Répubplique Algérienne Démocratique et Populaire

Ministére de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Yahia FARES de MEDEA

Facullté des Sciences et de la Technologie

Mémoire De Fin D'etude En Vue L'obtention

Du Diplôme De Master

Option Energétique et Thermique des Systémes

Théme

Analyse des défauts par simulation numérique du remplissage sous pression des moules par méthode des elements finis /Volume Of Fluid

Encadreur :

Dr. ZIRARI Mounire

Co-Encadreur :

Mr. SLATNIA Tahar

Présenté par :

MESSAOUDI Nawel

Année universitaire: 2014-2015

SOMMAIRE

Introduction Général…….....1

Chapitre I étude bibliographique

I.1. Introduction …….... ……..4

I.2.Le Moulage ……....4

I.2.1. Moulage en sable ……...7

I.2.1.1.principe ……...7

I.2.1.2 Avantages du procédé…….……..9

I.2.1.3 Inconvénients du procédé…….……9

I.2.2. Moulage mécanique……9

I.2.2.1. Par pression.……..12

I.2.2.2. Par secousse……...12

I.2.2.3.Par projection…….……..……..13

I.2.2.4. Par secousses et par pression.…….……...13

I.2.3. Moulage en carapace (procédé Corning)……. 14

I.2.3.1. Principe du procédé du moulage en carapace……15

I.2.4. Moulage en moules métalliques……...16

I.2.4.1. Caractéristiques générales…….16

I.2.5 : Moulage à la cire perdue……17

I.2.5.1.Principe du procédé…….……...17

I.2.5.2. Créer un modèle inerte……..17

I.2. 5.3.Confectionner une coquille …….....18

I.2.5.4. Injecter la cire…….....18

I.2.5.5. Trempe et enveloppement du modèle……18

I.2.5.6. Fusion du modèle perdu…….....18

I.2.5.7. Confection du moule et coulée du métal……...18

I.2.5.7.1.Applications……...…….……18

I.7. Moulage en coquille……...……..18

I.2.7.1.Moulage en coquille par gravité ……18

I.2.7.1.1. Principe…….……..……18

I.2.6.1.2.Avantages du procédé…….18

I.2.6.1.3.Inconvénients du procédé……18

I.3.6.2.Moulage en coquille sous pression ……19

I.2.6.2.1.Principe …….19

I.2.6.2.2.Avantages du procédé ……19

I.2.6.2.3.Inconvénients du procédé ……..…..19

I.3. Le remplissage……..…….……..21

I.4.Les défauts de moulage (fonderie)…… …..…….....21

I.5.Conclusion…….....25

Chapitre II FORMULATION MATHEMATIQUE

II.1.Introduction…….27

II.1. Modélisation de l'écoulement des fluides……..27

II.1.1. Equation de continuité…….…….....27

II.1.2. Equation de quantité de mouvement……...27

II.1.3. Equation de conservation d'énergie……28

II.2. Modélisation thermique……..…….....28

II.2.1-Différentes modes de transfert de chaleur……..……29

II.2.1.1.Transfert de chaleur par conduction……..29

II.2.1.1.1. Cas des gaz……...…….30

II.2.1.1.2. Cas des liquides……..…….....30

II.2.1.1.3. Cas des solides……..……30

II.2.1.1.4. Loi de Fourier……..…30

II.2.1.2- Transfert de chaleur par convection…….31

a) La convection naturelle……...32
b) La convection forcée…….…….32

II.2.2.3- transfert de chaleur par rayonnement……...32

II.3. Les conditions aux limites……..34

II.3.1. Condition de Dirichlet……....34

II.3.2. Condition de Robin-Fourier……34

II.4. Modèle de turbulence k-ε……...34

II.4.1. Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente k……..35

II.4.2.Equation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ε ……...35

II.5. La méthode volume-of-fluide (VOF)…… 36

II.5.1. Calculs équilibrés et transitoires de la méthode VOF…….36

II.5.2.Equation de la fraction volumique……..37

II.5.CONCLUSION…….…….38

