الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA
TECHNOLOGIE

Département du Génie Mécanique



Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master en Génie Mécanique

Option : Energétique et Thermique des Systèmes

THEME

Analyse des défauts par simulation numérique du remplissage sous pression des moules par méthode EF/VOF

Proposé et dirigé par :
Mr Zirari Mounir
Mr Labbadia Omar
Préparé et présenté par :
Mr. MAGHARI Mohamed Elhaouari Amine
Mr. Ali Mourad

Année universitaire 2021 – 2022

ملخص:

مشروع التخرج هذا يهدف لمحاكاة العددية لملء القالب من خليط الحديد وذلك لتحليل العيوب الممكن حدوثها أثناء عملية القولبة. وذلك باستخدام تقنية نماذج العناصر المحدودة باعتماد على برنامج ANSYS. خلال محاكاة مرحلة التعبئة اعتبرت بعض الخصائص مثل الكثافة والنا قلية الحرارية والحرارة النوعية للمعدن السائل والصلب كقيم ثابتة. كما عرفت حالة الاضطراب بنموذجk-ε .

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

الكلمات المفتاحية: المحاكاة العددية، طريقة العناصر المحدودة ،ملء القالب وحجم السائل(VOF).

Résumé :

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

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

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

Abstract:

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

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

Keywords: The numerical simulation, finite element method, fill the mold and the volume of fluid (VOF).

Remerciement

Toutes nos gratitudes, grace et remerciement au bon dieu qui Nous avons dirigé dans la voie de la science, et nous a donné le courage et la Volonté pour arriver à ce niveau.

Nous tenons tout d'abord à remercier fortement notre Promoteur Mr Zirari Mounir, quinous a aidé et donné tout son temps pour Compléter notre travail.Nous lui remercions pour sa compréhension,ses conseils Précieux.

Tous nos remeciements égalements à nos familles pour l'aide inconditionel Durant cette période.

Enfin,Nous remercions sincérement tous nos amis de pris ou de loin,et tous Ceux qui nous a aidé, d'une maniére ou d'une autre durant la période de recherche de ce mémoire.

SOMMAIRE

Introduction Général I

Chapitre I étude bibliographique

I.1. Introduction 01

I.2.Le Moulage 01

I.2.1. Moulage en sable 04

I.2.1.1. Principe 04

I.2.1.2 Avantages du procédé 05

I.2.1.3 Inconvénients du procédé 05

I.2.2. Moulage mécanique 06

I.2.2.1. Par pression 07

I.2.2.2. Par secousse 08

I.2.2.3. Par projection 08

I.2.2.4. Par secousses et par pression. 09

I.2.3. Moulage en carapace (procédé Corning) 10

I.2.3.1. Principe du procédé du moulage en carapace 10

I.2.4. Moulage en moules métalliques 11

I.2.4.1. Caractéristiques générales 11

I.2.5 : Moulage à la cire perdue 12

I.2.5.1. Principe du procédé 12

I.2.5.2. Créer un modèle inerte 12

I.2. 5.3. Confectionner une coquille 13

I.2.5.4. Injecter la cire 13

I.2.5.5. Trempe et enveloppement du modèle 13

I.2.5.6. Fusion du modèle perdu 13

I.2.5.7. Confection du moule et coulée du métal 13

I.2.5.7.1. Applications 13
I.7. Moulage en coquille 13
I.2.7.1. Moulage en coquille par gravité 14
I.2.7.1.1. Principe 14
I.2.6.1.2. Avantages du procédé 14
I.2.6.1.3. Inconvénients du procédé 14
I.3.6.2. Moulage en coquille sous pression 14
I.2.6.2.1. Principe 14
I.2.6.2.2. Avantages du procédé 14
I.2.6.2.3. Inconvénients du procédé 14
I.3. Le remplissage 16
I.4.Les défauts de moulage (fonderie) 16
I.5.Conclusion 19

Chapitre II FORMULATION MATHEMATIQUE

II.1. Introduction 20
II.1. Modélisation de l'écoulement des fluides 20
II.1.1. Equation de continuité 20
II.1.2. Equation de quantité de mouvement 20
II.1.3. Equation de conservation d'énergie 21
II.2. Modélisation thermique 22
II.2.1-Différentes modes de transfert de chaleur 22
II.2.1.1. Transfert de chaleur par conduction 23
II.2.1.1.1. Cas des gaz 23
II.2.1.1.2. Cas des liquides 23
II.2.1.1.3. Cas des solides 23
II.2.1.1.4. Loi de Fourier 23
II.2.1.2- Transfert de chaleur par convection 24
a) La convection naturelle 25
b) La convection forcée 25

II.2.2.3- transfert de chaleur par rayonnement 27
II.3. Les conditions aux limites 27
II.3.1. Condition de Dirichlet 27
II.3.2. Condition de Robin-Fourier 27
II.4. Modèle de turbulence k-ε 27
II.4.1. Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente k 28
II.4.2. Equation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ε 28
II.5. La méthode volume-of-fluide (VOF) 29
II.5.1. Calculs équilibrés et transitoires de la méthode VOF 29
II.5.2. Equation de la fraction volumique 30
II.5. CONCLUSION 30

Chapitre III METHODE DE DISCRETISATION

III.1. INTRODUCTION 31
III.2. Méthodes de discrétisation 31
III.2.1 Méthode des différences finies 32
III.2.2. Méthode des volumes finis 33
III.2.3 Méthode des éléments finis 33
III.4. Calcul d'interfaces 34
III.4.1. Maillage 34
III.4.1.1 les méthodes lagrangiennes 35
III.4.1.2. Les méthodes eulérienne 35
III.4.1.2.1. Les méthodes de suivi de front 36
III.4.1.2.2. Les méthodes de suivi de volume 36
III.5. Simulation numérique en fonderie 37
III.5.1. Mise en œuvre numérique 38
III.5.1.1. Définition de la géométrie 39
III.5.1.2. Définition des matériaux et des paramètres du procédé 39
III.5.1.3. Maillage de la géométrie 40

III.5.1.4. Calculs 42
III.5.1.5. Visualisation et analyse des résultats 42
III.6. Conclusion 42

Chapitre IV Résultat et interprétation

IV. 1. Introduction 45
IV.2. Identification et validation de la simulation numérique 45
IV.2.1.1. Les conditions initiales 46
VI.2.1.2 Les conditions Limitant 46
VI.2.3. Influence du champ magnétique 47
VI.2.3.1. L'emplacement des capteurs pour l'analyse 47
VI.2.4. Application par un champ magnétique 48
VI.2.4.1 Champ de pression 48
VI.3. Comparaison entre la première et la deuxième expérience 52
VI.4. Conclusion 53
Conclusion générale 54

Liste des tables

Tab. I.1 : des procédés de moulage en dépendent du métal à couler 03
Tab .I.2 : Présentation des différents défauts de moulage 18
Tab. IV.1 : Propriétés d'alliage de Fer 46

Listes des figures

Figure (I.1) : présenter le moulage en sable 05

Figure (I.2) : Plaque modèle double 06

Figure (I.3) : Plaque – modèle réversible 06

Figure (I.4) : Plaque double face 05

Figure (I.5) : Moulage par pression 05

Figure (I.6) : Serrage par secousses 08

Figure (I.7) : Système de projection 08

Figure (I.8) : Système d'aide au démontage 09

Figure (I.9) : moulage en carapace 10

Figure (I.10) : moulage en carapace 10

Figure (I. 11): des moules à joints verticaux 11

Figure (I.12) : Moulage en coquille sous pression 15

Figure (II.1) : Différent mode de transfert thermique 22

Figure (II.2) conduction thermique 24

Figure (II.3) : Conductivité thermique 25

Figure (II.4) : transfert thermique par rayonnement 26

Figure (III.1) : méthode de discrétisations 32

Figure (III.2) : Présentation des méthodes de calcul d'interface 34

Figure (III.3) : Maillage carré 35

Figure (III.4) : Différentes méthodes de suivi de front 36

Figure (III.5) : Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque 37

Figure (III.6) : Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret 37

Figure (III.7) : Définition de la géométrie 40

Figure (III.8) : Définition des propriétés des matériaux 40

Figure(III.9) : Maillage de la géométrie 41

Figure(III.10): Phase du Calcul 42

Figure(IV.1) Le moule multi-empreinte utilisé pour la validation 45

Figure(IV.2) : (a) Champs de fraction volumique de résultats de simulation Thierry BARRIERE, Boasheng LIU, Jean-Claude GELIN. (b) nos résultats de simulation par EF\VOF 45

Figure(VI.3): la géométrie du moule 47

Figure (IV.4) : Maillage du Domaine de calcul 47

Figure (VI.5): L'emplacement des capteurs choisis à une section du moule 47

Figure(IV.6) : Volume de fraction pendant le remplissage du moule 48

Figure(VI.7): Représentation spatiale de champ de pression dans le domaine de calcul 48

Figure (VI.8) : La variation de pression dans le temps pour les différents capteurs 49

Figure (VI.9) : Représentation spatiale du champ de température dans le domaine de calcul 49

Figure(IV.10) : Variation température dans le temps pour de différent position 50

Figure (VI.11) : Volume de fraction pendant le remplissage du moule en fonction de temps de remplissage 50

Figure(VI.12) : Représentation spatiale de champ de pression dans le domaine de calcul 51

Figure(IV.13) : Variation Pression dans le temps pour de différent position 51

Figure (VI.14) : Représentation spatiale de champ de température dans le domaine de calcul 51

Figure (VI.15): Variation température dans le temps pour de différent position 52

Figure (VI.16) : Représentations spatiales de suivi de coulé pour les cas avec force magnétique 53

Figure(IV.1) Le moule multi-empreinte utilisé pour la validation 45

Figure(IV.2) : (a) Champs de fraction volumique de résultats de simulation 45

Thierry BARRIERE, Boasheng LIU, Jean-Claude GELIN. (b) nos résultats de simulation par EF\VOF
Figure(VI.3): la géométrie du moule 47
Figure (IV.4) : Maillage du Domaine de calcul 47
Figure (VI.5): L'emplacement des capteurs choisis à une section du moule 47

Nomenclature

Notation	Signification	Unité
Cp	chaleur spécifique	[J.Kg^{-1}.K^{-1}]
p	pression	[Pa]
T	Température	[K]
T	variable du temps	[s]
τ_{xx}, τ_{yy}, τ_{zz}	contraintes visqueuses normales	[N.m^{-2}]
$\tau_{yz,xy,}\tau_{zx}$	contraintes visqueuses tangentielles	[N.m^{-2}]
u	vitesse suivant x	[m.s^{-1}]
v	vitesse suivant y	[m.s^{-1}]
w	vitesse suivant z	[m.s^{-1}]
x, y, z	coordonnées cartésiennes	
ρ	masse volumique	[Kg.m^{-3}]
ρ_0	masse volumique de référence	[Kg.m-^{3}]

μ	viscosité dynamique	[Kg. $m^{-1}.s^{-1}$]
dQ	Énergie élémentaire	[J]
λ	Conductivité thermique du matériau	[$W.m^{-1}.K^{-1}$]
A	section	[m^2]
dt	temps élémentaire	[s]
$\frac{dT}{dx}$	Gradient de température en x	[$K.m^{-1}$]
$\boldsymbol{\sigma}$	constante de Stephan Boltzmann	[$W.m^{-2}.K^{-4}$]
A	surface d'échange	[m^2]
$\boldsymbol{\varepsilon}$	coefficient d'émission de la surface	
Ts	température de surface du corps	[K]
Ta	température ambiante	[K]
$\emptyset$	La dissipation irréversible due au frottement visqueux	
$\boldsymbol{\varphi}$	La densité de flux thermique	[w/m^2]
$\boldsymbol{\nu}$	La viscosité cinématique	[m^2/s^2]
h	La constante de Plank	[Js^{-1}]
E	Energie	[J]

Abréviation

2D	Deux Dimensions
EDP	Equations aux Dérivées Partielles
EF	Elément Finis
VF	Volume Finis
MDF	Méthode des Différences Finis
VOF	Volume Of Fluid (volume de fluide)
MAC	Marker And Cells (méthode de marqueur de volume)
TVD	Total Variation Diminishing

Introduction Générale

La fonderie est l'un des procédés de formage 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) en limitant autant que possible les travaux ultérieurs de finition. Les techniques employées dépendent de l'alliage fondu, des dimensions, des caractéristiques et des quantités de pièces à produire. Sous le terme "**Fonderie**", on englobe généralement l'ensemble des techniques de mise en œuvre pour obtention d'un objet par coulée d'un métal en fusion dans une empreinte appelée "**moule**" qui peut être en sable ou métallique.

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

Les défauts de fonderie sont classés selon leurs aspects et leurs formes d'apparition. Chaque défaut peut entraîner une diminution de la qualité, c'est l'étendu du défaut et la destination d'utilisation de la pièce qui décident, si cette dernière est considérée comme 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.)

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

La présente étude concerne la modélisation numérique des procédés de remplissage de moulage. Quelques travaux ont proposé des méthodes basées……, les limites de cette approche se sentent lors des divisions ou fusions des fronts d'écoulement. Actuellement,

les méthodes de modélisation développées sont basées sur une approche de type éléments finis couplé à des volumes de contrôle. dans le cas particulier des géométries simples. Lorsque la solution analytique est trop complexe, ou les approximations excessives, la résolution numérique permet de trouver une solution approchée.

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

Ce mémoire est composé sur quatre chapitres :

- Le premier chapitre représente des généralités sur le moulage, il contient les techniques et les différents types de moulage, on représente les défauts liés 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 choix de la méthode et la discrétisation du modèle mathématique.
- Le quatrième chapitre est consacré à la résolution, validation et la discutions des résultats numériques obtenus.
- Et finalement terminer le travail par une conclusion générale et recommandation.



