]

III.2.2. Méthode des volumes finis :

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

Sa mise en œuvre est simple si les volumes élémentaires sont des rectangles (ou des Parallélépipèdes rectangles en dimension 3). [5]

Avantage :

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

Inconvénients :

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

III.2.3 Méthode des éléments finis :

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

Avantages :

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

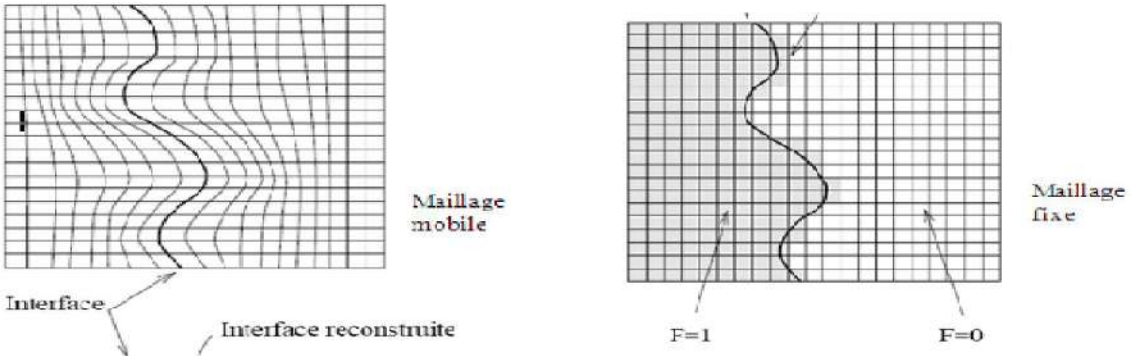
Inconvénients :

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

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

III.3.Calcul d'interfaces :

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



a)méthode Lagrangienne b) méthode Eulérienne [12]

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

III.3.1.Maillage :

Le maillage est la première étape de la méthode des éléments finis. C'est une étape fondamentale qui conditionne tout le reste du calcul : le temps de calcul et les ressources nécessaires (mémoire vive, mémoire virtuelle, temps processeur), la précision des résultats, la stabilité du modèle (possibilité de divergence dans le cas de calculs non-linéaires). L'objet de cette opération c'est de procéder à une simplification d'un système par un modèle représentant ce système et, éventuellement, son environnement (le milieu), dans l'optique de simulations de calculs ou de représentations graphiques (figure III.3). [13]

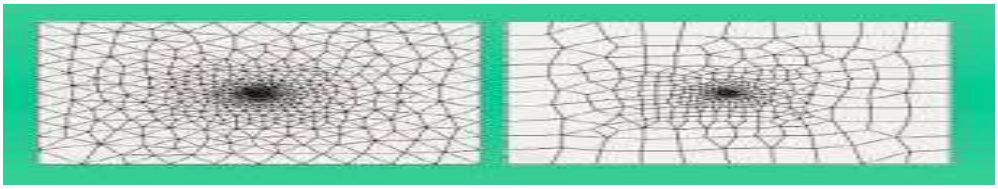


Figure (III.3) : Maillage carré [5]

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

III.3.1.1 les méthodes lagrangiennes :

Les méthodes lagrangiennes, sur maillage mobile permettent de représenter l'interface comme une réelle discontinuité et de suivre son évolution de manière très précise. Le transport de l'interface s'effectue soit en déformant le maillage au cours du calcule soit en régénérant le maillage après avoir advecté l'interface. Le principal avantage de cette méthode est de suivi très précis de l'interface qui permet d'imposer très facilement et avec rigueur les conditions aux limites de l'interface. Ces méthodes sont limitées aux écoulements ou l'interface ne subit pas de grandes déformations, car cela conduit a des maillages trop déformés. [13]

III.3.1.2. les méthodes eulérienne :

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

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

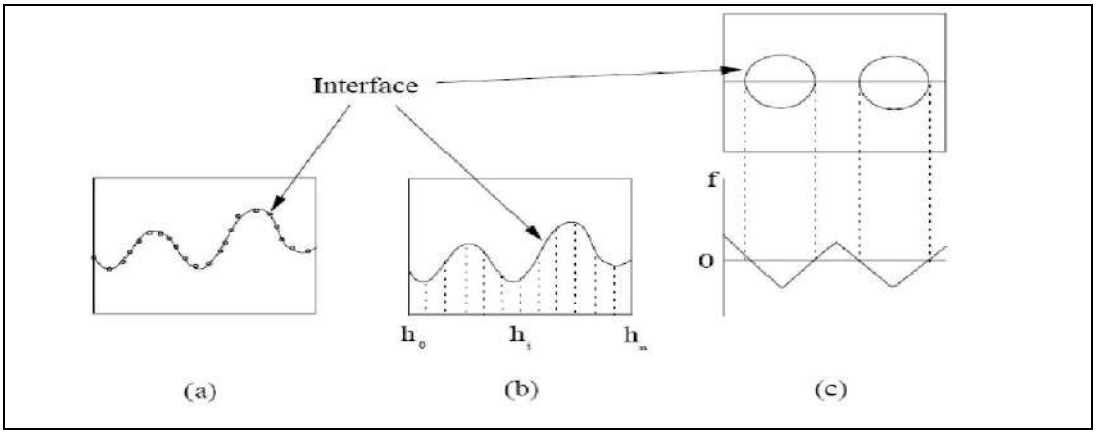
III.3.1.2.1.Les méthodes de suivi de front :

Il existe différente méthode pour marquer l'interface:

a) Marqueurs de surface

b) Fonction de hauteur

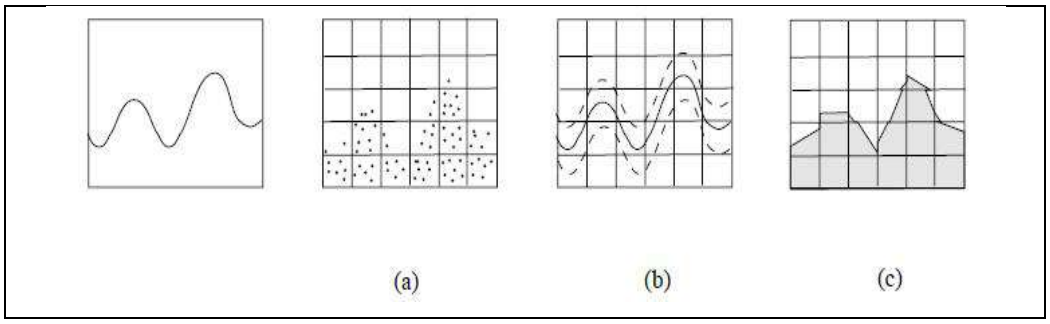
c) Méthode de ligne de niveau (lève set)



Figure(III.4): Différentes méthodes de suivi de front, [13]

III.3.1.2.2.Les méthodes de suivi de volume :

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



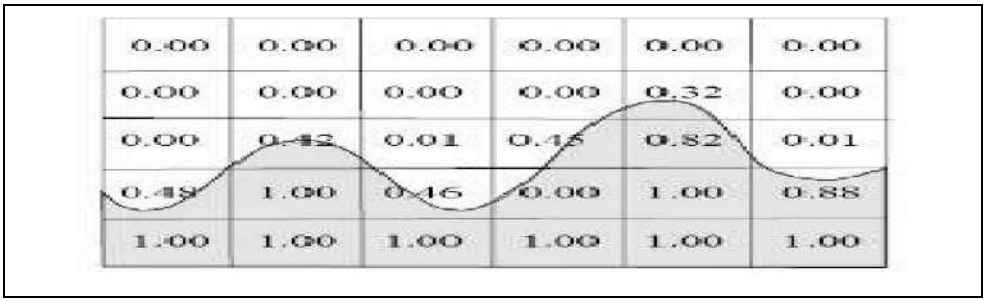
Figure(III.5) : Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque

(a) Méthode MAC

(b) schéma TVD

(c) Méthode VOF

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



Figure(III.6) : Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret. [15]

III.4.Simulation numérique en fonderie :

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

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

La simulation numérique consiste à résoudre ces équations sur un ou plusieurs sous domaines (pièces, moule, noyaux,...) en appliquant des conditions initiales et des conditions au limites. Dans le cas particulier des géométries simples, une solution analytique peut être trouvée en simplifiant le modèle. Les approximations effectuées doivent être en concordance avec la réalité. Lorsque la solution analytique est trop complexe, ou les approximations excessives, la résolution numérique permet de trouver une solution approchée. [16]

III.4.1.Mise en œuvre numérique :

A l'heure actuelle, il existe un certain nombre de codes industriels conviviaux, aux meilleurs performants, permettant la prédiction d'écoulement fluides par la résolution des équations de Navier-Stokes grâce aux méthodes des volumes finis, des différences finies ou des éléments finis (ANSYS , FLUENT,CFX-F3D, PHOENICS, STAR-CD, TRIO….). Pour notre travail, nous avons eu recours au code ANSYS, [17]

Le programme ANSYS a été dans l'utilisation commerciale depuis 1970 et a été utilisé intensivement dans l'espace, véhicules à moteur, la construction, le service électronique, d'énergie, la fabrication, nucléaire, les plastiques, le pétrole, et les industries en acier. En outre, beaucoup de sociétés de consultation et centaines d'universités utilisent ANSYS pour