Chapitre III METHODE DE DISCRETISATION

III.1.INTRODUCTION……40

III.2. méthodes de discrétisation……..……..……40

III.2.1 Méthode des différences finies……..42

III.2.2. Méthode des volumes finis……42

III.2.3 Méthode des éléments finis……43

III.4.Calcul d'interfaces……..…….……43

III.4.1.Maillage…….…….……..44

III.4.1.1 les méthodes lagrangiennes…….45

III.4.1.2. les méthodes eulérienne…….45

III.4.1.2.1.Les méthodes de suivi de front……46

III.4.1.2.2.Les méthodes de suivi de volume……46

III.5.Simulation numérique en fonderie……..48

III.5.1.Mise en œuvre numérique…….48

III.5.1.1.Définition de la géométrie……..49

III.5.1.2.Définition des matériaux et des paramètres du procédé…….49

III.5.1.3.Maillage de la géométrie……..….50

III.5.1.4.Calculs……..….52

III.5.1.5.Visualisation et analyse des résultats……..52

III.6.Conclusion…….….53

Chapitre IV Résultat et interprétation

IV. 1.Introduction …….55

IV.2. Identification et validation de la simulation numérique .....……..….55

IV.2.1.Description du domaine d'application ……..……....55

VI.2.2.Validation …….....57

VI.2.2.1.La mise en points au sein de la section de moule en cour de remplissage…… ….....62

VI.2.2.2. Observation des résultats ……65

VI.2.2.3. Interprétation des résultats ……..65

VI.3.propositions de notre modèle ……..66

VI.3.1. 1ere expérience ……....66

VI .3.1.1. La mise en points au sein de la section de moule en cour de remplissage …….....68

VI.3.1.2. Observation des résultats de 1ere expérience ……71

VI.3.2. Proposition une 2emeexpérience……72

VI .3.2.1. La mise en points au sein de la section de moule en cour de remplissage …….....74

VI.3.2.2. Observation des résultats de 2eme …….....77

VI.3.2.3. Interprétation des résultats 2 eme 77

VI.4.Conclusion ……..78

Conclusion générale…….80

Listes des figures

Figure(I.1) : présenter le moulage en sable…….....08

Figure(I.2) : Plaque modèle ……...…….....09

Figure(I.3) : Plaque – modèle réversible……..10

Figure (I.4): Plaque double face……...11

Figure (I.5): Moulage par pression…….....12

Figure(I.6) : Moulage par secousses …….....12

Figure (I.7): Système de projection …….....13

Figure(I.8) : Système d'aide au démontage …….....13

Figure(I.9): moulage en carapace……..…...14

Figure (I.10): moulage en carapace…….....15

Figure (I. 11): des moules à joints verticaux…….....16

Figure (I.12): Moulage en coquille sous pression…….....20

Figure(II.1) : Différent mode de transfert thermique…….....39

Figure(II.2) conduction thermique……..……31

Figure(II.3): Conductivité thermique…….....32

Figure(II.4): transfert thermique par rayonnement…….....33

Figure (III.1) : méthode de discrétisations…….....41

Figure(III.2) : Présentation des méthodes de calcul d'interface…….....44

Figure (III.3) : Maillage carré…….……45

Figure(III.4): Différentes méthodes de suivi de front…….……46

Figure(III.5) : Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque……..47

Figure(III.6) : Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret……..47

Figure(III.7): Définition de la géométrie……...…..49

Figure(III.8): Définition des propriétés des matériaux……...….....50

Figure(III.9) : Maillage de la géométrie……...51

Figure(III.10): Phase du Calcul……...….52

Figure(IV.1) :a) Les géométries de moule et de la cavité ;b) maillage adoptée pour la simulation2D……...…….55