Chapitre 1

Etude Bibliographies

I.1. Introduction :

Le terme de la fonderie Obtention d'une pièce métallique par coulée d'un alliage en fusion (liquide) dans un moule. Les métaux utilisés en fonderie doivent être fluides à la température de fusion afin de pouvoir remplir convenablement les moules. Pour cela, pendant le processus d'élaboration d'une pièce, il faut prendre en considération deux propriétés essentielles à savoir (Coulabilité et Retrait). 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. [1]

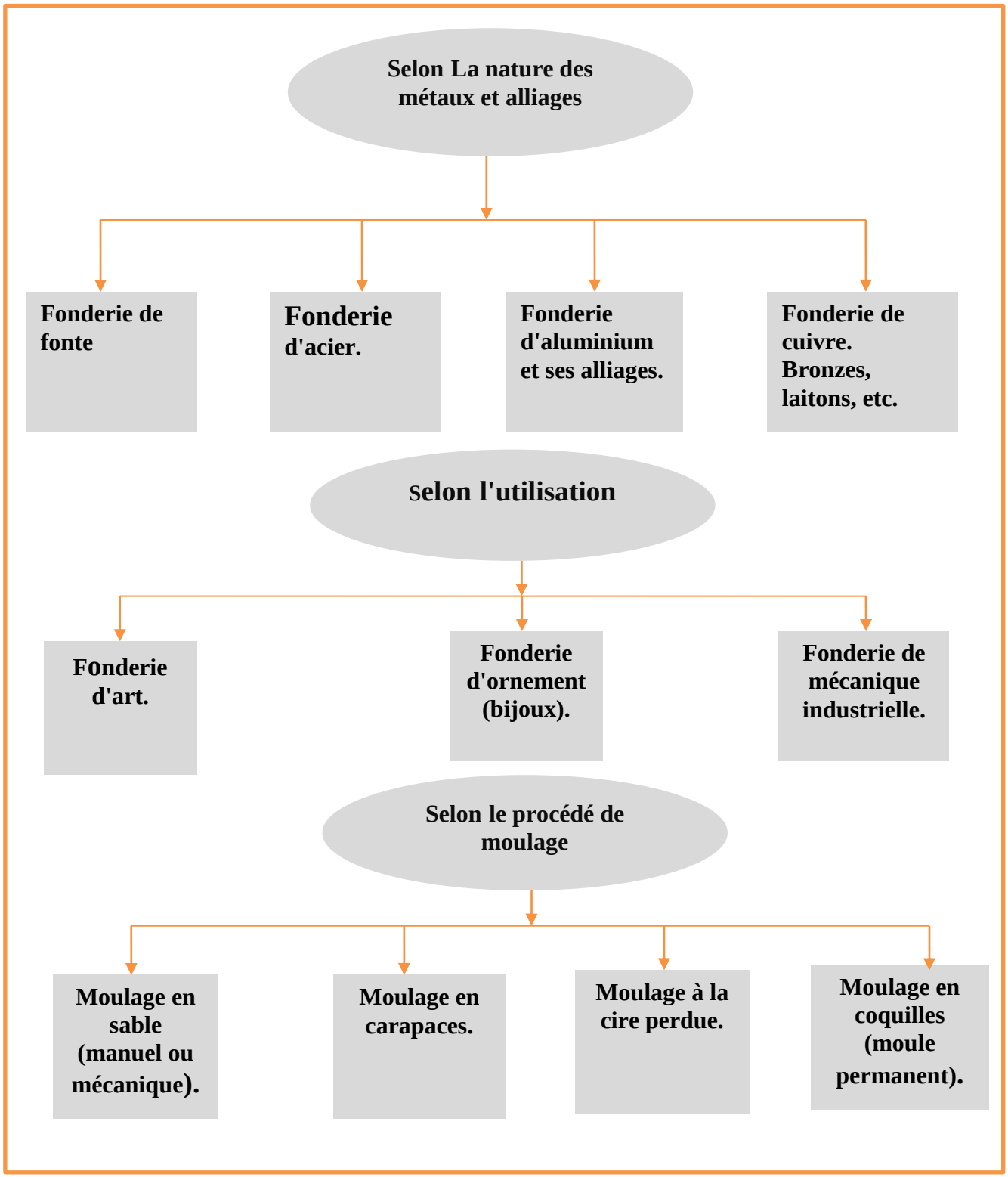
I.2.Le Moulage :

C'est l'action de prendre une empreinte qui servira ensuite de moule dans lequel sera placé un matériau et qui permettra le tirage ou la production en plusieurs exemplaires d'un modèle. Le moulage consiste donc à placer un matériau (liquide, pâte, poudre, feuille, plaque, paraison, préforme, pastille, etc.) dans un moule dont il prendra la forme. C'est aussi réussi demande beaucoup de réflexion et de goût. Avant toute opération, il faut étudier minutieusement les formes, en sentir les moindres détails. Avec un peu d'expérience, cette observation attentive du modèle alliée à un peu de pratique permet de déterminer le choix de la technique, et des produits à utiliser.

C'est principalement le travail du modeleur, qui d'après la pièce à réaliser, détermine les modèles à réaliser, les empreintes dans les moules, les noyaux ; le tout en tenant compte des impératifs de démoulage, de retrait de la matière. Le modeleur est celui qui dessine les outillages au bureau d'études, mais aussi celui qui réalise les modèles à l'atelier d'outillage. [2]

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

Organigramme les procédés de la fonderie



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

❖ Le moule non permanent :

N’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.

❖ Le moule permanent :

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. [3]

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).**

Tableau (I. 1): des procédés de moulage en dépend du métal à couler.

Comme il a été susmentionné, le moulage est généralement très économique, mais les caractéristiques d'un alliage coulé sont plus faibles 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. [3]

I.2.1. Moulage en sable :

I.2.1.1. Principe :

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

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

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

Ce noyau est donc fabriqué de la même manière que chacune des parties du moule en tassant du sable dans un modèle en deux parties ayant les formes de la pièce. [4]

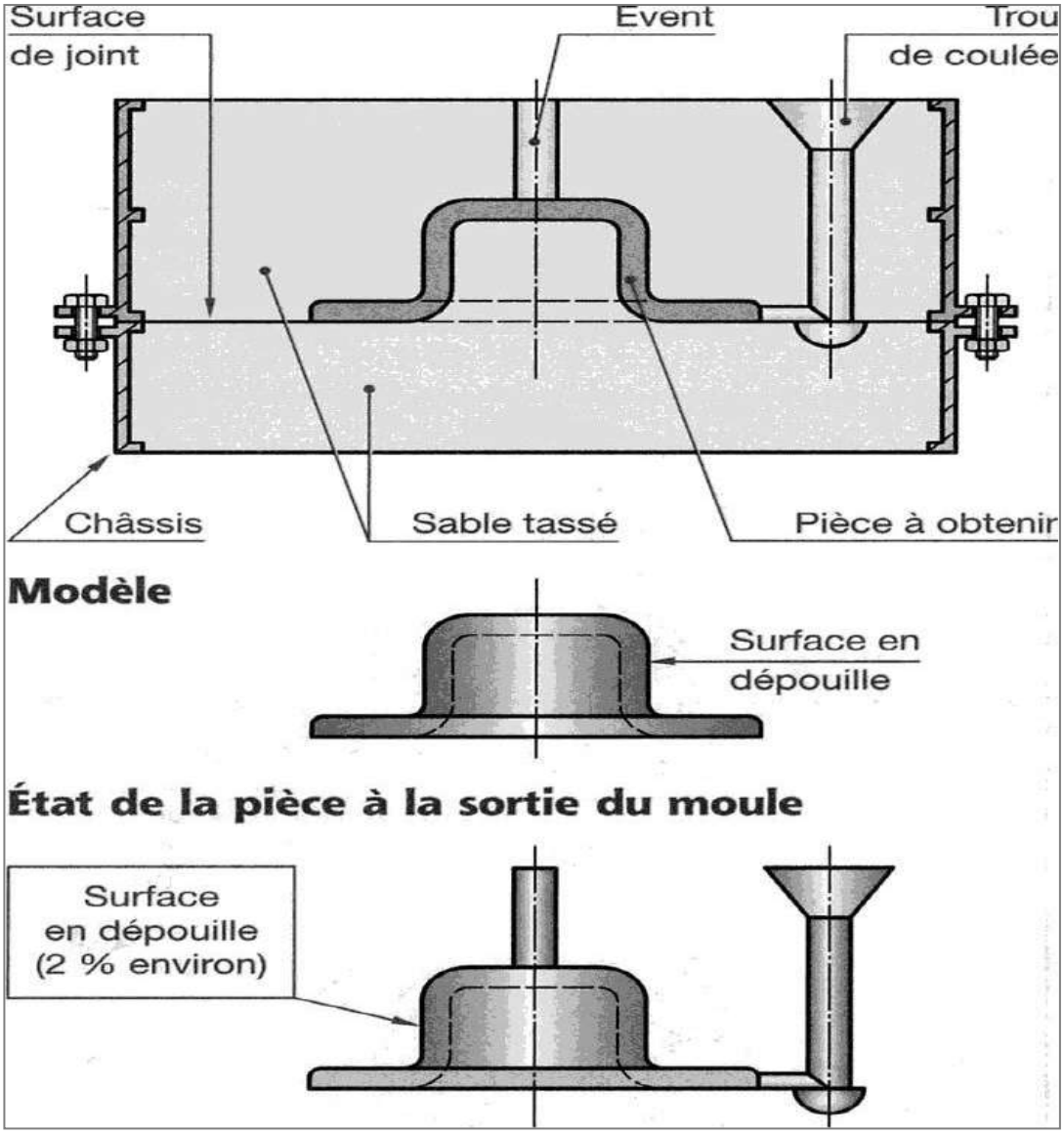


Figure (I.1) : présenté le moulage en sable

I.2.1.2 Avantages du procédé :

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

I.2.1.3 Inconvénients du procédé :

- ✓ Surfaces obtenues peu précises (± 0,5 mm) Nécessite un usinage des surfaces fonctionnelles
- ✓ Procédé peu rentable pour les grandes séries. [4]

I.2.2. Moulage mécanique

Afin de pouvoir effectuer le moulage mécaniquement, de nombreux types de machines ont été créés pour réaliser le serrage et le démoulage. Le modèle est collé à une plaque matérialisant la surface de joint du moule, l'ensemble constitue une plaque modèle, qui peut être en bois, en plâtre ou métallique. Deux plaques modèles sont généralement nécessaires pour exécuter un moule (figure 02)

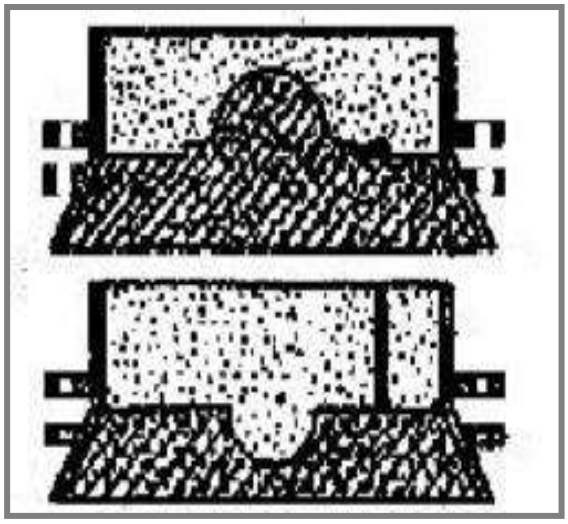


Figure (I.2) : Plaque modèle double [5]

Dans certains cas, pour le moulage de petites pièces sans noyaux, une seule suffit, on dit que la plaque est réversible (figure 03).

02 Plaques identiques

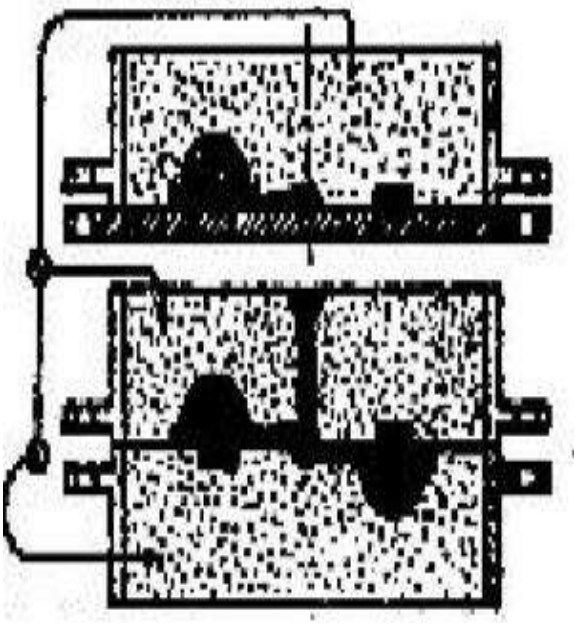
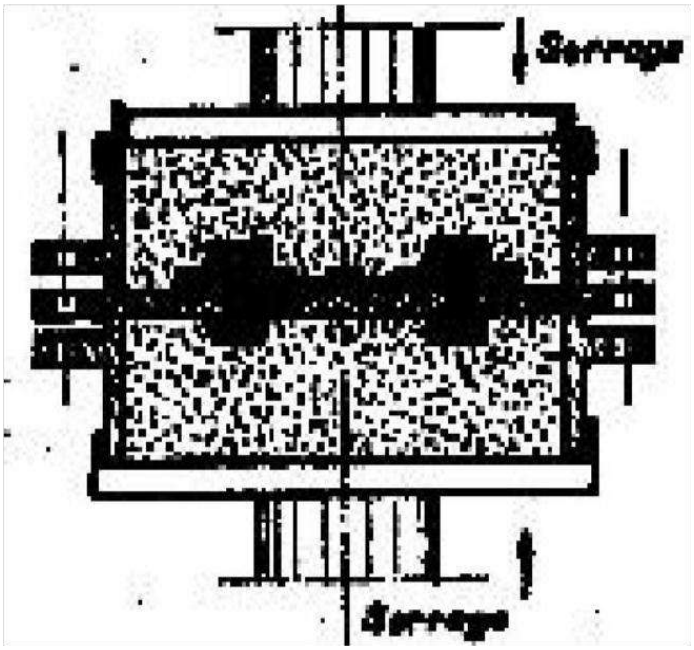


Figure (I.3) : Plaque – modèle réversible [5]

Où bien, double face pour les pièces plates (figure 04).

Serrage



Serrage

Figure (I.4) : Plaque double face [5]

La plaque modèle étant fixée sur la table de la machine, le châssis pourvu d'une rehausse est rempli de sable dont le serrage est assuré par l'un des moyens suivants :

I.2.2.1. Par pression : descente d'un piston ou montée de la table (figure05) ;

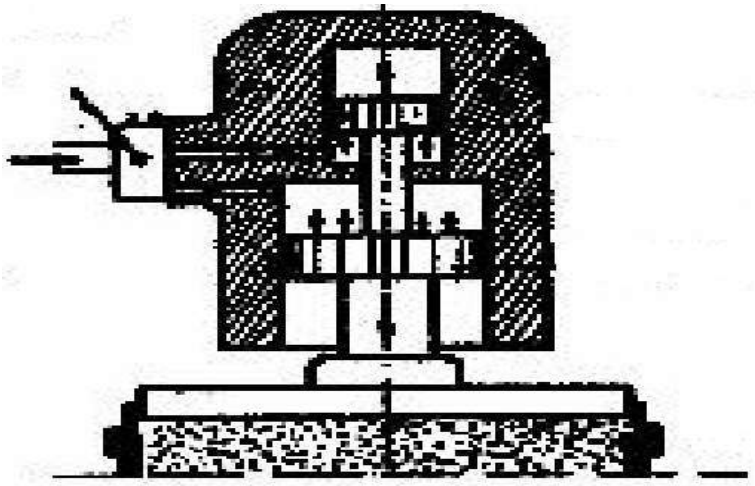


Figure (I.5) : Moulage par pression [5]

I.2.2.2. Par secousses : la table soulevée retombe brusquement, le sable est tassé par inertie (figure 06)