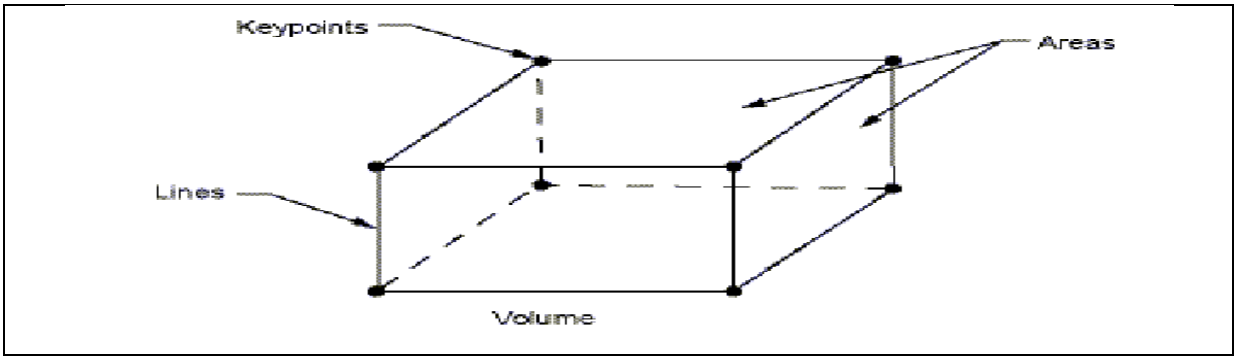
l'analyse, recherche, et l'utilisation éducative, ANSYS est identifiée dans le monde entier pendant qu'un des programmes le plus extensivement utilisés et capables de son type. [17]

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

visualisation et analyses des résultats. [17]

III.4.1.1.Définition de la géométrie :

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



Figure(III.7): Définition de la géométrie

Les points qui définissent les sommets de modèle s'appellent les keypoints et sont les entités de modèle plein de " bas-ordre ". Si, en établissant notre modèle plein, vous créez d'abord nos keypoints, et employons ensuite ces keypoints pour définir les entités " évoluées " de modèle plein (c'est-à-dire, lignes, secteurs, et volumes), vous seraient constituant votre modèle " du fond." Des modèles établis du fond vers le haut sont définis dans le système du même rang actuellement actif. [17]

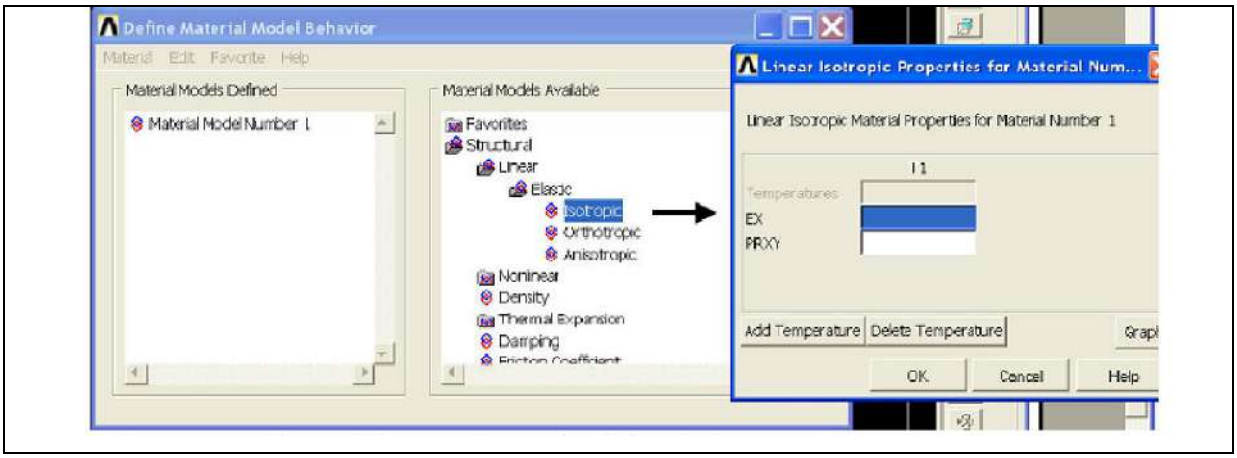
III.4.1.2.Définition des matériaux et des paramètres du procédé :

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

thermiques de contact métal/moule, des caractéristiques hydrauliques des filtres, etc. pour valider les bases de données du logiciel ou pour ajouter de nouveaux matériaux à la base de donnée.

Pour définie les propriétés matérielles :

Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models

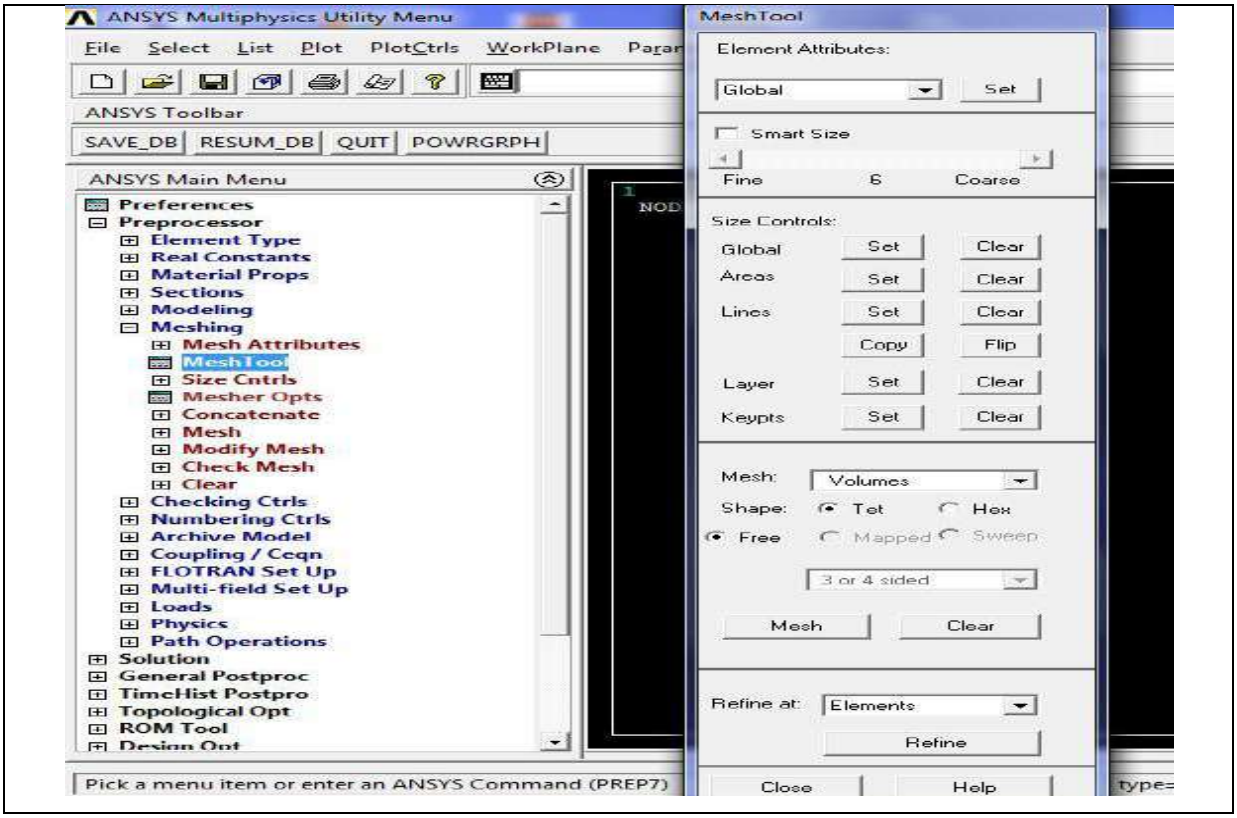


Figure(III.8): Définition des propriétés des matériaux

Les conditions aux limites d'échanges thermiques entre le moule et le milieu environnant, les circuits de refroidissement, les tirages d'air doivent aussi être renseignées. Il est possible d'utiliser des modèles simplifiés sur ANSYS pour déterminer l'influence qualitative et quantitative de chaque milieu extérieur sur la thermique du moule. Ce calcul préliminaire peut être utile pour simplifier la géométrie et éliminer des paramètres qui n'ont pas d'importance compte tenu de la précision attendue. [17]

III.4.1.3.Maillage de la géométrie :

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



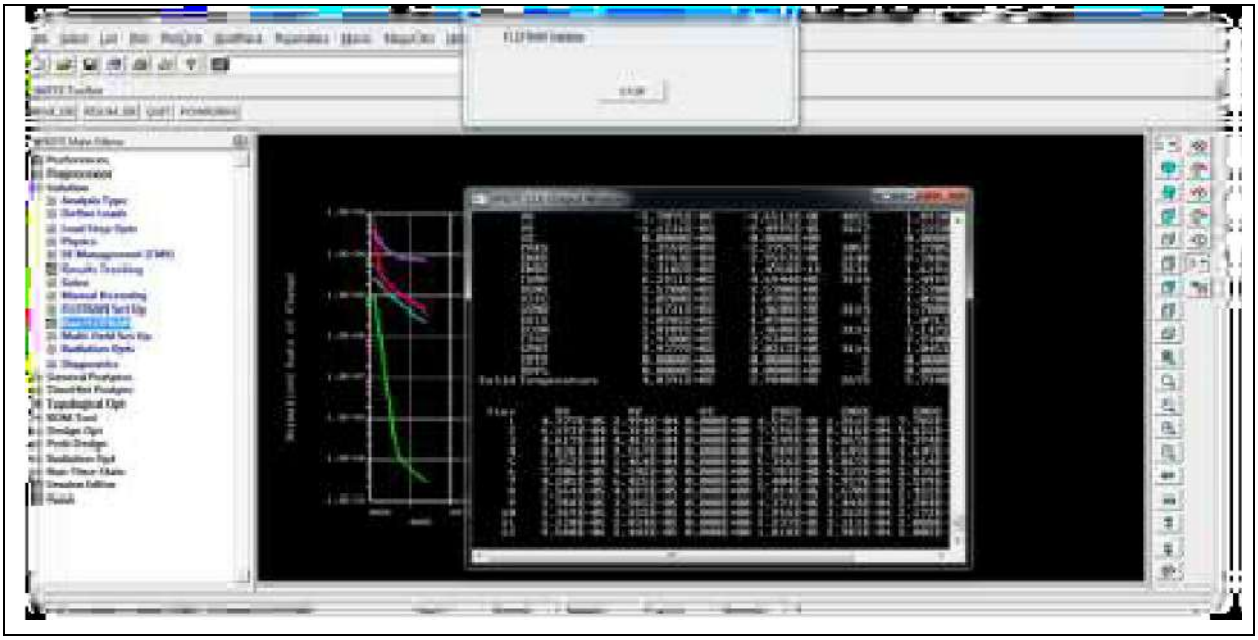
Figure(III.9) : Maillage de la géométrie

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

La finesse du maillage est un facteur important : plus le maillage est fin, meilleure sera la solution. Mais le temps de calcul deviendra de plus en plus long. Il faut trouver un compromis finesse du maillage/temps de calcul. Il est possible d'utiliser un maillage grossier pour la mise au point des données, lors de la prise en main du logiciel et de ne utiliser un maillage très fin que pour le calcul final. [17]

III.4.1.4.Calculs :

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



Figure(III.10): Phase du Calcul

III.4.1.5.Visualisation et analyse des résultats :

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

III.5.Conclusion :

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

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

Chapitre IV
resulta
et discution

IV. 1.Introduction :

La simulation numérique en fonderie est désormais indispensable dans la conception et la mise au point des pièces, car en représentant fidèlement ce qui se passe à l'intérieur du moule, elle peut être utilisée comme base de dialogue entre les différent acteurs du développement des pièces de fonderie.