Figure(IV.2) : Representation Spatiale des Champs de température lors du remplissage

a)- de Moisés M, Guilherme A. Salem, Felipe Bertelli, et Noé Cheung,b)- nos résultats de simulations…….....…...…….58

Figure(IV.3): profils de température des points témoin pendant le remplissage…….…59

Figure(IV.4) : Volume de fraction pendant le remplissage du moule ;a)-Modèle de Moisése M, GuilhermeA.Salem, Felipe Bertelli, et Noé Cheung,b)-Notre modèle……60

Figure (IV.5): détection des défauts de remplissage dans l'empreinte…… …..……..…..61

Figure(IV.6) : les champs de la vitesse……...….62

Figure(IV.7): Localisation des points témoins…….....62

Figure (IV.8) : la variation de la vitesse(V_X) des points choisis de moule en fonction de temps de remplissage…….....63

Figure (IV.9) : la variation de la vitesse(Vy) des points choisis de moule en fonction de temps de remplissage……..…….63

Figure(IV.10) : Representation Spatiale des Champs de pression lors du remplissage

a)-Moisés M,Guilherme A.Salem,Felipe Bertelli,et Noé Cheung,[19],b) nos résultats de simulation……..…….64

Figure (IV.11) : la variation de la pression (p) des points choisis de moule en fonction de temps de remplissage…….…….…….....65

Figure(IV.12) : Géomètre et maillage de moule …….……66

Figure(IV.13) : Volume Fraction……...……..……67

Figure (IV.14) : Champ de Vitesse ……....67

Figure (IV.15): Localisation des points témoins…….…..….68

Figure (IV.16) : la variation de la vitesse (Vx) des points choisis de moule en fonction de temps de remplissage……...…68

Figure (IV.17) : la variation de la vitesse (Vy) des points choisis de moule en fonction de temps de remplissage……...…69

Figure(IV.18) : La variation de température……...….69

Figure (IV.19) : la variation de la température des points choisis de moule en fonction de temps de remplissage……..……...70

Figure(IV.20) : Champ de Pression…….…....70

Figure(IV.21): la variation de la pression des points choisis de moule en fonction de temps de remplissage……..……71

Figure (IV.22) : Géométrie et maillage de moule…….....……...72

Figure (IV.23) : Volume Faction……...……..…73

Figure (IV.24) : Champ de Vitesse……..……...73

Figure(IV.25) : Localisation des points témoins ……..…74

Figure (IV.26) : la variation de la vitesse (Vx)des points choisis de moule en fonction de temps de remplissage……..……..…….74

Figure (IV.27) : la variation de la vitesse (Vy) des points choisis de moule en fonction de temps de remplissage……..……...75

Figure(IV.28) : Champs de Température…….……...75

Figure (IV.29) : la variation de la vitesse (Vy)des points choisis de moule en fonction de temps de remplissage……..……...……....76

Figure (IV.30) : Champ de Pression…….....76

Figure (IV.31) : la variation de la pression des points choisis de moule en fonction de temps de remplissage……...……77

Figure (IV.32) : l'élimination des défauts de remplissage dans l'empreinte……...……78

Liste des tables

Tab. I.1 : des procédés de moulage en dépendent du métal à couler…….....06

Tab .I.2 : Présentation des différents défauts de moulage…….....…..24

Tab. IV.1 : Propriétés d'alliage de Cu5%Zn……...56

Tab. IV. 3 Propriétés des matériaux de moule…….…..57

Résumé :

Dans ce travail, on a fait des simulations numériques de remplissage du moule d'un alliage de (Cu, 5%Zn), dans l'objectif d'une prévision sur l'opération et déduire le mode convenable de remplissage. En utilisant une technique de calcule numérique pour résoudre les équations de la dynamique et thermique de fluide basé sur la méthode des éléments finis, le modèle de la turbulence (K-ε), et l'algorithme de volume au fluide (Volume of Fluid). Nous avons cependant étudié numériquement le remplissage de moule sur un cas inspiré du phénomène de ventouse provoqué par l'ouverture de plus qu'un point de dégazage, d'ou les résultats obtenus permettent la bonne compréhension et Les enregistrements montrent en effet un mouvement extrêmement rapide qui peut difficilement être expliqué par les seules variations de température.