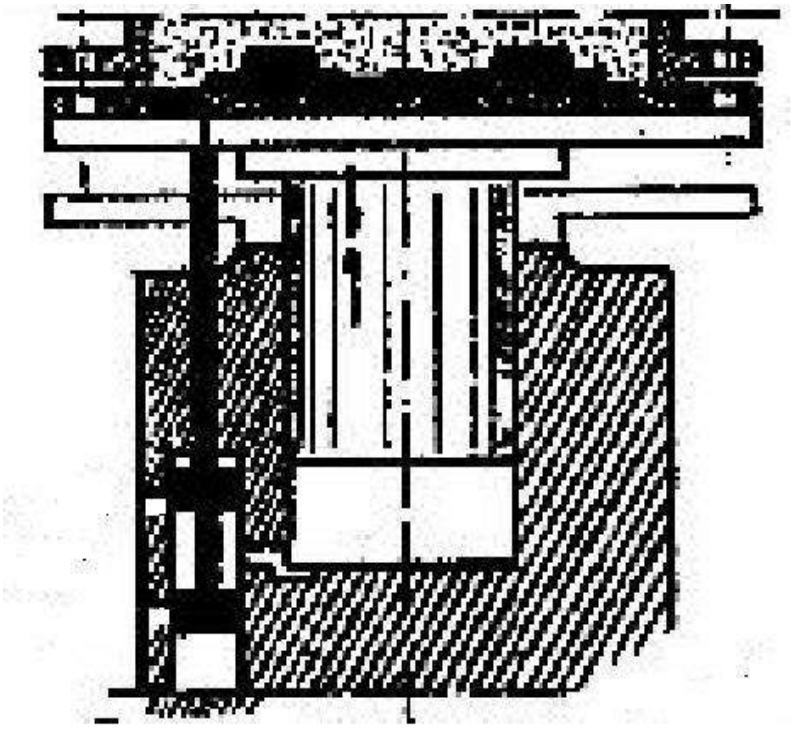


Figure (I.6) : Serrage par secousses [5]

I.2.2.3. Par projection : le sable est projeté violemment dans le châssis par une palette tournant à grande vitesse (figure 07)

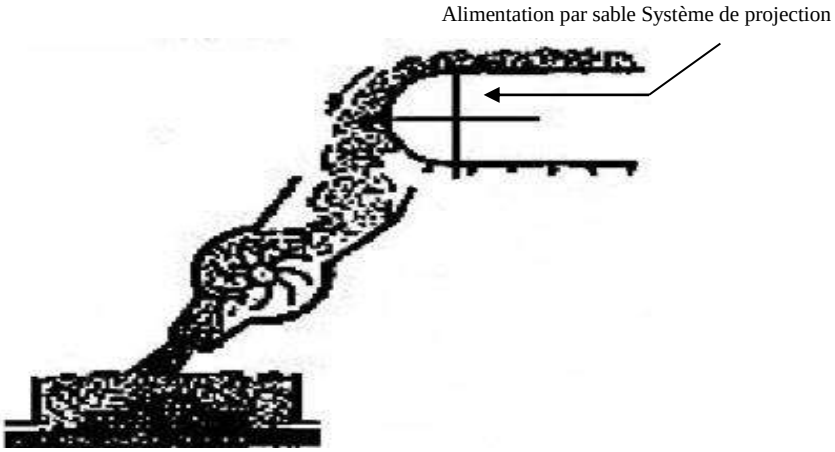


Figure (I.7) : Système de projection [5]

I.2.2.4. Par secousses et par pression :

Ce mode de serrage très régulier est le plus employé en fonderie moderne. Les différentes machines utilisent comme agent moteur la force humaine, l'eau sous pression et surtout l'air comprimé. Le démoulage est obtenu par soulèvement du châssis à l'aide d'un piston de démoulage (figure 07).

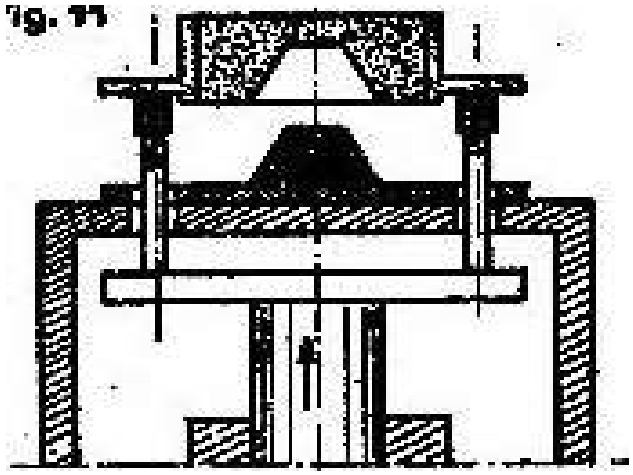


Figure (I.8) : Système d'aide au démontage [5]

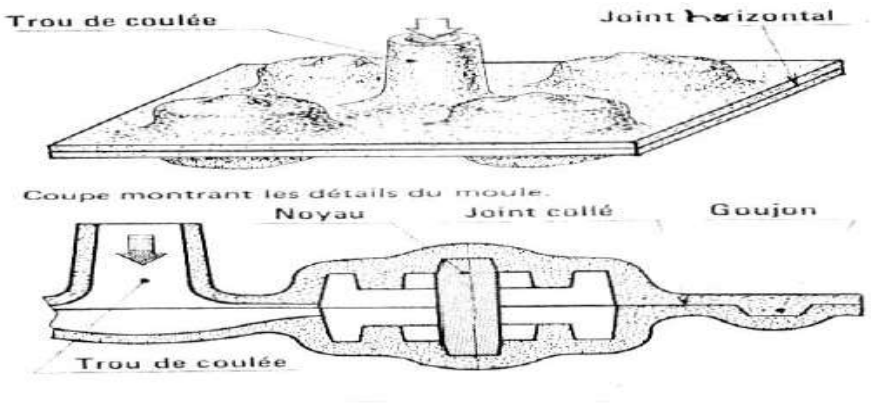
I.2.3. Moulage en carapace (procédé croning) :

Le moulage en carapace est comme le moulage mécanique en sable et dont il a un aspect particulier. Le métal liquide est coulé dans un moule constitué de deux coquilles appelées carapaces ou masques.

I.2.3.1. Principe du procédé du moulage en carapace :

1. Préparation du sable de moulage (séchage. Additions).

2. Chauffage de la plaque modèle (réversible) jusqu'à 200 à 300°C après pulvérisation d'une émulsion destinée à empêcher le collage ultérieur du masque. Le chauffage de la plaque est effectué par un dispositif incorporé à la machine et dont la puissance de chauffage est réglable.



Figure(I.9): moulage en carapace

3. Verser sur la plaque-modèle chauffée, un mélange de grains de silice (sable) et de résine thermodurcissable (indéformable à la chaleur après solidification). C'est ce mélange de sable qui est en contact de la plaque modèle chaude qui formera ainsi en 15 secondes une carapace solide d'épaisseur uniforme d'environ 5 mm et qui constitue le moule.

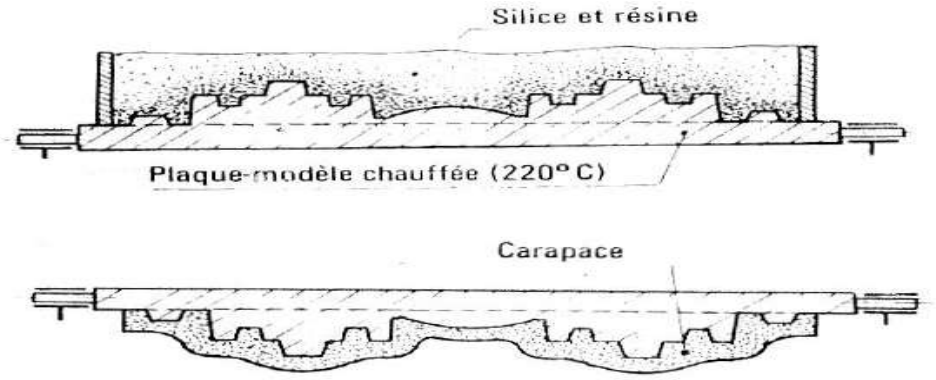


Figure (I. 10): moulage en carapace

4. L'ensemble caisson et plaque modèle est retourné (basculé) pour laisser tomber le mélange de sable et de résine qui n'a pas adhéré à la plaque modèle.

5. La plaque modèle et la carapace sont ensuite placées dans une étuve pendant 1 à 2 minutes à la température de 350°C. La carapace devient alors très dure et rigide. La surface intérieure en contact avec la plaque modèle est parfaitement lisse, ce qui va donner à la pièce moulée un très bon état de surface.

6. La deuxième partie est préparée identiquement mais la plaque modèle est munie de mandrin de coulée facilement adaptable et démontable.

7. Les carapaces ainsi formées sont assemblées, éventuellement avec des noyaux collés. Les trous d'évent ne sont pas indispensables. Les carapaces étant perméables. Après l'assemblage, le moule est alors prêt pour la coulée.

8. Les pièces moulées sont décochées facilement en brisant les carapaces et le sable de moulage est régénéré ensuite (réutiliser).

Les moules à joints verticaux sont placées dans un châssis et calés avec du sable ou de la grenaille de fonte. [3]

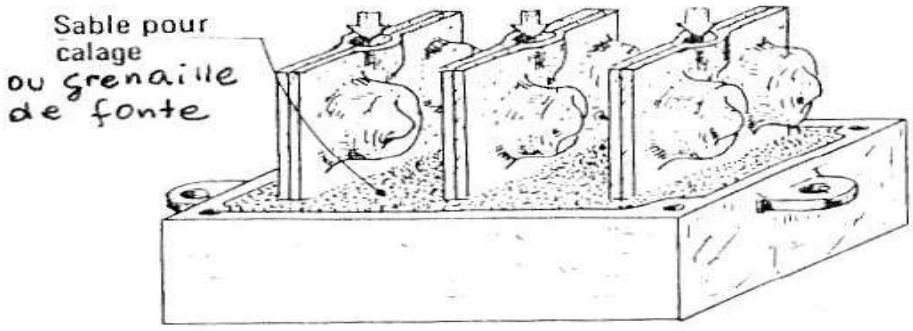


Figure (I.11): des moules à joints verticaux.

Lors de la coulée, la résine brûle en contact avec le métal en fusion en provoquant une excellente porosité. Ce procédé s'applique à tous les métaux et permet d'obtenir des pièces brutes avec des tolérances dimensionnelles et de formes beaucoup plus faibles qu'avec le moulage en sable traditionnel. Les frais d'usinage sont alors diminués. Le coût de fabrication élevé de la plaque modèle et le prix non négligeable de la résine fait que ce procédé n'est utilisé que pour mouler des pièces petites ou moyennes en grande série. [3]

I.2.4. Moulage en moules métalliques :

Dans les procédés de moulage au sable étudiés précédemment, les moules et les noyaux doivent être refaits après chaque coulée, ce qui pose de nombreux problèmes et nécessite des installations importantes pour la production des moules neufs et de nombreuses manutentions. On s'est efforcé de réaliser des moules ou des éléments de moules capables de supporter plusieurs coulées successives, appelés moules permanents ou coquilles.

I.2.4.1. Caractéristiques générales :

- Rigidité de l'empreinte
- Grande précision dimensionnelle
- Excellent état de surface des éléments moulants
- Conductivité thermique élevée des empreintes qui donnent aux pièces moulées
- Un meilleur état de surface
- Des caractéristiques mécaniques plus élevées de l'alliage coulé, conséquence d'une vitesse de refroidissement et de solidification plus élevée, donnant un grain plus fin et une matière

plus compacte ; mais des contraintes résiduelles à l'état brut peuvent nécessiter un traitement thermique de détente des pièces surtout pour les métaux ferreux

- Une plus grande précision des dimensions des pièces avec la possibilité de faire venir, bruts de fonderie, des trous de fixation et de permettre une réduction appréciable des surépaisseurs d'usinage

II faut noter que, pour certaines fabrications, le noyautage au sable reste obligatoire. [3]

I.2.5 : Moulage à la cire perdue :

Les différents procédés de moulage étudiés précédemment partent tous du principe suivant : le moule est en deux ou plusieurs parties afin de pouvoir en sortir le modèle ou donner l'empreinte voulue à chacune des parties. L'expérience montre qu'un tel moule, même si les différentes parties sont assemblées avec beaucoup de soins, ne permet pas d'atteindre une grande précision.

De l'a l'idée de faire un moule en une seule pièce pour obtenir un moulage très précis. Le moulage à la cire perdue est un moulage de précision dont le but est de supprimer tout ou en partie l'usinage s'il y a lieu.

La précision maximum pratiquement obtenue est de l'ordre de ± 0.07mm est couramment de 0.3% en valeur relative.

Ce mode de moulage est connu depuis la plus haute antiquité. Les chinois et les grecs l'utilisent pour la fonderie d'objet d'art, il s'est conservé à peu près intégralement pour la fonderie artistique et s'est perfectionné de nos jours pour la coulée de bijouterie et la fabrication de prothèses dentaires en or ou en acier inoxydable exigeant une grande précision. Il est enfin étendu à la production de petites pièces mécaniques à partir de tous les alliages. [3]

I.2.5.1. Principe du procédé :

Le moule est construit autour d'un modèle en cire, lequel ensuite est éliminé par fusion pour libérer l'empreinte formée. L'obligation de détruire le modèle enfermé, impose de fabriquer, non seulement un moule par pièce, mais un modèle par moule. Il faut donc fabriquer en série des modèles fusibles.

La gamme de fabrication d'une pièce par ce procédé est la suivante :

I.2.5.2. Créer un modèle inerte :

Généralement en bronze ou en laiton usiné avec une grande précision et parfaitement polis. Ses dimensions sont déterminées en tenant compte de retraits de la cire, du métal coulé

et de la dilatation du revêtement réfractaire du moule.

I.2. 5.3. Confectionner une coquille :

A l'aide du modèle inerte ou confectionner une coquille démontable reproduisant rigoureusement le modèle inerte

I.2.5.4. Injecter la cire :

Sous pression dans la coquille pour obtenir successivement autant de modèles fusibles qu'on le désire. Aujourd'hui on remplace de plus en plus la cire par une résine thermoplastique telle que le polystyrène qui commence à fondre vers 150 -200°C et brûle à 450°C et n'est pas récupéré.

Les grappes de modèle sont obtenues directement par injection de polystyrène dans des moules métalliques portant les empreintes.

I.2.5.5. Trempe et enveloppement du modèle :

S'effectue par projection d'une très fine couche (quelque dixième de mm) d'un enduit réfractaire très fin (silice et liant) ensuite séchage à l'air.

I.2.5.6. Fusion du modèle perdu :

Élimination du modèle par chauffage à une température de 200°C.

I.2.5.7. Confection du moule et coulée du métal

I.2.5.7.1. Applications

Tous les métaux ferreux et non ferreux peuvent être moulés par ce procédé. On peut classer les applications d'après la nature des alliages :

- ✓ Alliages réfractaires ou inoxydables.
- ✓ Alliages impossible ou difficile à forger et à usiner.
- ✓ Alliages faciles à usiner mais dont l'usinage ultérieur serait trop complexe.

Les pièces fabriquées ont un poids variant de quelques grammes à quelques kilogrammes.

Des épaisseurs de l'ordre du demi-millimètre peuvent être obtenues.

Ce procédé permet d'obtenir le moulage de pièces de formes très compliquées irréalisables par les autres procédés de moulage.

Il permet aussi la fabrication d'outils en acier rapide ou en alliages spéciaux à coupe ultra rapide à leur forme définitive et utilisable sans autre usinage que l'affûtage. [3]

I.7. Moulage en coquille :

Une coquille est un moule métallique usiné, en fonte ou en acier, les pièces obtenues par ce procédé ont donc des dimensions précises et un bel aspect de surface ; les propriétés

mécaniques sont bonnes par suite de la structure fine due au refroidissement rapide du métal [6]. Le moulage en coquille se fait pour les grandes séries mais pour des pièces de petites et moyennes dimensions ; où l'on distingue deux techniques :

I.2.7.1. Moulage en coquille par gravité :

I.2.7.1.1. Principe

Le matériau est coulé dans un moule métallique. Le principe est donc le même que pour le moulage en sable, mais on utilise le même moule pour toute une série de pièces.