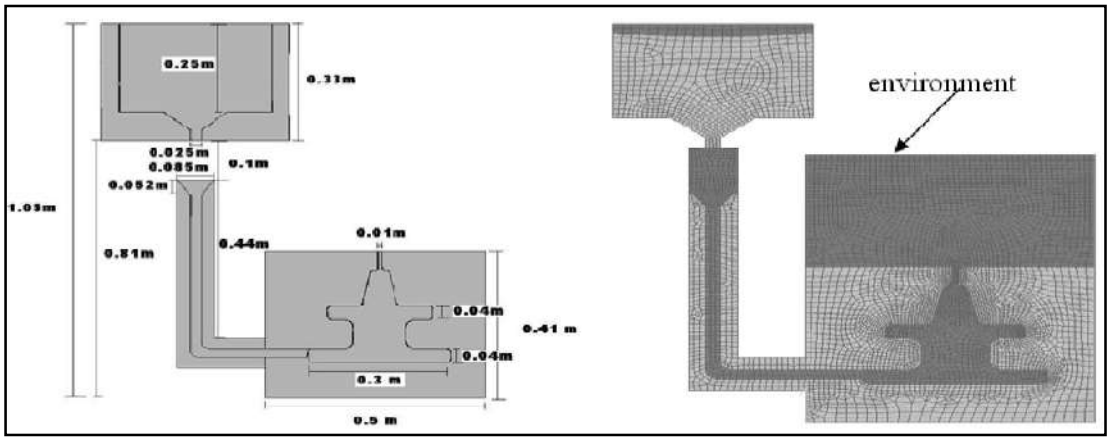
Elle permet d'énormes gains de temps dans la mise au points des moules et s'inscrit dans la chaîne complète de simulation de processus calculs de dimensionnement, simulation du remplissage et de la solidification, conception de l'outillage et de ses conditions de fonctionnement.

IV.2. Identification et validation de la simulation numérique :

IV.2.1.Description du domaine d'application :

La géométrie modélisée est représentée à la figure(IV.1) dans cette figure nous pouvons observer que entre la sortie de la cavité et l'entrée de moule il ya un espace libre de 0,1 m. non seulement cet espace libre mais également la sortie de la poche est exposée à l'environnement.

Pour atteindre la convergence selon l'état du volume de fluide de l'algorithme (VOF), la géométrie de la maille de l'élément doit être de forme quadrilatère et le maillage de la chaîne moule doit avoir une continuité, comme le montre la Figure (IV.1).



Figure(IV.1) :a) La géométrie de moule et de la cavité b) maillage adoptée pour la simulation2D.

Les propriétés du métal liquide utilisé dans les simulations de remplissage du moule sont énumérées dans le Tableau IV.1. Afin de simuler l'écoulement de métal liquide dans le moule en acier, les conditions suivantes ont été considérées :

- ✓ le métal liquide et le moule d'acier ont été stabilisés dans des conditions normales de la pression atmosphérique.
- ✓ la température initiale du métal liquide était de 2000 ℃ et la température de moule a été considérée égale à celle de l'environnement.
- ✓ la vitesse du liquide a été fixée à zéro sur les parois du moule.
- ✓ le modèle mathématique pour la turbulence est le modèle de k-ε.
- ✓ l'algorithme de VOF a été employé pour le remplissage de moule.
- ✓ le temps total pour le remplissage de moule est de 0.01s.
- ✓ le nombre d'itérations par étape était 30.
- ✓ les propriétés des matériaux est variable en fonction de la température.
- ✓ La solution en 2D a été considérée.

VI.2.2.Validation :

Le refroidissement d'une pièce dans un moule fait intervenir plusieurs phénomènes distincts qu'il est nécessaire de modéliser, le refroidissement en lui même nécessite de calculer les transferts de chaleur au sein de la pièce et du moule.

Nous nous sommes assuré que chaque étape était correctement simulée, c'est l'objet de ce chapitre de validations.

Dans cette partie dont l'objectif est d'assurer le bon déroulement de notre simulation numérique, nous comparons nos résultats à ceux obtenue dans les mêmes conditions de simulation par de Moisés M, Guilherme A. Salem, Felipe Bertelli, et Noé Cheung du département de mathématique et statique au Brésil [18].En outre, nous avons varié tous les paramètres thermiques du métal et du moule : la densité, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique et la conductivité thermique qui fonctionné de la température.

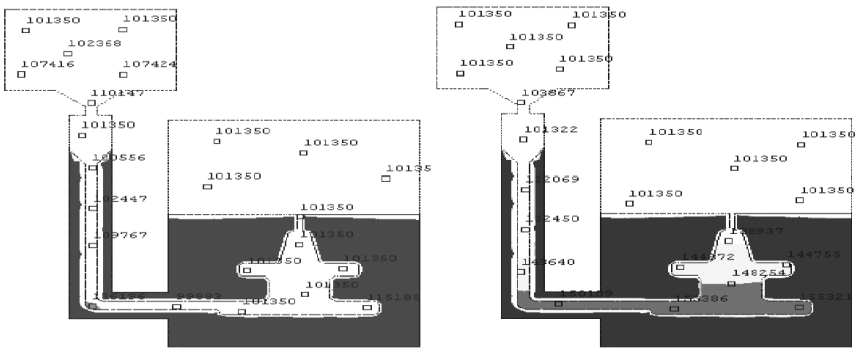
Tab. IV.1 : Propriétés d'alliage de fer

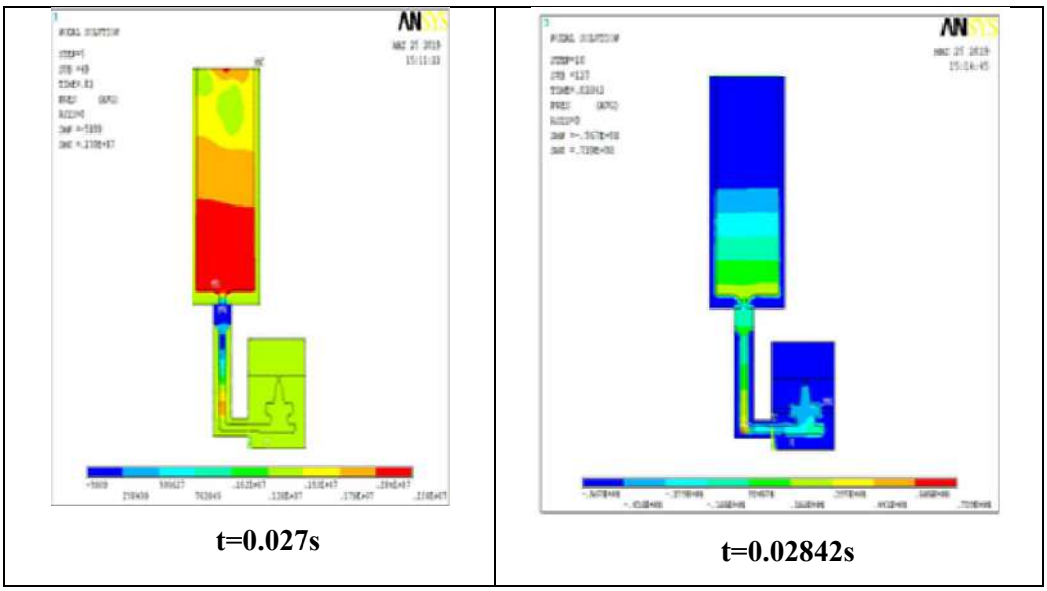
Propriétés	Valeur
Densité (Kg/m^3)	6890
Chaleur Spécifique (J/Kg.K)	438
Viscosité (kg/ms)	0.00544
Conductivité thermique (W/m.k)	80.2
Température de fusion (°C)	1554

Tab. IV. 2 : Propriétés des matériaux de moule (acier)