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

ملخص:

في هذا العمل، قمنا بالمحاكاة العددية لملء القالب من (النحاس، 5٪ زنك)، من أجل تحديد الدقة المناسبة للعملية واستنتاج طريقة ملء القالب.باستخدام تقنية الحساب الرقمي من اجل حل المعادلات الديناميكية و الحرارية للموائع بطريقة العناصر المحدودة و نموذج الاضطراب (K-ε) وخوارزمية حجم السائل (VOF). ومع ذلك، درسنا عدديا ملء القالب في حالة مستوحاة من ظاهرة صب و سبب ذلك فتح أكثر من نقطة التفريغ، من نتائج تمكن من الفهم الصحيح الذي يظهر في الواقع حركة سريعة للغاية يمكن تفسيرها من خلال الاختلافات في درجة الحرارة.

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

Abstract:

In this work, we made simulations of mold filling an alloy (Cu, 5% Zn), with the aim of a forecast on the transaction and deduct the proper way of filling. Using a technique of digital calculates to solve the equations of fluid dynamics and heat based on the finite element method, the model of turbulence (K-ε), and the algorithm fluid volume (Volume of Fluid) . However, we have studied numerically the filling mold on a case inspired by the phenomenon of suction caused by opening more than a degassing point, or of the results enable the proper understanding and Records show indeed an extremely movement Quick Keywords: numerical simulation, finite element method, filling, mold, volume of fluid (VOF). which can hardly be explained only by the temperature variations.

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

Introduction :

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 aux recherches et les expériences de, les limites de cette approche se sentent lors des divisions ou fusions des fronts

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

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

Ce mémoire est composé sur quatre chapitres :

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

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

I.1. Introduction :

