République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Yahia FARES de MÉDÉA
Faculté des Sciences et de la Technologie



Mémoire de Magister

Présentée par : YKRELEF Hichem
Ingenieur d'État en Génie Mécanique énergétique: Université Y. F., Médéa.

En vue de l'obtention du diplôme de Magister en Génie Mécanique énergétique

Thème

Étude de la distribution des défauts du remplissage des moules par simulation numérique.

Proposition du jury:

Mr. S. ABOUDERA	Professeur, U.M	**Président du Jury**
Mr. A. ABDALLAH ELHADJ	Maitre de Conférences(A), U.M	**Examinateur**
Mr. M. N. BOUAZIZ	Maitre de Conférences(A), U.M	**Examinateur**
Mr. S. HANINI	Professeur, U.M	**Directeur de mémoire**
Mr. M. ZIRARI	Maître de Conférences(B), U.M	**Codirecteur de mémoire**

juin 2011

Université Yahia Fares – Ain-d'Heb Médéa – 26000

Remerciements

Nous remercions notre Dieu tout puissant « **ALLAH** » de nous avoir permis et aider à accomplir ce travail en nous assurant l'atteinte de mon objective et arriver à mon but.

Je tiens à exprimer une profonde reconnaissance à mon Promoteur monsieur **HANINI Salah** pour ses conseils et son soutient.

Je tiens à remercier particulièrement monsieur **ZIRARI Mounir**, mon Co-Promoteur pour ses conseils, son assistance, son suivi et son soutient.

Je remercie Messieurs les membres du jury pour leur collaboration durant l'examen de ce travail et leur participation à ma soutenance.

Je remercie enfin mes parents qui m'ont donné l'immense chance de réaliser ces études. Je leur dédie ce travail.

Merci à tous ceux qui, à un moment ou un autre, nous ont apporté leur savoir faire, en particulier KHAZRANE Mohamed, MEDJBER Mohamed, Imad, TAHAR Souad, KHADDAR Hamza, FEKIR Ismail.

Dédicace

Je dédie ce travail

A mon très cher grand parent que j'aime beaucoup

A mes très chers parents pour toute l'affection, tendresse et l'attention dans mes études.

A mes très chers frères et sœurs

A tous les professeurs et enseignants qui ont pour ma bonne formation de puis mes début jusqu'à la fin de mon cursus universitaire.

A tous mes amis

A mes amis de la promotion

ملخص :

في هذا العمل، المحاكاة العددية لملء القالب من خليط النحاس و 5٪ من الزنك، و أجريت باستخدام تقنية العناصر المحدودة. و في هذه الدراسة ، يتم استخدام تقنية نماذج العناصر المحدودة من الاضطراب و الخوارزمية في جزء من الحجم (حجم السائل) وANSYS في تصميم نموذج لديناميات الموائع الحسابية . وكانت عملية ملء القالب في المحاكاة في الظروف العادية عن طريق الجاذبية. ويصب المعدن السائل في قالب من خلال قناة. نأخذ مقاطع درجة الحرارة في الملامح ز = 0،05 ثا. أثناء عملية ملء القالب تم اعتبار شرط الحدود وكافة الخصائص الفيزيائية و الكميائية من السبائك وقالب من الرمل كان يتغير مع درجة الحرارة. وتم الحصول على النتائج التالية: السرعة، وتوزيع درجات الحرارة والضغط أثناء ملء القالب. من ميزة المحاكاة هوتحليل الظواهر المختلفة في عملية ملء قالب التي تعتبر جد صعبة و مكلفة تجريبيا.

كلمات البحث: المحاكاة العددية، حجم السائل (VOF)، طريقة العناصر المحدودة، ملء القالب.

Résumé :

Dans ce travail, des simulations numériques de remplissage du moule d'un alliage Cu-5% Zn ont été réalisées en utilisant une technique par éléments finis. Dans cette étude, la technique des éléments finis, les modèles de turbulence, en plus l'algorithme de volume de fraction (Volume of Fluid) et le logiciel ANSYS sont utilisée pour modéliser la dynamique des fluides. Le processus de remplissage du moule a été simulé dans des conditions atmosphériques par gravité et le métal liquide a été versé dans le moule à travers un canal de moule. Les profils de température générés à l'instant t = 0.05 s au cours du processus de remplissage du moule ont été considérés comme une condition à la limite et toutes les propriétés thermo physiques de l'alliage et le moule de sable ont été considérés comme une fonction de la température. Les résultats suivants ont été obtenus: la vitesse, la distribution de température, champs de pression et le volume de fraction au cours de remplissage du moule.

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

Abstract:

In this work, numerical simulations of mold-filling of a Cu-5%Zn alloy were performed by using a finite element technique. In this study, the finite-element technique, turbulence models in addition to the Fractional Volume (Volume of Fluid - VOF) algorithm is used to model the computational fluid dynamics (CFD) and the ANSYS software program were used. The mold filling process was simulated in atmospheric conditions by gravity and the liquid metal was poured into the mold through a mold channel. The temperature profiles generated at t =0.05 s during the mold filling process was considered as a boundary condition and all the thermophysical properties for the alloy and for the sand mold were considered as a function of temperature. The following results were obtained: velocity, temperature distribution, pressure fields and the solid fraction during mold-filling.

Keywords: numerical simulation, mold filling, finite-element method, sand mold, volume of fluid (VOF).

Liste des figures

Fig. I.1 : description d'un moule complet. 5

Fig. I.2 : différents moyens de production de moulage. 7

Fig. I. 3 : éléments du moule en coquilles. 8

Fig. I. 4: Moulage en coquille par gravité. 10

Fig. I. 5: machine moulage à basse pression. 11

Fig. I. 6: une coupe de moulage sous pression. 12

Fig. I. 7. Principales étapes du procédé de moulage au sable. 14

Fig. I. 8 : Principales étapes de procédé de moulage en sable. 15

Fig. I. 9 : La représentation de l'usinage, le retrait et la dépouille. 16

Fig. I. 10 : Principales étapes du procédé de moulage à la cire perdue. 17

Fig. I.11. Les défauts de surface. 19

Fig. I.12. Les défauts de détachement dans le moule. 19

Fig. II-1 : Différent mode de transfert thermique. 26

Fig. II-2 : Conductivité thermique. 28

Fig. II-3 : Le transfert thermique par rayonnement 29

Fig. III.1.: La méthode lagrangienne et la méthode eulérienne. 34

Fig. III.2 : Les différentes méthodes de suivi de front. 35

Fig. III.3: Les différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque. 35

Fig. III.4. Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret. 36

Fig. III.5. Positionnement de l'interface à partir de la normale et de fraction volumique. 37

Fig. III.6. Segments représentants l'interface. 38

Fig. III.7. Volume critique 39

Fig. III.8 : vitesse aux bornes du domaine. 39

Fig. III.9 : Déplacement du segment 40

Fig. III.10. Calcul de la fraction volumique. 41

Fig. IV.1 a) Géométries de moule et de la cavité b) maillage adoptée pour la simulation en 2D, ... 42

Fig. IV.2. a) Champs de la température de modèle de Moisés M, Guilherme A. Salem, Felipe Bertelli, et Noé Cheung, b) Les champs de la température de nos simulations. 46

Fig. IV.3. : a) Champs de la pression de modèle de Moisés M, Guilherme A. Salem, Felipe Bertelli, et Noé Cheung, b) Les champs de la pression de nos simulations. 47

Fig. IV.4. Volume de fraction pendant le remplissage du moule ; a) modèle de Moisés M, Guilherme A. Salem, Felipe Bertelli, et Noé Cheung, b) notre modèle. 48

Fig. IV. 5. Profile de la vitesse dans le moule 50

Fig. IV. 6. Répartition de la pression dans le moule 51

Fig. IV.7. Répartition de la température dans le moule 52

Fig. IV.8. Profile de volume de fraction dans le moule 54

Fig. IV.9. Profile de la vitesse dans le moule 55

Fig. IV.10. Répartition de la température dans le moule 56

Fig. IV.11. Profile de la pression dans le moule 57

Fig. IV.12. Profile de volume de fraction 58

Liste des tableaux

Tab. I.1: classification les procédés de la fonderie. 5

Tab. I.2. différents procédés de moulage. 6

Tab. I. 03 : présentation des différents défauts de moulage..... 22

Tab. IV.1 : Propriétés d'alliage de Cu5%Zn. 43

Tab. IV. 2 : variation de la viscosité d'alliage de Cu5%Zn en fonction de température..... 44

Tab. IV. 3 Propriétés des matériaux de moule. 44

Nomenclature

Notation	Signification	Unité
Cp	Capacité thermique	[J/Kg.K]
H	Coefficient de transfert thermique	[W/m2.K]
L	Chaleur latente de fusion	[J/Kg]
n	Vecteur normal à S	[m,m,m]
p	Périmètre	[m]
S, A	Surface	[m^2]
T	Température	[K]
t	temps	[s]
t_0	temps à la position initiale	[s]
V	Volume	[m^3]
λ	Conductivité thermique	[W/m.K]
ρ	Masse volumique	[Kg/m^3]
μ	La viscosité dynamique	[Kg/m]
q	Source volumique	
F	Fraction volumique	
m	La mass	[Kg]
h	Distance	[m]
F_{21}, F_{23}et F_{22}	Le déplacement du segment de la cellule 2 ver 1et 3	[m]
r	Paramètre de calcule d'interface	
ε	Coefficient d'émission de la surface	

$\boldsymbol{\sigma}$	Constante de Stephan Boltzmann	[W.$\boldsymbol{m^{-2}}$.$\boldsymbol{K^{-4}}$]
$\boldsymbol{\varphi}$	La densité de flux thermique	[W/m^2]
ν	La fréquence	[Hz]
ν	La viscosité cinématique	[m^2/s^2]
Γ	Coefficient d'échange dans les termes de transport	
E	Energie	[J]
h	La constante de Plank	[Js^{-1}]
u	Composante de la vitesse moyenne dans la direction X	[m /s]
v	Composante de la vitesse moyenne dans la direction Y	[m /s]
w	Composante de la vitesse moyenne dans la direction Z	[m /s]
X, Y, Z	Coordonnées cartésiennes	

Abréviation

2D	Deux Dimensions
3D	Trois Dimensions
EDP	Equations aux Dérivées Partielles
EF	Elément Finis
VF	Volume Finis
MDF	Méthode des Différences Finis
VOF	Volume Of Fluid (volume de fluide)
CIAM	Construction de l'Interface Affine par Morceaux
SLIC	Simple Ligne Interface Calculation
MAC	Marker And Cells (méthode de marqueur de volume)

TVD	Total Variation Diminishing
CFL	Courant- Friedrich- Lewy
VC	Volume de Contrôle
CL	Condition aux Limites
RTM	Resin Transfert Molding

Sommaire

Introduction générale 1

I.1. Introduction 3

I.2. Les techniques de moulage 4

I .2.1. Le moule non permanent : 6

I.2.2. le moule permanent : 6

I .3. Description technologique du procédé de fonderie 8

I.3.1. Le moulage en coquille 8

I.3.1.1. Choix du procédé 8

I.3.1.2. Les avantage 9

I.3.1.3. Les inconvénients 9

I.3.1.4. Différents procédés de moulage en coquille 9

I.3.1.4.1. Moulage en coquille par gravité 9

I.3.1.4.2. Moulage en coquille basse pression 10

I.3.1.4.3. Moulage sous pression 11

I.3.1.4.3.1. Principe de fonctionnement du moulage sous pression 13

I.3.2. Le moulage au sable 14

I.3.3. Le moulage à la cire perdue 17

I.3.3.1. Les avantage 18

I.3.3.2. les inconvénients 18

I .4. Défauts de moulage (de fonderie) 18

I.4.1. Défauts affectant la surface 18

I.4.2. Défauts affectant la masse ou le volume 20

I.4.2.1. Les inclusions d'air 21

I.4.2.2. Les soufflures 21

I.4.2.3. Les retassures 21

II. 1. Introduction 24

II.2. Modélisation de l'écoulement des fluides 24

II.2.1. L'équation de la continuité 24

II.2.2. L'équation de quantité de mouvement 24

II.2.3. Équation de l'énergie 25

II.3. Modélisation de la surface libre 25
II.4. Modélisation thermique 26
II.4.1. Introduction 26
II.4.2. Différentes modes de transfert de chaleur 26
II.4.2.1. Transfert de chaleur par conduction 27
II.4.2.1.1. Cas des gaz 27
II.4.2.1.2. Cas des liquides 27
II.4.2.1.3. Cas des solides 27
II.4.2.1.4. Loi de Fourier 27
II.4.2.2. Transfert de chaleur par convection 28
II.4.2.3. transfert de chaleur par rayonnement 28
II.5. Les conditions aux limites 30
II.5.1. Condition de Dirichlet 30
II.5.2. Condition de Neumann 30
II.5.3. Condition de Robin-Fourier 30
II.6. Conclusion 31
III .1. Introduction 32
III.2. Les trois grandes méthodes des discrétisation 32
III.2.1. La méthode des différences finies 32
III.2.2. La méthode des volumes finis 33
III.2.3. La méthode des éléments finis 33
III.3.Calcul d'interfaces 33
III.3.1. les méthodes lagrangiennes 34
III.3.2. les méthodes eulérienne 34
III.3.2.1. Les méthodes de suivi de front 34
III.3.2.2. Les méthodes de suivi de volume 35
III.4. La Méthode VOF CIAM 36
III.4.1. Introduction 36
III.4.2. Présentation de la méthode en 2D 37
III.4.2.1. Estimations de la normale 37
III.4.2.2. Positionnement de l'interface 38
III.4.2.3. Déplacement de l'interface 39
III.4.2.4. Calcul de la nouvelle fraction volumique 40

III.5. Conclusion 41
IV.1. Introduction 42
IV.2. Description du domaine d'application 42
IV.3.1. Validation 45
IV.3.2. évaluation de l'influence de la température sur le bon remplissage 49
IV. 3.3. Comparaison entre la première et la deuxième partie 58
IV. 4. Conclusion 59
Conclusion générale 59

Introduction générale

Introduction générale

La fonderie est un procédé de mise en forme des métaux qui consiste à couler un métal ou un alliage liquide dans un moule pour reproduire, après refroidissement, une pièce donnée (forme intérieure et extérieure). Schématiquement, on peut classer les procédés de moulage utilisés en fonction de l'aptitude du moule à produire une seule pièce (moule non permanent) ou un grand nombre de pièces (moule permanent).

Aujourd'hui, le RTM (Resin Transfert Molding) reste un des procédés de fabrication des composites les plus avantageux, par son coût de réalisation, sa productivité élevée et ses possibilités de mise en œuvre des pièces à forme complexe et caractéristiques mécaniques remarquables. Son principe général consiste à injecter dans un moule fermé, une résine thermodurcissable sur un renfort fibreux préalablement disposé. Il comporte deux sous familles : les procédés RTM et ses dérivées et les procédés d'infusion et ses dérivées.

Dans le premier cas la résine s'imprègne dans le renfort par un mode de transfert et dans le second par infusion. Les applications de ce procédé sont de plus en plus pointues et permettent de réaliser des pièces de bonne qualité dans diverses applications.

Comme pour les autres industries, le développement de produits pour la fonderie a dû répondre au triptyque : augmentation de la productivité, baisse des coûts, contrôle de la qualité. La réalisation de cet objectif triple passe par la maîtrise technique du procédé dans son ensemble, de la conception de la pièce à couler jusqu'à la réalisation des outillages. Or il n'existe actuellement aucune méthodologie qui puisse diriger efficacement l'ensemble des étapes nécessaires à la fabrication des pièces de fonderie.

En effet, le processus de conception en fonderie est un processus complexe dans le sens où il fait intervenir des acteurs de métiers ou d'expertises variés, et surtout ce procédé nécessite de nombreux bouclages de conception : par exemple entre la pièce telle que le concepteur la dimensionne et la pièce telle que le fondeur peut la produire, ou encore entre la pièce effectivement fabricable et les outillages associés. Ces bouclages inévitables mais coûteux doivent donc être réduits le plus possible.

Il manque donc aux entreprises de fonderie une méthodologie et un cadre formel (support informatique) qui puissent leur permettre de réaliser la conception complète d'une pièce et de ses outillages tout en réduisant le plus possible les bouclages.

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

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

Les types de défauts rencontrés le plus souvent en moulage qui sont :

Défauts affectant la surface (bavures, les épaississements, les saillies, etc.).

Défauts affectant la masse ou le volume (Les inclusions d'air ; Les soufflures ; Les retassures.)

La caractérisation de tels phénomènes est difficile à mener expérimentalement car les échelles spatio-temporelles mises en jeu sont souvent difficiles à atteindre. La mise en œuvre par simulation numérique directe d'un modèle d'écoulement apparaît donc comme une solution intéressante.

La présente étude concerne la modélisation numérique des procédés de moulage. Quelques travaux ont proposé des méthodes basées sur les systèmes des coordonnées curvilignes adaptés à une frontière. Cependant, 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. Ce type d'approche a été proposé pour la première fois par Wang et autres, il a été adopté dans le cas du moulage par injection des coquilles minces. Fracchis était le premier à proposer la méthode de FE/CV pour simuler le processus RTM et d'autres chercheurs ont également suivi cette approche. A travers cette étude, nous proposons une méthode numérique pour la simulation du remplissage des moules dans le procédé RTM avec prise en charge de la variation d'épaisseur du renfort. L'étude à pour objectif de validé les résultats de quelque travaux de simulation numérique de remplissage des moules tel que : **Moisés M**, **Guilherme A**. **Salem**, **Felipe Bertelli**, et **Noé Cheung**. Et de voir l'influence de la température sur les remplissages des moules.

La méthode numérique adoptée est basée sur une discrétisation type éléments finis /VOF.

Ce mémoire est donc organisé de la façon suivante :

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 une conclusion générale et recommandation.

Chapitre I :

Elément de moulage

I.1. Introduction

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

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

La fonderie, c'est aussi une industrie produisant des pièces de toutes natures finies ou semi-finies, en toutes quantités, de la façon la plus économique à partir de matières premières brutes (métaux, ferrailles, déchets de tôles, bocages), contrairement à certaines techniques concurrentes (forgeage, mécano soudage...) utilisant des produits semi-finis comme les tôles neuves, les barres et billettes en acier de toutes nuances, élaborés par la sidérurgie.

On s'adresse à elle soit pour la fabrication de pièces de formes compliquées qu'il serait difficile ou impossible de réaliser par tout autre procédé, soit pour la production à des prix de revient plus intéressants de pièces plus simples, soit encore pour profiter des propriétés physiques ou d'utilisation (dilatation, corrosion, frottement, usure, basses et hautes températures) et des propriétés mécaniques des divers métaux et alliages coulés, soit enfin pour couler des alliages non corrodables ou difficilement usinées.

I.2.Etat de l’art :

Les procédés de moulage sont largement utilisés pour produire des composants en métal. La demande des pièces de haute précision de coulée continue d'augmenter en raison des exigences rigoureuses de l'industrie automobile et aéro-industries. Beaucoup de recherches ont été consacrées vers le développement de processus pour la production de biens de haute qualité de coulée à faible coût. D'un point de vue macroscopique, des procédés de coulée impliquent le couplage du transfert de chaleur de solidification et d'écoulement de fluide. Analyse des flux de fluide au cours du processus de remplissage du moule a été vigoureusement étudiés dans les dernières décennies en raison de l'avance de matériel informatique et de logiciels.

Selon les auteurs Babaei et al, Im et al, et Kim et al. Le remplissage du moule est une étape très importante dans la détermination de la qualité d'une pièce. Le phénomène d'écoulement de fluide au cours de remplissage de moule est étroitement lié à la qualité de la coulée. [Kader Zaidi, Boussad Abbes, Cristian Teodosiu, 1997], qui font un algorithme de suivi de la surface libre, lors du remplissage de pièces de

métal en fusion, est développé à partir de technique de marqueur de volume (MAC). [K. Ravindran, R.W. Lewis ,1998], aussi font un algorithme pour le remplissage des moules qui a également les effets des modèles de solidification comme la formation de froid pendant le processus de remplissage.

[Hoang Quan NGUYEN, Benjamin REMY et Alain DEGIOVANNI, 2009], qui font une simulation de remplissage des moules par gravité ou par pression pour l'industrie verrière. Le problème est relativement complexe à résoudre car les propriétés thermo-physiques de verre, en particulier sa viscosité dynamique, dépendent fortement de la température. Ils proposent un modèle valable sur une très large gamme d'épaisseur optique peut être facilement implémenté dans différents codes de type Volumes Finis ou Eléments Finis.

Les autres prennent explicitement en compte les deux phases liquide et gazeuse (air). [Moisés M, Guilherme A. Salem, Felipe Bertelli, et Noé Cheung, 2008], proposent un modèle pour un remplissage d'un moule, le modèle repose sur plusieurs hypothèses comme la constante des variables thermiques du moule et de métal sauf la conductivité thermique de métal qui varie avec la température.

I.3. Les techniques de moulage

Les organes et pièces constituants les machines et appareils proviennent de sources diverses de fabrication telles que le forgeage, l'usinage, l'estampage, la fonderie, etc.

La technique de fonderie est le plus souvent utilisée, car elle est non seulement économique, mais :

- Elle permet de produire des pièces de formes complexes (difficilement réalisables par usinage ou par d'autres procédés).
- La série des pièces est identique.
- L'obtention de pièces massives telles que bâtis, volants, … etc.