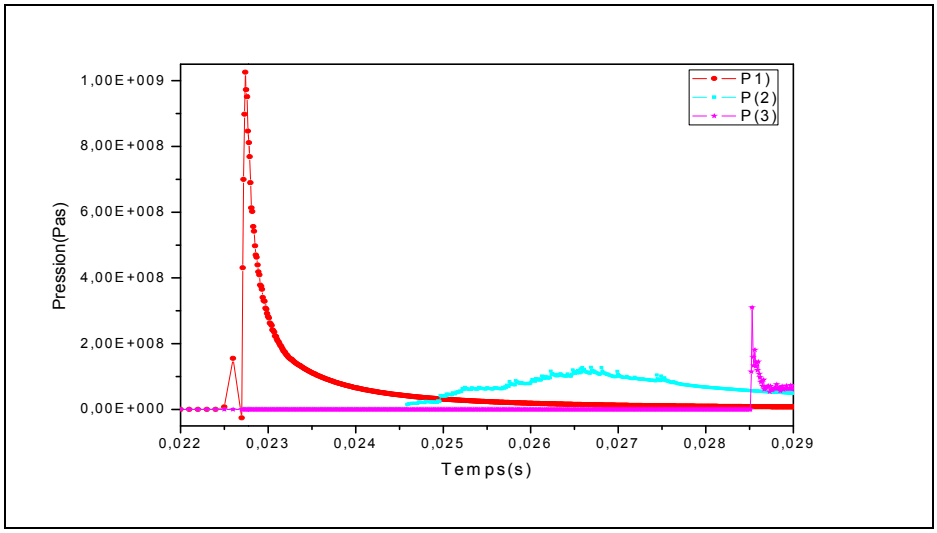
Densité (Kg/m^3)	Chaleur Spécifique (J/Kg.K)	Conductivité thermique (W/m.k)
8000	**400**	**25**

Les figures (IV.2.a et IV.2.b) affichent la variation de la pression dans le moule, la première affiche le modèle de Moisés M, et al [18]. et la deuxième affiche notre modèle



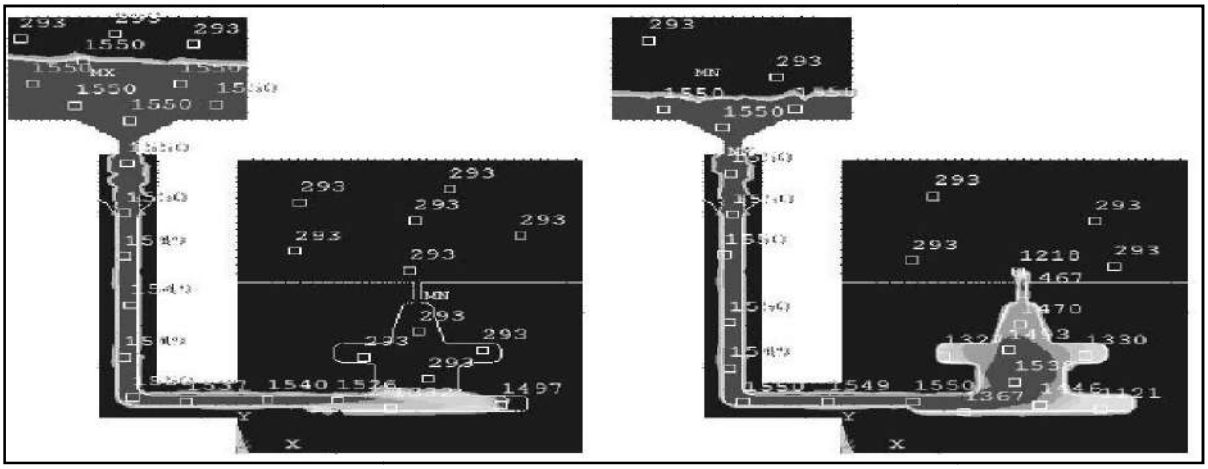


Figure(IV.2) : Représentation Spatiale des Champs de pression lors du remplissage a)-Moisés M et al [18]. b) nos résultats de simulations.



Figures (IV.3) : la variation de pression des points choisis en fonction de temps de remplissage dans un champ magnétique B = 0

Les figures (IV.4.a et IV.4.b) illustrent la variation de fraction volumique de l'écoulement du métal dans le moule, la première affiche le modèle de Moisés M, et al [18] et la deuxième affiche notre modèle.



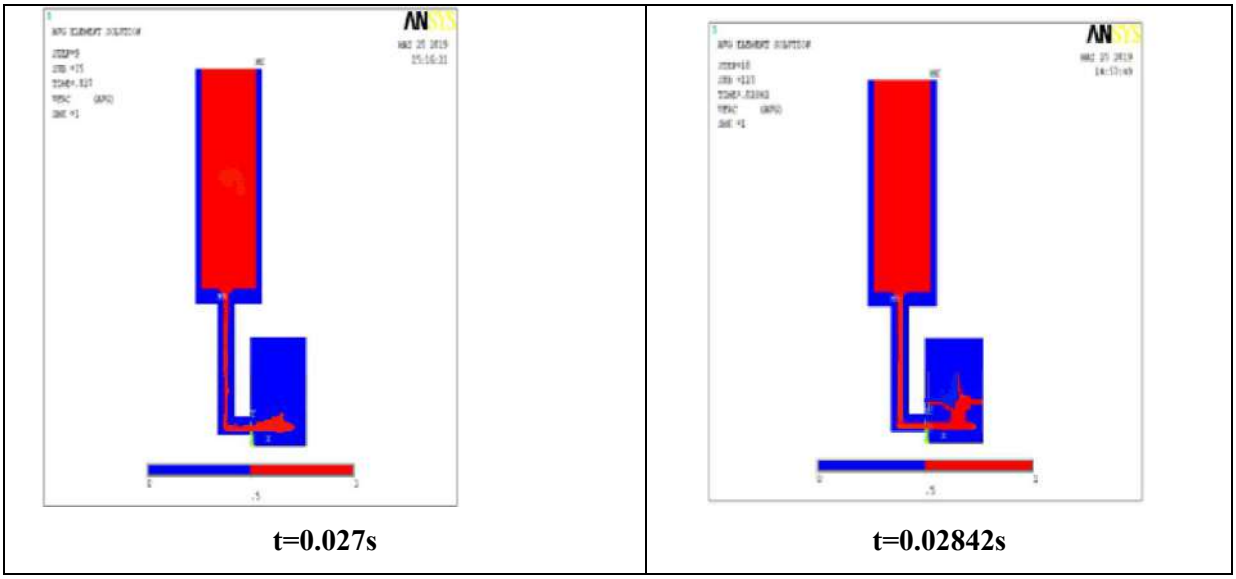


Figure (IV.4) : Volume de fraction pendant le remplissage du moule ; a)-Modèle de Moisés M, et al[18] ,b)-nos simulations.

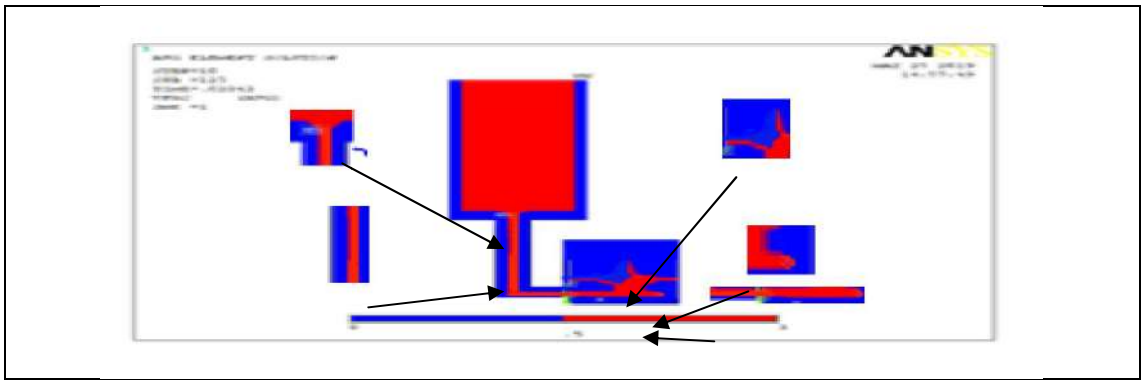


Figure (VI.5) : détection des défauts de remplissage dans l'empreinte.

D'après les résultats, on remarque que la variation de déférente paramètre (la pression et le volume de fraction) de notre travail et les même profile que les résultats de l'article. Donc notre modèle validé.

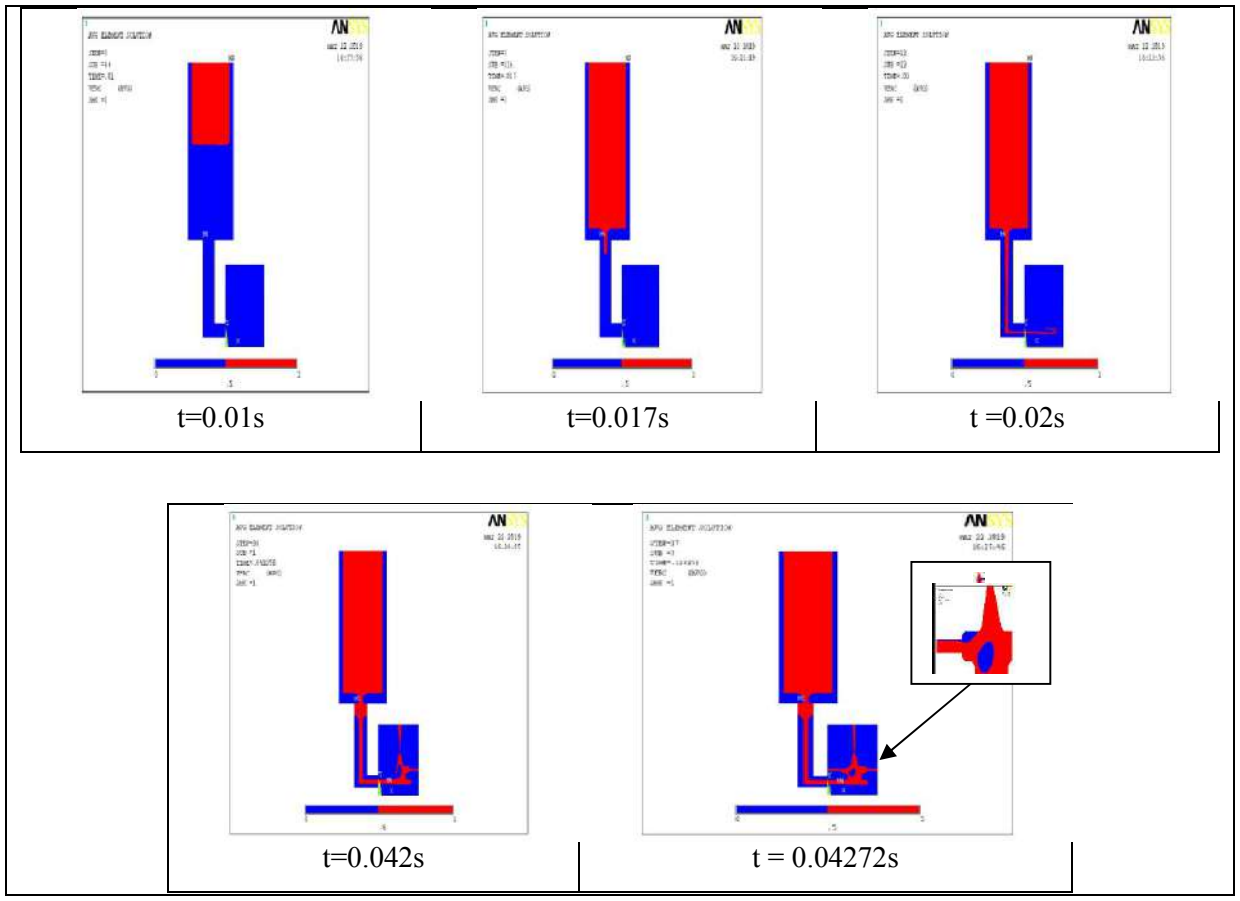
VI.3.Effet du champ magnétique sur le moulage :