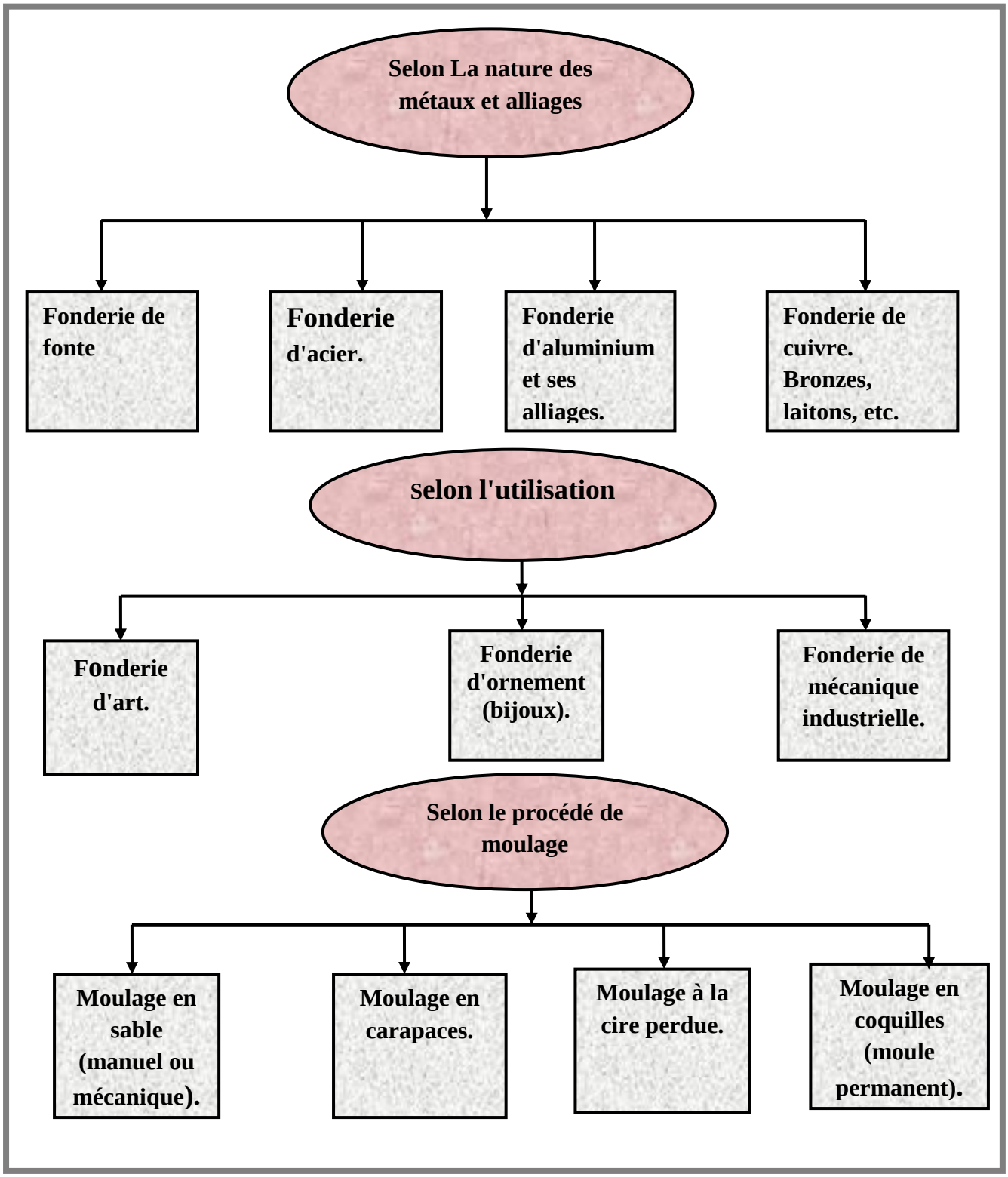
Le terme de la fonderie Obtention d'une pièce métallique par coulée d'un alliage en fusion (liquide) dans un moule .Les métaux utilisés en fonderie doivent être fluides à la température de fusion afin de pouvoir remplir convenablement les moules. Pour cela, pendant le processus d'élaboration d'une pièce, 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. 01): 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 faible que celles du même alliage forgé Les défauts de fonderie, fréquents dans les pièces moulées, diminuent encore leur résistance globale, certains de ces défauts, dus aux gaz occlus ou à la contraction du métal au refroidissement, mais peuvent-être évités par un tracé judicieux des formes. [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]