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

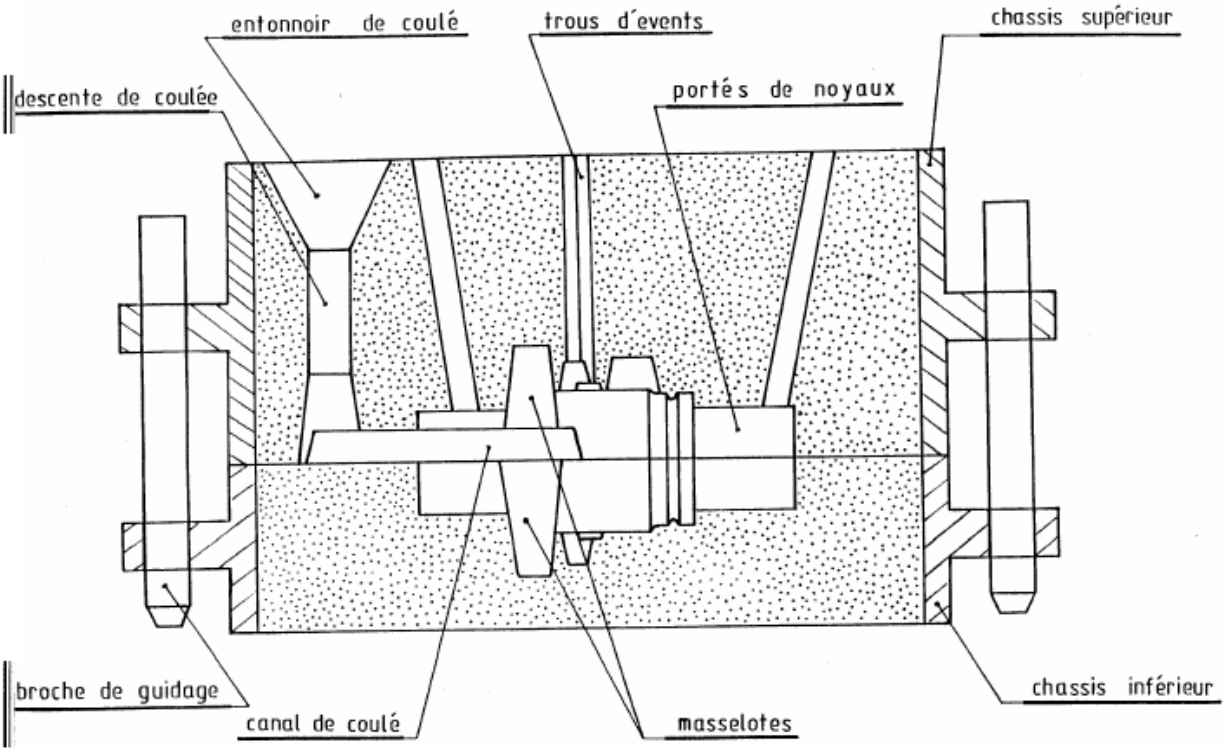


Fig. I.1 : Description d'un moule complet, [2].

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

Tab. I.1: Classification les procédés de la fonderie, [2].

Selon La nature des métaux et alliages	**- Fonderie de fonte** **- Fonderie d'acier.** **- Fonderie d'aluminium et ses alliages.** **- Fonderie de cuivre. Bronzes, laitons, … etc.**
Selon l'utilisation	**- Fonderie d'art.** **- Fonderie d'ornement (bijoux).** **- Fonderie de mécanique industrielle.**
Selon le procédé de moulage	**- Moulage en sable (manuel ou mécanique).** **- Moulage en carapaces.** **- Moulage à la cire perdue.** **- Moulage en coquilles (moule permanent).**

Dans ces procédés, le moule peut-être permanent ou non permanent (destructible).

I .3.1. Le moule non permanent :

Ce moule est utilisé qu'une seule fois, pour extraire la pièce. Il faut le détruire, l'empreinte est obtenue par moulage du matériau constitutif autour d'un modèle réalisé en bois ou en métal.

I.3.2. le moule permanent :

Le moule peut servir un grand nombre de fois, il est réalisé en plusieurs parties pour faciliter l'extraction de la pièce. Il est utilisé surtout lorsque la quantité de pièces à couler est importante.

Le choix des procédés de moulage en dépend du métal à couler. En général la température de fusion du métal coulé doit être inférieure à la température de fusion du matériau constituant le moule.

Tab. I.2. Différents procédés de moulage, [2].

Métaux Et températures de fusion	**Moulage En sable**	**Moulage En coquille**
Fontes : 1100 à 1250°C **Aciers : 1200 à 1500°C**	**- Moulage en sable avec ou sans noyau.** **- Moulage en carapace :procédé Croning.** **- Moulage à la cire perdue**	**Moulage impossible sans détériorer les coquilles.**
Cuivre et ses alliages : **Laiton : 940°C** **Aluminium et ses alliages :** **Alpax et Zamack :** **Environ 610°C**	**Moulage en sable :** **- Pour les grosses pièces.** **Exemples :** **- Cloches en bronze.** **- Hélices de bateaux.** **- Pour les petites séries.**	**Moulage en coquille :** **- Pour les grandes séries.** **- Avec ou sans pièce (prisonnier) insérée au moulage** **- Par gravitation ou sous pression.** **Exemples :** **- Carter de boîte de vitesses (alpax)** **- Corps de carburateur (zamack).**

Comme il a été susmentionné, le moulage est généralement très économique, mais les caractéristiques d'un alliage coulé sont plus faible que celles du même alliage forgé Les défauts de fonderie, fréquents dans les pièces moulées, diminuent encore leur résistance globale, certains de ces défauts, dus aux gaz occlus ou à la contraction du métal au refroidissement, mais peuvent être évités par un tracé judicieux des formes, [2].

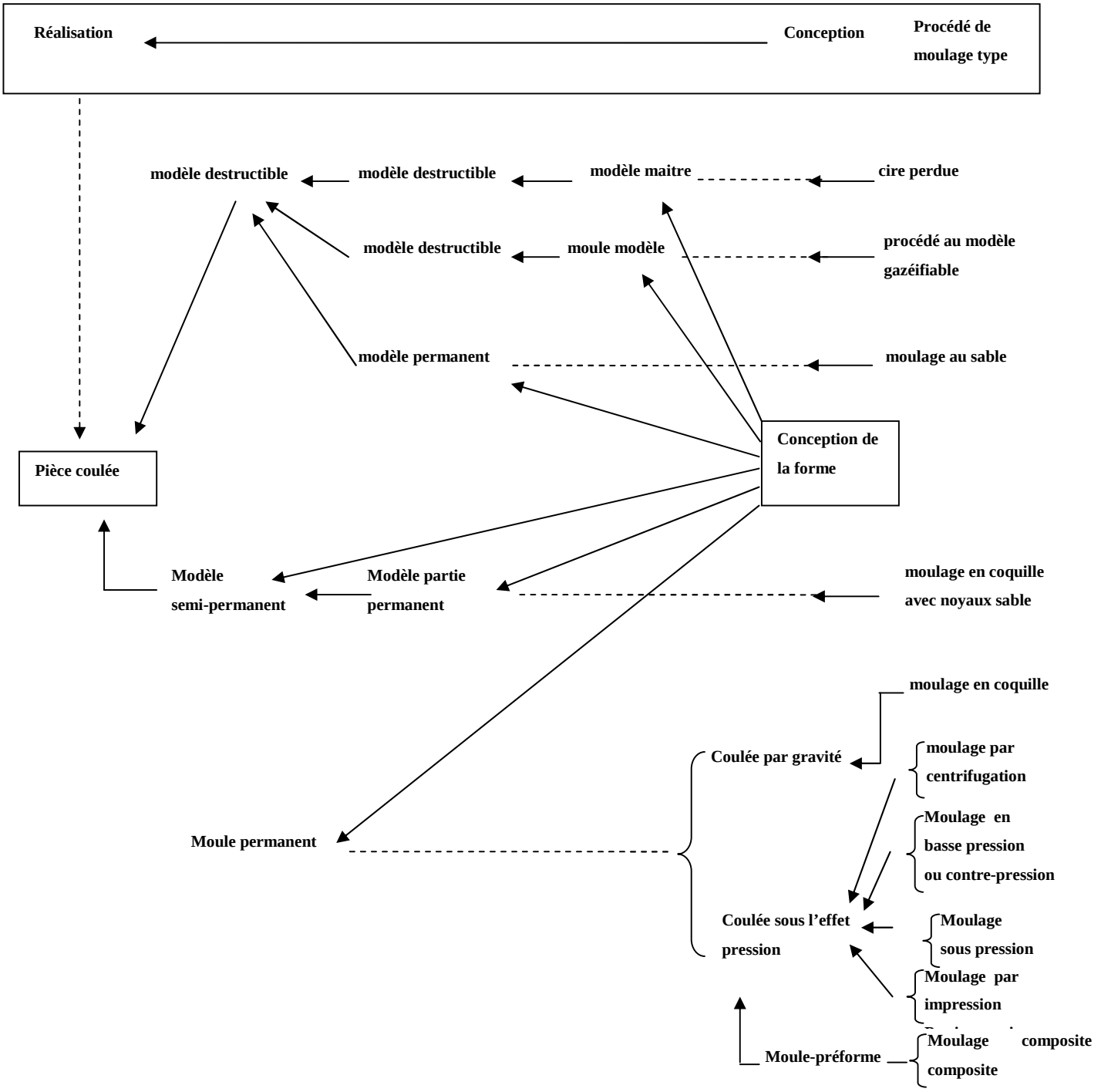


Fig. I.2 : Différents moyens de production de moulage, [1].

I .4. Description technologique du procédé de fonderie

La technique de moulage en moule permanent regroupe plusieurs procédés qui dépendent essentiellement du système de remplissage dont, [1] :

- le moulage en coquille
- le moulage au sable
- le moulage à la cire perdue

I.4.1. Le moulage en coquille

C'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.

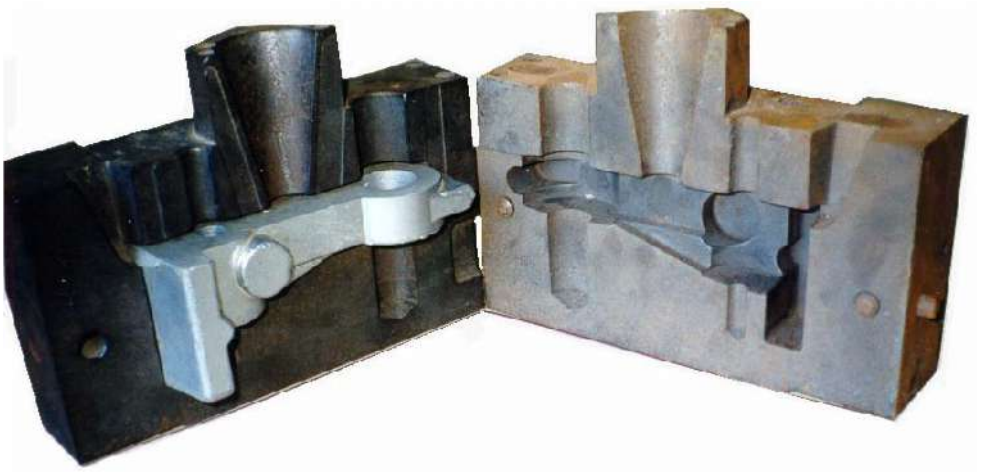


Fig. I. 3 : Eléments du moule en coquilles, [3].

I.4.1.1. Choix du procédé

Le choix de la technique de moulage à utiliser pour la fabrication d'une pièce est soumis à de nombreux facteurs qui constituent une partie du cahier des charges de cette pièce, [3] :

- caractéristique métallique minimal.
- alliage métallique composant la pièce.
- précision dimensionnelle générale et particulière.
- état de surface.
- importance de la série à fabriquer.

I.4.1.2. Les avantage

Les avantages du moulage en coquille peuvent être résumés comme suit, [2] :

- Le prix de revient des pièces est modéré, si la série des pièces est importante.
- Bon état de surface.
- La précision dimensionnelle est bonne.
- Réduction du rebut.
- Texture plus fine et caractéristiques mécaniques élevées.
- La cadence de production peut être automatisée.

I.4.1.3. Les inconvénients

Les inconvénients du moulage en coquille peuvent être résumés comme suit, [2] :

- Les règles de dessin sont à respecter lors de la conception des pièces.
- Le choix est limité dans les matériaux à utiliser.
- Des reprises en usinage sont souvent nécessaires.
- Le prix du moule et de l'outillage sont très élevé.

I.4.1.4. Différents procédés de moulage en coquille

Ces procédés sont classés et différenciés suivant le mode de mise en œuvre du métal liquide, [2]:

Moulage en coquille par gravité : la coulée se fait par gravité, directement dans le godet de coulée de la coquille.

Moulage en coquille basse pression : le métal est injecté dans l'empreinte grâce à la pression d'un gaz sur le bain liquide et introduit dans le moule par l'intermédiaire d'une buse d'injection.

Moulage sous pression : le métal est injecté sous forte pression dans le moule par l'intermédiaire d'un piston agissant sur le métal liquide versé dans un conteneur.

Moulage sous très haute pression (100 à 150 MPa) ou forgeage liquide.

Moulage en coquille centrifugée : il est utilisé principalement pour la fabrication de pièces cylindriques creuses.

I.4.1.4.1. Moulage en coquille par gravité

On coule directement le métal liquide à l'aide d'une louche ou d'une petite poche de coulée dans l'empreinte d'un moule métallique qui peut comporter ou non des noyaux métalliques ou en sable suivant les pièces à fabriquer et leur complexité, [1].

Avantage, [1] : Un tel procédé fournit des pièces propres, de beaux aspects, lisses, étanches et compacts, aux cotes très proches des dimensions finales. La précision des pièces est améliorée par rapport à celle des moulages au sable, d'où économie de matière, usinage réduit, tolérances des cotes plus serrées facilitant l'usinage sur machines-outils automatiques. Les pièces peuvent présenter des formes extérieures compliquées. Le refroidissement rapide leur donne une structure plus fine du métal donc à de meilleures caractéristiques mécaniques.

Inconvénients, [1] : Par contre, il faut noter que ce procédé nécessite l'emploi de masselottes nombreuses et importantes, parfois difficiles à positionner dans le moule. Le temps de solidification des masselottes est long et le coût de transformation du métal liquide est assez élevé. Les outillages sont chers. II faut également noter que les installations de coulée en coquille par gravité sont nettement moins polluantes que les installations de moulage au sable.

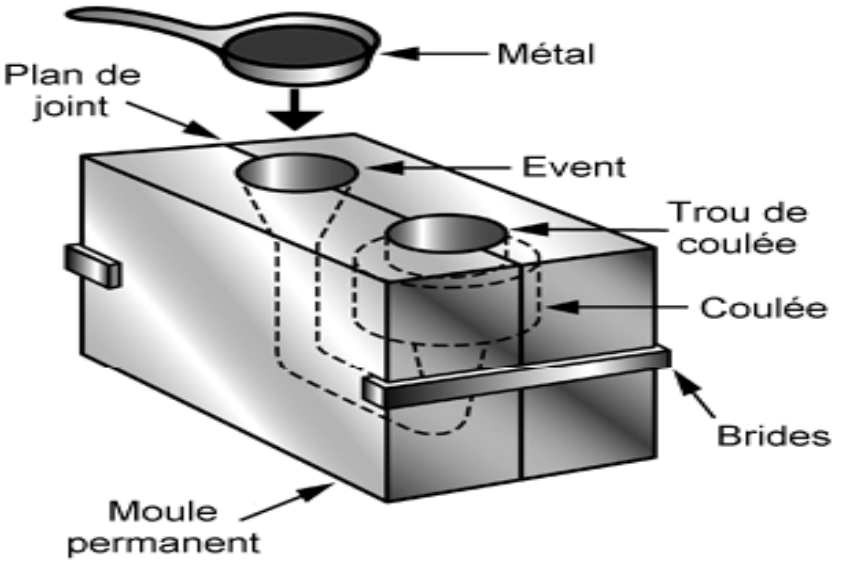


Fig. I. 4: Moulage en coquille par gravité, [3].

I.4.1.4.2. Moulage en coquille basse pression

a) Mise en œuvre

Dans la coulée en moule sous basse pression, on obtient par ce procédé des pièces de fonderie ayant une meilleure intégrité métallurgique que les pièces faites par injection sous pression classique et on peut les recuire. Ce procédé offre la plupart des avantages de l'injection sous pression mais sans ses inconvénients. Les moules sont faits en fonte de fer qui est relativement meilleure marché et facile à usiner. On peut utiliser des inserts en acier d'outillage pour des grandes séries ou des pièces complexes. Les coûts des outillages ne s'élève qu'à environ la moitié de ceux du moulage sous pression. Le procédé est seulement adapté aux alliages à bas points de

fusion (Température de fusion inferieur a 950°C). Les formes sont d'une complexité moyenne et on peut faire des contre dépouilles mais c'est coûteux, [3].

b) Intérêt du procédé

Le procédé convient pour les alliages à bas point de fusion. On l'utilise de manière prédominante pour les alliages d'aluminium. Il donne une bonne définition de la surface et une meilleure intégrité métallurgique que l'injection sous pression. Un angle de dépouille de 2 à 3 degrés est requis pour permettre d'extraire les pièces du moule. Ce procédé est généralement utilisé pour des roues d'automobile et têtes de cylindres, capot de boîte de vitesse et d'embrayage, boîtiers de transmission et de différentiels, stators de moteur électrique, capot des transformateurs et pièges thermiques, [3].

c) Avantage, [3] : Le principal avantage du procédé basse pression est le mode de remplissage, calme, de bas en haut qui préserve la qualité de l'alliage. La solidification se propage naturellement des zones froides aux zones chaudes, des zones éloignées vers l'attaque.

Lorsque la pièce est solide, on relâche la pression du four et le métal resté liquide recoule dans le four, séparant ainsi la pièce du système d'alimentation.

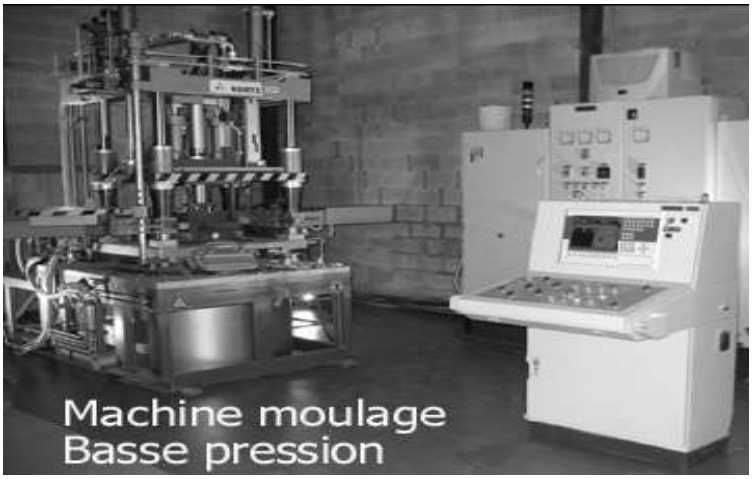


Fig. I. 5: Machine moulage à basse pression, [3].

I.4.1.4.3. Moulage sous pression

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

A cause des coûts très élevés des moules, le moulage sous pression est rentable seulement pour des productions en série. Donc les machines à mouler sous pression permettent de réaliser de très grandes séries et avec des cadences de production

extrêmement rapides (1000 pièces de faible volume/heure) et sont destinés surtout pour les alliages tels que Plomb, Zinc, Aluminium, Magnésium, Cuivre, etc.…

Les machines, quelque soit le type, comprennent toujours un dispositif de fermeture et d'ouverture du moule avec serrage énergique au moment de l'injection du métal sous pression. Le moule comprend deux blocs (chapes), l'un fixé sur le bâti de la machine et sur lequel l'empreinte doit être minimum et l'autre est monté sur le chariot mobile de la machine à mouler et comportant la majeure partie de l'empreinte. Ainsi que les éjecteurs qui éjectent la pièce moulée, [2].

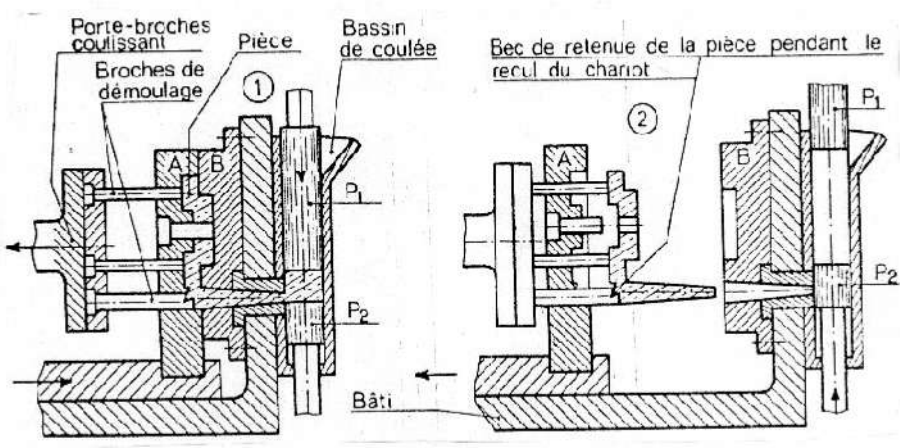


Fig. I. 6: Une coupe de moulage sous pression, [2].

La chape B est solidaire du bâti de la machine, l'autre chape A est montée sur un chariot qui assure la fermeture et l'ouverture du moule. Lorsque le moule est fermé, le piston P2 est au niveau inférieur du trou de coulée et le piston P, est en position haute. Le métal versé dans le cylindre et ensuite pressé par le piston P, emplit le moule jusque dans ses moindres détails. Après refroidissement, le piston P 2 monte et sectionne le talon de coulée, le chariot recule entraîne avec lui la pièce hors de la chape B et le porte-broches la détache.

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

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

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

- D'assurer une plus grande résistance, dureté ou autres propriétés (axe en acier, bague en bronze etc.
- De réaliser des conduites qui ne peuvent pas être noyautées (tube).