Dans le cas de la validation, nous essayons de trouver les résultats et de les comparer les uns aux autres (les résultats de l'article), mais dans ce cas, nous présenterons nos résultats plus en détail et les expliquerons, ce travail est divisé en trois parties. Nous allons ajouter un champ magnétique variable et examiner le résultat:

VI.3.1.Expérience 1 (B=3000 tesla):

D'après les calculs des éléments finis par le code ANSYS, les résultats obtenus de cette expérience d'âpres Ajouter un champ magnétique, sont les suivant :

La figure (IV.6) montre le mouvement du métal dans le moule à différents moments, en utilisant un champ magnétique de B = 3000 tesla.



Figures (IV.6) : Volume de fraction pendant le remplissage du moule avec un champ magnétique à environ B=3000 tesla.

Après la fin de cette expérience, nous remarquons la présence de défauts dans la forme de la cavité, comme le montre la figure suivante :

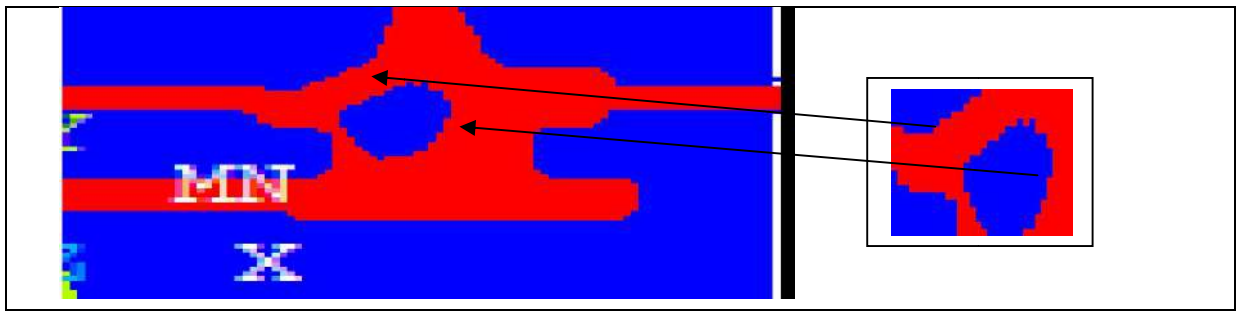
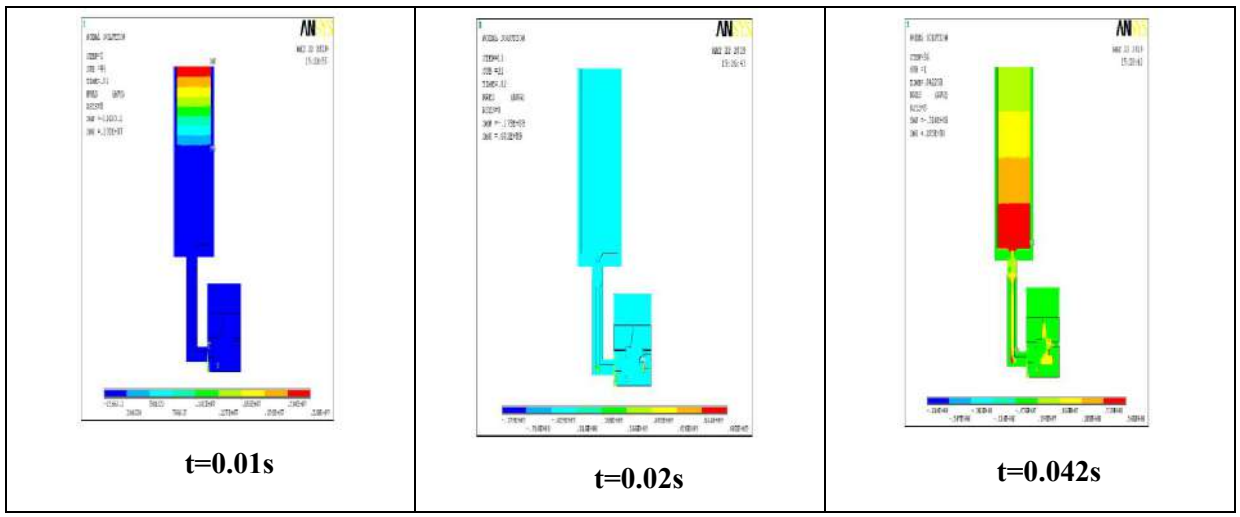
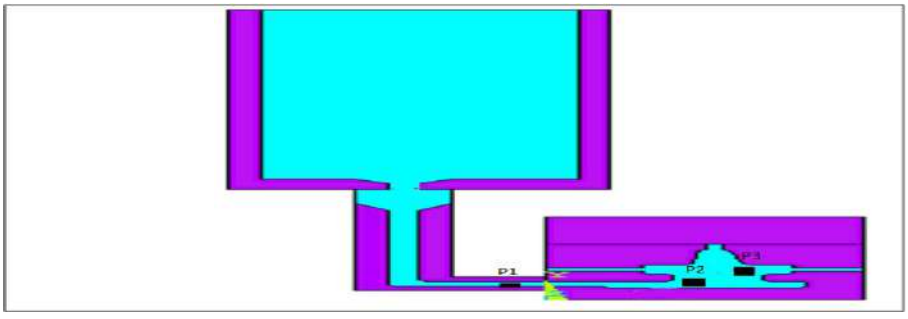


Figure (IV.7) : détection des cavités de remplissage de retassure.



Figures (IV.8) : La variation de Pression avec champ magnétique B=3000 tesla.

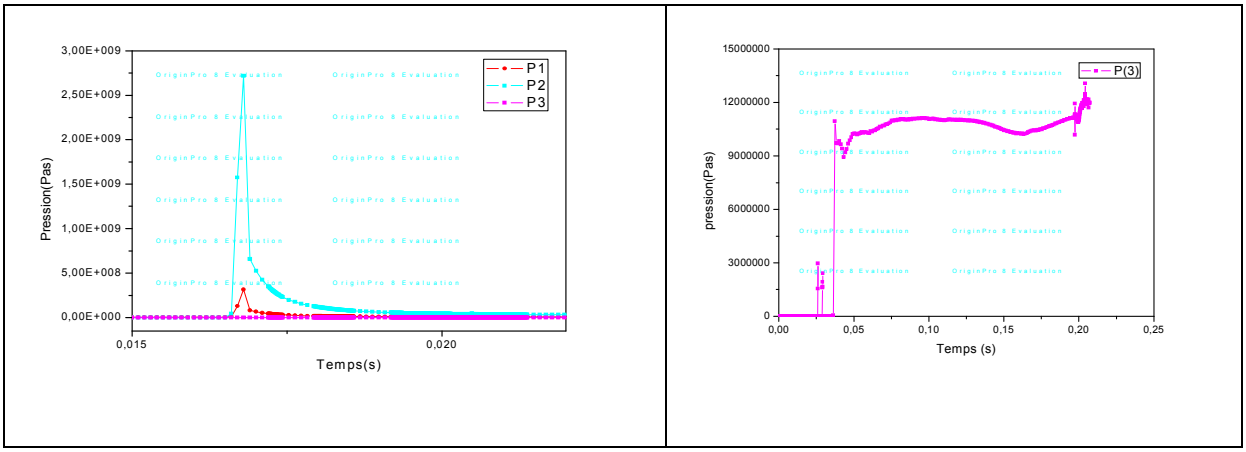
Pour connaître la variation des grandeurs physique pour déférents zones préférable de l'empreinte, on a choisies des points différents au sein de la section de l'empreinte suivant la figure c'après, voir Figure (VI.9)



Figure(VI.9) : les points choisis à une section du moule.

La figure (IV.10) illustré l'effet de la variation de la pression d'injection de métal en fonction de l'instant t. D'après cette figure on constant que, à l'instant t=0 la pression est nul (c'est dire l'absence de la pression d'injection) et après un certain temps t=0.017s on remarque que la pression augmente vers une valeur maximale de 2.7GPa et au-delà de cette valeur (c'est à dire on augment le temps d'injection) la pression diminue progressivement vers une valeur nulle.