On peut également pour les formes intérieures utiliser un noyau en sable.

I.2.6.1.2. Avantages du procédé :

- Procédé plus rentable pour les moyennes et grandes séries.
- Précision meilleure que pour le moulage en sable (±0,3 mm). Cependant cela nécessite quand même un usinage des surfaces fonctionnelles de la pièce.

I.2.6.1.3. Inconvénients du procédé :

- Réservé aux matériaux dont le point de fusion est inférieur à 900°C (alliages de cuivre d'aluminium ou de zinc, etc. …)
- Le prix du moule exclu ce procédé pour les petites séries

I.3.6.2. Moulage en coquille sous pression :

I.2.6.2.1. Principe :

Le matériau est coulé ou fondu dans un cylindre puis un piston assure le transfert (injection) du matériau sous pression de ce cylindre vers l'empreinte du moule.

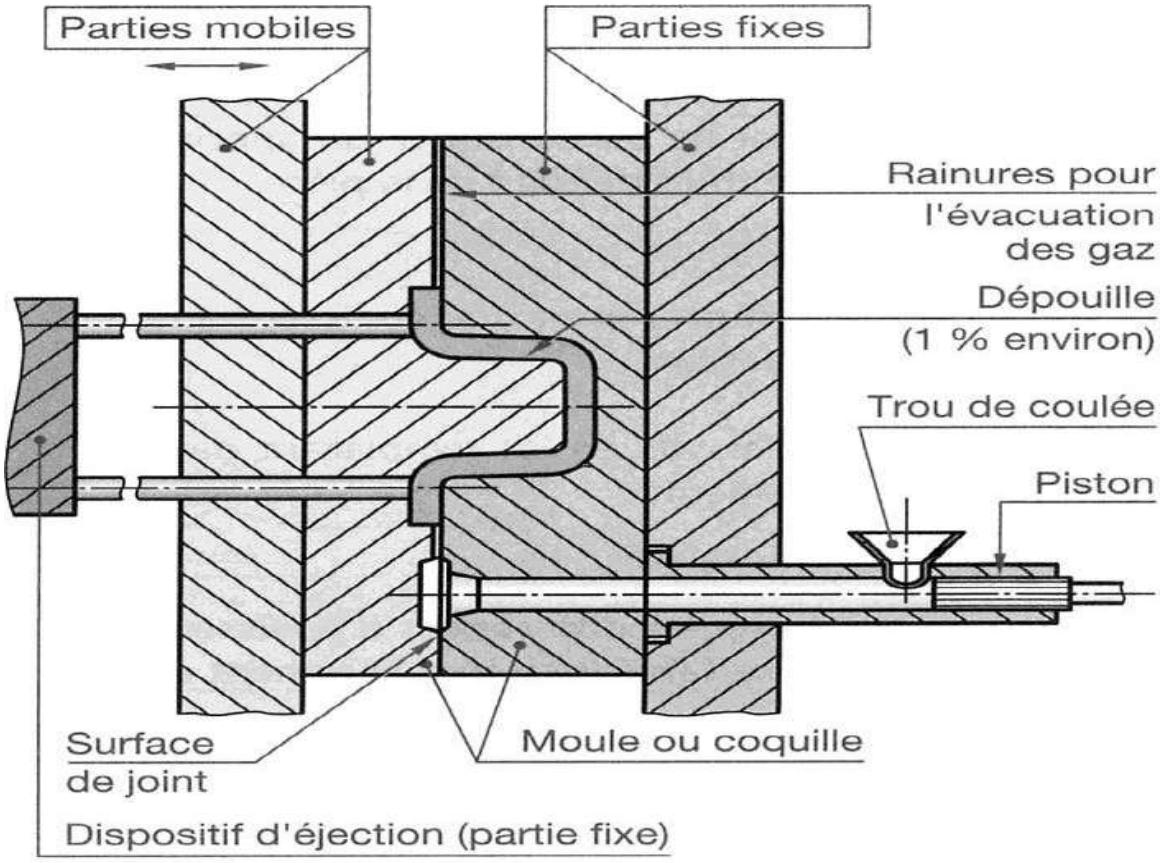
Lorsque le matériau est un polymère la matière est fondue dans un cylindre et injectée par un piston appartenant à la machine d'injection.

I.2.6.2.2. Avantages du procédé :

- Permet le moulage de matériaux très peu fluides donc permet le moulage des polymères.
- Permet le moulage de pièces de faible épaisseur.
- Bonne précision des surfaces obtenues (± 0,1 mm pour les métaux à ± 0,05 mm pour les polymères). Donc cela peut permettre d'éviter certains usinages.

I.2.6.2.3. Inconvénients du procédé :

- Le prix très élevé du moule oblige à réserver ce procédé pour les grandes séries de pièces.
- Il est impossible d'utiliser des noyaux en sable pour la réalisation de formes intérieures.



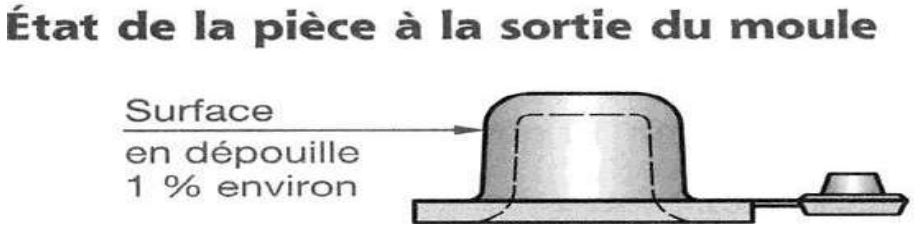


Figure (I. 12) : Moulage en coquille sous pression

I.3. Le remplissage :

Le remplissage des moules par métal permet d'obtenir les formes les plus complexes (pleines ou creuses). On obtient alors, sans joints mécanique ni soudures, des pièces de tailles très variées, allant de moins d'un gramme jusqu'à plusieurs centaines de tonnes. La façon de couler n'est pas indifférent et cette opération demande un véritable tour de main, pour assures la continuité du remplissage et le débit de la coulée. L'engorgement de la coulée permet d'éviter l'entraînement d'air, ce qui provoquerait des soufflures dans la pièce et d'autres défauts de moulage.

I.4.Les défauts de moulage (fonderie) :

Les anomalies sont le fait d'une appréciation insuffisante des éléments de base du moulage au niveau :

- ✓ de la conception du modèle en général.
- ✓ de la définition des systèmes de remplissage et d'alimentation.
- ✓ du choix de la technique de moulage.
- ✓ des opérations de parachèvement et de traitement thermique (déformations).
- ✓ de l'alliage, par sa mise en œuvre et son comportement à la fusion et au moulage. [7]

Les problèmes d'anomalie sont très complexes, et il n'est pas toujours aisé de déterminer l'origine des défectuosités d'une façon précise. Plusieurs facteurs différents pouvant se superposer par interaction.

Pour qu'une altération de la qualité ait des conséquences limitées, il est indispensable d'effectuer un dépistage en utilisant, entre autres, les moyens suivants:

a) examen visuel, avec ou non l'aide d'auxiliaires (loupe, endoscope, etc.)

b) examen des structures.

c) test de ressuage.

d) contrôles non destructifs : ultrasons et RX.

e) mesure de la densité.

f) test de sonorité.

Et le tableau suivant représente les différents types de défaut de moulage

Les défauts		Description du défaut	Causes principales
PIECES IMCOMPLETES	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.
	Moule vidé		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.
FORMES		la partie intérieure de la pièce est déportée par rapport à la partie extérieur.	excès de jeu dans les portées de noyaux ou les guidages de broches, mauvais remmoulage par défaut de repérage.
Retassures	Macroretassures	Cavités de dimensions souvent importantes situées en général dans les parties hautes des pièces ou dans les parties massives	ontraction 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,
	Microretassures	Nombreuses petites cavités affectant des parties limitées d'une pièce et situées en général dans des zones	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

		éloignées des masselottes, ou mal refroidies	**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);**

Tableau 02 : présentation des différents défauts de moulage. [4]

I.5.Conclusion :

Dans ce chapitre on a Présenté une généralité sur le procédé de remplissage des moules (le moulage). Ainsi que quelques types de défauts liés au remplissage des moules des pièces métalliques brutes. Aussi nous avons traité les défauts rencontrés le plus souvent en moulage comme solidification.

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.

Pour cela, et en raison du coût élevé de l'expérience nous proposons une simulation numérique base sur la méthode des (EF/VOF) de remplissage de moules d'alliage Cu-5%Zn pour analyser ces défauts et donc d'éviter certains types dus à de trop fortes turbulences.

Dans cet objectif nous proposant une série d'expériences numériques pour évaluer l'effet de l'ajout de plusieurs points de dégazage ; sur le comportement de remplissage de l'empreinte. Pour ce faire nous consacrant le chapitre suivant à l'étude des modèles mathématique qui régissent les problèmes physiques ; thermique et dynamique de remplissage des moules.

Chapitre 2

Formulation Mathématique

II.1. Introduction :

Dans ce chapitre on s'intéresse aux notions fondamentales de transfert de chaleur et l'écoulement turbulent de fluide newtonien incompressible en régime variable. Ce chapitre a pour but de présenter les principales équations régissant le problème couplés (dynamique et thermique) où les lois de base seront établies.

II.1. Modélisation de l'écoulement des fluides :

Le mouvement de l'écoulement d'un fluide est modélise par les équations de Navier-Stokes qui permet de traiter les fluides classiques comme l'air, l'eau, l'huile ou aussi les métaux fondus. [8]

II.1.1. Equation de continuité :

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

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

(II.1)

Ou dans une notation plus compacte

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

(II.2)

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

$$\mathbf{div u}=0$$

(II.3)

II.1.2. Equation de quantité de mouvement :

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

Suivant OX :

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

(II.4)

Suivant OY :

$$(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial t}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z})=-\frac{\partial P}{\partial x}+(\frac{\partial \tau xy}{\partial x}+\frac{\partial \tau yy}{\partial y}+\frac{\partial \tau zy}{\partial z})+(\rho+\rho_0)g_y$$

(II.5)

Suivant OZ :

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

(II.6)

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

$$\mu=\tau_{xy}=\mu[\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}]$$

(II.7)

$$\tau_{yz}=\tau_{zy}=\mu[\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial x}]$$

(II.8)

$$\tau_{xx}=\tau_{zx}=\mu[\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial x}]$$

(II.9)

$$\tau_{xx}=\mu[2\frac{\partial u}{\partial x}];\tau_{yy}=\mu[2\frac{\partial v}{\partial y}];\tau_{zz}=\mu[2\frac{\partial w}{\partial z}]$$

(II.10)

II.1.3. Equation de conservation d'énergie :

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

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

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

Avec :

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

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

div ($\boldsymbol{\lambda}$ gradT) : La variation d'énergie par conduction

$\emptyset$: La dissipation irréversible due au frottement visqueux. [8]

II.2. Modélisation thermique :

Le transfert d'énergie se produit chaque fois qu'un gradient de température existe à l'intérieur d'un système, ou lorsque deux systèmes de températures différentes sont mis en contact. Le processus par lequel le transfert de l'énergie s'effectue est désigné parle terme générale de ' transmission de la chaleur' la grandeur transférée appelée chaleur, ne peut être ni mesurée ni observée directement, mais ses effets donnent lieu à des observations et des mesures. L'écoulement de la chaleur comme la production de travail phénomène qui implique la variation de l'énergie interne.

II.2.1-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.
- La convection.
- Le rayonnement.

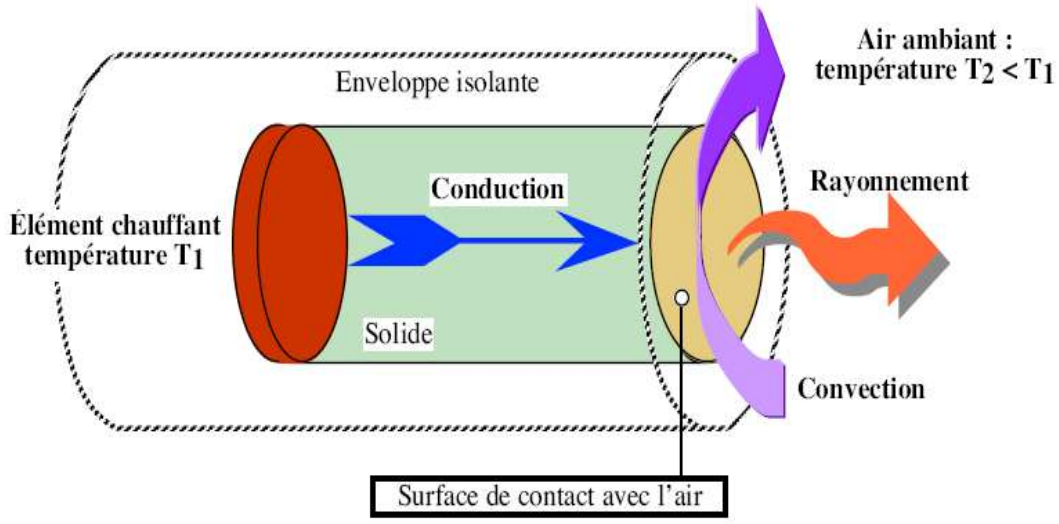


Figure (II.1) : Différent mode de transfert thermique

II.2.1.1. 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.2.1.1.1. 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 ou **brownienne,** d'un mouvement de vibration et de rotation interne. L'ensemble de ces mouvements forme le phénomène d'agitation thermique, auquel 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.2.1.1.2. 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.2.1.1.3. 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.2.1.1.4. 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 le (figure01), 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]

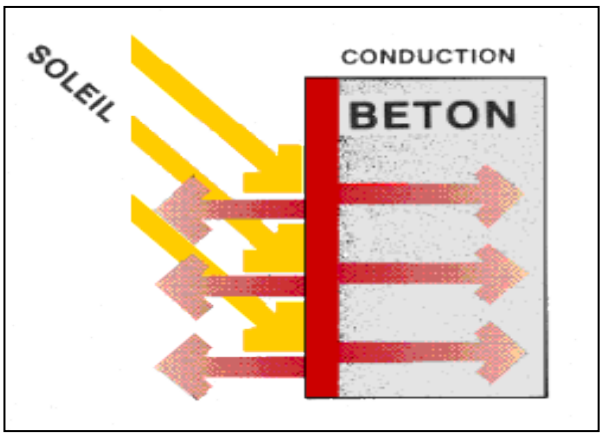


Figure (II.2) : Conduction thermique.[4]

En régime permanent, la loi de Fourier exprime la quantité de chaleur élémentaire dQ qui

traverse en x une surface S d'épaisseur dxdurant le temps dt

$$\mathbf{dQ = -\lambda A \frac{dT}{dx} dt}$$

(II.13)

- 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.2.1.2- Transfert de chaleur par convection :

Ce mode d'échange de chaleur existe au sein des milieux fluides ou lorsque un fluide circule autour d'un solide.

L'étude du transfert de chaleur par convection permet de déterminer les échanges de chaleur se produisant entre un fluide et une paroi.