- D'assurer un assemblage qui serait plus difficile et coûteux par d'autres moyens.

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

La composition du produit de poteyage est variable peut être d'un mélange de plomb, d'eau, de silicate de soude etc.…, [2].

I.4.1.4.3.1. Principe de fonctionnement du moulage sous pression

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

Après la mise en place du noyau, s'il y a lieu, et lorsque le moule est fermé, le métal liquide est versé manuellement à l'aide d'une louche ou automatiquement dans l'orifice de coulée. Ensuite commence le mouvement d'injection qui se compose de 3 phases réglables et dépendantes l'une de l'autre, [2] :

- $1^{ère}$ Phase : Approche lente du piston de conduite du métal vers l'empreinte du moule.
- $2^{ème}$ Phase : Mouvement à grande vitesse du deuxième piston pour injection, ou remplissage du moule.
- $3^{ème}$ Phase : Pression de maintien, après remplissage du moule, elle agit sur le métal encore liquide en donnant une densité plus élevée à la pièce coulée.

Après refroidissement, le piston revient dans sa position initiale et suivi par l'ouverture du moule, qui s'effectue par déplacement du chariot avec la chape mobile, ce dernier entraînera avec la pièce refroidit hors du moule fixe et le détachement de la pièce s'effectuera par éjection.

Tout le cycle de l'opération s'effectue automatiquement.

Les paramètres essentiels pouvant exercés une influence sur la qualité des pièces coulées sous pression sont :

- La température de coulée du métal liquide.
- La température du moule.
- Le volume du dosage.
- La pression d'injection.
- La durée du cycle d'injection.
- Le réglage de la machine.

I.4.2. Le moulage au sable

C’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 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 lente. 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).

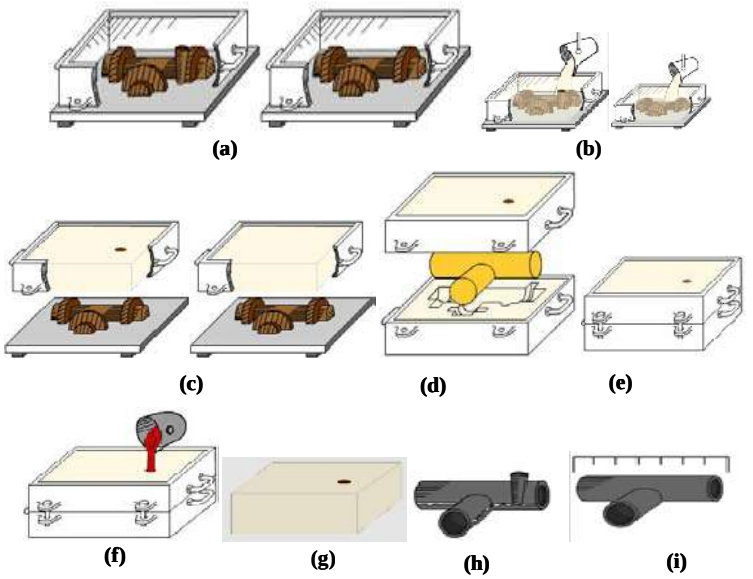


Fig. I. 7. Principales étapes du procédé de moulage au sable, [4].

L'ensemble des opérations de moulage en sable est donné par le schéma ci-dessous :

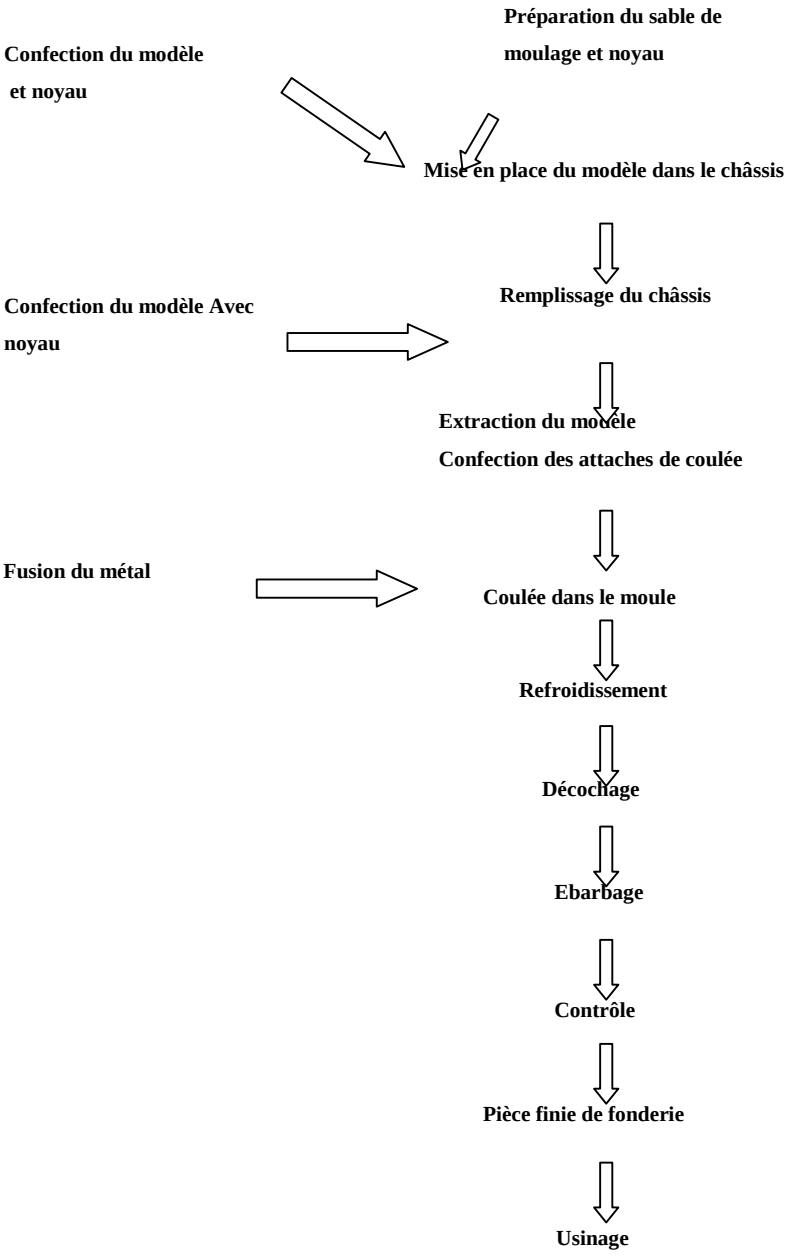


Fig. I. 8 : Principales étapes de procédé de moulage en sable, [2].

Lors de la réalisation du modèle on doit tenir compte de :

a. L'usinage Dans ce cas, la pièce brute doit comporter des surépaisseurs qui seront enlevées durant l'opération d'usinage. Donc les dimensions du modèle doivent être augmentées de 2 à 3 mm. Généralement la grandeur de la surépaisseur d'usinage est choisie suivant un tableau spécial. Elle dépend essentiellement de la nature du métal à couler, des dimensions de la pièce et de la position de ses surfaces pendant la coulée.

b. Le retrait au cours du refroidissement, le métal se contracte, le retrait est la valeur de cette contraction. Donc on majore les dimensions du modèle de 1 % pour la fonte et de 2 % pour l'acier.

c. La dépouille les formes du modèle doivent permettre son extraction du sable sans dégradation du moule. Dans ce but, on donne une certaine inclinaison aux parois du modèle, c'est la dépouille (pente de 3 à 10%), comme le montre la figure I.9. La dépouille est absolument nécessaire.

La dépouille peut se faire en augmentation à égalité de la pièce ou encore en diminuant les dimensions de la pièce, si le rôle de celle-ci n'est pas important. En général, le modèle est souvent en plusieurs parties démontables pour faciliter le démoulage et permettre la sortie des parties en contre dépouille.

Lorsqu'une partie du modèle fait saillie sur le modèle et à une direction autre que celle générale du moulage, il est bien évident que l'on ne peut démouler cette partie au même temps que le modèle sans arracher une portion du sable du moule. Pour éviter cet inconvénient on fait cette partie du moule démontable, au moment du démoulage, le corps C est démoulé dans la direction générale du démoulage D, alors que la partie démontable P, reste dans le moule, et elle est ensuite démoulée suivant la direction S dans la cavité du moule laissé par le corps C démoulé, [2].

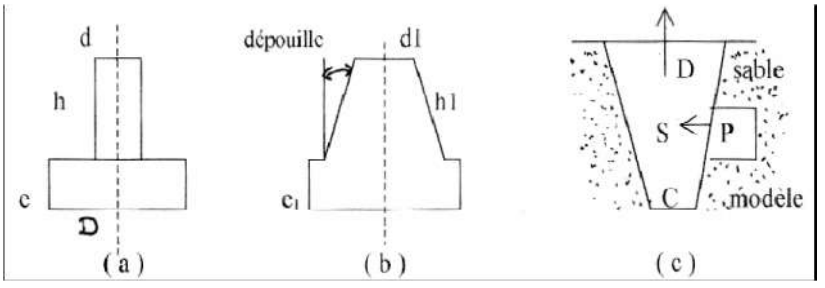


Fig. I. 9 : La représentation de l'usinage, le retrait et la dépouille, [2].

Les modèles peuvent être aussi creux ou pleins. Les modèles de petites dimensions sont massifs et au contraire ceux de grandes dimensions sont creux afin de diminuer le prix de revient, ainsi que leur poids.

I.4.3. Le moulage à la cire perdue

C’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 œuvre 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 "net Shape", 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 stucco ou 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.

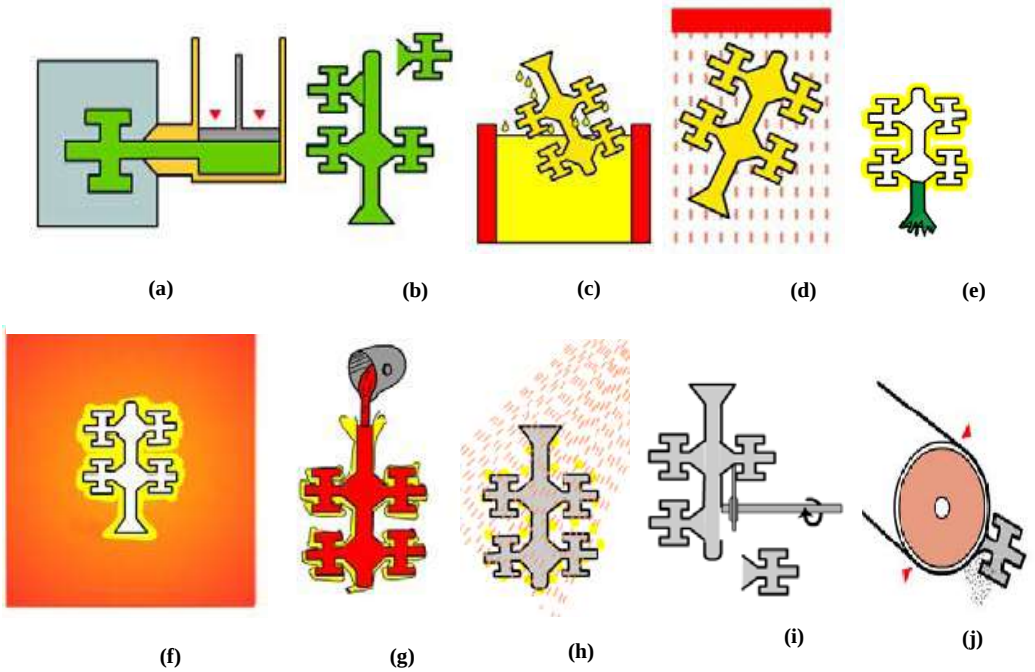


Fig. I. 10 : Principales étapes du procédé de moulage à la cire perdue, [4].

I.4.3.1. Les avantage

Les avantages de moulage à la cire perdue sont, [2] :

- obtention de tolérances serrées permettent de minimiser les usinages et donc les coûts.
- état de surface fin.
- liberté de conception / complexité des formes.
- Intégration de plusieurs pièces, source d'économie.
- faible épaisseur de paroi.
- très grand choix de matériaux, y compris des nuances non usinables.

I.4.3.2. Les inconvénients

Les inconvénients de moulage à la cire perdue sont, [2] :

- La maîtrise du procédé.
- Le cout.

I .5. Défauts de moulage (de fonderie)

La diminution ou l'élimination des défauts des pièces moulées est une question économique importante. Une solution rapide peut aider à augmenter la qualité des pièces moulées et diminuer le pourcentage de rébus, [2].

Les défauts de fonderie sont classés selon leurs aspects et leurs formes d'apparition. Chaque défaut peut entraîner une diminution de la qualité, c'est l'étendu du défaut et la destination d'utilisation de la pièce qui décident, si cette dernière est considérée comme rébus ou non. Beaucoup de défauts peuvent être éliminés par un traitement ultérieur, [2].

Dans cette partie, nous allons traiter les types de défauts rencontrés le plus souvent en moulage.

I.5.1. Défauts affectant la surface

Ce sont des défauts non souhaités tels que saillies, bavures, épaississements qui sont visibles à l'œil nu et se différencient suivant leur forme et leur cause de formation. Ils n'affectent généralement pas la qualité de la pièce, mais exigent des opérations supplémentaires d'usinage.

Ce sont, le plus souvent, les bavures, les épaississements, les saillies, etc. Leur formation s'effectue généralement dans le plan de joint du moule et au niveau du noyau.

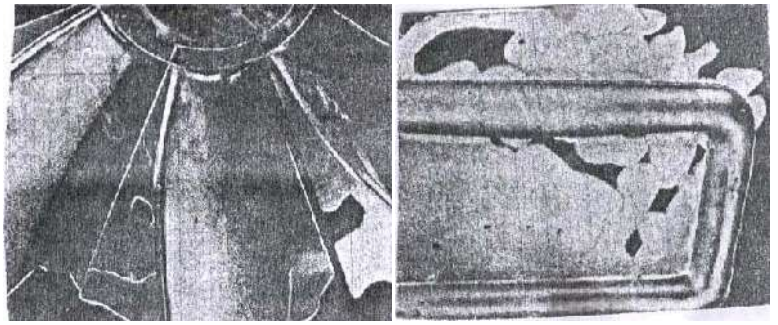


Fig. I.11. Les défauts de surface, [2].

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

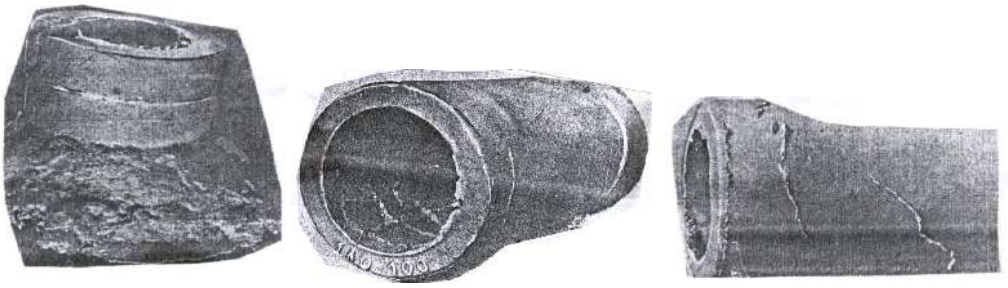
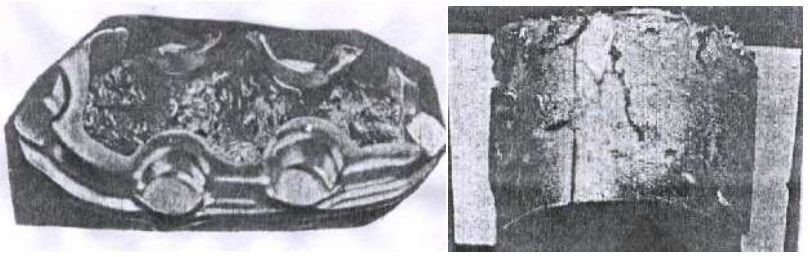
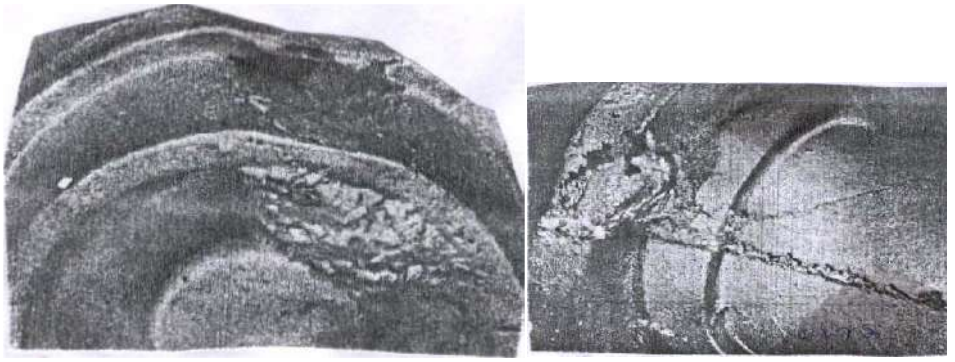


Fig. I.12. Les défauts de détachement dans le moule, [2].

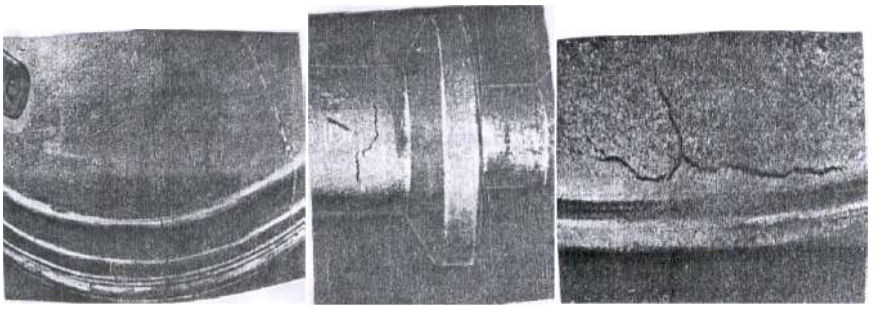
Ou encore à des arrachements de sable :



Ecrasement du moule et du noyau :



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



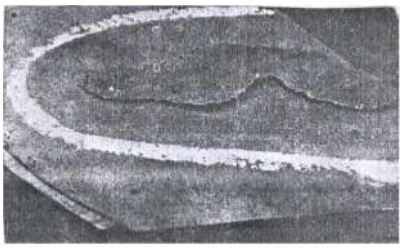
D'autres types de défauts pouvant existés sur les pièces moulées sont :

Rugosité superficielle.

Différence de forme et de dimension.

Pièce moulée incomplète.

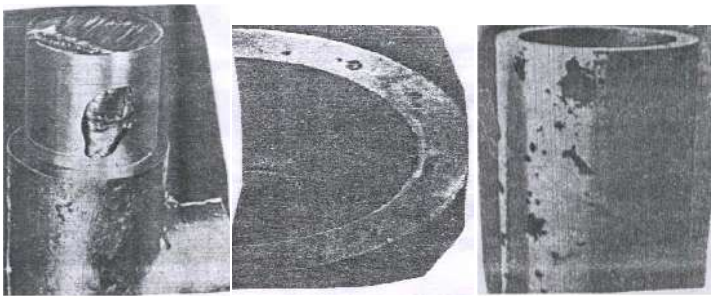
Un autre type de défaut est celui des brûlures du sable apparaissant lors de la coulée à haute température. Ce type de défaut n'est pas rencontré dans les alliages d'aluminium.



I.5.2. Défauts affectant la masse ou le volume

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

I.5.2.1. Les inclusions d'air



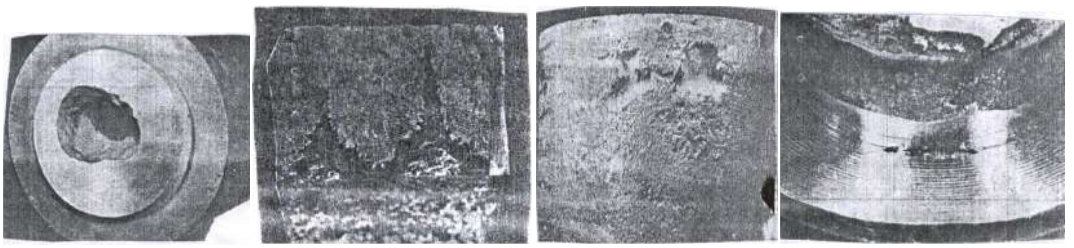
I.5.2.2. Les soufflures

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



I.5.2.3. Les retassures

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



On peut classer touts ces défauts dans le tableau suivant :

Tab. I. 03 : présentation des différents défauts de moulage, [2].

Les défauts		Description du défaut	Causes principales
Pièces imcomplet es	Manque	absence de matière dans une partie de la pièce.	mauvaise conception du système de coulée. température de coulée trop Basse. zones de moule trop froides (moules métalliques). mauvais choix d'alliage.
	Reprises	Solution de continuité à bords arrondis.	Pratiquement les mêmes que celles des malvenues, mais plus fréquentes en moule métallique quand il se produit la rencontre de deux courants de métal déjà refroidis.
	Coulée à court		Dans le cas du moulage en basse pression, la pression de fin de remplissage est insuffisante.
Formes incorrectes	Moule vidé	La partie intérieure de la pièce est déportée par rapport à la partie extérieure.	cas du moulage coquille : moule mal fermé ou ouverture prématurée. cas du moulage sous basse pression : mêmes causes que pour le moulage en coquille, risques de coupures prématurées de la pression de maintien de solidification. cas du moulage sous pression : fuite au plan de joint. excès de jeu dans les portées de noyaux ou les guidages de broches. mauvais remmoulage par défaut de repérage.
Retassures	Macroretass ures	Cavités de dimensions souvent importantes situées en général dans les parties hautes des pièces ou dans les parties massives Nombreuses petites cavités affectant des parties limitées d'une pièce et situées en général dans des zones éloignées des masselottes, ou mal refroidies	contraction volumétrique de l'alliage lors de son passage de l'état liquide à l'état solide. les températures des diverses parties du moule. le tracé de la pièce. le gradient thermique de Coulée. l'effet de pression pendant la solidification. tracé contrariant la solidification rationnelle. mauvaise répartition du liquide interdendritique en fin de solidification. manque d'action du masselottage et du refroidissement. présence d'éléments étrangers gênant l'écoulement interdendritique.