Dans cette partie nous avons présenté la trajectoire de chaque point qu'on a déjà sélectionné à la première simulation figures (IV.9)

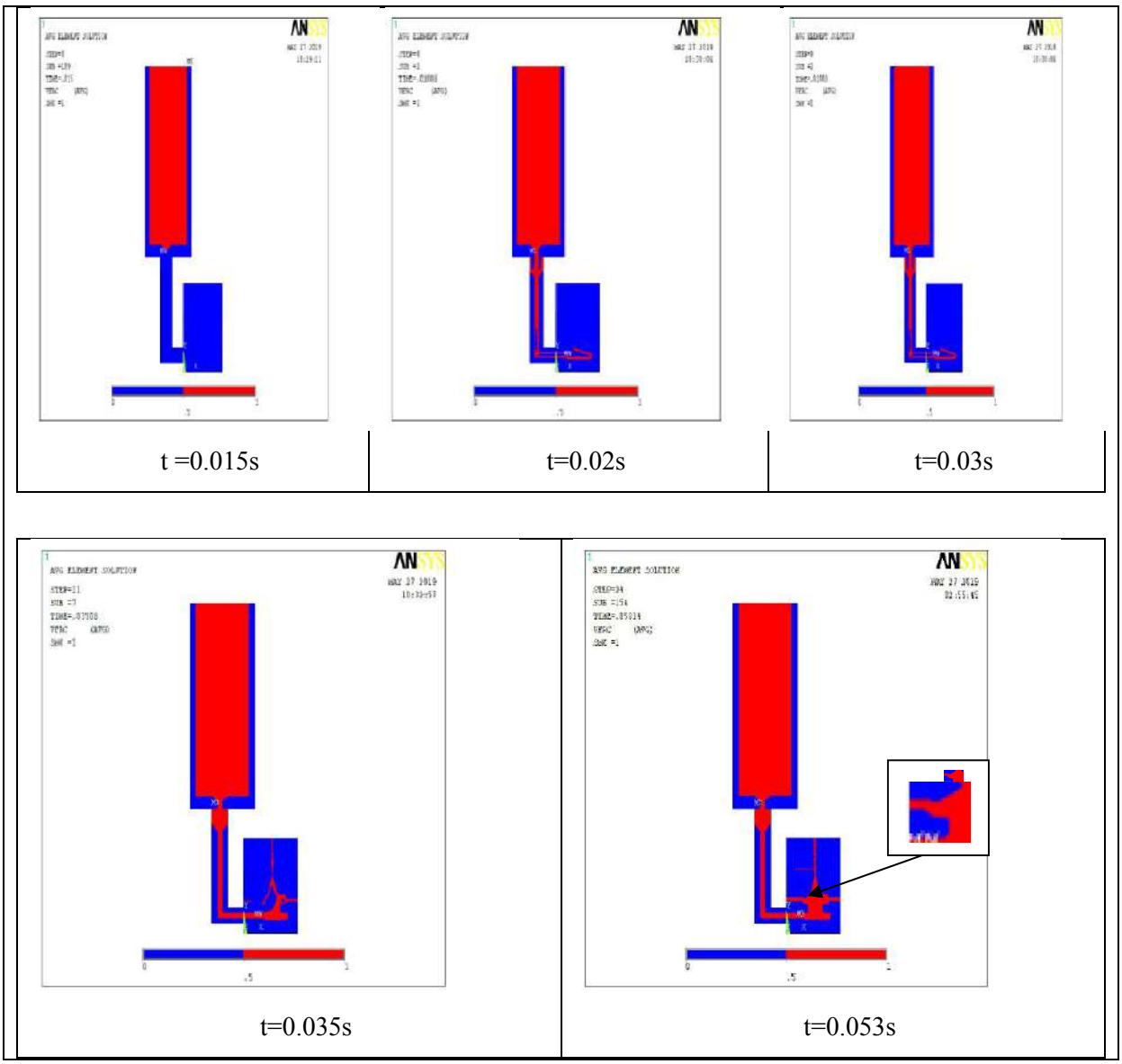


Figures (IV.10) : la variation de la pression des points choisis en fonction de temps de remplissage après l'ajout d'un champ magnétique estimé à B=3000 tesla.

VI.3.2.Expérience 2 (B=6000 tesla):

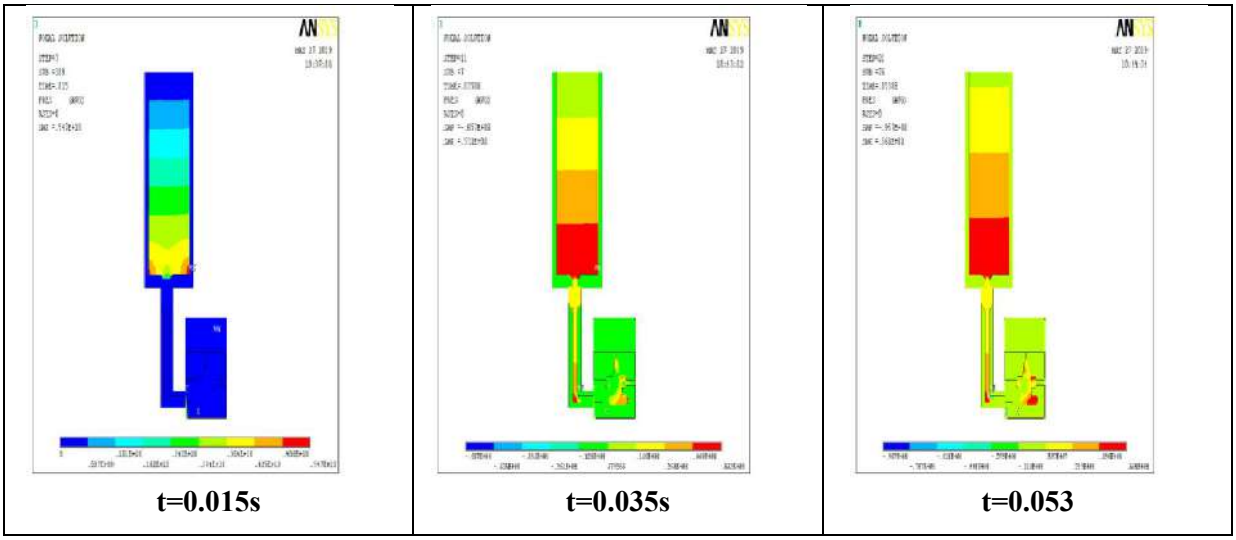
Augmentation de la quantité de champ magnétique (B=6000 tesla) et étude de cas :

La figure (IV.11) montre le mouvement du métal dans le moule à différents moments, en utilisant un champ magnétique de B = 6000 tesla.



Figures (IV.11) : Volume de fraction pendant le remplissage du moule avec un champ magnétique à environ B=6000 tesla.

la figure (IV.12) représente la variation de pression dans le moule avec un champ magnétique.



Figures (IV.12) : La variation de Pression avec champ magnétique B=6000 tesla.

La figure (IV.13) illustré l'effet de la variation de la pression d'injection de métal en fonction de l'instant t. D'après cette figure on constant que, à l'instant t=0 la pression est nul (c'est dire l'absence de la pression d'injection) et après un certain t on remarque que la pression augmente rapidement vers une valeur maximale de 3GPa pour t=0.015s et au-delà de cette valeur (c'est à dire on augment le temps d'injection) la pression diminue progressivement vers une valeur nulle.

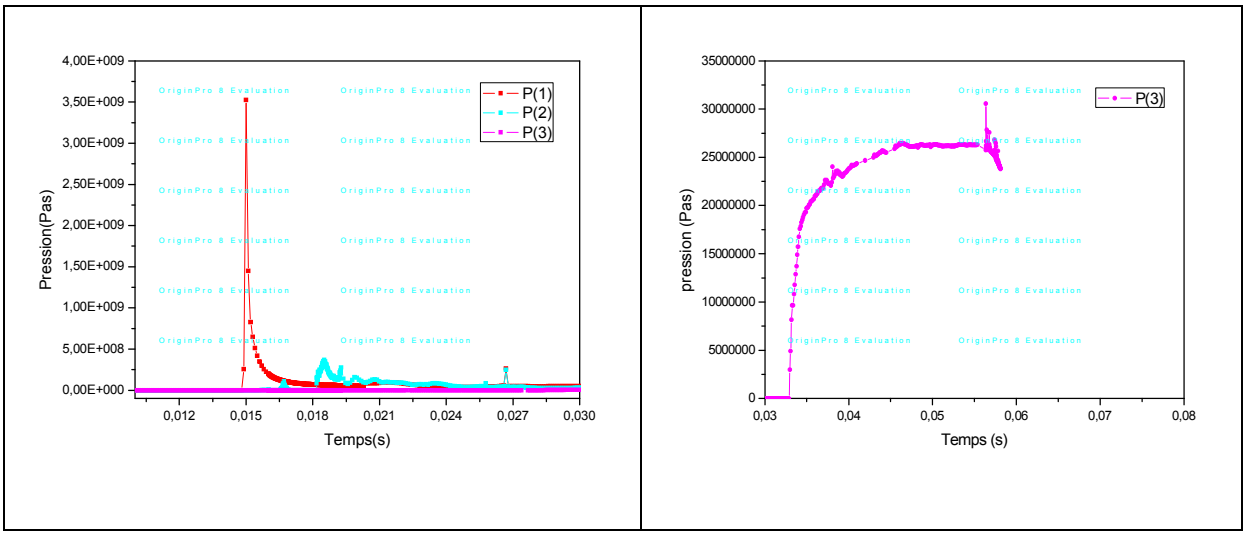


Figure (IV.13) : la variation de la pression des points choisis en fonction de temps de remplissage après l'ajout d'un champ magnétique estimé à B=6000 tesla.