La quantité de chaleur échangée par unité de temps dépend de plusieurs paramètres :

- La différence de température entre la paroi et le fluide ;
- La vitesse du fluide ;
- La capacité thermique massique du fluide ;
- La surface d'échange ;
- L'état de surface du solide ;
- Sa dimension etc.…

Selon la mécanique qui génère le mouvement du fluide, on distingue :

- La convection naturelle
- La convection forcée

a) La convection naturelle :

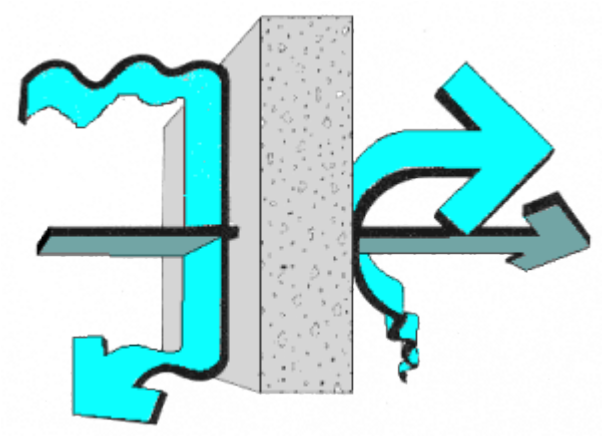
Le fluide est mis en mouvement sous le seul effet :

- ✓ Des déférences de masses volumiques résultant des différences de températures sur frontières ;
- ✓ D'un champ de forces extérieures.

b) La convection forcée :

Le mouvement du fluide est induit par une cause indépendante des différences de

température (pompe, ventilateur…) [4]



Figure(II.3) : Convection thermique.

II.2.2.3- 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 γ tel que $h\gamma = dE$ 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 $\gamma = c/\lambda = 3.10^{14}$ Hz et possède une énergie de $dE = h\gamma = 1.9810^{-19}$ 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.

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. [10]

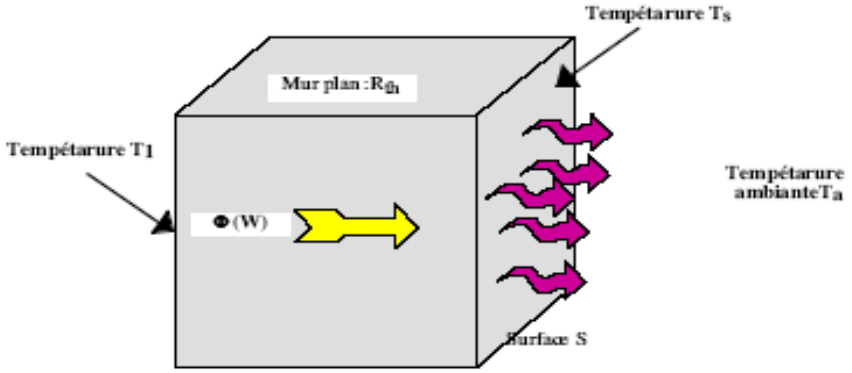


Figure (II.4): transfert thermique par rayonnement

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

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

(II.14)

- $\boldsymbol{\sigma}$: constante de Stephan Boltzmann 5.67 10^{-8}W.m^{-2}.K^{-4}
- **A** : surface d'échange (m^2)
- $\boldsymbol{\varepsilon}$: coefficient d'émission de la surface (ε = 1 pour un corps noir, ε <<1 corps brillant)
- **Ts** : température de surface du corps
- **Ta** : température ambiante.

II.3. 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 plusieurs types de conditions :

II.5.1. Condition de Dirichlet :

Qui fixent la température T_S à la surface des corps (ou sur une partie de la surface) à

Chaque instant :

$$\mathbf{T_S = T\ (x_S.y_S\ .z_S)} \qquad \mathbf{(II.15)}$$

II.3.1. 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 son 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) :

$$\boldsymbol{\varphi = h\,(T_c - T_e)}$$

(II.16)

Où h est un facteur de proportionnalité appelé coefficient de transfert thermique, [10]

II.4. Modèle de turbulence k-ε :

Il existe différents modèles de turbulence, qui se distingue par un nombre d'équation de transport supplémentaires nécessaires pour fermer le système d'équations du problème à résoudre. Dans notre cas, on a utilisé le modèle k-ε standard qui est un modèle semiempirique basé sur le concept de Boussinesq reliant les contraintes de Reynolds au taux de déformation moyen :[11]

$$-\boldsymbol{\rho}\overline{u_i'}\overline{\boldsymbol{\rho}u_j'} = \mu_t\left[\frac{\partial Ui}{\partial x_j}+\frac{\partial Uj}{\partial i}\right]-\frac{2}{3}\delta_{ij}\boldsymbol{\rho}k$$

(II.17)

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

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

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

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

$$\boldsymbol{\nu_t = C_\mu\sqrt{K}\,\frac{k^{3/2}}{\varepsilon} = C_\mu\frac{k^2}{\varepsilon}}$$

(II.18)

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

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

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

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i}}_{1}\underbrace{(\rho K U_i)}_{2}=\underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu+\frac{\mu t}{\sigma k})\frac{\partial k}{\partial x}]}_{3}+\underbrace{G_K+\rho\varepsilon}_{4} \quad \textbf{(II.19)}$$

1 : terme convectif

2 : terme diffusif

3 : taux de production

4 : taux de dissipation

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

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon U_i)=\frac{\partial}{\partial x_j}[(\mu+\frac{\mu t}{\sigma\varepsilon})\frac{\partial\varepsilon}{\partial x}]+C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k}-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}$$

(II.20)

Le terme de production G_k est donnée par :

$$\overline{G_k}=-\rho\overline{U_iU_j}=\rho\upsilon_t(\frac{\partial\overline{Ui}}{\partial x_j}+\frac{\partial\overline{Uj}}{\partial x_i})\frac{\partial Ui}{\partial x_j} \quad \textbf{(II.21)}$$

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

La méthode VOF est une méthode qui a été introduite par Hirt & Coll. en 1981 qui s'utilise pour la simulation d'écoulements entre plusieurs phases non miscibles. Il s'agit d'une méthode Eulérienne à 1 fluide, et elle est particulièrement adaptée dans le cas d'écoulements à interfaces fortement déformées, puisqu'elle permet de suivre la position de l'interface dans un maillage fixe. [4]

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

mouvements de surface libre. [12]

$$\frac{\partial F}{\partial T} + \mathbf{u}.\nabla \mathbf{F} = 0 \quad \mathbf{En}\ \Omega \qquad \textbf{(II.22)}$$

F : représente le facteur de remplissage,

U : désigne vecteur vitesse,

t : représente le temps et Q.

Ω : est le domaine de calcul.

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

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

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

Avec :

$$\frac{\partial \Omega_k}{\partial \Omega_{maill}} = C_k \qquad \textbf{(II.23)}$$

$\partial\Omega_{maill}$ **:** représente le volume total de la maille de calcul et Ω_k le volume de la partie de la maille occupée par la phase. Basé sur la valeur locale du, les propriétés et les variables

appropriées seront assignés à chaque volume de contrôle dans le domaine.

II.5.2. Equation de la fraction volumique :

Le cheminement de l'interface (s) entre les phases est accompli par la solution d'une équation de continuité pour la fraction volumique d'une (ou plus) des phases. Pour La K^{ieme} phase, cette équation a la forme suivante :

$$\frac{1}{\rho k}\left[\frac{\partial}{\partial t}(C_k \rho_k) + \nabla.(C_k \rho_k \vec{V}_k) = S_{ck} + \sum_{p=1}^{n}(\dot{m}_{pk} - \dot{m}_{kp})\right] \quad \textbf{(II.24)}$$

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

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

$$\sum_{k=1}^{n} Ck = 1$$

(II.25)

II.5. CONCLUSION :

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

Chapitre 3

Les Méthodes Discrétisation

III.1. INTRODUCTION :

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

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

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

III.2. Méthodes de discrétisation :

La discrétisation se fait en suivant des trois méthodes :

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

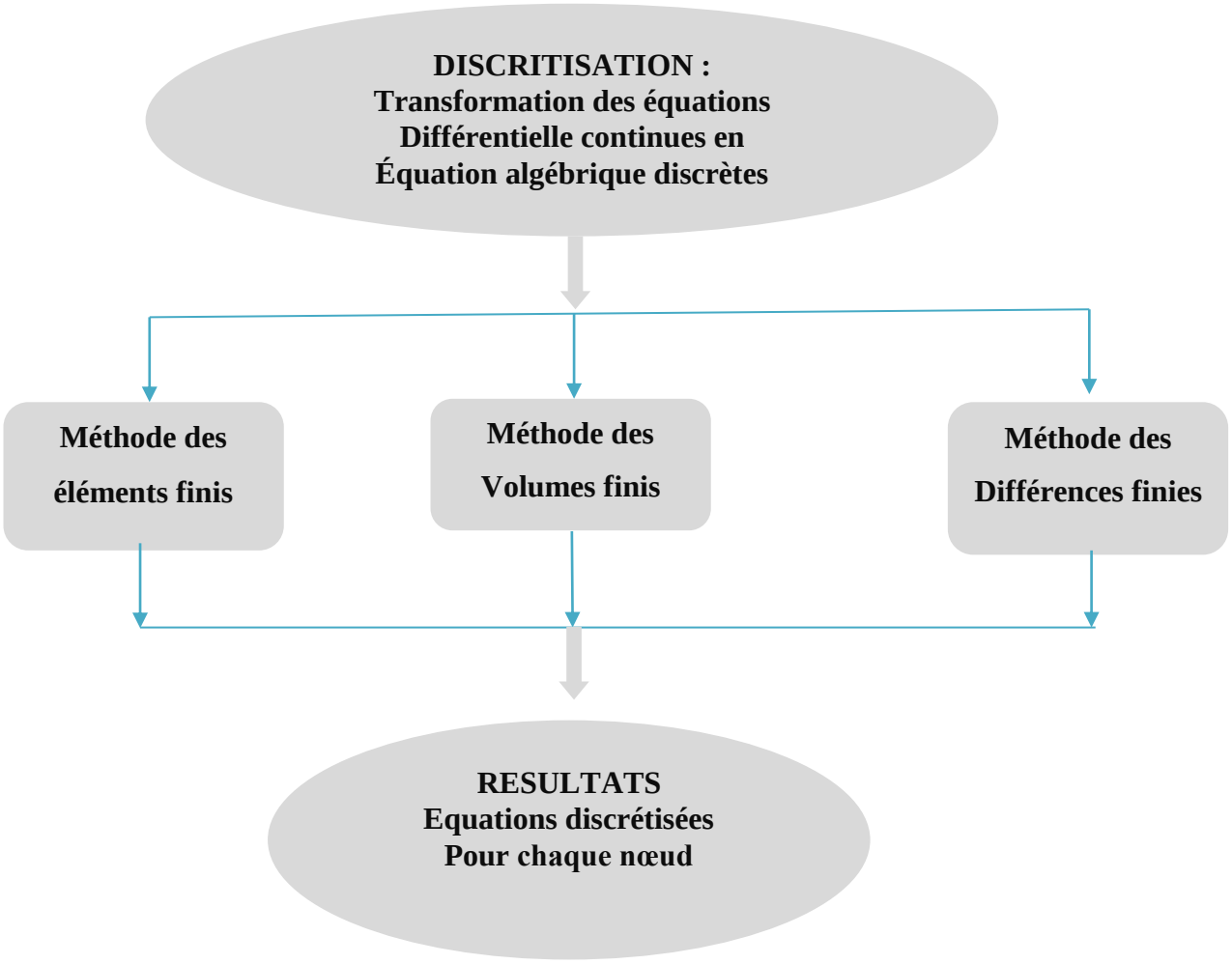


Figure (III.1) : méthode de discrétisations [13]

III.2.1 Méthode des différences finies :

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

❖ Avantage :

- ✓ Grande simplicité d'écriture.
- ✓ Faible coût de calcul.

Inconvénients :

- ✓ Limitation de la géométrie des domaines de calculs.
- ✓ Difficultés de prise en compte des conditions aux limites portant sur les dérivées ou les gradients de l'inconnue.
- ✓ En général absence de résultats de majoration d'erreurs. [4]

III.2.2. Méthode des volumes finis :

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

Sa mise en œuvre est simple si les volumes élémentaires sont des rectangles (ou des Parallélépipèdes rectangles en dimension 3). [4]

❖ Avantage :

- ✓ Préservation du caractère conservatif des équations sur chaque volume de contrôle (continuité des flux aux interfaces), valable pour n'importe quelle finesse du maillage ;
- ✓ Mise en œuvre relativement facile ;
- ✓ Applicable aux géométries complexes ;
- ✓ Temps de calcul et stockage mémoire raisonnable (matrice de type bande) [4]

❖ Inconvénients :

- ✓ Moins précis que les méthodes spectrales.
- ✓ On dispose de peu de résultats théoriques de convergence. [4]

III.2.3 Méthode des éléments finis :

La méthode des éléments finis consiste à approcher, dans un sous-espace de dimension finie, un problème écrit sous forme variationnelle (comme rninimisation de l'énergie, en général) dans un espace de dimension infinie. La solution approchée est dans ce cas une fonction déterminée par un nombre fini de paramètres comme, par exemple, ses valeurs en certains points (les nœuds du maillage). [4]

❖ Avantages :

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

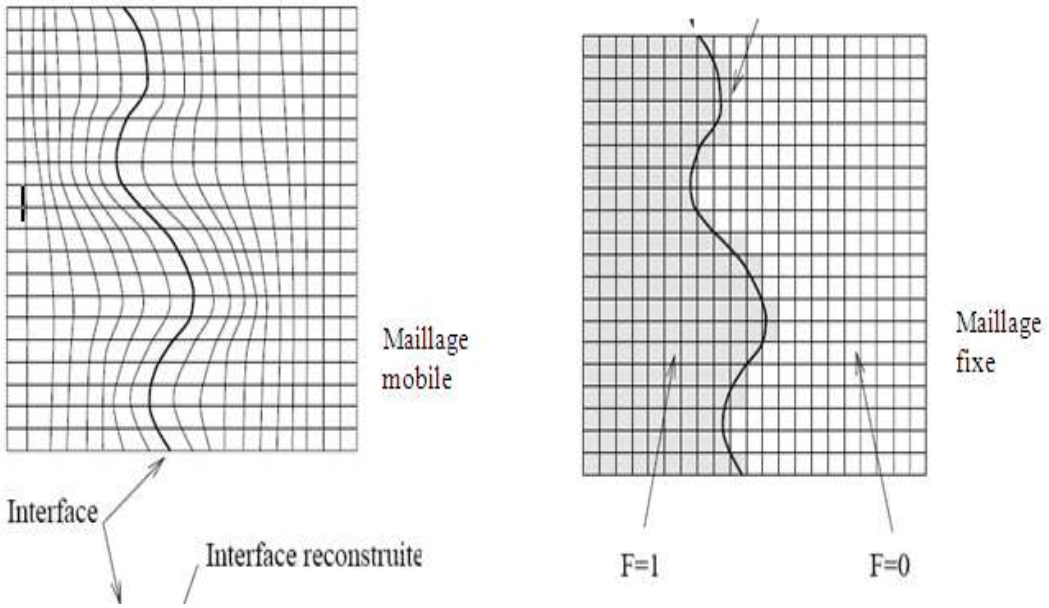
❖ Inconvénients :

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

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

III.4. Calcul d'interfaces :