	Retassures de surface	la surface de certaines parties de pièces coulées en alliage A-Sl3, ou de composition voisine, présente de petits affaissements faibles (de l'ordre du millimètre).	le liquide eutectique, en fin de solidification, se contracte (effet d'aspiration) à travers un front de solidification irrégulier. une surchauffe élevée et accidentelle du métal.
Soufflures		cavités à parois lisses sensiblement sphéroïdales	emprisonnement d'air au moment du remplissage. dégagement gazeux pouvant provenir de la présence d'un refroidisseur.
Piqûres		Petites cavités sphéroïdales régulièrement réparties dans la pièce ou dans des zones corticales.	libération de gaz au cours de la solidification, ce défaut est appelé piqûres endogènes. réaction avec les matériaux de moulage au contact de l'alliage liquide, le défaut est réparti régulièrement sous la peau de la pièce (zone corticale).

Chapitre II :

Modélisation mathématique

II. 1. Introduction

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

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

Dans son ensemble, la mécanique des fluides est gouvernée par trois équations fondamentales. Celles-ci sont l'équation de continuité, l'équation de la quantité de mouvement et l'équation d'énergie [5].

II.2. Modélisation de l'écoulement des fluides

Dans un repère cartésien, les écoulements newtoniens, incompressibles et visqueux sont quantifies par les équations définies dans les paragraphes ci après.

II.2.1. L'équation de la continuité

Cette équation concerne le principe de conservation de la masse dans un élément. Elle exprime l'égalité de la variation de la masse d'élément et de la déférence entre la quantité de fluide qui entre et celle qui quitte pendant le même temps.

L'équation de continuité globale est donnée par :

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho\vec{\nabla}\vec{V} = 0 \qquad \text{(II.1)}$$

Dans un système de coordonnées cartésiennes, la vitesse $\vec{V}$= (u, v, w) et ρ c'est la densité

Donc l'équation devient :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \qquad \text{(II.2)}$$

II.2.2. L'équation de quantité de mouvement

En mécanique des fluides, les équations de Navier-Stokes sont des équations aux dérivées partielles non linéaires qui décrivent le mouvement des fluides dans l'approximation des milieux continus. Elles gouvernent par exemple les mouvements de l'air de l'atmosphère, les courants océaniques, l'écoulement de l'eau dans un tuyau, le mouvement d'air dans les locaux et de nombreux autres phénomènes d'écoulement de fluides. Elles sont nommées d'après deux physiciens du XIXe siècle, Claude Navier et George Stokes.

$$\rho\left\{\frac{\partial\vec{v}}{\partial t} + \vec{v}\,\nabla\vec{v}\right\} = -\nabla P + \mu\nabla^2\vec{v} + \rho\vec{g} \qquad \text{(II.3)}$$

Ou :$\boldsymbol{\rho}$ la densité considéré variable avec le temps,$\boldsymbol{\mu}$ la viscosité dynamique aussi variable, P la pression et $\vec{\boldsymbol{g}}$ la gravité.

II.2.3. Équation de l'énergie

$$\boldsymbol{\rho c}\left(\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{\boldsymbol{v}}.\boldsymbol{\nabla T}\right) = \boldsymbol{k\nabla^2 T} + \boldsymbol{q} \qquad \text{(II.4)}$$

T : température.

q : source volumique.

II.3. Modélisation de la surface libre

Dans les dernières années en raison des évolutions logicielles et matérielles technologiques, des études approfondies et des applications concernant le remplissage du moule par des fluides métalliques peuvent être trouvées dans la littérature. Pendant le processus de remplissage du moule, le métal liquide et l'air coexistent dans le moule et les changements de position d'interface rapidement avec le temps [6].

Il est indispensable d'introduire un algorithme de suivi de surface libre pour analyser le processus de remplissage. Le volume de liquide, méthode (VOF) est la méthode la plus largement utilisée pour le suivi de surface libre pendant le remplissage du moule [6].

Dans un cadre rectangulaire de coordonner bidimensionnels, l'équation de transport sur le VOF, F (r, t), pour un fluide incompressible peut être écrite comme:

$$\frac{\boldsymbol{\partial F}}{\boldsymbol{\partial t}} + \boldsymbol{\nabla F}.\vec{\boldsymbol{v}} = \boldsymbol{0} \qquad \text{(II.5)}$$

Le F (r, t) la fonction régie par l'équation ci-dessus est l'unité dans la région occupée par le fluide et zéro dans la région vide. Pour le domaine donné de calcul, les F (r, t) obtenus sur le terrain de l'équation. (II.5) donne les informations pour la surface libre. Les cellules avec F (r, t) des valeurs comprises entre 0 et 1 sont les cellules de surface libre. La méthode VOF a été appliquée avec succès à de nombreux problèmes d'ingénierie, incluant des surfaces libres y compris le problème de remplissage du moule.

Toutefois, étant donné la méthode originale VOF utilise une méthode de différenciation explicite en temps, grand temps de calcul est nécessaire pour analyser un problème typique de remplissage.

Im et al. [6] préciser que l'utilisation d'une méthode VOF de temps implicite pour atténuer les graves restrictions l'étape de temps est plus efficace que la méthode VOF de temps explicite. Le temps de méthode VOF implicite est basé sur l'hypothèse selon laquelle une cellule en cours de remplissage ne peut pas transmettre fluide à ses cellules voisines jusqu'à ce qu'il soit complètement rempli. Une fois que la cellule est remplie, il peut transmettre de fluide vers les cellules voisines. Toutefois, selon McBride et al. [7] presque tous les outils de simulation viable pour la simulation de l'écoulement à surface libre dans les

pièces moulées en forme de l'utilisation d'une approche grille fixe tel que défini par la géométrie du moule, et ils font généralement appel à la notion de volume de fluide (VOF) pour suivre l'interface, comme initialement proposé par Hirt et Nichols [8].

II.4. Modélisation thermique

II.4.1. Introduction

Le transfert d'énergie se produit chaque fois qu'un gradient de température existe à l'intérieur d'un système, ou lorsque deux systèmes de températures différentes sont mis en contact. Le processus par lequel le transfert de l'énergie s'effectue est désigné par le 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.4.2. Différentes modes de transfert de chaleur

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

- La conduction
- Le rayonnement
- La convection

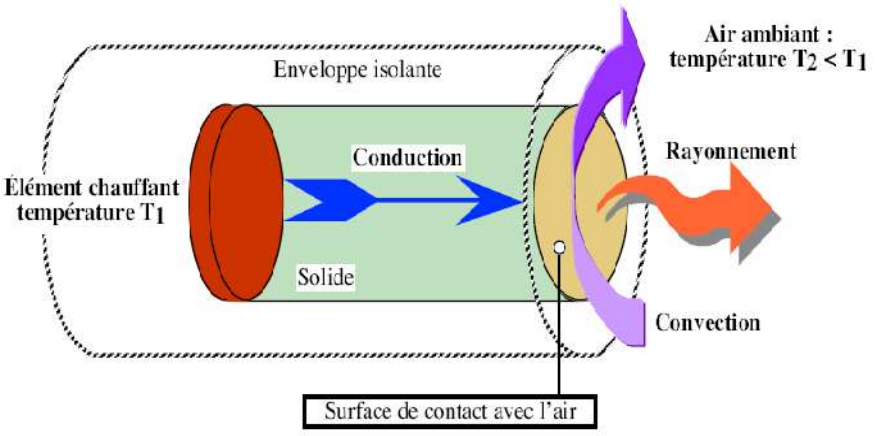


Fig. II-1 : Différent mode de transfert thermique, [9].

II.4.2.1. Transfert de chaleur par conduction

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

II.4.2.1.1. Cas des gaz

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

II.4.2.1.2. Cas des liquides

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

II.4.2.1.3. Cas des solides

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

II.4.2.1.4. Loi de Fourier

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

Considérons un milieu cylindrique homogène de section S et de longueur L (fig.II. 2), les deux faces du cylindre sont maintenues respectivement à la température T2 (source chaude) et T1. (Source froide). Il se produit un transfert d'énergie orienté de la source chaude vers la source froide.

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

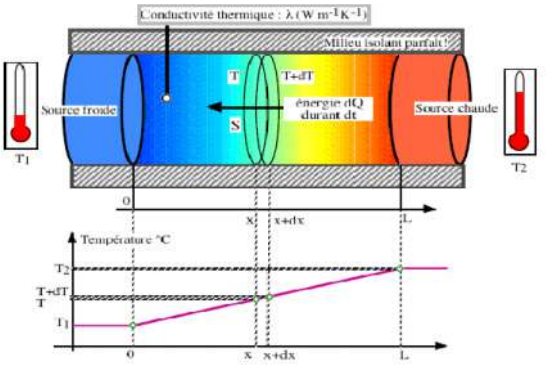


Fig. II-2 : Conductivité thermique, [9].

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

$$\boldsymbol{dQ = -\lambda A \frac{dT}{dx} dt} \qquad \text{(II.6)}$$

dQ : Énergie élémentaire en Joule

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

A : section en m^2

dt : temps élémentaire en s

$\frac{dT}{dx}$: Gradient de température en x en $K.m^{-1}$

II.4.2.2. Transfert de chaleur par convection

Le transfert de chaleur par convection apparaît entre deux phases dont l'une au moins est mobile, en présence d'une différence de température. Le mouvement des phases peut être provoqué par une dégradation d'énergie mécanique, le transfert de chaleur est dit de convection forcée. Le mouvement peut être provoqué par l'existence même du transfert de chaleur par suite de l'apparition dans le milieu d'une différence de masse volumique, le transfert de chaleur est dit de convection naturelle ou libre, [9].

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

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

II.4.2.3. Transfert de chaleur par rayonnement

On entend par rayonnement thermique, l'émission d'énergie susceptible de se transmettre dans le vide, il s'agit du rayonnement électromagnétique. Dans la pratique, le rayonnement s'effectue en présence d'un gaz, c'est la raison pour laquelle le rayonnement est

rarement le seul type d'échange thermique mis en jeu : la convection et la conduction sont également présentes. Cependant aux hautes températures, le rayonnement prend une importance prépondérante.

Le rayonnement des corps est dû à des transitions énergétiques par exemple des états de vibrations quantifiées de la chaîne d'atomes. Lorsque l'état du système passe d'un niveau énergétique E au niveau E+dE, il y a émission d'un photon de fréquence ν tel que $h\nu = dE$ avec h = 6.6 10-34 Js^{-1} la constante de Plank. Par exemple un rayonnement infrarouge ayant une longueur d'onde de 1µm correspond à une fréquence $\nu = c/\lambda = 3.1014$ Hz et possède une énergie de $dE = h\nu = 1.9810^{-19}$ J soit 1.23 eV.

Si un corps rayonne, il émet donc de l'énergie et sa température doit baisser. Cependant dans la pratique un corps n'est jamais isolé. Il est en équilibre avec le milieu qui l'entoure et par conséquent il reçoit lui-même de l'énergie et sa température atteint un équilibre. Le rayonnement émis est alors une caractéristique de cette température. C'est par exemple le cas de la Terre et du soleil. Le soleil réchauffe la terre par rayonnement (λ = 400 nm) et la terre remet un rayonnement de manière à assurer une température de l'ordre de 300K.

On peut exprimer le phénomène global du rayonnement de la façon suivante. Considérons en figure II.3 un mur de surface S dont les deux faces sont respectivement maintenues aux températures T_1 et T_s. ($T_1 > T_s$). Ce mur est donc soumis à un phénomène de conduction. On suppose que seule la surface située à droite échange de la chaleur par rayonnement avec le milieu ambiant à la température T_a, [9].

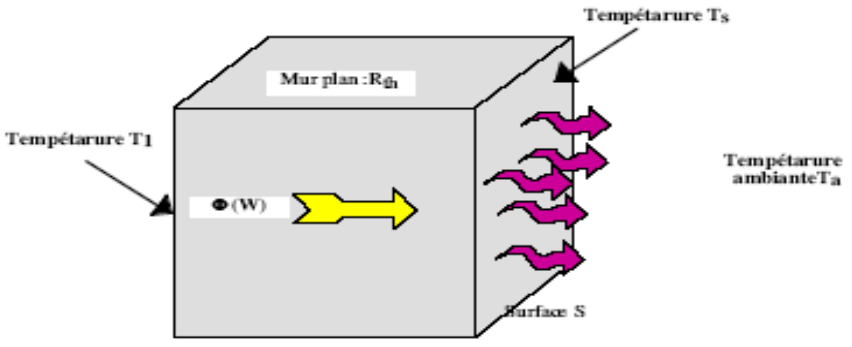


Fig. II-3 : Le transfert thermique par rayonnement, [9].

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

$$\varphi(W) = \varepsilon . \sigma . A\left(T_s^{\,4} - T_a^{\,4}\right) \qquad \text{(II.7)}$$

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

A : surface d'échange (m^2)

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

T_s : température de surface du corps

T_a : température ambiante.

II.5. Les conditions aux limites

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

II.5.1. Condition de Dirichlet

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

$$T_s = T(x_s, y_s, z_s)$$

Ou x_s, y_s, z_s décrivent la surface.

Ce type de conditions facilite beaucoup les calculs. Cependant, elles sont assez éloignées de la réalité physique car il est très difficile d'imposé une température sur une surface. Ceci n'est possible que dans le cas d'un contact parfait avec un autre corps isotherme à température maintenue constant. On utilise quand même ce type de CL pour la conduction dans un corps en contact avec un fluide très turbulent, [5].

II.5.2. Condition de Neumann

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

$$\varphi_s = \mathrm{Q}(x_s, y_s, z_s, \mathrm{t})$$

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

La condition de ce type permet de tenir compte d'un flux surfacique absorbé par rayonnement à la surface d'un corps (par exemple les objets métalliques chauffés à de hautes températures dans des fours, le rayonnement solaire absorbé par des corps solides), [5].

II.5.3. Condition de Robin-Fourier

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

$$\varphi = \mathrm{h}\,(T_c - T_e) \qquad [\mathrm{W/m^2}]$$

Où **h** est un facteur de proportionnalité appelé coefficient de transfert thermique, [5].

II.6. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la prévision numérique d'écoulement turbulent de fluide incompressible en régime variable et les différentes mode de transfert thermique qui influe sur le mole avec la méthode de volume de fluide (VOF) qui est une méthode de construction d'interface. L'équation qui gère cet écoulement (II.5) n'est pas résolue analytiquement donc on fait appel aux méthodes numériques. Ce qui est l'objectif du chapitre suivant.

Chapitre III :

Solution numérique

III .1. Introduction

Depuis de nombreuses années, les techniques de simulation connaissent un développement considérable. Les mises au point expérimentales, longues et coûteuses sont progressivement remplacées par des études dans lesquelles les outils de simulation prennent une place de plus en plus importante. Les impératifs industriels de rapidité et de limitation des coûts sont pour l'essentiel responsables de cette évolution. Les approches actuelles concernent l'ensemble des domaines et en particulier la prise en compte des phénomènes thermiques.

Ce chapitre, relatif à la modélisation thermique des remplissages des moules s'inscrit dans cette démarche.

La discrétisation d'une EDP est le remplacement de l'information continue que contient sa solution par une information discrète. Donc, le domaine de calcul qui était continue doit être divisé ou discrétisé. C'est cette discrétisation systématique des variables dépendantes et de l'espace qui permet de remplacer les EDP très compliqués par des équations algébriques faciles à résoudre.

La forme finale du modèle mathématique élaboré un système d'équation aux dérivé partielles elliptiques. A cause de leur non linéarité et la complexité du problème physique, elles ne peuvent pas être résolues analytiquement. La seule approche à envisager ici est la procédure numérique.

III.2. Les trois grandes méthodes des discrétisation

Pour passer d'un problème exact continu régit par une EDP au problème approché discret, il existe trois grandes familles des méthodes, [10] :

la méthode des différences finies (MDF) procédé par approximation des dérivées d'une fonction en termes de ces valeurs approchées aux nœuds du maillage.

La méthode des volumes finis.

La méthode des éléments finis.

III.2.1. La méthode des différences finies

La méthode consiste à remplacer les dérivées partielles par des différences divisées ou combinaisons de valeur ponctuelles la fonction en un nombre fini de points discrets ou nœuds du maillage. Plus clairement nous avons dit, [9]:

Elle consiste à approximer les dérivées de 1'EDP par des troncatures de séries de Taylor.

La substitution de ces approximations dans l'équation différentielle donne les équations aux différences finies.

Avantages: grande simplicité d'écriture et 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 d´étrivées ou les gradients de l'inconnue et en général absence de résultats de majoration d'erreurs.

III.2.2. La méthode des volumes finis

Le principe de cette méthode est de subdiviser le domaine de calcul en un nombre de volumes de contrôle juxtaposés. Chacun de ces derniers englobe un "nœud principal".

La méthode 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 conservative et est particulièrement bien adaptée aux équations de la mécanique des fluides. Sa mise en œuvre est simple avec des volumes élémentaires rectangles.

L'avantage déterminant des volumes finis par rapport aux autres méthodes est qu'ils sont conservatifs ; en bref, tous ce qui sort d'un volume de contrôle entre dans un autre, [5].

III.2.3. La méthode des éléments finis

La méthode consiste à approcher, dans un sou –espace de dimension finie, un problème écrit sous la forme variationnelle dans un espace de dimension infinie. Cette forme variationnelle est équivalente à une forme de minimisation de l'énergie en générale. La solution approchée dans ce cas une fonction déterminée par un nombre fini de paramètres comme, par exemple, ses valeur en certain points ou nœuds du maillage.

Cette méthode est particulièrement bien adaptée aux problèmes d'équilibre. Elle permit de traiter des géométries complexes contrairement aux différences finies mais demande un grand coût de temps de calcul et de mémoire.

D'autre part, La simulation numérique est de plus en plus utilisée dans l'industrie, aussi bien pour modéliser les écoulements que les transferts thermiques dans le moule. Des logiciels comme ANSYS permettent en effet de déterminer des répartitions de température à la surface du moule et la pression, la vitesse d'écoulement dans le moule ainsi le temps de refroidissement. La conception du moule et en particulier du système de refroidissement est donc basée sur l'expérience de l'utilisateur uniquement, [9].

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 (figure III.1) en fonction de maillage que l'on va utiliser : la méthode lagrangienne (sur maillage mobile) et la méthode eulérienne (sur maillage fixe).

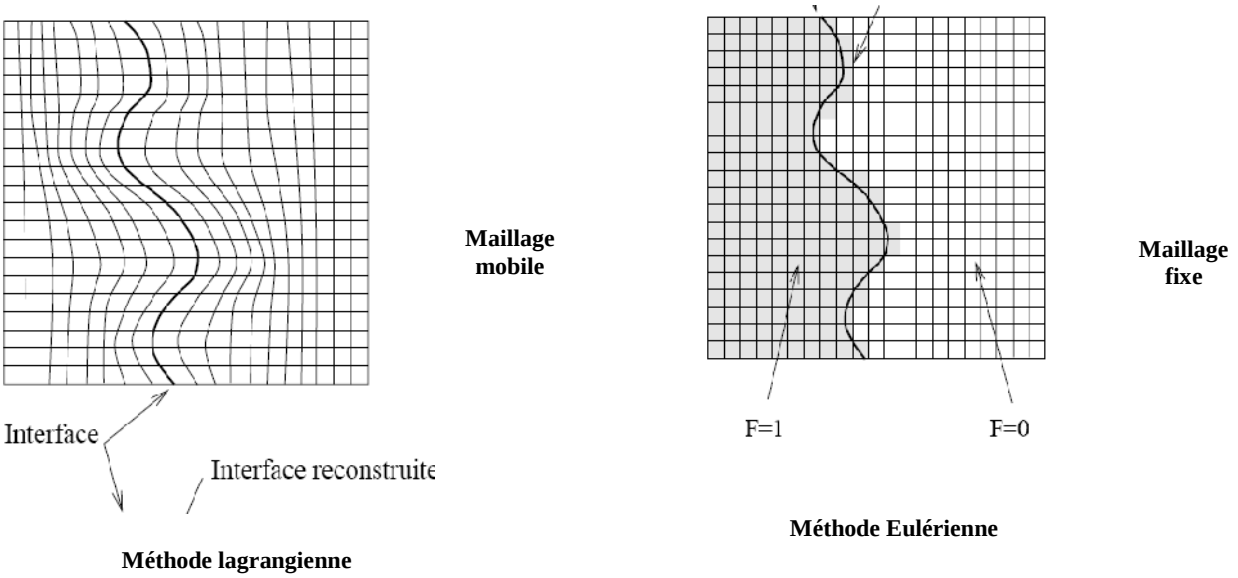


Fig. III.1.: La méthode lagrangienne et la méthode eulérienne, [11].

III.3.1. 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.