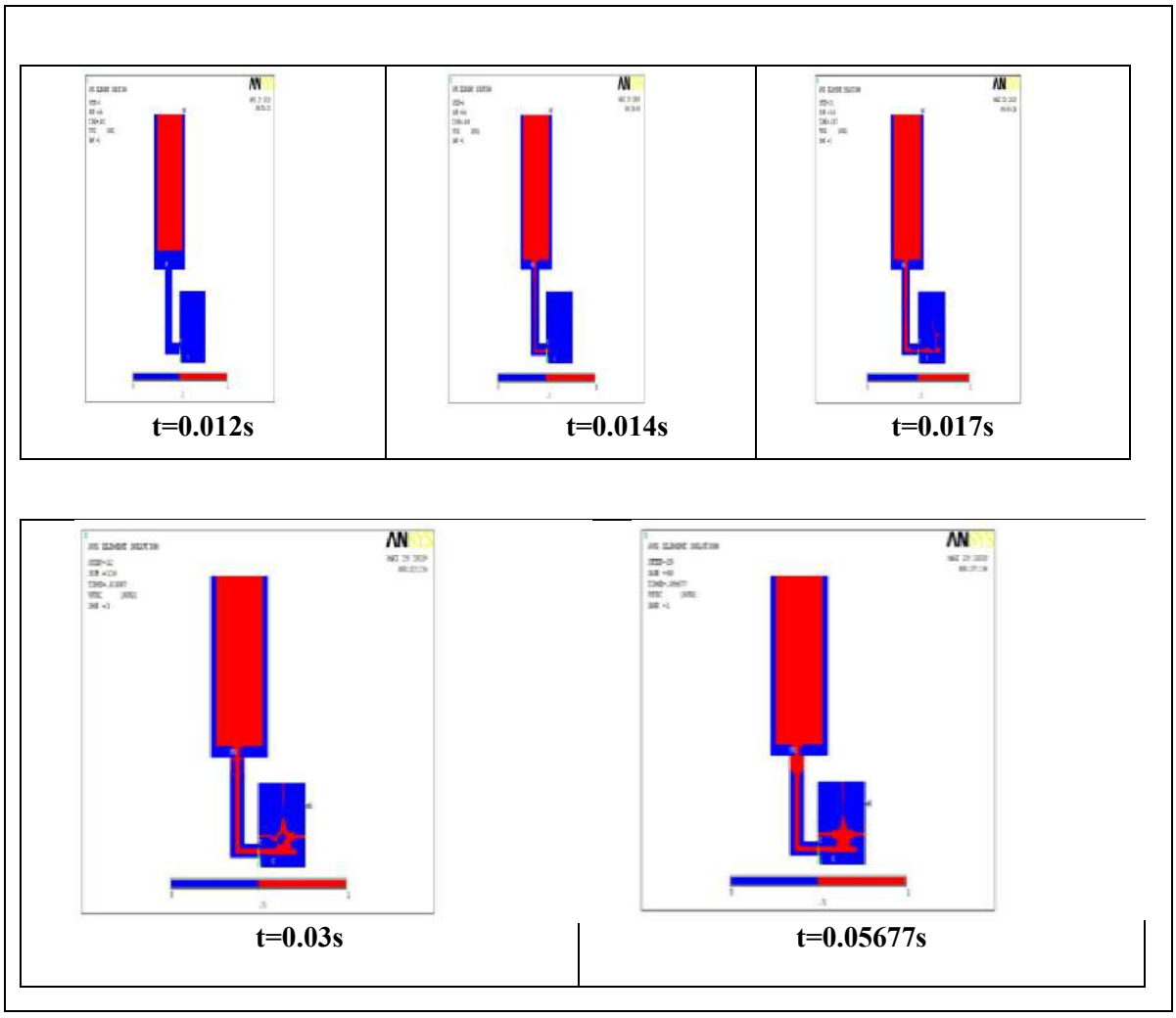
Avant le remplissage l'espace libre de moule est en contacte avec l'aire atmosphérique, et puisque le remplissage de métal au sein de moule rencontrait des arêtes de moule ce qui créer un volume d'aire qui est engendré par le métal et est former une bulle d'air, malgré le métal

déplacé cette bulle d'air en cour de remplissage, elle n'est pas disparaître. Ce phénomène est dit : la cavitation, il est progressé sous l'effet contact le fluide avec ces types des arrêtes.

VI.3.3.Expérience 3 : B=10000 tesla:

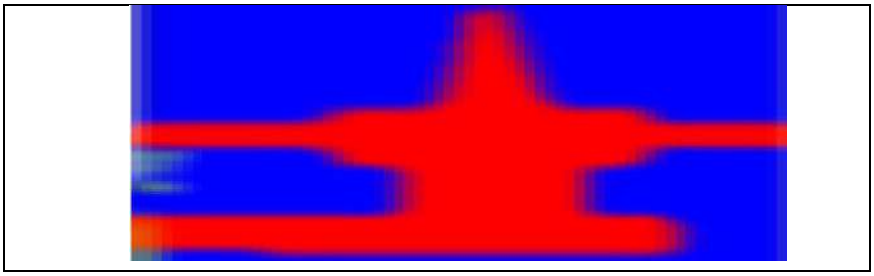
Dans cette expérience, nous avons éliminé les défauts de la présentation précédemment, après une augmentation du champ magnétique (B=10000 tesla), en tenant compte des conditions et des initiales du cas précédent.

La figure (IV.14) montre le mouvement du métal dans le moule à différents moments, en utilisant un champ magnétique de B = 10000 tesla.



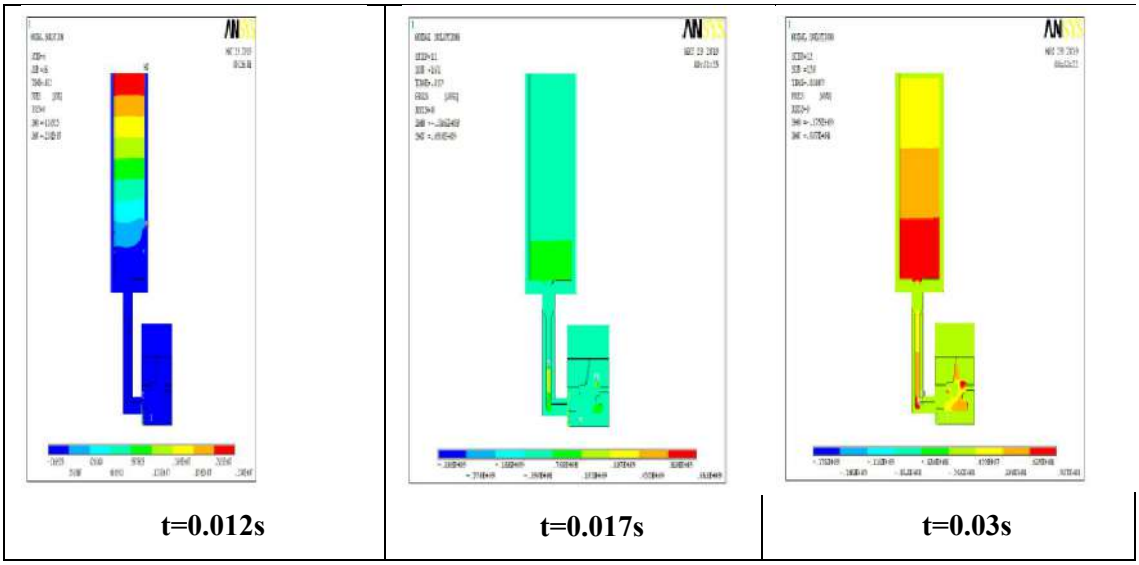
Figures (IV.14) : Volume de fraction pendant le remplissage du moule avec un champ magnétique à environ B=10000 tesla.

Après cette expérience On a éliminé les défauts de rendu précédemment figures (IV.15), en respectant les conditions et l'initiale du cas précédent.



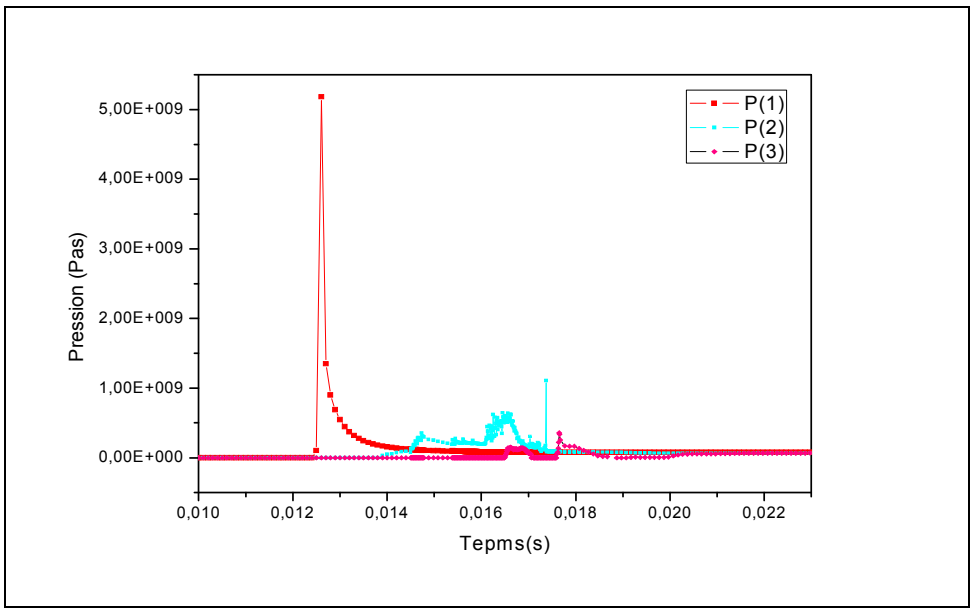
Figures (IV.15) : La disparition des défauts de remplissage de l'empreinte.

la figure (IV.16) représentation spatiale de pression dans le moule en fonction de temps.



Figures (IV.16) : La variation de Pression avec champ magnétique B=10000 tesla.