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



a) méthode Lagrangienne **b) méthode Eulérienne [15]**

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

III.4.1. Maillage :

Le maillage est la première étape de la méthode des éléments finis. C'est une étape fondamentale qui conditionne tout le reste du calcul : le temps de calcul et les ressources nécessaires (mémoire vive, mémoire virtuelle, temps processeur), la précision des résultats,

la stabilité du modèle (possibilité de divergence dans le cas de calculs non-linéaires). L'objet de cette opération c'est de procéder à une simplification d'un système par un modèle représentant ce système et, éventuellement, son environnement (le milieu), dans l'optique de simulations de calculs ou de représentations graphiques (figure III.3). [14]

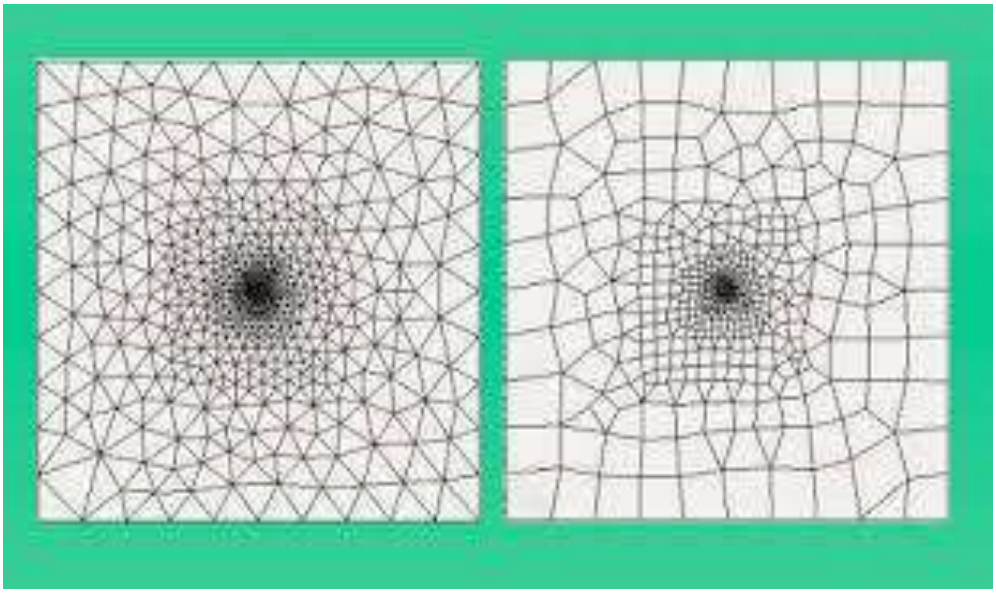


Figure (III.3) : Maillage carré [4]

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

III.4.1.1 les méthodes lagrangiennes :

Les méthodes lagrangiennes, sur maillage mobile permettent de représenter l'interface comme une réelle discontinuité et de suivre son évolution de manière très précise. Le transport de l'interface s'effectue soit en déformant le maillage au cours du calcule soit en régénérant le maillage après avoir advecté l'interface. Le principal avantage de cette méthode est de suivi très précis de l'interface qui permet d'imposer très facilement et avec rigueur les conditions aux limites de l'interface. Ces méthodes sont limitées aux écoulements ou l'interface ne subit pas de grandes déformations, car cela conduit a des maillages trop déformés. [14]

III.4.1.2. Les méthodes eulérienne :

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

eulériennes peut être classées en deux catégories :

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

III.4.1.2.1. Les méthodes de suivi de front :

Il existe différente méthode pour marquer l'interface :

a) Marqueurs de surface

b) Fonction de hauteur

c) Méthode de ligne de niveau (lève set)

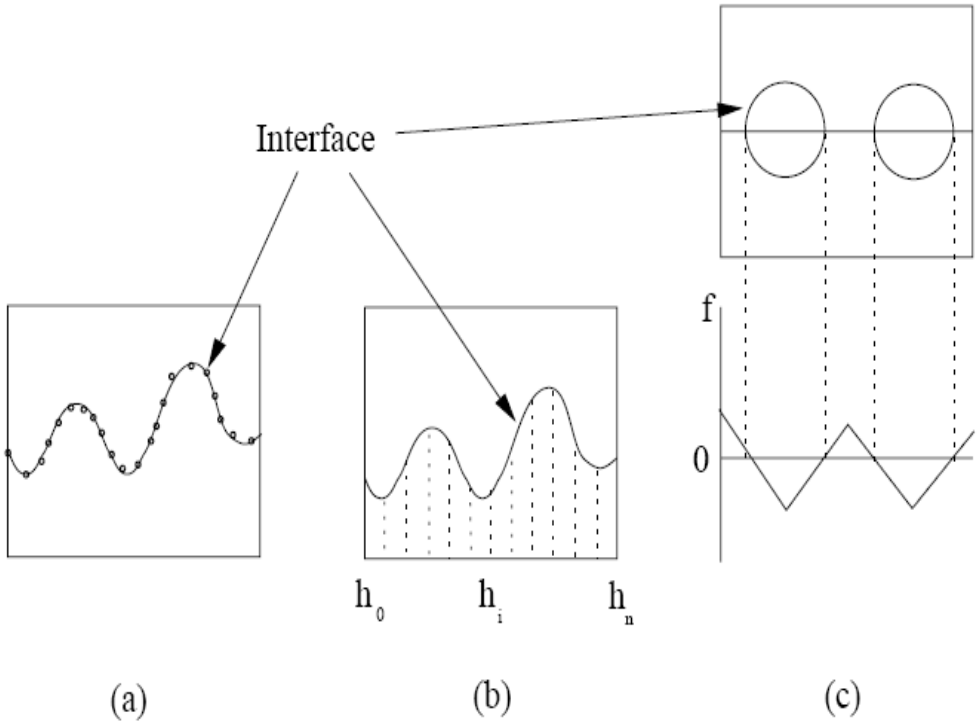


Figure (III.4) : Différentes méthodes de suivi de front, [15]

III.4.1.2.2. Les méthodes de suivi de volume :

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

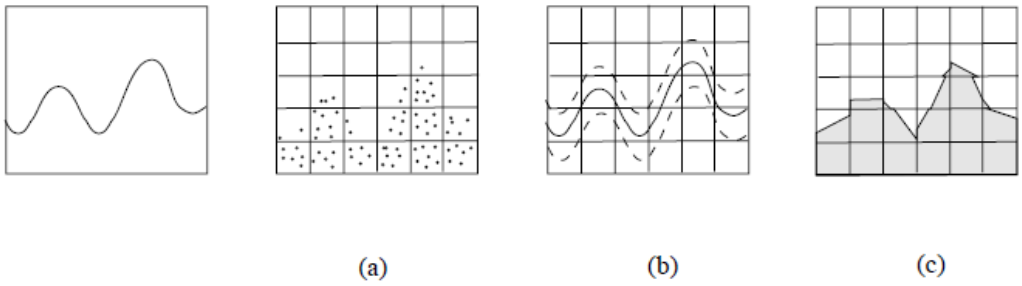


Figure (III.5) : Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque :

(a) Méthode MAC

(b) schéma TVD

(c) Méthode VOF

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

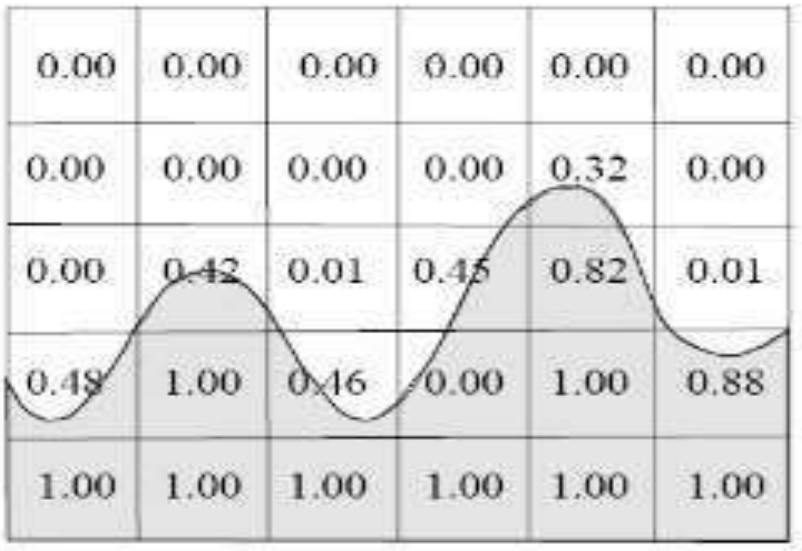


Figure (III.6) : Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret. [16]

III.5. Simulation numérique en fonderie :

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

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

La simulation numérique consiste à résoudre ces équations sur un ou plusieurs sous domaines (pièces, moule, noyaux,) en appliquant des conditions initiales et des conditions au limites. Dans le cas particulier des géométries simples, une solution analytique peut être trouvée en simplifiant le modèle. Les approximations effectuées doivent être en concordance avec la réalité. Lorsque la solution analytique est trop complexe, ou les approximations excessives, la résolution numérique permet de trouver une solution approchée. [17]

III.5.1. Mise en œuvre numérique :

A l'heure actuelle, il existe un certain nombre de codes industriels conviviaux, aux meilleurs performants, permettant la prédiction d'écoulement fluides par la résolution des équations de Navier-Stokes grâce aux méthodes des volumes finis, des différences finies ou des éléments finis (ANSYS, FLUENT, CFX-F3D, PHOENICS, STAR-CD, TRIO…). Pour notre travail, nous avons eu recours au code ANSYS, [18]

Le programme ANSYS a été dans l'utilisation commerciale depuis 1970 et a été utilisé intensivement dans l'espace, véhicules à moteur, la construction, le service électronique, d'énergie, la fabrication, nucléaire, les plastiques, le pétrole, et les industries en acier. En outre, beaucoup de sociétés de consultation et centaines d'universités utilisent ANSYS pour l'analyse, recherche, et l'utilisation éducative, ANSYS est identifiée dans le monde entier pendant qu'un des programmes le plus extensivement utilisés et capables de son type. [18]

La mise en œuvre d'une simulation de fonderie se fait en plusieurs phases : définition de la géométrie, maillage, définition des matériaux et des paramètres du procédé, calculs, Visualisation et analyses des résultats. [18]

III.5.1.1. Définition de la géométrie :

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

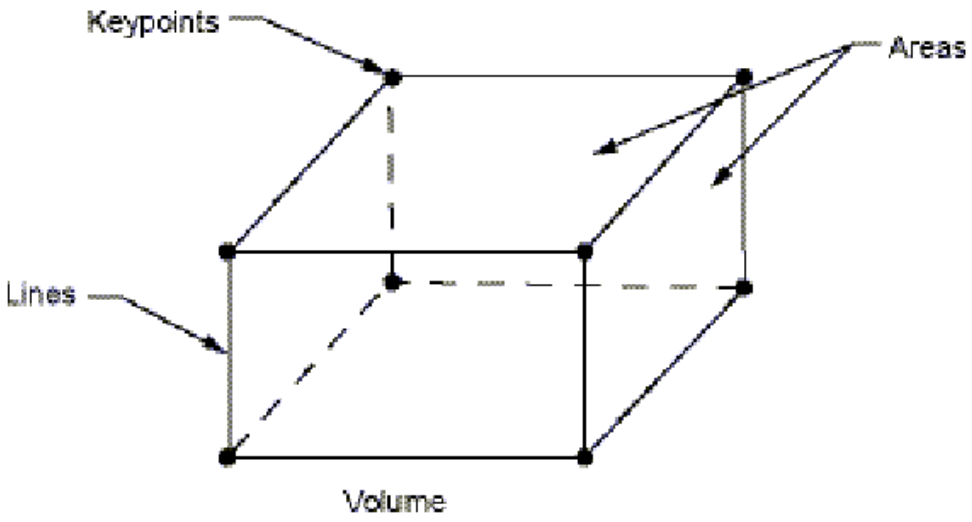


Figure (III.7) : Définition de la géométrie

Les points qui définissent les sommets de modèle s'appellent les keypoints et sont les entités de modèle plein de " bas-ordre ". Si, en établissant notre modèle plein, vous créez d'abord nos keypoints, et employons ensuite ces keypoints pour définir les entités " évoluées " de modèle plein (c'est-à-dire, lignes, secteurs, et volumes), vous seraient constituant votre modèle " du fond." Des modèles établis du fond vers le haut sont définis dans le système du même rang actuellement actif. [18]

III.5.1.2. Définition des matériaux et des paramètres du procédé :

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

Pour définie les propriétés matérielles :

Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models

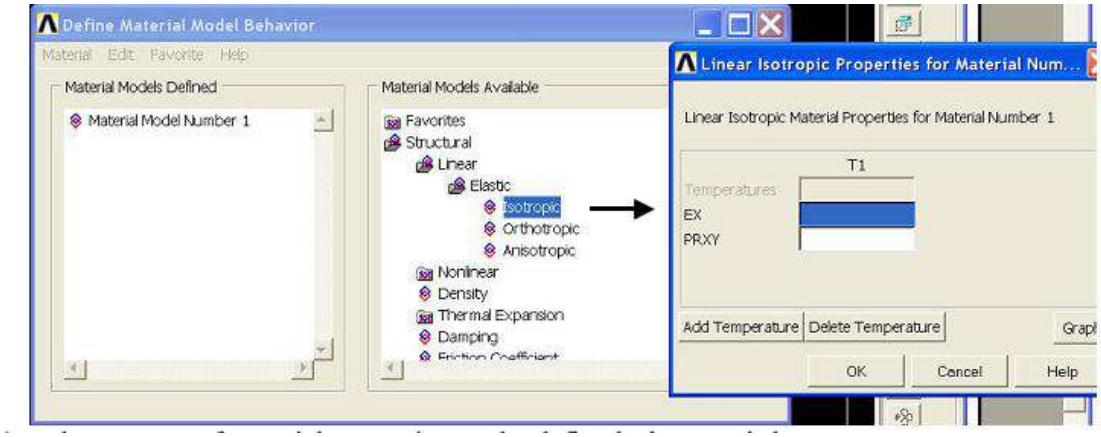


Figure (III.8) : Définition des propriétés des matériaux

Les conditions aux limites d'échanges thermiques entre le moule et le milieu environnant, les circuits de refroidissement, les tirages d'air doivent aussi être renseignées. Il est possible d'utiliser des modèles simplifiés sur ANSYS pour déterminer l'influence qualitative et quantitative de chaque milieu extérieur sur la thermique du moule. Ce calcul préliminaire peut être utile pour simplifier la géométrie et éliminer des paramètres qui n'ont pas d'importance compte tenu de la précision attendue. [18]

III.5.1.3. Maillage de la géométrie :