III.3.2. 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.3.2.1. 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 (level set)

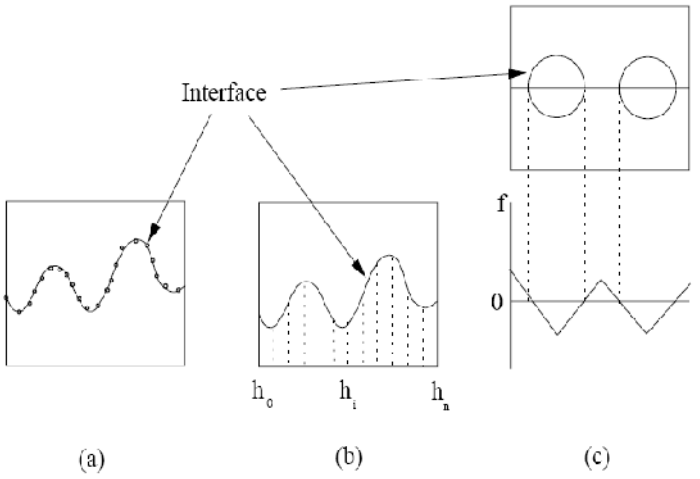


Fig. III.2 : Différentes méthodes de suivi de front, [12].

III.3.2.2. 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.

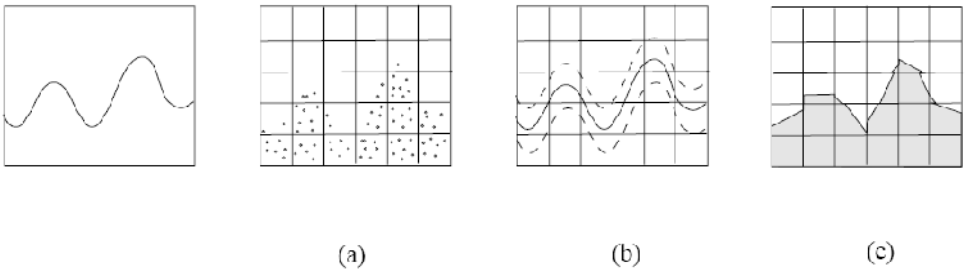


Fig. III.3: Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque, [14,15].

a) Méthode de marqueur de volume
b) Schémas TVD
c) Méthode de volume de fluide (VOF)

Nous utilisons pour la méthode VOF (volume of fluid) une fonction scalaire dont 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 à une valeur 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.4).

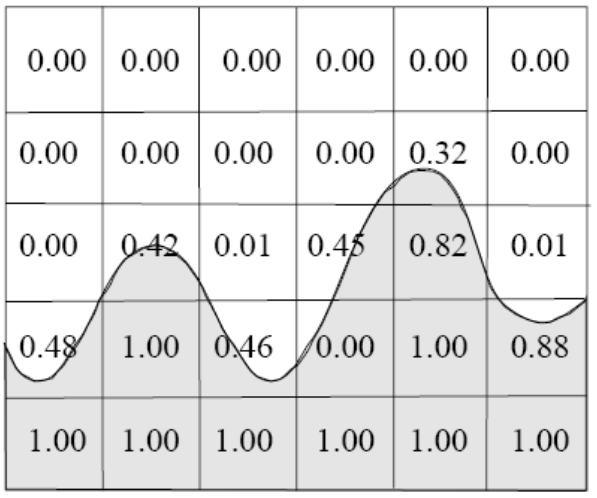


Fig. III.4. Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret, [16].

III.4. La Méthode VOF CIAM

III.4.1. Introduction

Nous utilisons la méthode VOF CIAM qui est une méthode de **C**onstruction de l'**i**nterface **a**ffine par **m**orceaux. VOF CIAM se décompose en trois parties : on doit tout d'abord reconstruire la représentation de la surface libre à partir de la fraction volumique ensuite on transporte l'interface a l'aide d'une méthode lagrangienne et enfin on calcule le nouveau champ de fraction volumique. L'interface est alors approchée par un segment en 2D comme on peut le voir sur la figure (III.5). La force de la méthode VOF CIAM est la reconstruction de l'interface qui se fait-on fonction de son orientation et de la fraction volumique. Ainsi ; par rapport à des méthodes qui utilisent des schémas de discrétisation (schémas UPWIND, QUICK, TVD..), on élimine totalement le phénomène de diffusion numérique, et par rapport à d'autre méthodes VOF (VOF SLIC) on suit l'interface de façon plus précise.

Donc, dans la méthode VOF CIAM, à chaque pas de temps, à partir de la fraction volumique du fluide que l'on cherche à advecter et d'un calcule de vecteur normale à l'interface, on reconstruit précisément l'interface. Cette surface plane est advectée par le champ de vitesse imposé à l'interface et le résultat utilisé pour calculer la nouvelle fraction volumique. Après on passe au pas de temps suivant. Nous allons maintenant détailler ces étapes en 2D.

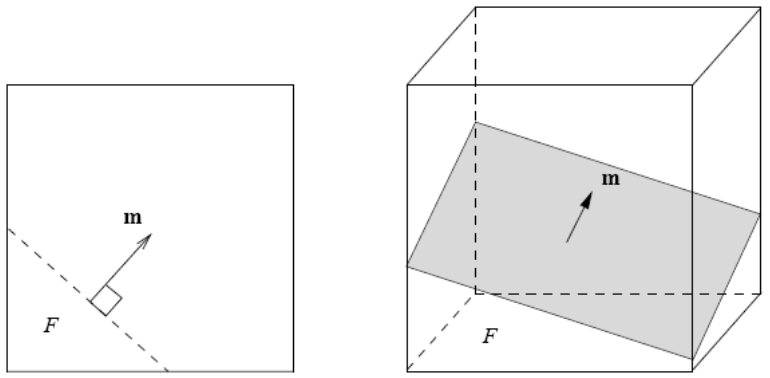


Fig. III.5. Positionnement de l'interface à partir de la normale et de fraction volumique, [20].

III.4.2. Présentation de la méthode en 2D

III.4.2.1. Estimations de la normale

Nous allons maintenant détailler la méthode que l'on utilisée pour estimer la normale à l'interface, la surface plane de chaque cellule, et le calcul du déplacement lagrangienne de cette surface. Afin de simplifier l'écriture, les équations que nous donnerons serons valable pour un maillage régulier ($\Delta x = \Delta y = \Delta z = h$) ; mais le code à été programmé en irrégulier, Aussi bien en 2D.

La reconstruction est basée sur le fait que la surface plane qui est dans une cellule de calcul est totalement déterminée par la normale à la surface **m** et par la fraction volumique de cette cellule F. cette normale est calculée par différence finie à l'aide de la relation suivant :

$$\mathbf{m} = -\nabla . \boldsymbol{F} \qquad \text{(III.1)}$$

Le signe négatif du gradient est utilisé afin d'obtenir le vecteur sortant. Le vecteur m est tout d'abord estimé en $\boldsymbol{i} + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}}$, $\boldsymbol{j} + \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}}$ par :

$$\boldsymbol{m}_{x\left|i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}\right.} = -\frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}\boldsymbol{h}}(\boldsymbol{F}\left|_{\text{i+1, j}} - \text{F}\right|_{\text{i, j}} + \text{F}\left|_{\text{i+1, j+1}} - \text{F}\right|_{\text{i, j+1}}) \qquad \text{(III.2)}$$

$$\boldsymbol{m}_{y\left|i+\frac{1}{2},j+\frac{1}{2}\right.} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{2}\boldsymbol{h}}(\boldsymbol{F}\left|_{\text{i, j+1}} - \text{F}\right|_{\text{i, j}} + \text{F}\left|_{\text{i+1, j+1}} - \text{F}\right|_{\text{i+1,j}}) \qquad \text{(III.3)}$$

On calculera alors le vecteur m en effectuant une moyenne :

$$\text{m}\left|_{i\,,j} = \frac{\mathbf{1}}{\mathbf{4}}\right. (\text{m}\left|_{\text{i+1/2, j+1/2}} + \text{m}\right|_{\text{i+1/2, j-1/2}} + \text{m}\left|_{\text{i-1/2, j+1/2}} + \text{m}\right|_{\text{i-1/2, j-1/2}}) \qquad \text{(III.4)}$$

En 2D, le gradient est donc approximé par une différence finie à neuf points. Pour le maillage irrégulier, nous utilisons des moyennes *Q1*, les expressions des différentes composantes du vecteur **m** sont alors plus complexe. Les résultats que nous obtenons avec cette méthode de calcul de gradient de la fraction volumique nous montrent que cette méthode est totalement satisfaisante. Le seul problème étant bien sur que les segments ainsi calculés

ne serons pas raccordé entre deux cellules de calcule voisines. La figure (III.6) illustre cette représentation de l'interface.

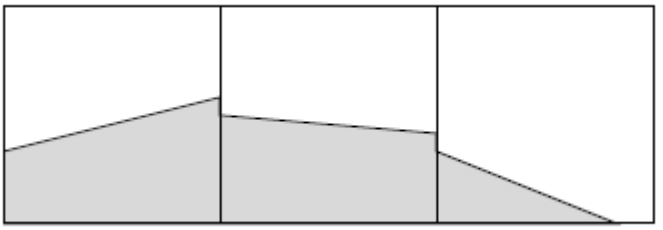


Fig. III.6. Segments représentants l'interface, [20].

III.4.2.2. Positionnement de l'interface

Après avoir déterminé la normale à l'interface, il nous reste à positionner cette interface à l'aide de volume de chaque fluide contenu dans la cellule de calcul. Dans la pratique, trouver le volume à partir d'une l'interface donnée (partie suivante) est beaucoup plus facile que le problème inverse qui est de déterminé l'équation d'un problème connaissant le volume de chacune des parties séparées par ce plan. Plus précisément, considérons une cellule carré dont les coté sont de longueur ***h***. le bute de cette partie va être d'évaluer le paramètre ***r*** défini par l'équation :

$$\mathbf{m_x\, x + m_y\, y = r} \qquad \text{(III.5)}$$

L'équation (III.5) définies touts les droites parallèles de la direction normale (m_x ,m_y). Le paramètre r permet de fixer une droite. Nous nous plaçons dans le cas $0 < m_x \leq m_y$

On obtiendra les autre cas par des opérations symétrie. Nous déduisons des calculs des volumes les fractions volumiques critiques. Dans notre cas, lorsque le segment passe en (h, 0) et en (0, h), nous avons $F_1 = m_x h^2 / (2m_y)$ et $F_2 = h^2 - F_1$ (figure III.7).

Toujours à partir de calculs les volumes, on détermine les équations nous permettent de calculer r entre les volumes critiques. Pour notre cas nous obtenons les trois formules :

$$\boldsymbol{r = \sqrt{2F m_x m_y}\, h} \qquad \text{Pour} \quad 0 \leq F \leq F1 \qquad \text{(III.6)}$$

$$\boldsymbol{r = h\left(2F\, m_y + m_x\right)/2} \qquad \text{Pour} \quad F1 \leq F \leq F2 \qquad \text{(III.7)}$$

$$\boldsymbol{r = m_x h + m_y h - h\sqrt{2(1-F) m_x m_y}} \qquad \text{Pour} \quad F2 \leq F \leq 1 \qquad \text{(III.8)}$$

Nous avons ramené F à une expression de surface c'est-à-dire $0 \leq F \leq h^2$

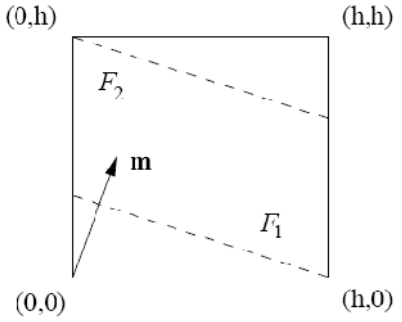


Fig. III.7. Volume critique avec 0< $\mathbf{m_x} \leq \mathbf{m_y}$, [20].

III.4.2.3. Déplacement de l'interface

Nous connaissons maintenant l'équation de segment grâce à l'équation (III.5). Son déplacement va alors être effectue dans la direction *x* puis on recommencera tout l'algorithme dans la direction *y*.

Détaillons l'advection lagrangienne du segment dans la direction *x*. le maillage étant de type MAC, les données en vitesse se trouvent en 0 et en *h* (figure III.8).

La vitesse du point *x* se trouvant entre 0et *h* dans la cellule de calcul est une simple interpolation linéaire de la forme :

$$\boldsymbol{U(x) = U_0\left(1 - \frac{x}{h}\right) + U_h\frac{x}{h}} \qquad \text{(III.9)}$$

Ainsi tous les points de segment qui se trouvent en *x* à l'instant *n* seront notés $x\big|^{n}$ et serons advectés en $x\big|^{n+1}$:

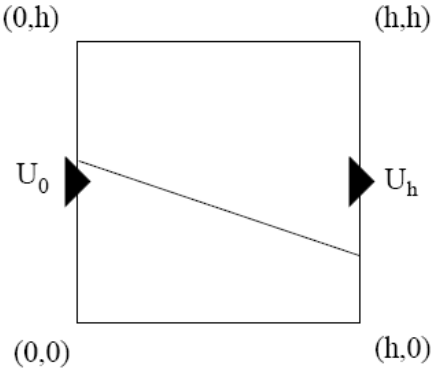


Fig. III.8 : vitesse aux bornes du domaine, [20].

$$x\big|^{n+1} = x\big|^{n} + U(x\big|^{n})\Delta t = x\big|^{n}(1 + ((U_h - U_0)/\Delta t) + U_0\Delta t \qquad \text{(III.10)}$$

Le pas de temps Δt correspondant à une valeur de CFL qui ne devra pas dépasser 0 ,5 c'est-à-dire que l'interface n'avancera pas de plus d'une demi-maille par pas de temps de calcul. En écrivant $x\big|^{n}$ comme étant une fonction de $x\big|^{n+1}$ on obtient :

$$x\big|^{n} = [x\big|^{n+1} - U_0\Delta t) / (1 + ((U_h - U_0)/h)\Delta t)] \qquad \text{(III.11)}$$

En remplaçant cette expression dans l'équation (III.5) nous arrivons à l'expression :

$$m_x \big|^n [(x \big|^{n+1} - U_0 \Delta t) / (1 + ((U_h - U_0)/h)\Delta t)] + m_y \big|^n y \big|^n = r \big|^n \quad \text{(III.12)}$$

Or le champ de vitesse (III.9) que l'on applique au segment va le transformer en un autre segment d'équation :

$$m_x \big|^{n+1} x \big|^{n+1} + m_y \big|^{n+1} y \big|^{n+1} = r \big|^{n+1} \quad \text{(III.13)}$$

On aura donc par analogie :

$$m_x \big|^{n+1} = ((m_x \big|^n) / (1 + ((U_h - U_0)/h)\Delta t) \quad \text{(III.14)}$$

$$r \big|^{n+1} = r \big|^n + [(m_x \big|^n U_0 \Delta t) / (1 + ((U_h - U_0)/h)\Delta t)] \quad \text{(III.15)}$$

Toutes les autres valeurs en (n+1) de (III.13) n'auront pas été modifiées et serons égales à leurs anciennes valeurs. Nous avons ainsi le nouveau segment.

L'étape suivant va être de calculer les fractions volumiques définies par ce nouveau segment. En effet, comme on peut le voir sur la figure (III.9), il faut maintenant déterminer F_{21}, F_{23}, et F_{22} qui correspond respectivement au déplacement du segment de la cellule 2 vers la cellule 1, de 2 vers 3 et bien sur la modification de la fraction volumique initialement en 2. Il est à noter que l'avancement des segments ne pourra dépasser une demi-maille soit une condition CFL (Courant- Friedrich- Lewy) qui devra toujours être inférieur à 0.5. Le CFL correspond au rapport de la taille de la maille par la vitesse.

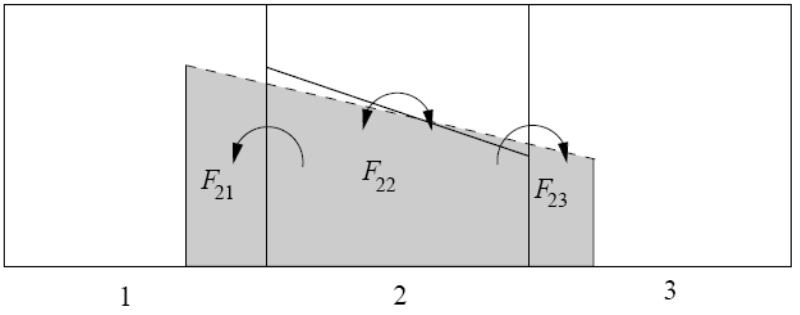


Fig. III.9 : Déplacement du segment, [20].

III.4.2.4. Calcul de la nouvelle fraction volumique

Le calcul de la nouvelle fraction volumique et la dernière étape de la méthode VOF CIAM. Elle correspond en fait à un calcul d'aire en 2D. Nous avons toujours l'équation du segment définie par (III.5). Les points d'intersection entre la droites et les axes x et y sont respectivement r/m_x et r/m_y. Ils sont représentés par les points E et F sur la figure (III.10). La hauteur de la cellule AD correspond à la longueur $\Delta y = h$, en revanche, AB correspond à la portion qu'occupe le segment advecté dans les cellules 1,2 ou 3 de la figure (III.9). Nous noterons AB comme étant h'. L'aire correspondant à la fraction volumique recherchée sera obtenue par la relation :

$$A = (1/(2m_x m_y))*(r^2 - \max(0, r - m_x h')(r - m_x h') - \max(0, m_y h)(r - m_y h)) \quad \text{(III.16)}$$

Avec : F = (A / hh')

Dans l'équation (III.16), le terme (r^2 / 2 $m_x m_y$) correspondant à l'aire du triangle AEF. Si E et F restent à l'intérieur du rectangle, cela représente l'aire recherchée. En revanche, si E et F sortent du rectangle, (c'est-à-dire que $r > m_x h'$ et $r > m_y h$) alors il faut retrancher à l'aire de AEF les triangles qui dépassent du rectangle ABCD. On remarquera que si ce n'est pas le cas la fonction *max* annulera la valeur.

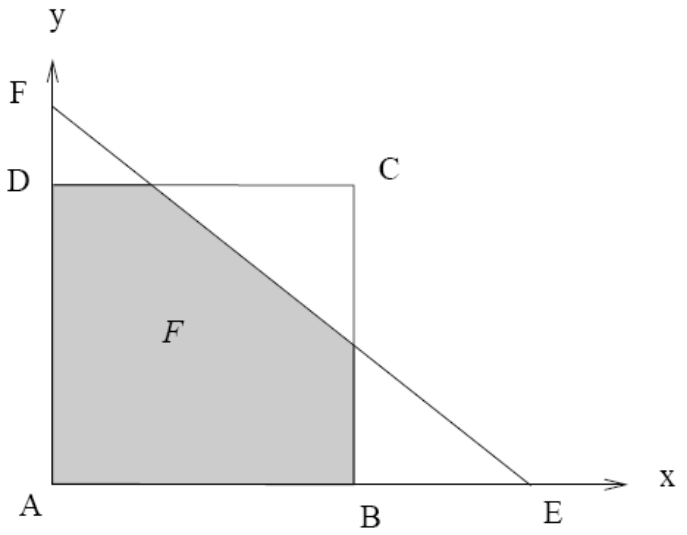


Fig. III.10. Calcul de la fraction volumique, [20].

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait un aperçu sur les méthodes numérique utilisées pour le traitement des problèmes thermiques, nous avons fait une discrétisation de l'équation de transport par la méthode des éléments finis pour la mettre sous la forme algébrique. Ainsi une présentation de la méthode de volume de fluide (VOFCIAM) que nous utilisons pour simuler le transport de l'interface. La méthode est d'écrite en 2D. C'est une approche très concrète du problème totalement déférente des approches classiques qui consiste à utiliser des schémas de discrétisation.

Chapitre IV :

Résultats et discussion

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 différents 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. Description du domaine d'application

La géométrie modélisée est représentée à la figure IV.1. Dans cette figure nous pouvons observer qu'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 quadratique et le maillage de la chaîne moule doit avoir une continuité, comme le montre la Figure IV.1.

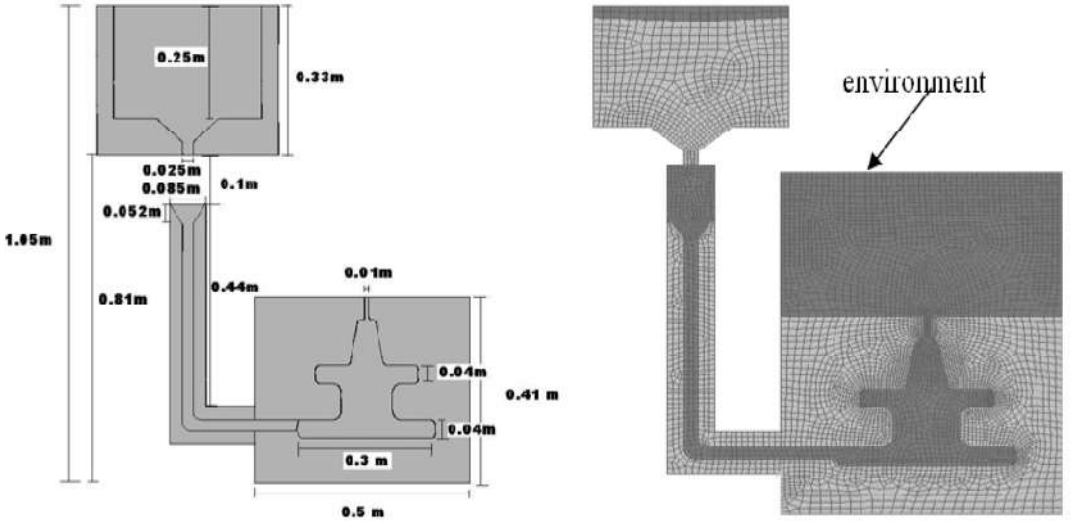


Fig. IV.1 a) Géométries de moule et de la cavité b) maillage adoptée pour la simulation en 2D,

Les propriétés du métal liquide utilisé dans les simulations de remplissage du moule sont énumérées dans le Tableau 1. Afin de simuler l'écoulement de métal liquide dans le moule en sable, les conditions suivantes ont été considérées, [17]:

- le métal liquide et le moule de sable ont été stabilisés dans des conditions normales de la pression atmosphérique.
- la température initiale du métal liquide était de 1550 K 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 k-ε.
- l'algorithme de VOF a été employé pour le remplissage de moule.
- le temps totale pour le remplissage de moule est de 0.05s avec un pas de temps de $5*10^{-5}$ s.
- le nombre d'itérations par étape était 30.
- les propriétés du matériau varient avec la température.
- La solution en 2D a été considérée.