La figure (IV.17) montre l'effet de la variation de la pression d'injection de métal en fonction de l'instant t. D'après cette figure on constant que, à l'instant t=0 la pression est nul (c'est dire l'absence de la pression d'injection) et après un certain temps t=0.013s on remarque que la pression augmente vers une valeur maximale de 5GPa et au-delà de cette valeur (c'est à dire on augment le temps d'injection) la pression diminue progressivement vers une valeur nulle.

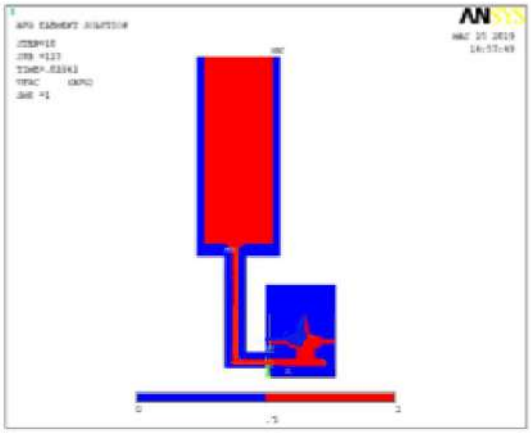


Figures (IV.17) : la variation de la pression des points choisis en fonction de temps de remplissage après l'ajout d'un champ magnétique estimé à B=10000 tesla

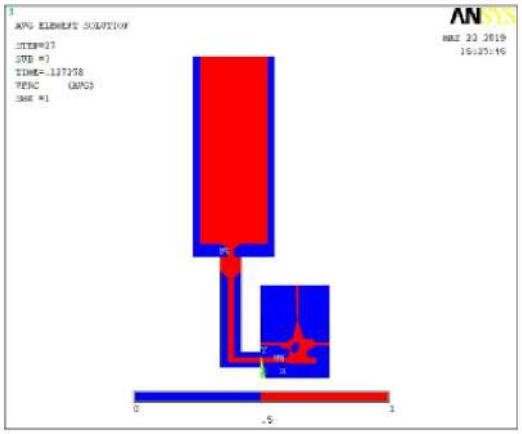
Les résultats présentés sur les Figures (IV.18).prouvent que d'introduction du champ magnétique comme étant un paramètre primordial favorise la réussite de remplissage des moules métalliques par rapport au procédé de coulée par gravité. Le champ magnétique influe sur la coulée par l'accélération de l'écoulement du métal en fusion, il influe aussi sur le comportement thermique du métal et du moule.

L'écoulement du métal a été accéléré par un champ magnétique en comparaison avec celui engendré par l'effet de la pesanteur.

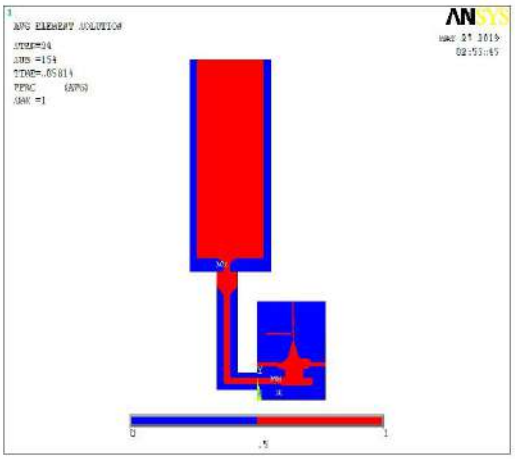
La coulée d'un métal par gravité dans un moule métallique peut ne pas donner une pièce parfaite particulièrement pour les pièces compliquées (défaut mal venu). Cette situation nous a orientés vers l'utilisation d'une nouvelle technique qui est le champ magnétique afin d'améliorer l'écoulement de ce métal. Dans cette section, on obtient que l'intensité du champ magnétique avec une valeur de 10000 Tesla a montré que les défauts dans le moule de la pièce considérée sont ignorés.



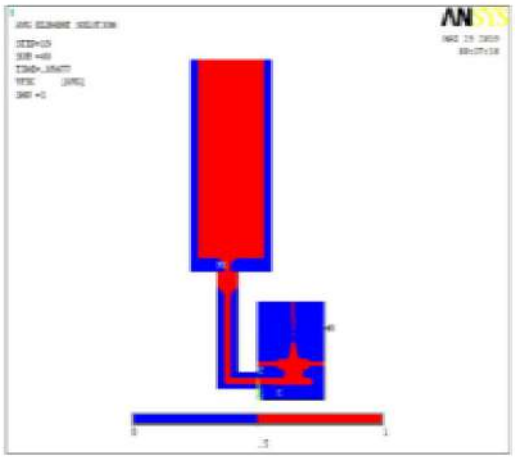
B=0



B=3000 tesla



B=6000 tesla



B=10000 tesla

Figures (IV.18) : Comparaison des résultats.

VI.4.Conclusion :

Nous présentons dans ce chapitre les résultats obtenus par le calcul numérique basé sur la méthode EF/VOF et nous les comparons en premier lieu aux résultats expérimentaux dans un cas de validation, ou le résultat obtenu montre un bon niveau de cohérence. Cette méthode nous a permis de même une meilleure Compréhension de la distribution de tous les paramètres au cours de remplissage, qui nous à permet d'analysé le phénomène de remplissage avec champ magnétique et qui nous oriente vers l'optimisation des paramètres influençant sur les défauts et le coût total du remplissage du moule. Nous avons cependant étudié numériquement le remplissage de moule sur un cas inspiré du phénomène de ventouse provoqué par l'ouverture de plus qu'un point de dégazage, d'ou les résultats obtenus permettent la bonne compréhension. Les enregistrements montrent en effet un mouvement extrêmement rapide qui peut difficilement être expliqué par les seules variations de température.

Conclusion générale

Conclusion générale :

Dans ce mémoire Le présent travail porte sur la simulation numérique de l'écoulement de fer liquide avec surface libre durant son injection dans la cavité du moule à partir du cylindre d'injection. Le modèle proposé est bidimensionnel et prend en considération le transfert thermique avec changement de phase, et analysé les défauts liés au remplissage du moule.

Sur la base des résultats de cette simulation, on peut dire que l'avantage de la simulation est d'analyser plusieurs phénomènes présentes dans le processus de remplissage du moule afin de mieux comprendre et de mieux analyser ces phénomènes, et qui est affecté certainement sur la qualité de la produit final. Ainsi que, la méthode VOF s'est révélée être une technique puissante, pour le contrôle du remplissage des moules.

La réussite d'une simulation dépend beaucoup de la fiabilité des données thermo physiques des matériaux du moule et de la pièce mises à la disposition du code de calcul.

De ces donnés on établira des expériences de différents systèmes d'alimentations pour la même section du moule, et le même alliage à coulé (fer) de propriétés physiques, et leurs conditions initiales et aux limites, aussi on établir la même taille de maillage pour les différentes expériences (0.025m) de coté d'une maille quadratique.

Sur la base des résultats Numérique, en peut dire que l'avantage de la simulation est d'analyser plusieurs phénomènes présentes dans le processus de remplissage du moule afin de mieux comprendre et de mieux analyser ces phénomènes, et qui est affecte certainement la qualité de la produit final. Ainsi que, la méthode VOF s'est révélée être une technique puissante, pour le contrôle du remplissage des moules.

La simulation numérique en fonderie est désormais indispensable dans la conception et la mise au point des pièces car en représentant fidèlement ce qui se passe à l'intérieur du moule, elle peut être utilisée comme base de dialogue entre les différents facteurs du développement des pièces de fonderie elle permet d'énorme gains de temps dans la mise au points des moules et s'inscrit dans la chaine complète de simulation de processus calculs de dimensionnement, simulation du remplissage et de la solidification ,conception de l'outillage et de ses conditions de fonctionnement.

Références bibliographiques

[1] BOUGHERARA, Etude de la corrélation entre les propriétés mécaniques Et la température des traitements thermiques d'un alliage. Mémoire de Magistère, Université HADJ LAKHDAR BATNA 2013/2014.

[2] Lionel MARTIN, Intégration du métier de la fonderie dans les processus de conception méthodologies et outils associés, L'école nationale supérieure d'arts métiers, 2006.

[3] Adrien Toros, Jorge Zarate, Benoît Denkinger, Méthode de productions Moulage des Métaux, école polytechnique fédérale de Lausanne, 2012.

[4] https://fr.wikipedia.org/wiki/Défaut de moulage.

[5] cours Procédés de mise en forme par moulage , 2017.

[6] https://hal.archives-ouvertes.fr/tel-01340526/file/GARDA Brahim opt.pdf .

[7] Journal of Scientific & Engineering Research, Volume 6, Issue 5, May/2015.

[8] Article in Materials Science Forum , 2018.

[9] KORTI Mohammed Choukri, Simulation numérique des champs dynamique et thermique durant le moulage par injection à haute pression des métaux, Mémoire de magister, Université Abou Baker Belkaid Tlemcen, 2011-2012.

[10] BEDJEGHIT El Houas , Etude expérimentale et numérique d'un écoulement autour d'obstacles carre et cylindrique, Université Mentouri Constantine ; 2009-2010.

[11] JU MIN KIM, KYUNG AHN, SEONG JAE LEE, and SEUNG JONG LEE, numerical simulation of moving free surface problems in polymer processing using volume of fluid university Seoul, Korea, 2001.

[12] MATENE ELHACENE, méthode numérique de résolution des équations de Navier stokes, THESE DE DOCTORAT, Université Lille 1997.

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

[14] YKRELEF Hichem Étude de la distribution des défauts du remplissage des moules par simulation numérique, de magister ; Université de Yahia Fers de Médéa ; 2011.

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

[16] Arnaud Delano Kwayep De Petntang ; Simulation numérique de la fonderie du Front Plate DC ENSAM-Meknès, 2001.

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

[18] Son G.Dhi V.K, Mathematical modeling of mold filling and solidification of casting: partII application to Cu-5%Zn alloy casting in a sand mold International Journal of Heat and Mass Transfer, vol .51, 2008/ 2009.