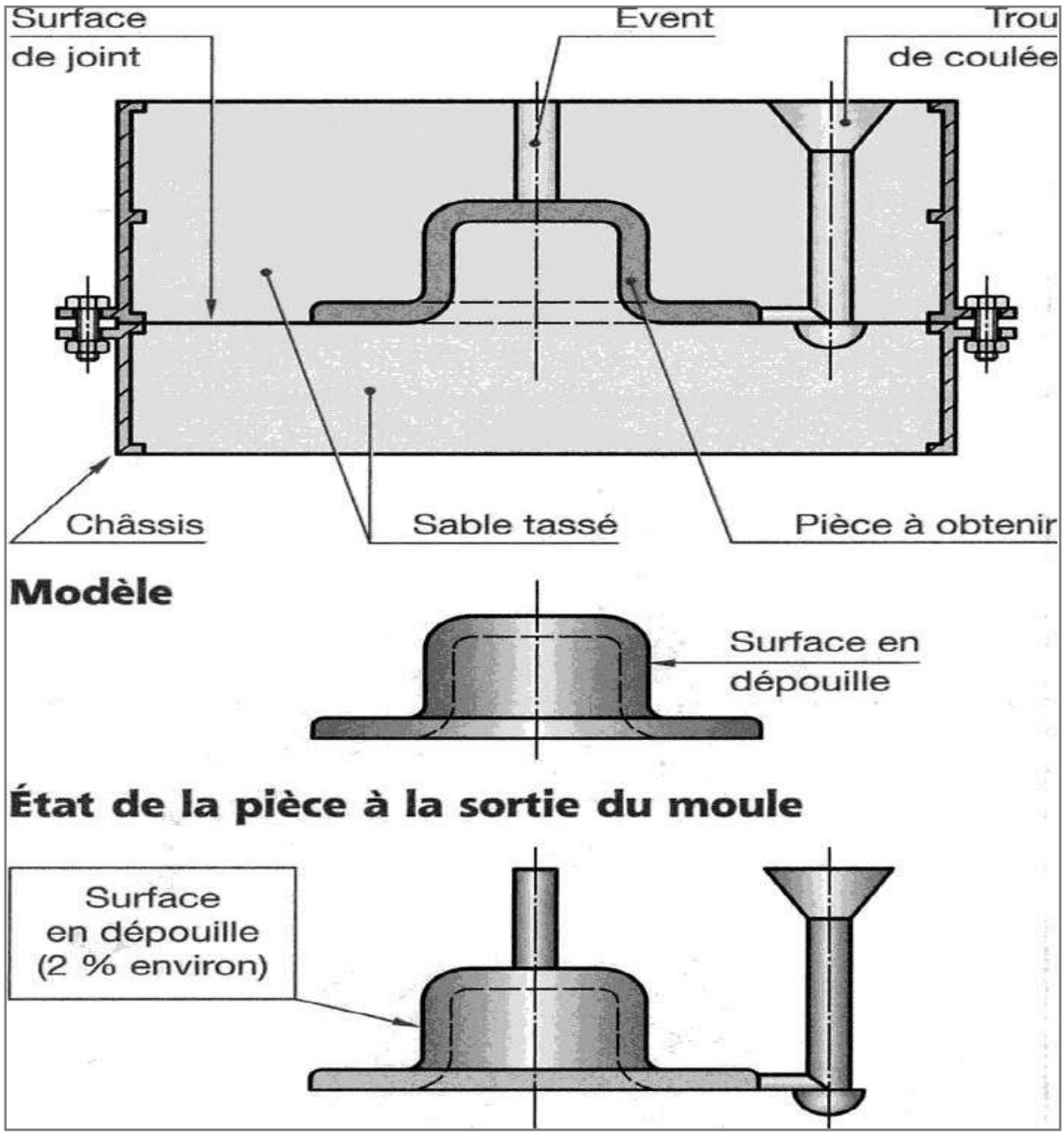


Figure (I.1) : présenté le moulage en sable [4]

I.2.1.2 Avantages du procédé :

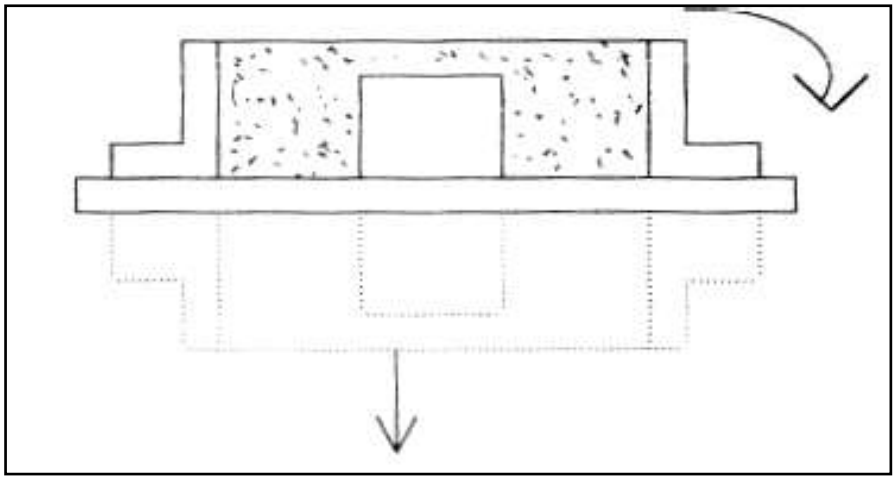
- Possibilité de mouler des matériaux dont le point de fusion est élevé (acier, fonte).
- Possibilité de mouler des pièces de (très) grande taille (Moulage de carters de machines)
- Procédé rentable pour les petites et moyennes séries (quelques dizaines à quelques milliers de pièces)