Tab. IV.1 : Propriétés d'alliage de Cu5%Zn, [18].

Température (K)	Chaleur Spécifique (J/Kg.K)	Température (K)	Densité (Kg/m^3)	Température (K)	Conductivité thermique (W/m.k)
1284.718	466.071	1284.718	8344.642	1284.538	321.428
1296.437	466.071	1296.437	8344.642	1296.077	321.428
1308.156	467.857	1308.156	8344.642	1307.615	321.428
1315.187	467.857	1317.531	8344.642	1319.154	321.428
1319.875	469.642	1322.219	8275.000	1321.462	314.285
1324.562	471.428	1326.906	8251.786	1323.769	307.143
1329.250	471.428	1331.594	8158.928	1326.077	300.000
1333.937	478.571	1336.281	8019.6437	1328.385	292.857
1338.625	491.071	1340.968	7857.143	1330.692	278.571
1355.031	492.857	1355.031	7857.143	1333.000	257.143
1366.750	492.857	1366.750	7857.143	1335.308	228.571
1378.468	492.857	1378.468	7845.535	1337.615	178.571
1390.187	492.857	1390.187	7833.928	1342.231	107.143
1401.906	492.857	1401.906	7833.928	1376.846	107.143
1413.625	492.857	1413.625	7833.928	1399.923	107.143
1423	492.857	1423	7810.714	1423	107.143

Tab. IV. 2 : Variation de la viscosité d'alliage Cu5%Zn en fonction de la température

T [°k]	1273	1284.718	1296.437	1308.156	1315.187	1319.875
Viscosité (Pa.s)	0.0161	0.0155	0.0150	0.0144	0.0142	0.0140
T [k]	1324.562	1329.250	1333.937	1338.625	1355.031	1366.750
Viscosité (Pa.s)	0.0138	0.0136	0.0134	0.0132	0.0127	0.0123
T [k]	1378.468	1390.187	1401.906	1413.625	1423	
Viscosité (Pa.s)	0.0119	0.0115	0.0112	0.0108	0.0106	

Tab. IV. 3 Propriétés du matériau de moule, [19].

Température(K)	Densité (Kg/m3)	Température (K)	Chaleur Spécifique (J/Kg.K)	Température (K)	Conductivité thermique(W/m.k)
295	1488	373	1118	373	0.785
373	1482	473	1114	473	0.732
473	1475	573	1160	573	0.693
573	1468	673	1178	673	0.668
673	1462	773	1196	773	0.668
773	1456	873	1214	873	0.668
873	1448	973	1232	973	0.691
973	1442	1073	1250	1073	0.733
1073	1437	1173	1268	1173	0.79
1173	1433	1273	1285	1273	0.863
1273	1428	1373	1303	1373	0.951
1373	1422	1473	1321	1473	1.054
1473	1417	1573	1339	1573	1.175
1573	1413	1673	1356	1673	1.303
1673	1401	1773	1374	1773	1.439
1773	1382	1873	1392	1873	1.582
1873	1360				

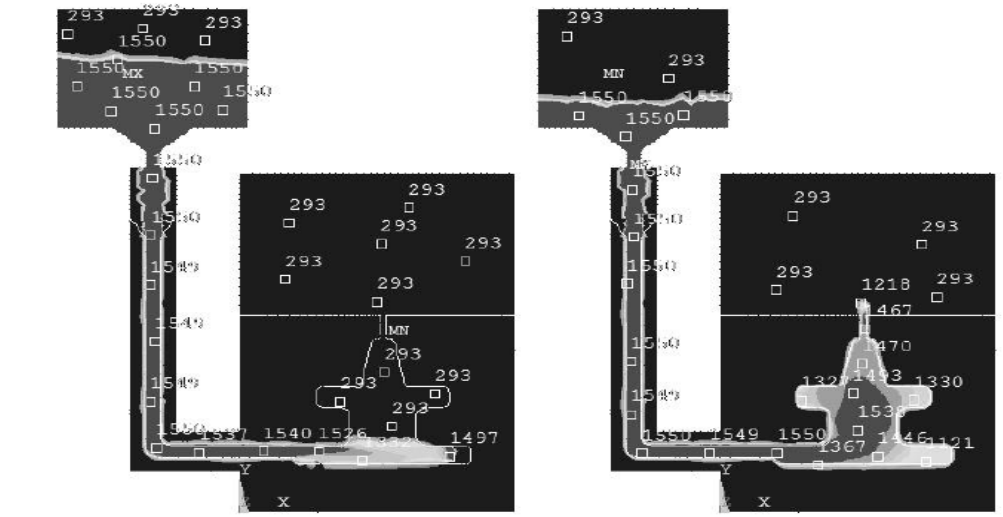
IV.3. Validation

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.

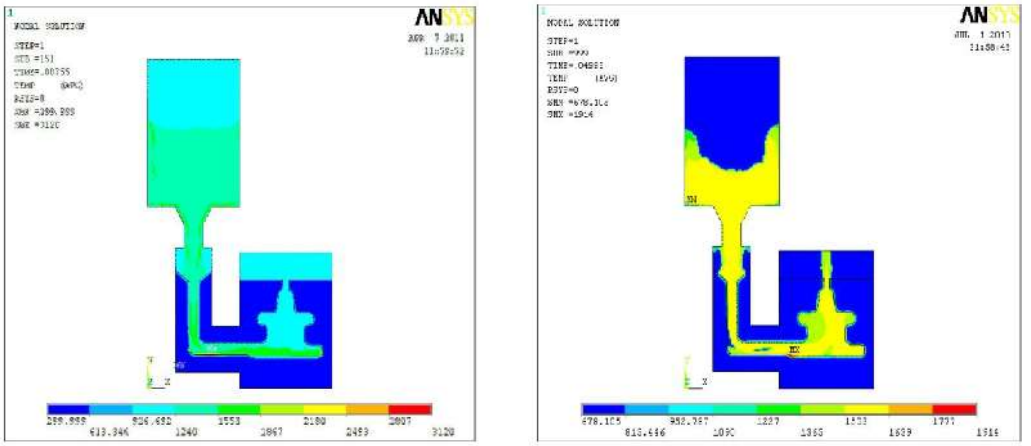
Nous nous sommes assuré que chaque étape était correctement simulée, c'est l'objet de ce chapitre de validations.

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 Moisés M, Guilherme A. Salem, Felipe Bertelli, et Noé Cheung du département de mathématique et statique au Brésil **[17]**. 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 en fonction de la température.

Champ de température : les figures (IV.2.a ; IV.2.b) montrent la distribution de la température dans le moule, la première affiche le modèle de Moisés M, Guilherme A. Salem, Felipe Bertelli, et Noé Cheung et la deuxième affiche notre modèle **[17]**.



(a)

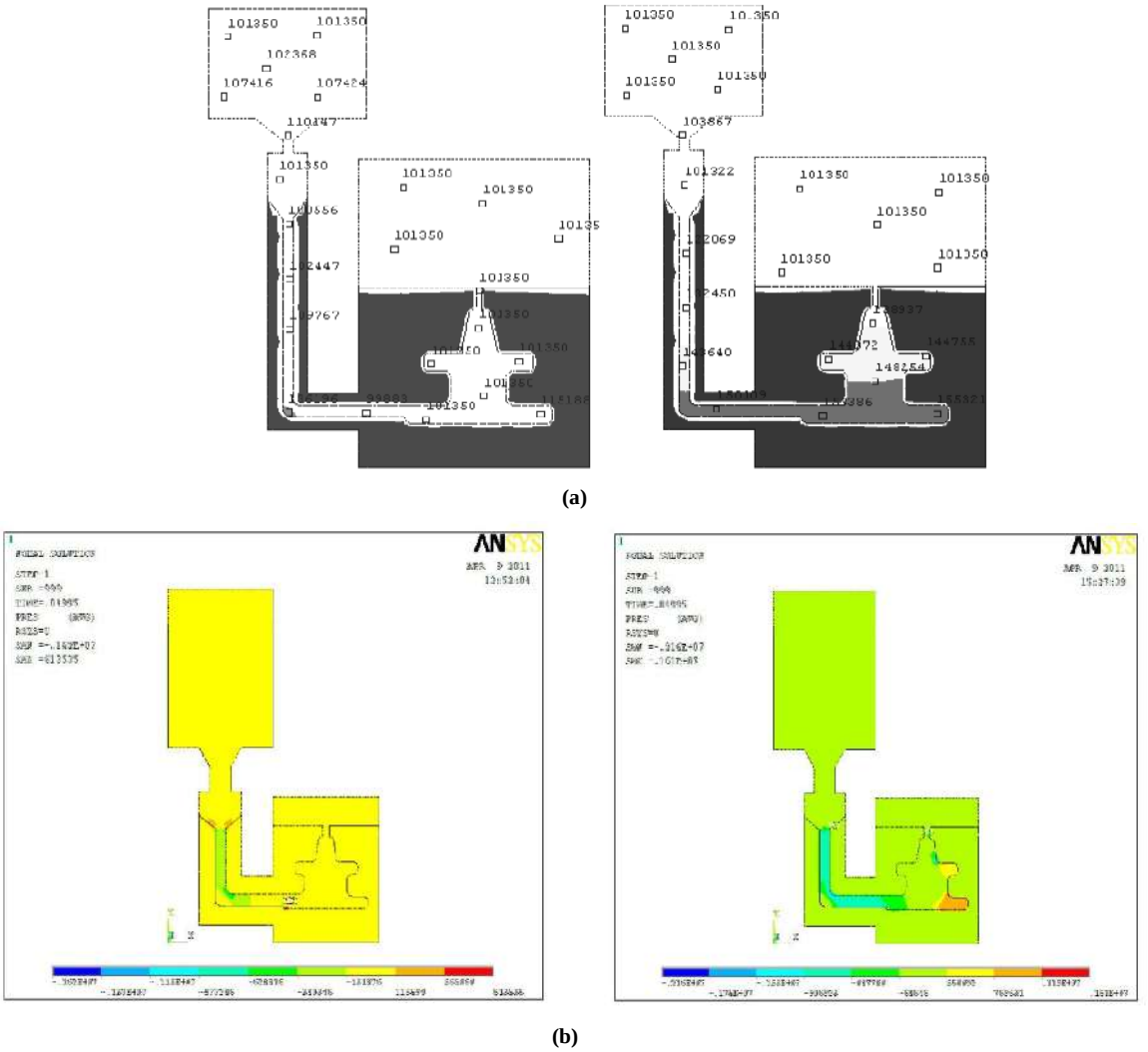


(b)

Fig. IV.2. a) Champs de la température de modèle de Moisés M, Guilherme A. Salem, Felipe Bertelli, et Noé Cheung, b) Les champs de la température de nos simulations.

La variation de la température au cours de remplissage de moule, est montrée sur la figure IV.2. La température est presque constante sur les parois et à l'intérieur du moule, mais elle augmente jusqu'à 1553K grâce à la convergence de la section. D'autre part, si nous comparons les résultats de la figure IV.2.a avec les résultats de la figure IV.2.b. La variation de la température a le même profile avec un écart de 15 à 25°C, cet écart causée par l'effet de la turbulence c'est-à-dire la vitesse d'injection de métal dans le moule.

Champ de pression : les figures (IV.3.a ; IV.3.b) affichent la variation de la pression dans le moule, la première affiche le modèle de Moisés M, Guilherme A. Salem, Felipe Bertelli, et Noé Cheung et la deuxième affiche notre modèle **[17]**.



(a)

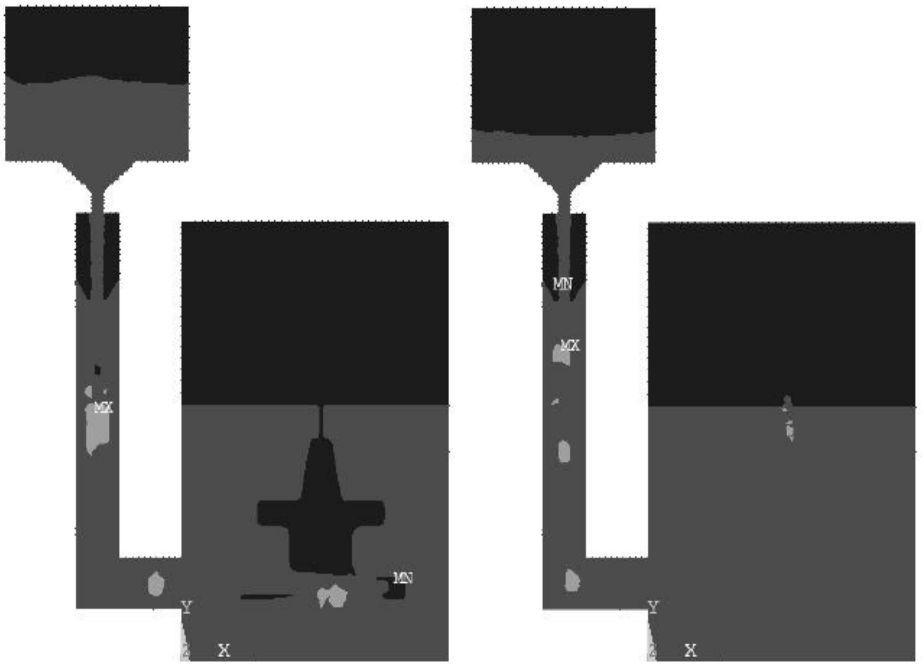
(b)

Fig. IV.3. : a) Champs de la pression de modèle de Moisés M, Guilherme A. Salem, Felipe Bertelli, et Noé Cheung, b) Champs de la pression de nos simulations.

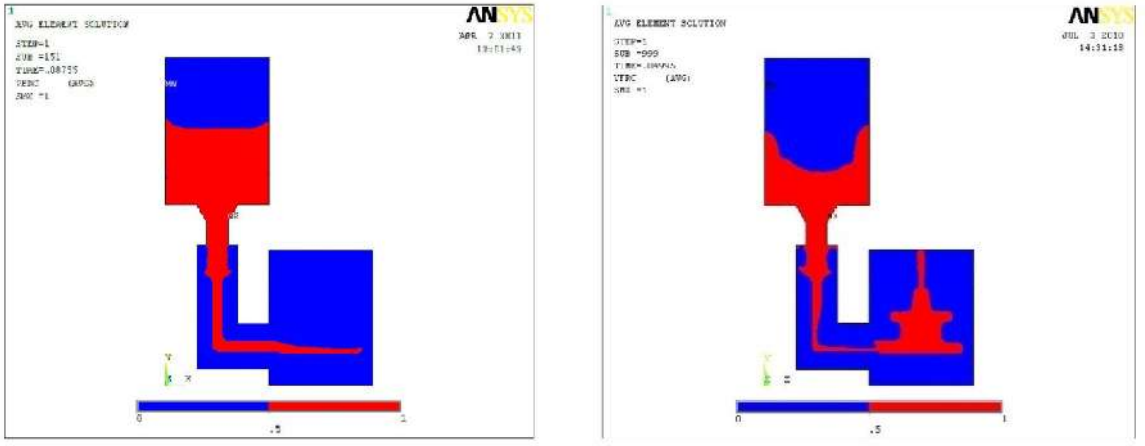
La variation de la pression est affichée dans le moule comme elle est illustrée sur la figure IV.3, au démarrage la valeur de la pression est 131875Pa, et elle augmente jusqu'à une valeur maximale de 628516Pa grâce à la convergence de la section et le coude vif. Il y a aussi une diminution jusqu'à une valeur de 135594Pa à cause de libération de liquide.

Si nous comparons la variation de champ de pression des autres auteurs avec notre simulation, mais en séparant le moule en trois parties, la partie supérieure, la partie inférieure et la partie intermédiaire. Dans les deux parties (supérieure et inférieure) les valeurs sont affichées dans le moule, les valeurs de la figure IV.3.a et celles de la figure IV.3.b sont à peu prés les mêmes avec un légère écart (par exemple : $P1_a$ = 139732Pa et $P1_b$= 131875Pa). Mais dans la partie intermédiaire, l'écart est grand ($P2_a$= 138005Pa et $P2_b$= 628516Pa) grâce à la vitesse d'injection.

Volume de fraction : les figures (IV.4.a ; IV.4.b) affichent l'écoulement du métal dans le moule, la première affiche le modèle de Moisés M, Guilherme A. Salem, Felipe Bertelli, et Noé Cheung et la deuxième affiche notre modèle **[17]**.



(a)



(b)

Fig. IV.4. Volume de fraction pendant le remplissage du moule ; a) Modèle de Moisés M, Guilherme A. Salem, Felipe Bertelli, et Noé Cheung, b) Notre modèle.

L'écoulement du métal dans les conduites est montré sur la figure IV.4. Au début, l'écoulement est lent à cause de la diminution de la section (convergent), mais quand la section diminue la vitesse augmente. Le liquide continue jusqu'à le chargement complet du moule. Nous ne pouvons pas faire la comparaison entre la (a) et (b) de la figure IV.4 car le même profile est affiché.

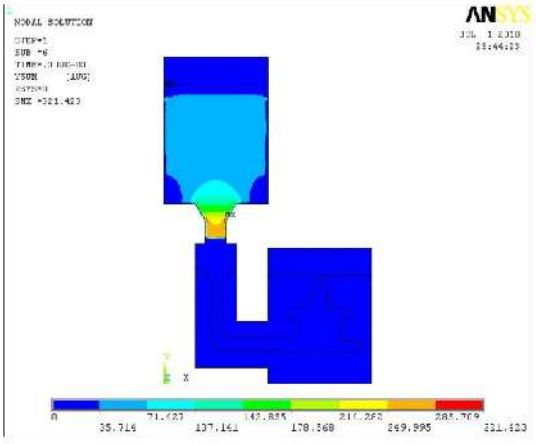
IV.3.1. Evaluation de l'influence de la température sur le bon remplissage

Nous allons présenter l'influence de la température sur le remplissage du moule, ce travail est décomposé de deux parties :

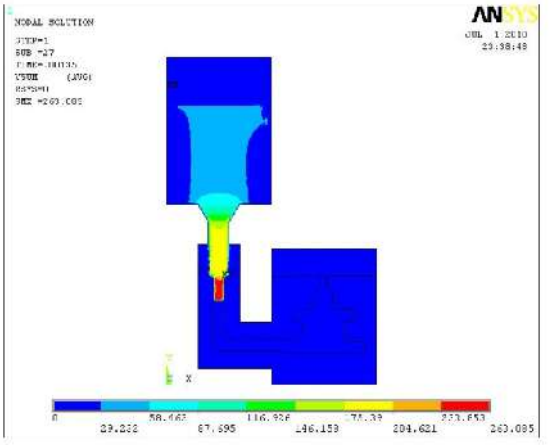
1ere partie

Dans cette partie nous avons varié la température du gaz dans le moule c'est-à-dire de prendre la même température avec les parois du moule.

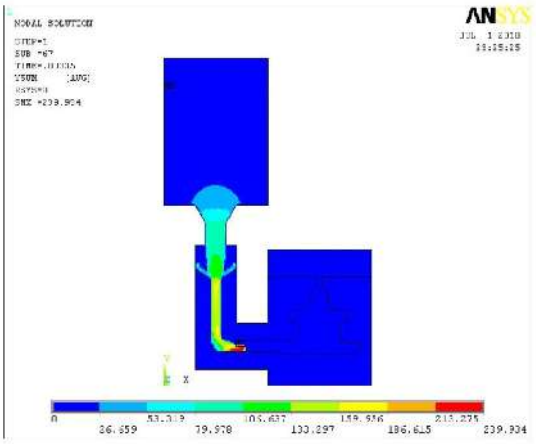
Champ de vitesse : la figure IV.5 montre la variation de la vitesse dans le moule en fonction de la température.