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

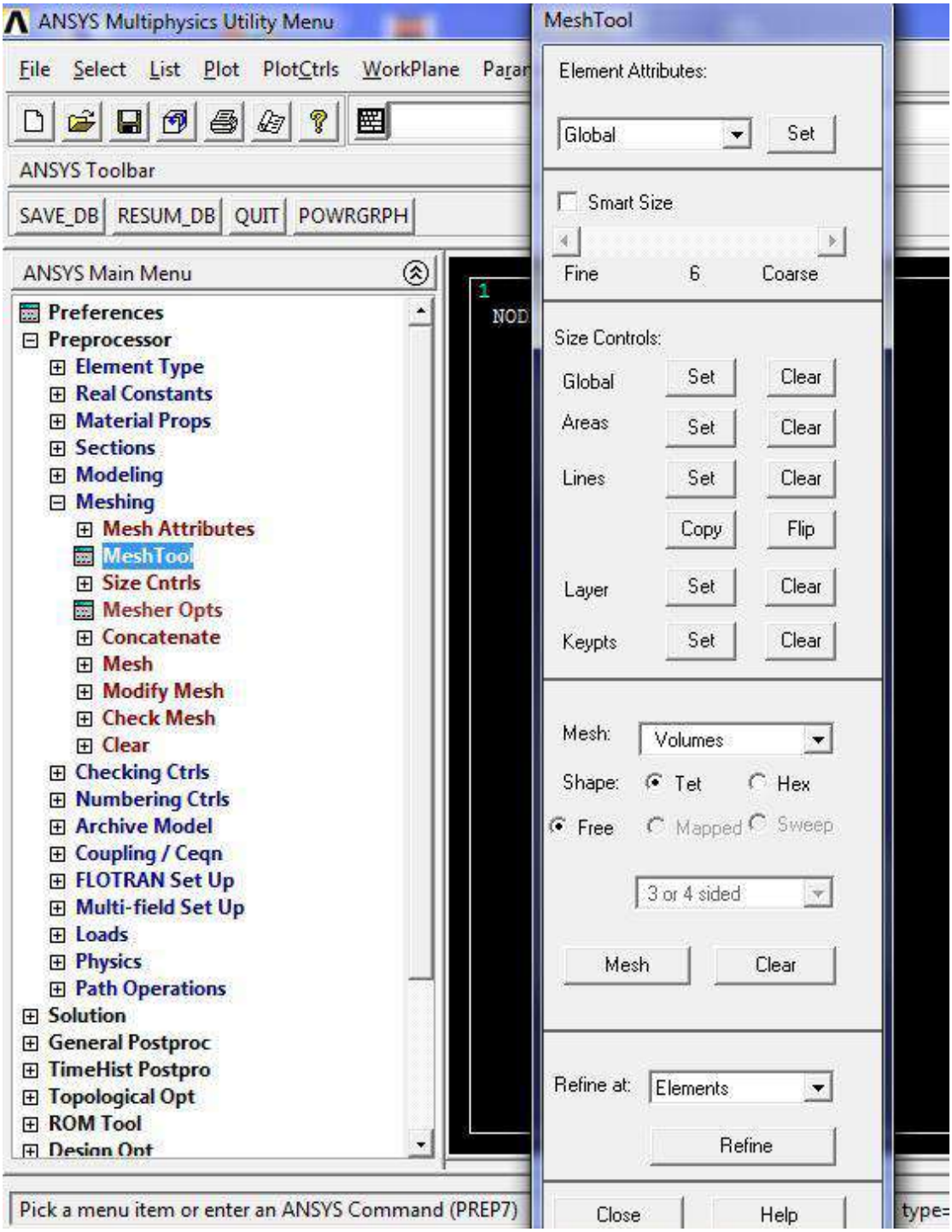


Figure (III.9) : Maillage de la géométrie

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

La finesse du maillage est un facteur important : plus le maillage est fin, meilleure sera la solution. Mais le temps de calcul deviendra de plus en plus long. Il faut trouver un

compromis finesse du maillage/temps de calcul. Il est possible d'utiliser un maillage grossier pour la mise au point des données, lors de la prise en main du logiciel et de n'utiliser un maillage très fin que pour le calcul final. [18]

III.5.1.4. Calculs :

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

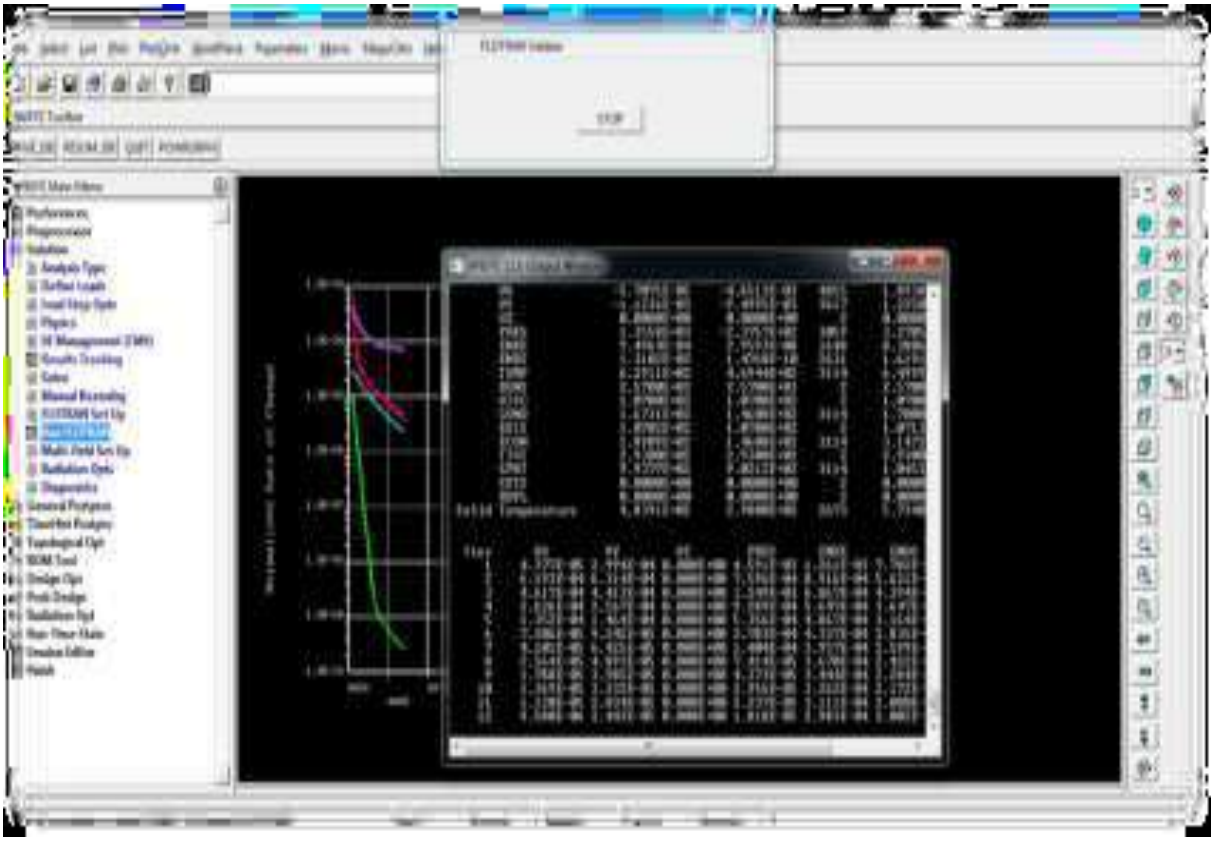


Figure (III.10) : Phase du Calcul

III.5.1.5. Visualisation et analyse des résultats :

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

III.6. Conclusion :

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

(ANSYS).

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

Chapitre 4

Résulta et Discutions

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 point 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.

2.1. Indentification et validation de la simulation numérique

Dans cette partie dont l'objectif d'assures le bon déroulement du modèle utilisé, nous comparons nos résultats à ceux obtenue dans les mêmes conditions de l'expérience de Thierry BARRIERE, Boasheng LIU, Jean-Claude GELIN, on applique les mêmes valeurs des propriétés thermiques de fluide : la densité, la viscosité dynamique et la conductivité thermique en fonction de température. Ainsi la géométrie du moule et pièces sont montrés sur la figure si après.



Fig.1. Le moule multi-empreinte utilisé pour la validation.

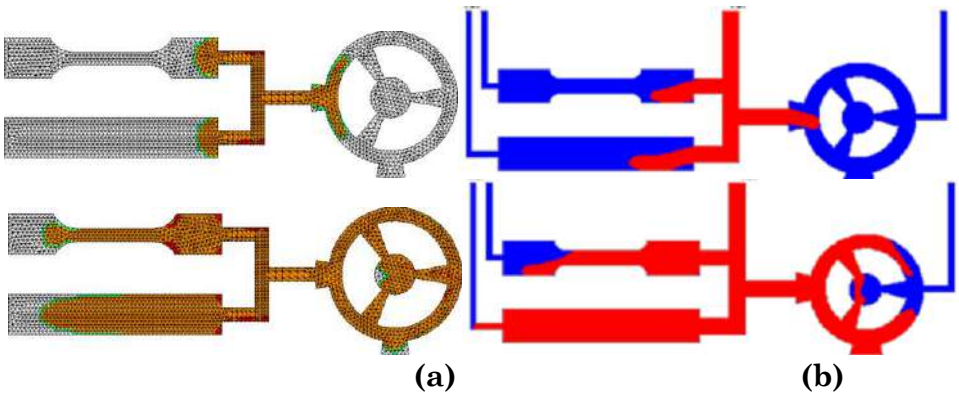


Fig.2. (a) Champs de fraction volumique de résultats de simulation Thierry BARRIERE, Boasheng LIU, Jean-Claude GELIN. (b) nos résultats de simulation par EF\VOF.

Les résultats numériques obtenus en utilisant la méthode EF\VOF montre un bon accord

avec les résultats obtenus par Thierry BARRIERE et Al.

2.1.1 Les conditions initiaux :

La température initiale du métal liquide était de 1200 k (Température de fusion de fer 838 °c).

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

2.1.2 Les conditions limitants :

- La vitesse d'injection du fer liquide a été fixée à 10 m/s.
- Le temps total pour le remplissage de moule est de 0.00799 s.
- La solution en 2D a été considérée.

Tableau.1.les propriétés des matériaux des moules en acier et en fer

	Densité (kg /m^3)	Chaleur spécifique (j/kg.k)	Viscosité (kg/ms)	Conductivité thermique (w/m.k)
Fer	6980	438	0.00544	80.2
Acier	8000	400	/	25

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

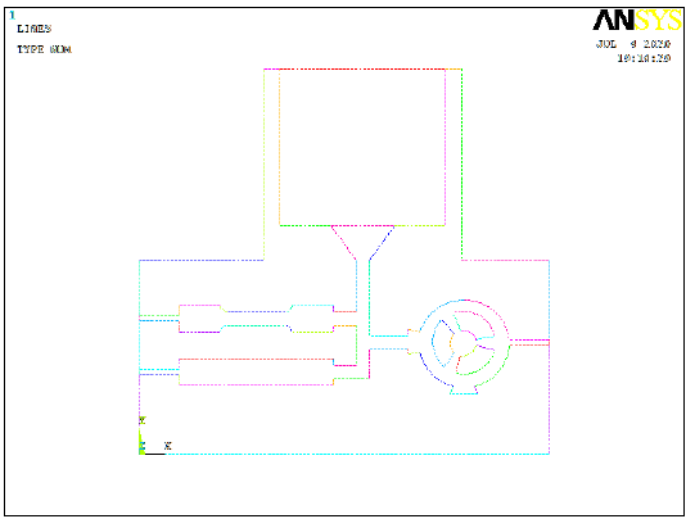


Fig.3.la géométrie du moule

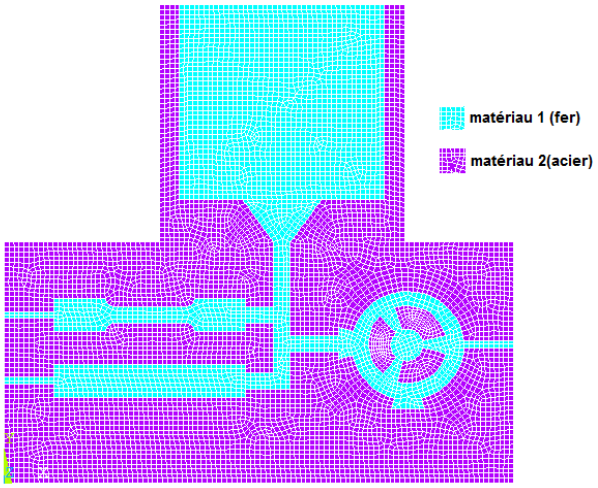


Fig.4. Maillage du Domaine de calcul

2.3. Influence du champ magnétique :

Dans cette partie, nous discutons d'une simulation numérique d'un remplissage du moule avec liquide (fer), en comparant les résultats d'une étude qui a été faite avec une force de gravité en présence d'un champ magnétique appliqué à $31x10^4$N (force verticale), on ajoutant des forces appliqué horizontalement (l'Est et à l'ouest) dans les mêmes conditions. Nous examinons également une comparaison entre différentes forces.

2.3.1 L'emplacement des capteurs pour l'analyse :

Pour permettre un bon suivie des comparaisons des grandeurs physique (la température, la pression, la vitesse, …) pour les différentes expériences, des capteurs sont placés comme ses mentionnés sur la figure suivante.

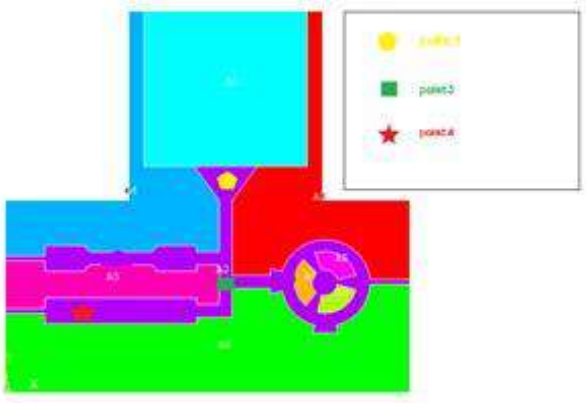


Fig.5. L'emplacement des capteurs choisis à une section du moule

2.4 Application par un champ magnétique :

Pour cette expérience on applique trois forces magnétiques comme suite : force de gravite (force verticale), force à l'Est et à l'ouest (force horizontale) ; et calculons les paramètres liés au remplissage qui sont l'empreintes, température, pression et le temps de remplissage.

La figure (3.5) représente le suivi de la coulée au cours de remplissage pour une

Premier cas : B= 31x10^4 N

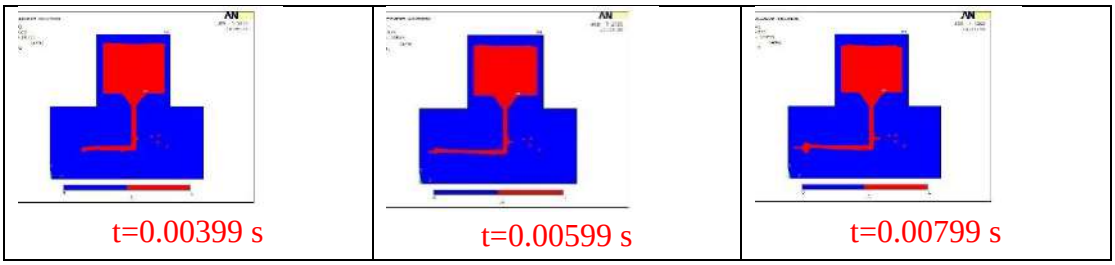
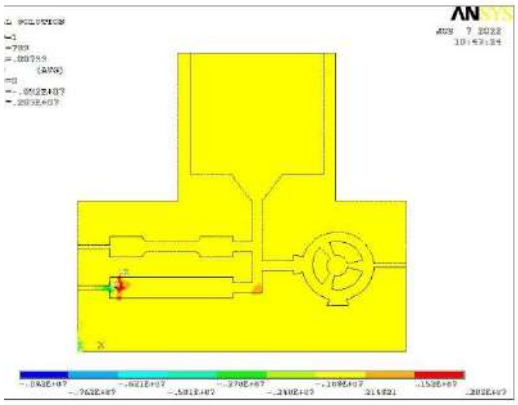


Fig.6. Volume de fraction pendant le remplissage du moule

La figure 3.5 montre spatialement des séquences de coulé de fer métallique à l'intérieur du moule à travers des tubes, d'où le remplissage des pièces se fait rapidement par un coulé transversal, malgré que la force magnétique soit vertical et Horizontal aussi sur deux sens, on peut dire donc que le champ applique par trois forces magnétiques est très favorable pour le bon remplissage des empreintes

2.4.1 Champ de pression :

La figure (3.6) représentation spatiale de pression dans le moule en fonction de temps.



t=0.00799 s

Fig.7. Représentation spatiale de champ de pression dans le domaine de calcul.