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 crées pour réaliser le serrage et le démoulage. Le modèle est collé à une plaque matérialisant la surface de joint du moule, l'ensemble constitue une plaque modèle, qui peut être en bois, en plâtre ou métallique. Le plaque modèle est généralement nécessaires pour exécuter un moule (figure 02)



Figure(I.2): Plaque modèle [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

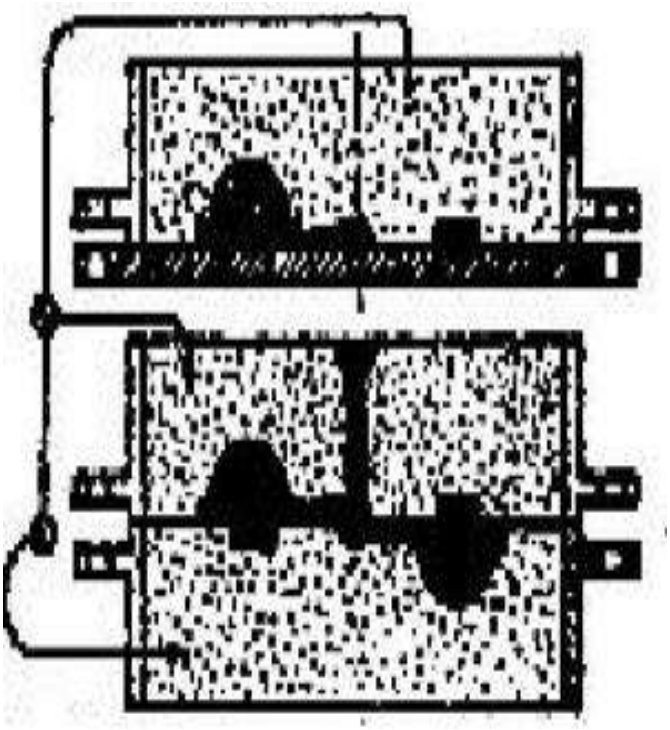
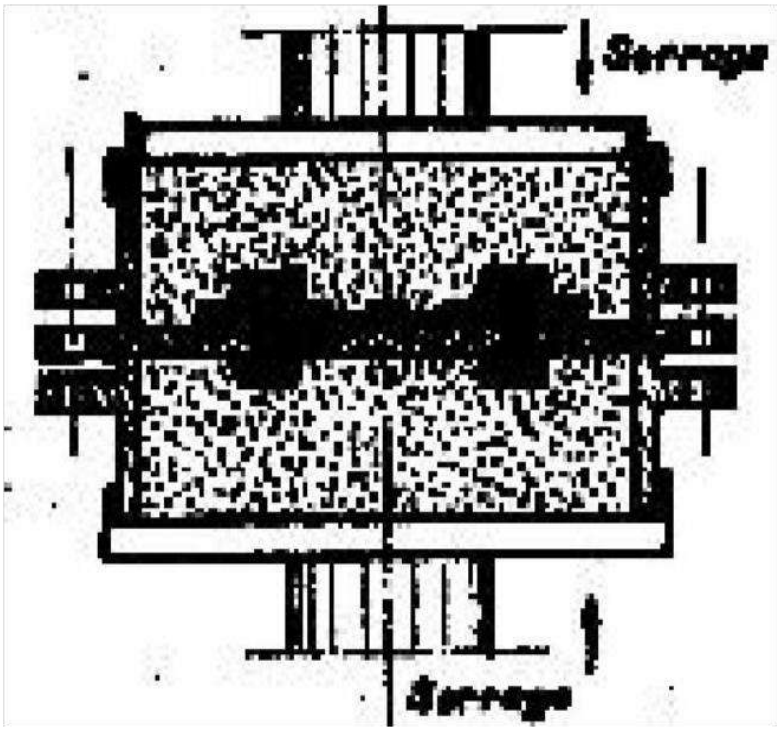