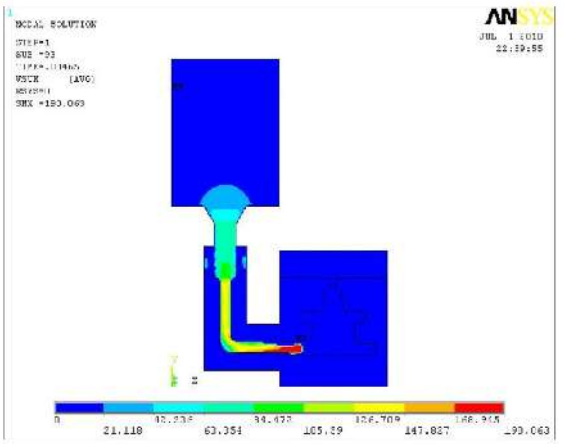
T = 200 K



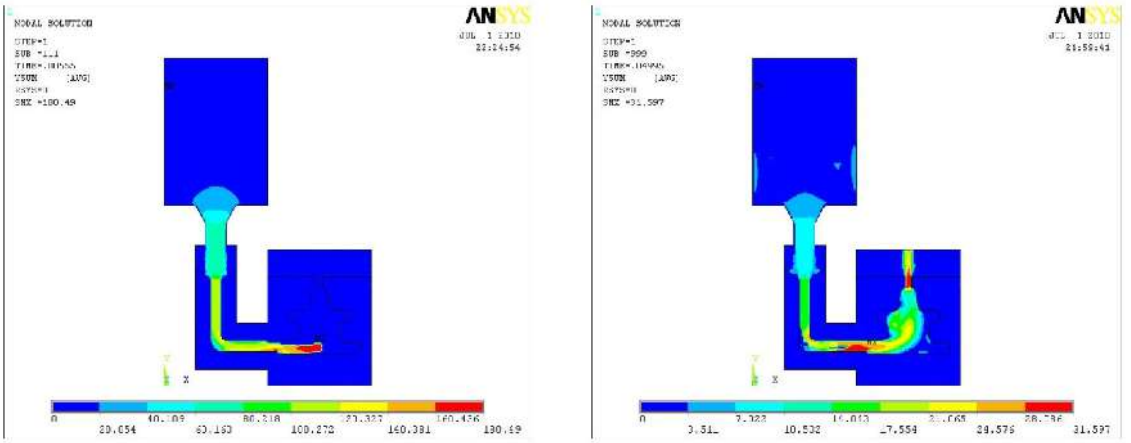
T = 300 K



T = 400K



T = 500K



T = 700K **T = 800 K**

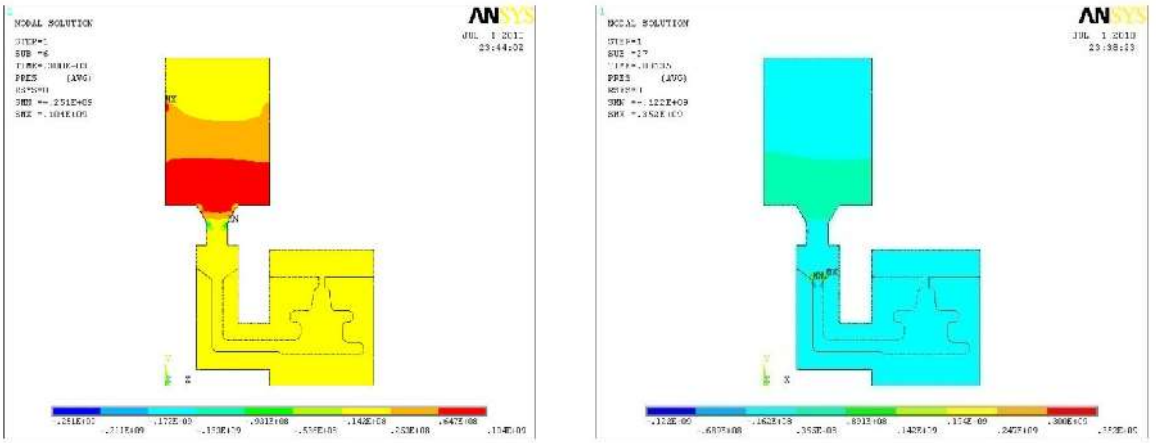
Fig. IV. 5. Profile de la vitesse dans le moule

Différents paramètres caractérisant le processus de remplissage du moule ont été déterminées. Ces paramètres sont calculés aux cours de remplissage du moule. La figure IV.5 illustre la vitesse instantanée (m / s) du fluide.

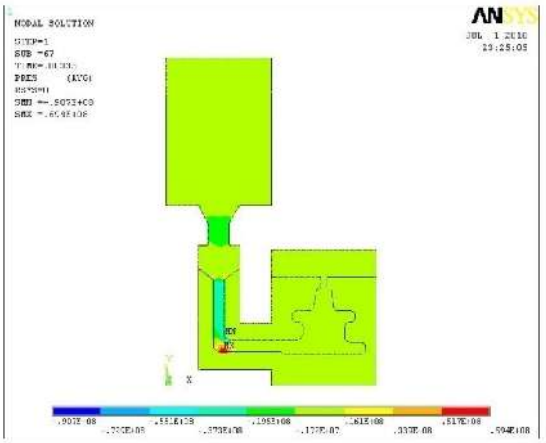
La vitesse varie en fonction de la trajectoire d'écoulement, étant plus élevée au début, cette augmentation de l'énergie cinétique causée par la diminution de la section entre l'entre et la sortie du moule, et le facteur de la gravitation qui joue un rôle important et en plus l'interaction fluide solide.

Dans les courbures de la géométrie du moule, à la température T=800°K le moule est complètement rempli et certains flux de métal fondu à travers la sortie du moule. Ce phénomène, de sortie de liquide comme une forme de jet, qui se passe en raison de la variation brusque de la pression, parce que la variation de la haute pression à la pression atmosphérique.

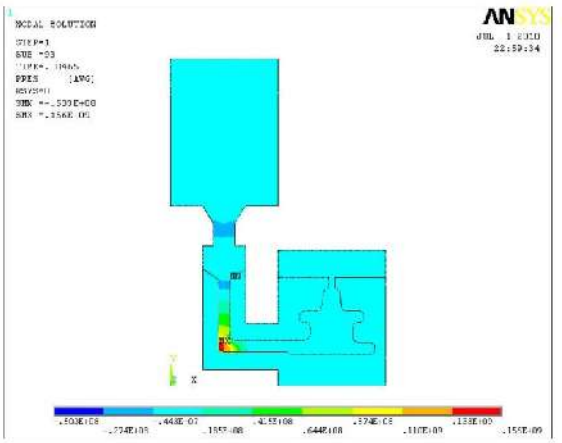
Champ de pression : la figure IV.5 montre la variation de la pression dans le moule en fonction de la température.



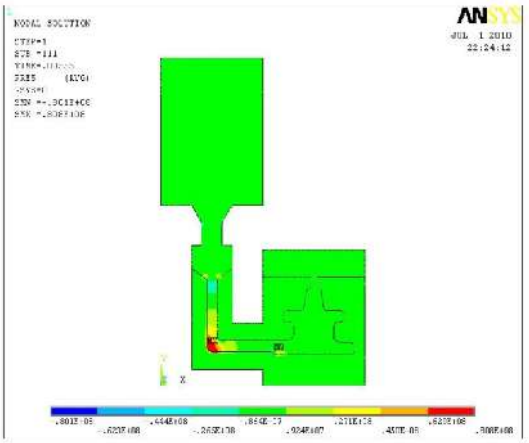
T = 200K **T = 300 K**



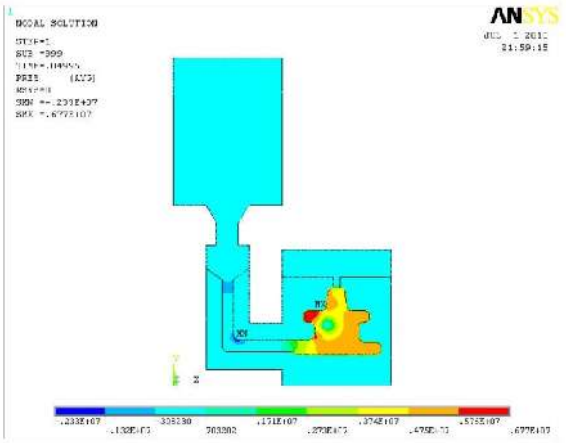
T = 400K



T = 500K



T = 700K

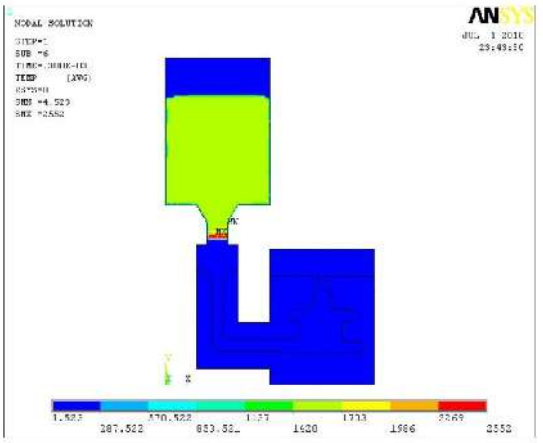


T = 800K

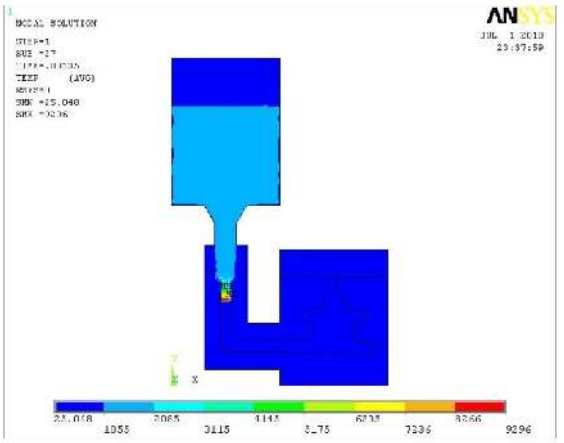
Fig. IV. 6. Répartition de la pression dans le moule

Nous avons d'autres résultats avec d'autre paramètre. Dans la figure IV. 6 la variation de la pression est affichée dans le moule, au début de l'écoulement de liquide, la pression est maximale au niveau de réservoir de valeur 0.1 $*10^9$ Pa, elle due à la convergence de la section, elle diminue après un certain temps (dans la conduite), encore une augmentation légère atteindre a $0.15*10^9$Pa grâce au changement de sens de l'écoulement (dans le coude vif). Après, il y a une diminution à cause de la libération de liquide avec l'environnement (la sortie du moule).

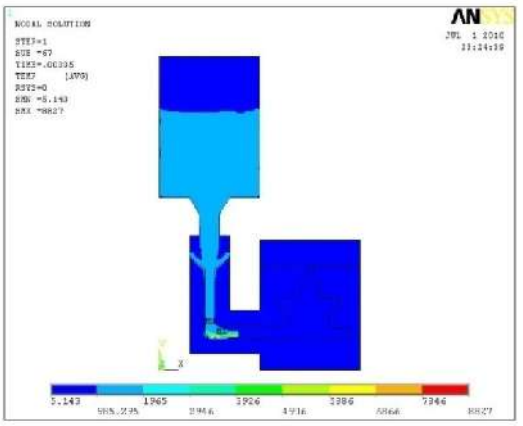
Champ de température : la figure IV.6 affiche la distribution de la température dans le moule.



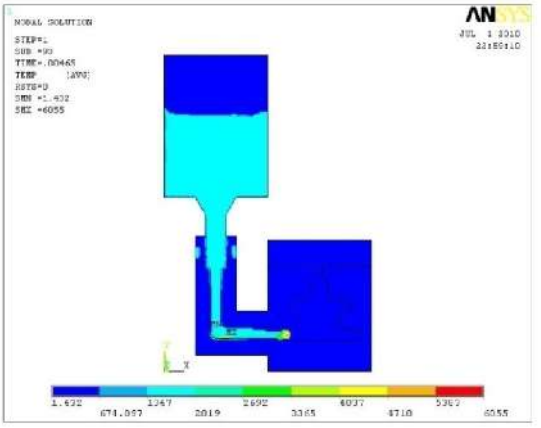
T = 200K



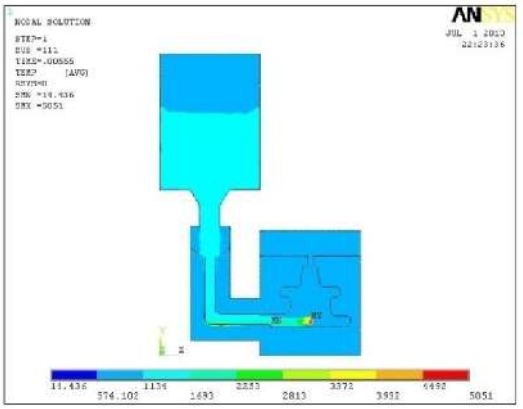
T = 300K



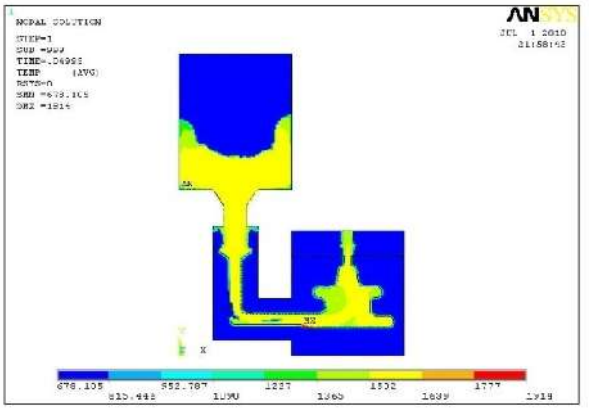
T = 400K



T = 500K



T = 700K

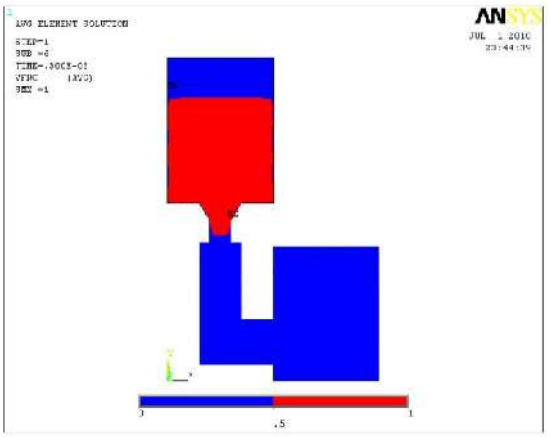


T = 800K

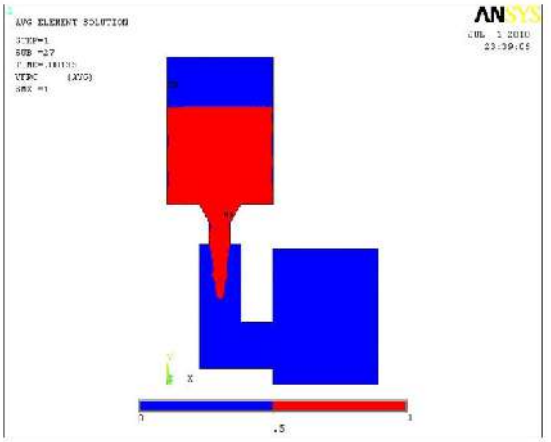
Fig. IV.7. Répartition de la température dans le moule

La variation du champ de température au cours de remplissage du moule, comme le montre la Figure IV.7. Elle possède une valeur de 2552°K. Après un certain temps, elle augmente dans la conduite jusqu'à la partie inférieure du moule (dans le coude), jusqu'à la valeur de 9296°K. D'autre part, dans d'autre région à l'intérieur du moule, elle diminue jusqu'à 600°K.

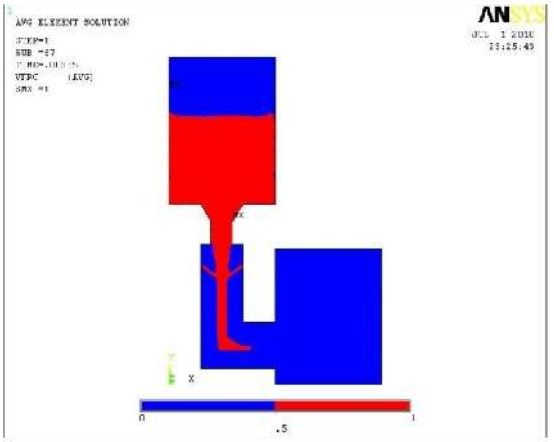
Volume de fraction : la figure VI.8 affiche l'influence de la température sur l'écoulement de métal dans le moule.



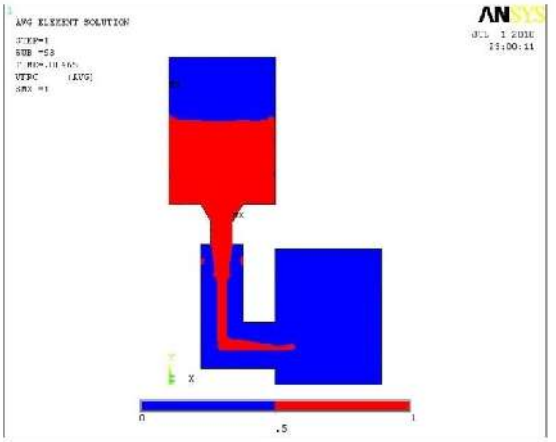
T = 200K



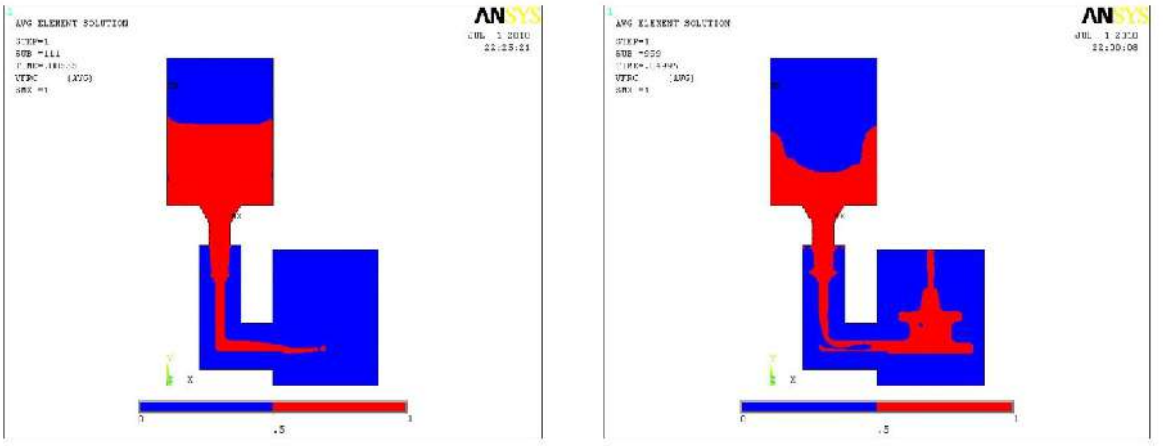
T = 300K



T = 400K



T = 500K



T = 700K **T = 800K**

Fig. IV.8. Profile de volume de fraction dans le moule

La fraction volumique a été calculée, comme il est illustré à la figure IV.8, où la couleur rouge représente la cellule complètement rempli par le liquide et il est caractérisé par la valeur de l'unité (1), la couleur bleu représente la cellule complètement vide et elle est caractérisée par la valeur de zéro (0) et la couleur violet représente la cellule au cours du processus de remplissage et il est caractérisée par des valeurs comprises entre zéro et l'unité.

Au début de remplissage du moule, le liquide déplace lentement, mais après la croissance de la température, on remarque que le mouvement de liquide augmente, sa donne un remplissage rapide. D'autre part, au cours de remplissage, il y a des turbulences à l'intérieur du moule. Ces turbulences créent des défauts comme les retassures et les inclusions d'air (voir la figure IV.8 à T=800°K).

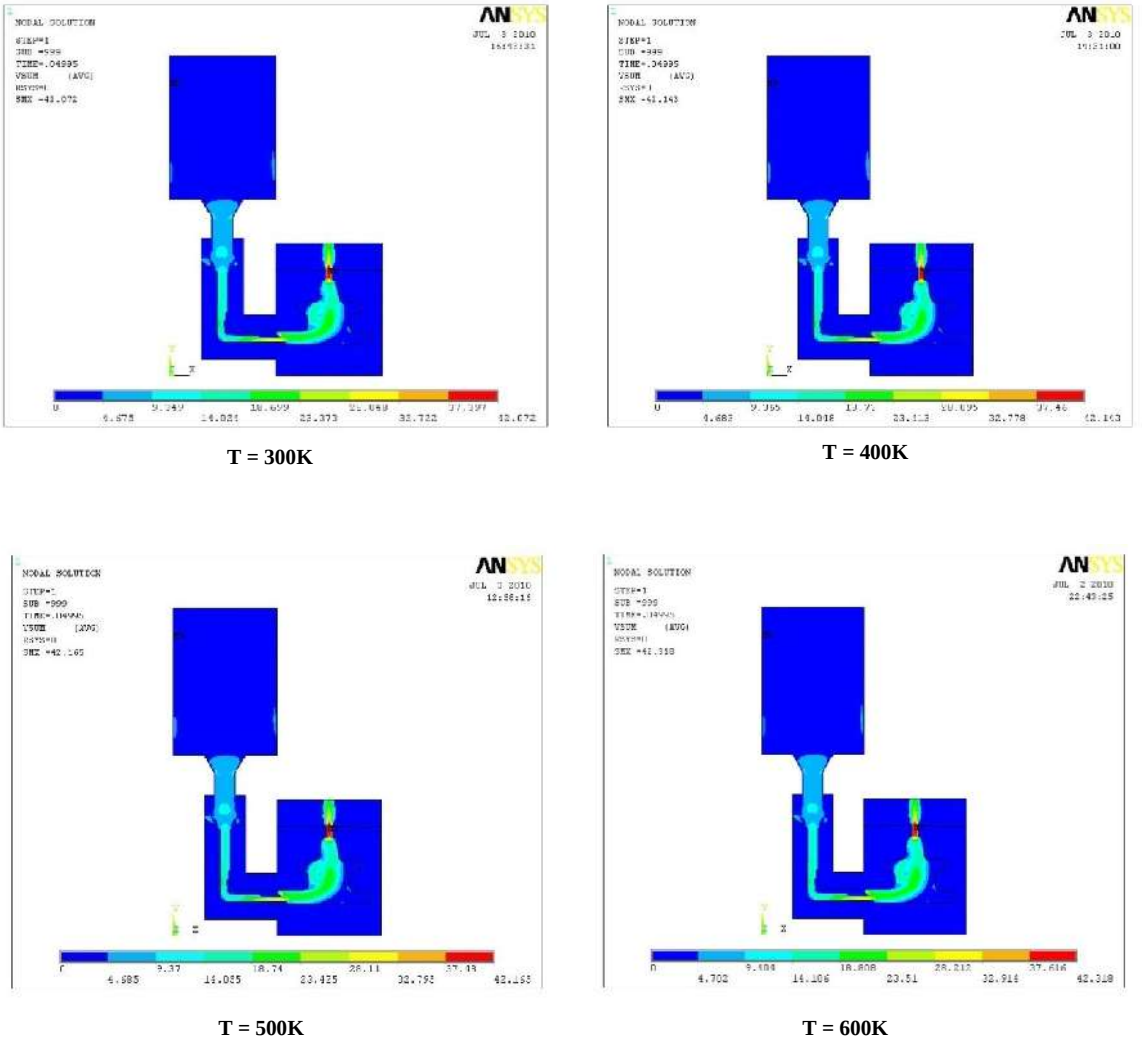
D'autre part, les résultats de la figure IV.8 montrent que le paramètre viscosité joue un rôle très important c'est à dire lorsque la température diminue, la viscosité augmente se qui donne un freinage du liquide dans le moule.