La Fig.11. Représenté spatialement le champ de pression au cours du remplissage, au

démarrage la valeur de la pression est 240 MPa, et elle diminuer jusqu'à une valeur 167M Pa au niveau des empreintes à cause de libération de liquide.

La variation de la pression des capteurs pendant la coulée sont indiqués sur la Fig. .12. D'où l'augmentation de pression est évidente.

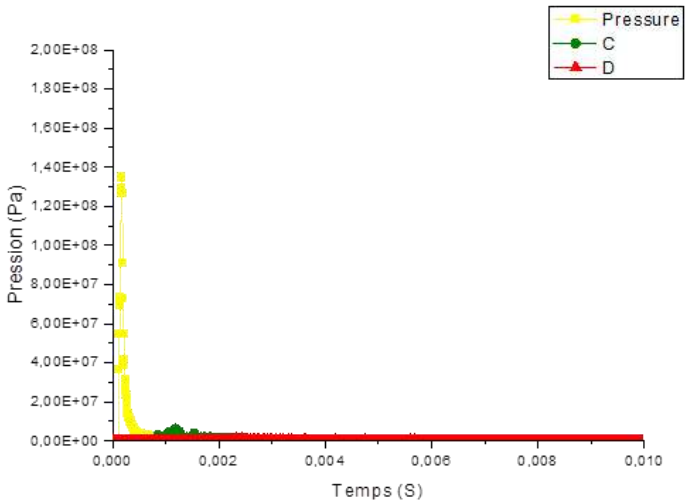
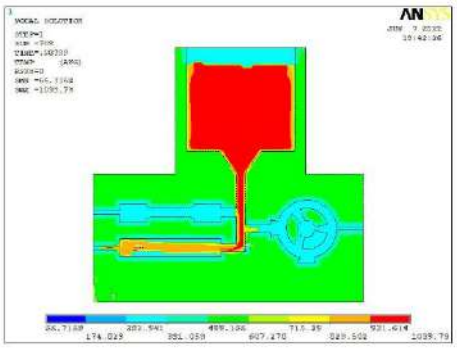


Fig.8. La variation de pression dans le temps pour les différents capteurs.

La Fig.9. Montre une représentation spatiale du champ de température pendant le remplissage de moule.



t=0.00799 s

Fig.9. Représentation spatiale du champ de température dans le domaine de calcul

La température de métal a injecté initialement à 1200k, de fait de l'interaction Dynamique /thermique d'un part et d'autre par les frottements pariétaux ainsi, on remarque que la température au démarrage la valeur est 950 K après elle est augmenté progressivement à une température de 1000 k à la fin du remplissage améliorant la viscosité du métal et par conséquent le bon remplissage des empreintes dans un minimum de temps.

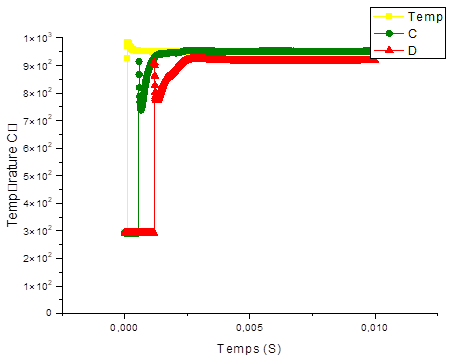


Fig.10. Variation température dans le temps pour de différent position

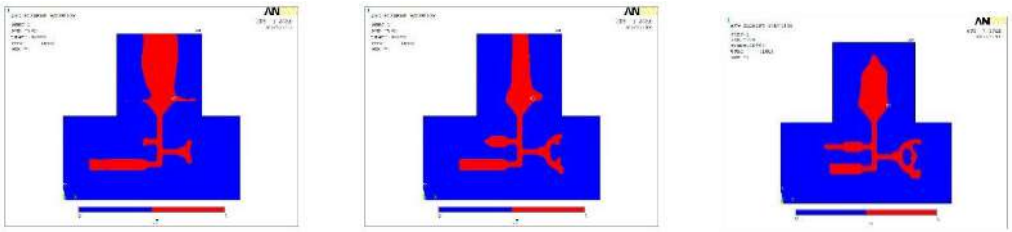
Remarque : la température commence par une valeur constante(T=200k) dans tous les Capteurs.

Capteur (1) : la température augmente rapidement jusqu'à T=1200k (t=0.001s) à cause de la convergence de section, puis elle chute jusqu'à T=900K (t=0.0012s). Après elle va : la température stable est presque constante à cette valeur jusqu'à t=0.009 s

Capteur (2) : la température constante T=200 k jusqu'à (t=0.009s) Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=1100k elle stable est presque constante à cette valeur jusqu'à t=0.009 s

Capteur (3) : la température augmente rapidement jusqu'à T=1000k (t=0.001s) à cause de la convergence de section, puis elle chute jusqu'à T=700K (t=0.0011s). Après elle va : la température stable est presque constante à cette valeur jusqu'à t=0.009 s

Deuxième cas : B= $31x10^7$N



t=0.00399 s t=0.00599 s t=0.00799 s

Fig. 11. Volume de fraction pendant le remplissage du moule

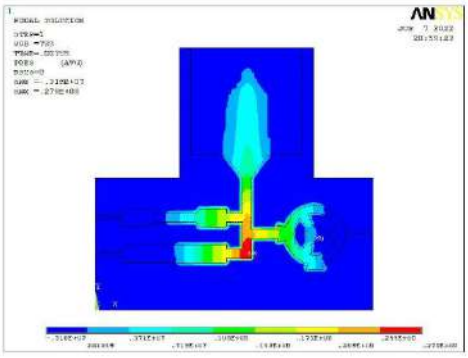


Fig. 12. Représentation spatiale de champ de pression dans le domaine de calcul.

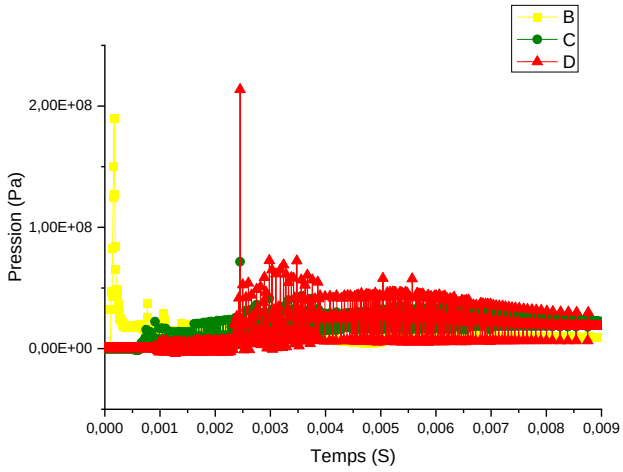
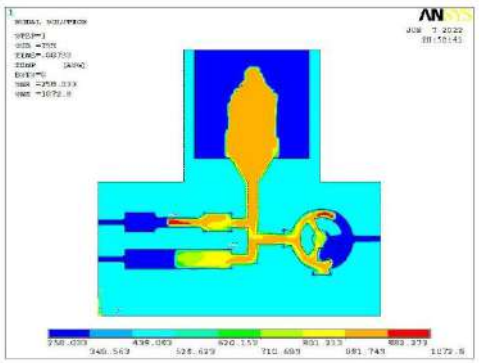


Fig.13. Variation Pression dans le temps pour de différent position



T=0.00799 s

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

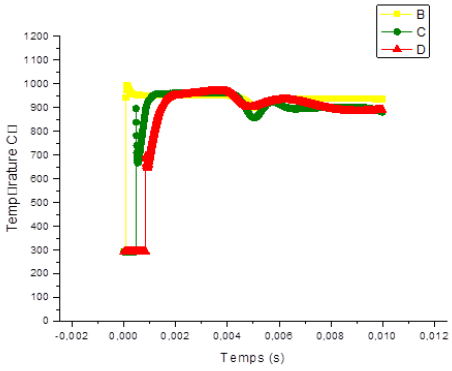


Fig.15. Variation température dans le temps pour de différent position

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

Capteur (1) : la température augmente rapidement jusqu'à T=1200k (t=0.001s) à cause de la convergence de section, puis elle chute jusqu'à T=950K (t=0.0011s). Après elle va : la température stable est presque constante à cette valeur jusqu'à t=0.009 s

Capteur (2) : la température constante T=250 k jusqu'à (t=0.017s) Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=1100k puis elle chute jusqu'à T=950K (t=0.0067s), Après elle va : la température stable est presque constante à cette valeur jusqu'à t=0.009 s

Capteur (3) : la température augmente rapidement jusqu'à T=1100k (t=0.0012s) à cause du Convergence de section, puis elle chute jusqu'à T=850K (t=0.0012s). Elle peut la température augmente jusqu'à T=970k a (t=0.0016s), la température stable est presque constante à cette valeur jusqu'à t=0.009 s

3. Comparaison entre la première et la deuxième expérience :

Dans cette partie on va comparer entre les deux expériences (la première d'une étude faite (approuvé) avec un champ magnétique appliqué verticalement et la deuxième, notre étude en appliquant les deux forces magnétiques horizontalement et de valeur plus élevée par des images VOF c'est à dire on compare par le suivie de trajectoire de remplissage, par les capteurs installés.

La couleur rouge Spectacle expérience 02 (le champ magnétique pour G=310000 N).

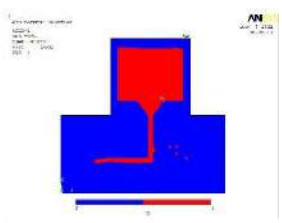
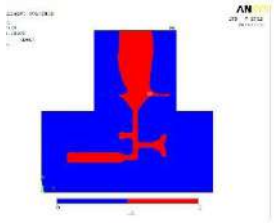
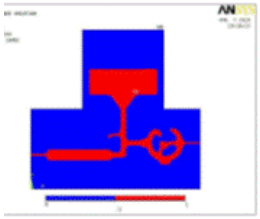
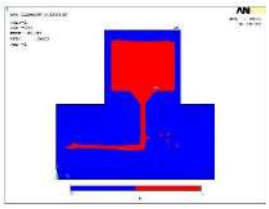
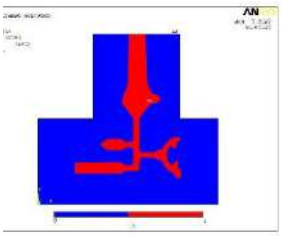
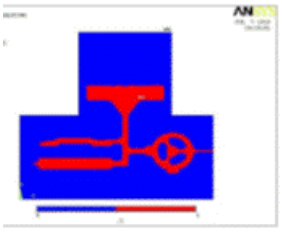
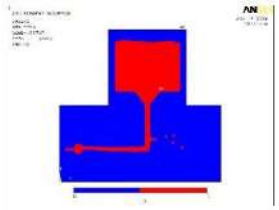
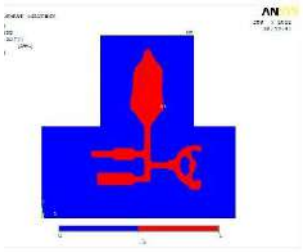
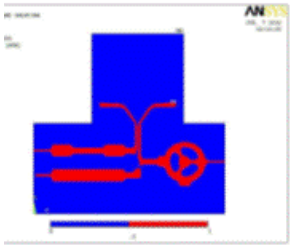
Champ magnétique à 31e4N (horizontal et vertical)	**Champ magnétique à 31e7N (horizontal et vertical)**	**Champ Magnétique à 31x10N (vertical)**
 t=0.00399 s	 t=0.00399 s	 t=0.00399 s
 t=0.00599 s	 t=0.00599 s	 t=0.00599 s
 t=0.00799 s	 t=0.00799 s	 t=0.00799 s

Fig.16. Représentations spatiales de suivi de coulé pour les cas avec force magnétique

VI.4. Conclusion :

Nous présentons dans ce chapitre les résultats obtenus par le calcul numérique basé sur la méthode EF/VOF et nous les comparons en premier lieu aux résultats expérimentaux dans un cas de validation, ou le résultat obtenu montre un bon niveau de cohérence.

Cette méthode nous a permis de même une meilleure Compréhension de la distribution de tous les paramètres au cours de remplissage, qui nous à permet d'analysé le phénomène de remplissage et qui nous oriente vers l'optimisation des paramètres influençant sur les défauts et le coût total du remplissage du moule.

Nous avons cependant étudié numériquement le remplissage de moule sur un cas inspiré du phénomène de ventouse provoqué par l'ouverture de plus qu'un point de dégazage, d'où les résultats obtenus permettent la bonne compréhension.

Les enregistrements montrent en effet un mouvement extrêmement rapide qui peut difficilement être expliqué par les seules variations de température.

Conclusion Générale

L'objectif de notre étude est de trouver la situation optimale Le cadre des défauts d'étude et d'analyse liées à remplir le moule .On peut trouver donc la méthode plus rentable et la préscience du coulé des moules avec différents aspet géométrique, en se basons sur les propriétés physiques des matériaux utilisés (alliage, moule).

Des simulations numériques de remplissage ont été réalisées en utilisant le code ANSYS qui base sur la méthode des éléments finis.

La méthode des éléments finis /VOF s'est révélée être un puissant outil mathématique pour analyser de remplissage du moule et de solidification qui ne sont pas négligeables pour visualiser expérimentalement.

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

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

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

Références Bibliographiques

Références bibliographiques

[1] -Gilles DOUR, « Fonderie alliages, procédés, propriétés d'usag, défauts », Editeur Dunod 2004, France.

[2] -http://fr.wikipedia.org/wiki/Moulage.

[3] -Dr. S. BENSAADA ; « Fonderie et soudage » ; livre (EUE2010), biskra.

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

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

[6] -Fonderie et moulage des alliages d'aluminium Techniques de l'Ingénieur, Article M813 1991.

[7] -SEBASTIEN BERNARD, MICHEL PIELLARD, VINCENT ROLLAND, (Technique de fonderie : le moulage par basse pression) Université de Poitier, 2001-2002

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

[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] -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.

[11]-BEDJEGHIT El Houas ; « Etude expérimentale et numérique d'un écoulement autour d'obstacles carre et cylindrique » ; diplôme de magister ; Université Mentouri Constantine ; 2009-2010.

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

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

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

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

[16] -S. VINCENT. Modélisation d'écoulements incompressibles de fluides non-miscibles.

Thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 1999.

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

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

2012-2013.

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