2eme partie

D'après les résultats de la première partie et ces défauts pendant le remplissage du moule, nous avons essayé de jouer sur quelques paramètres pour éliminer le maximum des défauts (optimiser ce modèle), parmi ces solutions, la température du gaz (air) dans le moule. D'abord nous avons fixé la température du gaz à T=1000 °K et nous avons varié la température du moule avec un pas de 100°K.

Après un long temps, on a obtenue les résultats suivants :

Champ de vitesse : la figure IV.9 montre la variation de la vitesse dans le moule en fonction de la température.



T = 300K **T = 400K**

T = 500K **T = 600K**

Fig. IV.9. Profile de la vitesse dans le moule

Dans la figure IV.9, le profile de la vitesse reste le même, malgré la variation de la température, au début la vitesse d'écoulement augmente progressivement jusqu'à une valeur maximale de 42 m/s, ceci est due à la convergence de la section du moule, Après, il y a une diminution de la vitesse à cause de libération de liquide avec l'environnement (la sortie du moule).

Champ de température : la figure IV.10 affiche la distribution de la température dans le moule.

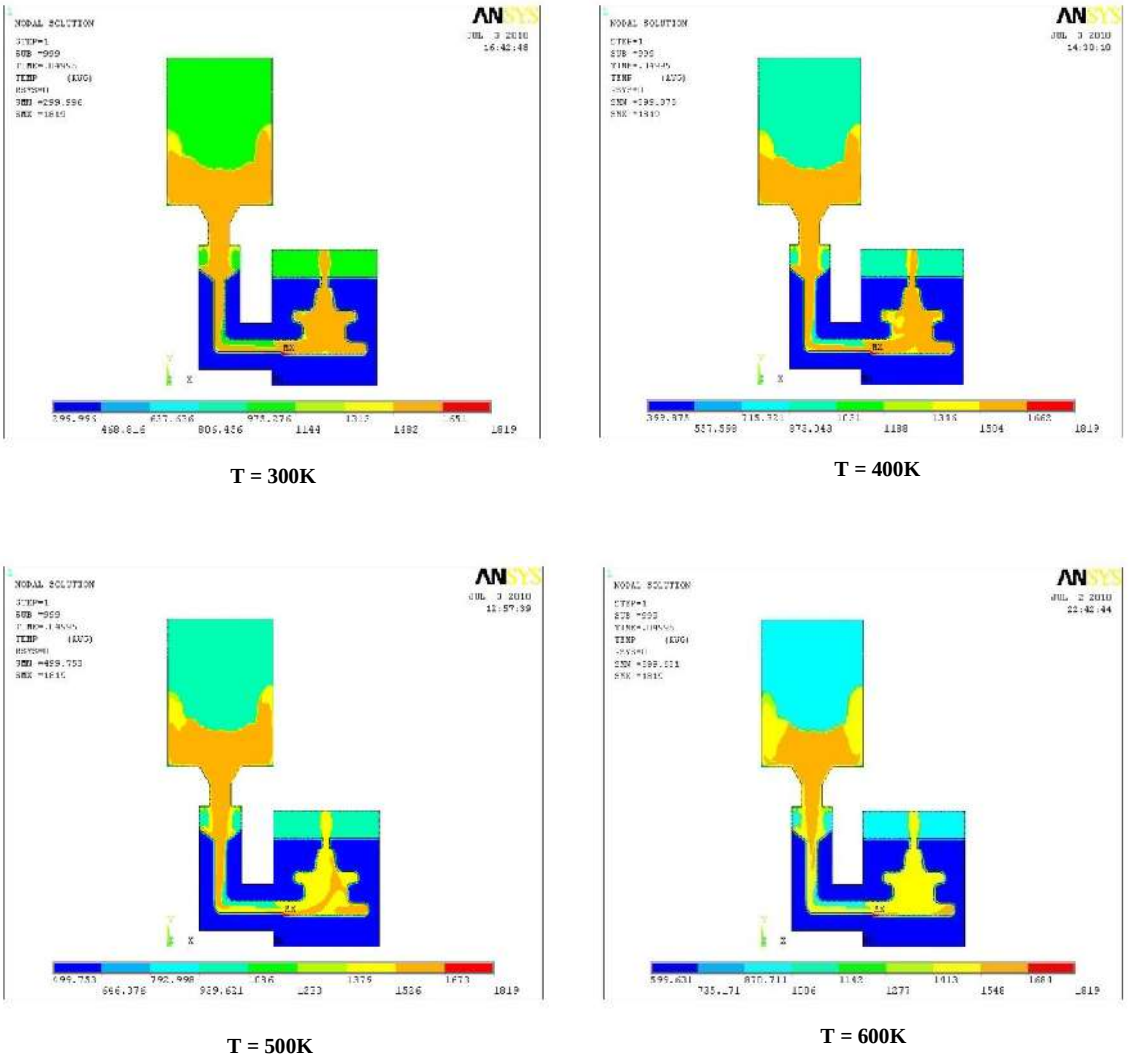
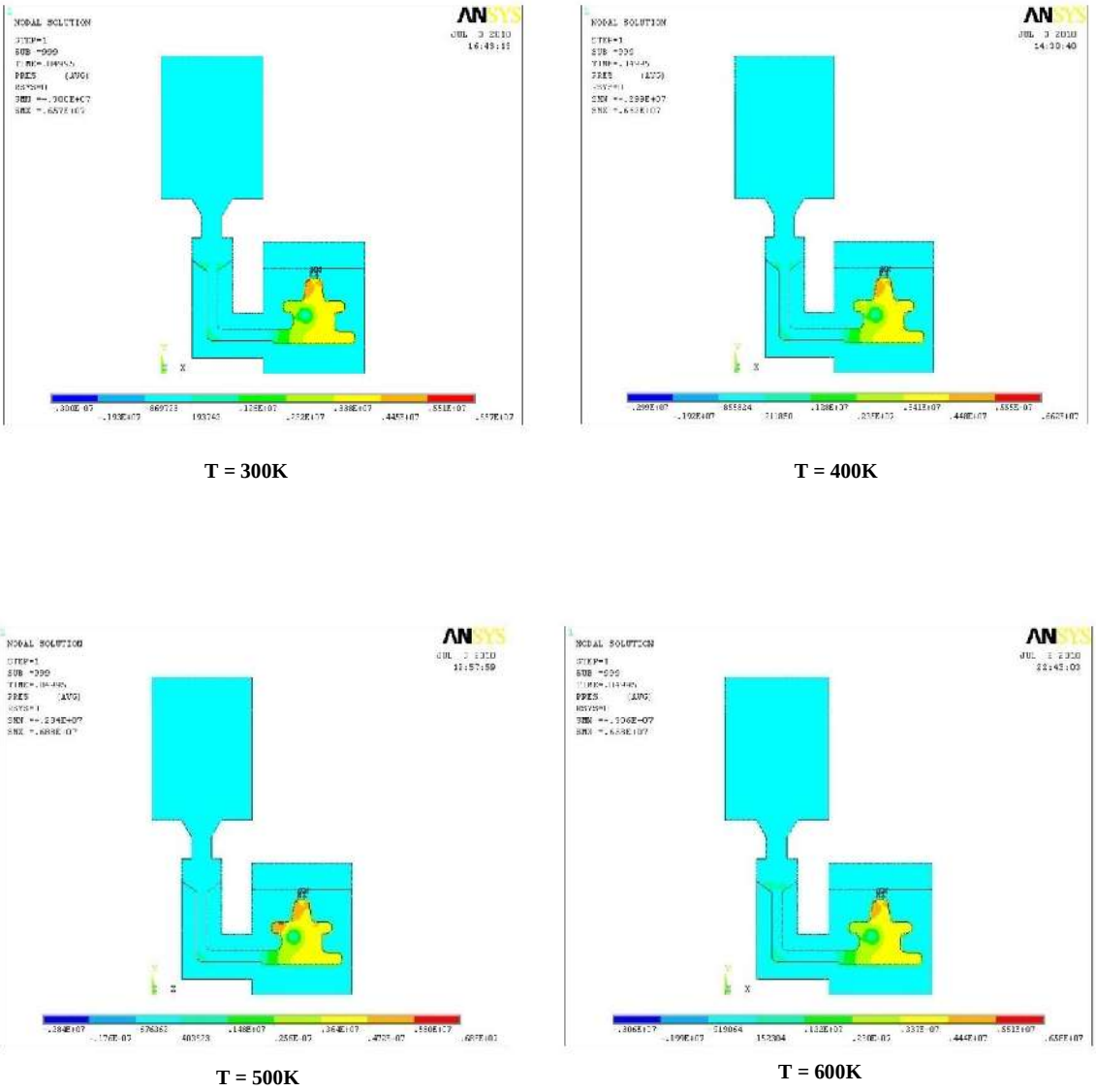


Fig. IV.10. Répartition de la température dans le moule

La figure IV.10 représente la répartition de la température au cours de remplissage du moule. Elle commence par une valeur de 1313°K. Après un certain temps, elle augmente dans la conduite jusqu'à la partie inferieure du moule (dans le coude) jusqu'à une valeur de 1482°K. Dans la partie inférieure du moule la température augmente jusqu'à la valeur de 1651°K, dans cette partie il y a une divergence de forme arrondie, cette forme crée quelques turbulences qui fond que la température atteint une valeur maximale de 1819°K.

Champ de pression : la figure IV.11 montre la variation de la pression dans le moule en fonction de la température.



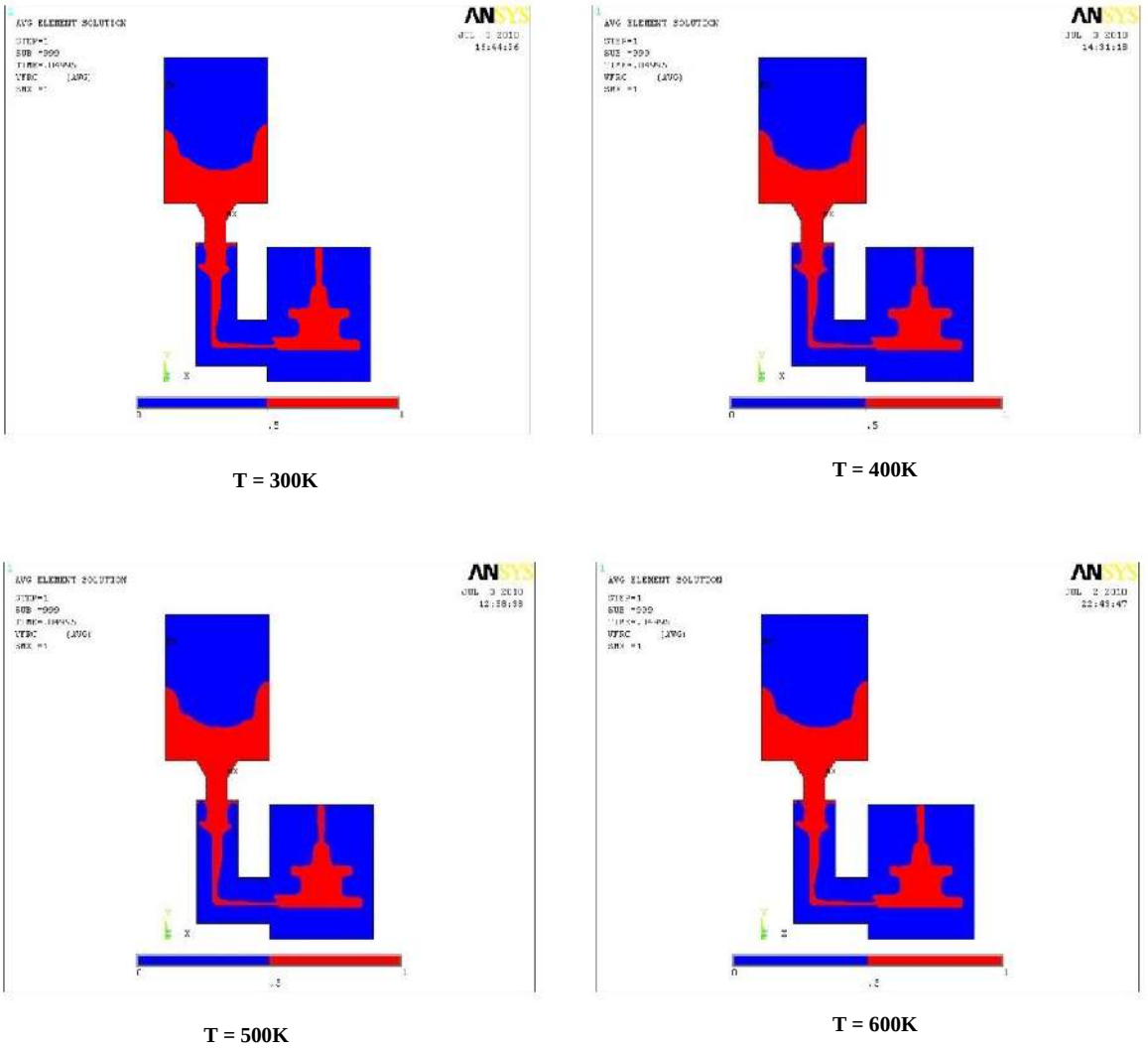
T = 300K **T = 400K**

T = 500K **T = 600K**

Fig. IV.11. Profile de la pression dans le moule

A partir de cette figure IV.11, on note que le profile reste le même, au début, la pression commence par la valeur minimale de 869723Pa, après un certain temps la pression augmente régulièrement jusqu'à la valeur maximale de $65*10^5$ Pa, ceci est due à la convergence de la section juste avant la sortie. Après, il y a une diminution de la pression à cause de libération de liquide avec l'environnement.

Volume de fraction : la figure VI.12 affiche l'influence de la température sur l'écoulement de métal dans le moule.



T = 300K **T = 400K**

T = 500K **T = 600K**

Fig. IV.12. Profile de volume de fraction

Le volume de fluide (VOF) a été calculée, comme il est illustré à la figure IV.12, ce mode d'affichage exprime mieux le remplissage du moule, le moule est complètement chargé de liquide, mais malgré le changement de la température, le remplissage (profile) reste le même et dans ce cas là nous avons éliminé tous les défauts que nous avons vu dans la première partie comme les retassures et les inclusions d'air.

IV. 3.2. Comparaison entre la première et la deuxième partie

D'après les résultats des deux parties nous pouvons faire la comparaison sur le plan thermique. Dans la première partie, le remplissage du moule est très lent malgré la vitesse très grande de valeur maximale 321m/s, la vitesse est très élevée par rapport à la hauteur du moule h=1.05m.

La température de cette partie est énorme de valeur maximale de 9296°K, cette élévation donne une vie courte de matériau de construction du moule.

Toujours dans la première partie, la pression aussi de valeur imaginaire et inacceptable de valeur maximale $15*10^7$ Pa, donne un risque de dégradation rapide du moule.

Le nouveau et dernier paramètre de volume de fraction dans cette partie qui donne le mode de remplissage du moule et qui affiche tout les défauts, l'augmentation de la température crée une libération de fluide dans le moule mais insuffisante car on observe des défauts dans la pièce comme retassure et inclusion d'air.

Par contre dans la deuxième partie nous avons essayé de jouer sur le paramètre de la température qui stabilise tous les autres paramètres, et qui donne des valeurs pratiques et réalisables.

D'après la fixation de la température du gaz dans le moule à la valeur 1000°K, la vitesse est diminuée de manière très importante, sa valeur maximale est 42m/s. De plus, la température qui diminue de 5 fois de valeur max égale 1819°K, la pression aussi donne un profile acceptable et de valeur maximale $65*10^5$ Pa. Le paramètre de VOF qui donne un très bon remplissage du moule avec élimination des défauts que nous avons obtenu au début.

IV. 4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté notre modèle ainsi la nouvelle méthode de transport d'interface (méthode de volume de fluide VOF), La méthode VOF s'est révélée être une technique puissante, pour le contrôle du remplissage des moules et nous avons pu construire d'autres modèles très simples et faciles à utiliser. De plus, les simulations avec cette méthode nous ont permis de mieux comprendre la distribution de tous les paramètres : la vitesse, la pression, la température et le volume de fraction aux cours de remplissage du moule, qui donnent des résultats illustrés et interprétés précédemment et qui vont nous orienter vers l'optimisation des paramètres influençant sur les défauts et le coût total du remplissage du moule.

Conclusion générale

Conclusion générale

L’aptitude à la compréhension des problèmes physiques complexes constitue les premiers maillons de la chaîne pour maîtriser l’aspect scientifique ; donc pour l’obtention des résultats bien déterminer dans un régime turbulent (transitoire) ; il est nécessaire de comprendre ces outil dans la MDF qui n’est pas évidente pour une première tentative.

Ce qui nous a poussés d’exposer les moyens mathématiques et numériques après une brève résumé de certaines théories de remplissage des moules.

Dans un premier temps, on a modélisé l’évolution du mouvement de fluide qui passe par une conduite cylindrique pour remplir l’empreinte du moule. La formulation VOF (volume of fluid) a été adoptée pour le contrôle du remplissage des moules. On a vu d’après les résultats obtenus et les références qu’elle s’adapte bien avec un tel genre de problème.

Nous avons validé notre modèle à partir de comparaisons avec le modèle de Moisés M, Guilherme A. Salem, Felipe Bertelli, et Noé Cheung.

Nous avons aussi présenté les résultats de notre modèle, en insistant plus particulièrement sur le paramètre de volume de fluide (VOF) et les champs température, de vitesses et de pression dans le moule.

Les faibles écarts observés sont dus d'une part à la condition initiale de chacun des deux modèles, et d'autre part pour notre modèle à la précision des calculs.

On a déduit que la technique de préchauffage donne des résultats très intéressants.

Les principales conclusions suivantes peuvent être tirées de l'analyse numérique effectuée dans la présente étude:

- D’après les résultats, le paramètre de volume de fraction qui permet de visualiser la dynamique de fluide au cours de remplissage, la phase de refroidissement et de contrôler le processus en faisant varier les paramètres opérationnels.
- Aussi pour le paramètre de température qui est très important dans le domaine de remplissage des moules. Grace à lui, on a éliminé tous les défauts qu’on a vu précédemment.
- La pratique de la simulation et la modélisation mathématique dans l'industrie de moulage peut produire une série d'avantages tels que l'optimisation, gain de temps, réduction des déchets, et l'amélioration de la qualité.

Références

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

[2] LEKBAIRIA Mokhtar ; BETIL Younes « Simulation numérique du remplissage des moule» diplôme d'ingénieure ; Université de Yahia Fers de Médéa ; 2010.

[3] Document de SCHMINCK Julien ; Moulage en coquille métallique, citer dans [2].

[4] Lionel MARTIN «Intégration du métier de la fonderie dans les processus de conception méthodologies et outils associés» diplôme de docteur ; Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers ; 2006.

[5] MEDJBER Mohamed, YKRELEF Hichem «Etude de l'écoulement d'air dans une cavité parallélépipédique chargé d'obstacle » diplôme d'ingénieure ; Université de Yahia Fers de Médéa ; 2008.

[6] Im I.-T., Kim W.-S., Lee K.-S. « Mathematical modeling of mold-filling and solidification of castings: part I – theoretical basis» International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.44, 2001, pp.1507-1515. 2009.

[7] McBride D., Croft T.N., Cross M. « Multi-component free surface flows and rotating devices in the context of minerals processing » Computers & Fluids, vol. 37, 2008, pp.170–180.

[8] Hirt C.W., Nichols B.D. «Volume of Fluid (VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries » Journal of Computational Physics, vol. 39, 1981, pp. 201-225.

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

[10] H.B.Awbi, Application of computational fluid dynamics in room ventilation, buildings and environment, 24-1(1989)73-84, 2003.

[11] B. RAMASWAMY & M. KAWAHARA. Lagrangian finite element analysis applied to viscous free surface fluid flow. Int. J. Numer. Methods fluids, vol.7, p. 953-984, 1987.

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

[13] R. J. LEVEQUE. Numerical methods for conservation laws. Lecture in mathematics. ETH. Zurich, Birkhauser, 1990.

[14] H. C. YEE. Upwind and symmetric Shock-Capturing Schemes. NASA, 1987.

[15] C. Hirsh. Numerical computation of internal and external flows. John Wiley and sons, 1990.

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

[17] Son G., Dhi V.K. « Mathematical modeling of mold-filling and solidification of castings: part II – application to a cu 5%Zn alloy casting in a sand mold» International Journal of Heat and Mass Transfer, vol.51, 2008, pp.1156– 1167, 2009.

[18] Miettinen J. **«** Thermodynamic-kinetic simulation of solidification in binary fcc copper alloys with calculation of thermophysical properties**»** Computational Materials Science, vol.22, 2001, pp.240-260.

[19] Midea T. and Shah J.V. « Mathematical modeling of mold-filling and solidification of castings: part II – application to a cu 5%Zn alloy casting in a sand mold» AFS Transaction, vol.02-080, 2002, pp.1-16, 2009.

[20] http://thetis.enscbp.fr/sites/default/files/theses/these_j_breil.pdf.

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

[22] Kim KD, Yang DY, Jeong JH, « Contribution to the modelling of sheet metal forming: application to spring-back and localization» comput. Methods appl. Mech. Engrg. 2006. 195 (48-49): 6799-6821, 2007.