Figure (I.3) : Plaque – modèle réversible [5]

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) ;

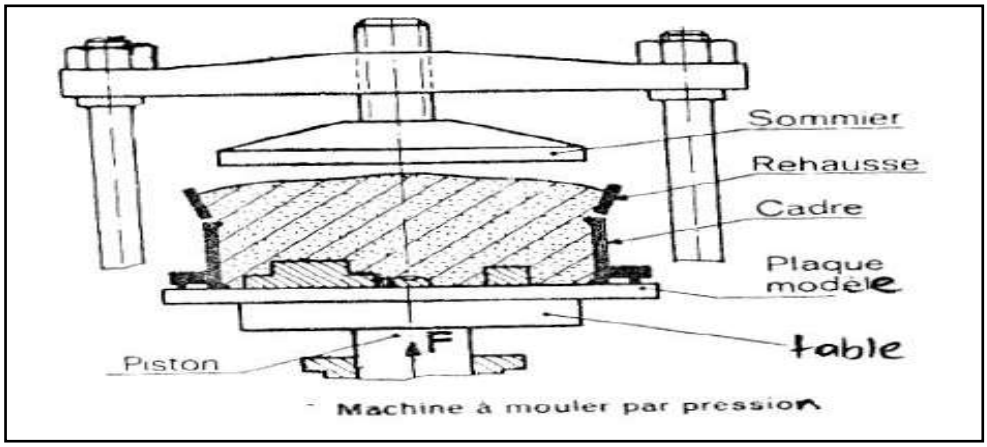


Figure (I.5) : Moulage par pression [5]

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

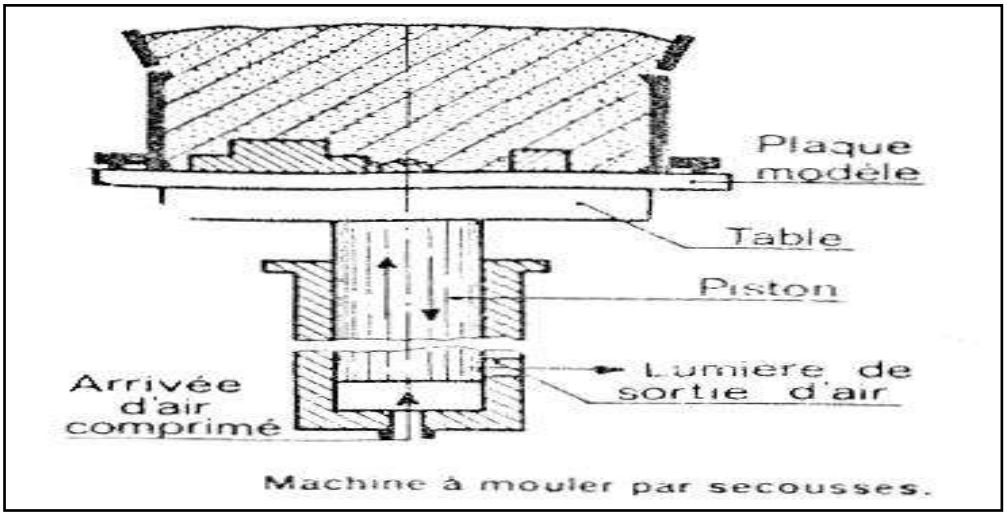


Figure (I.6) : Moulage par secousses [5]

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

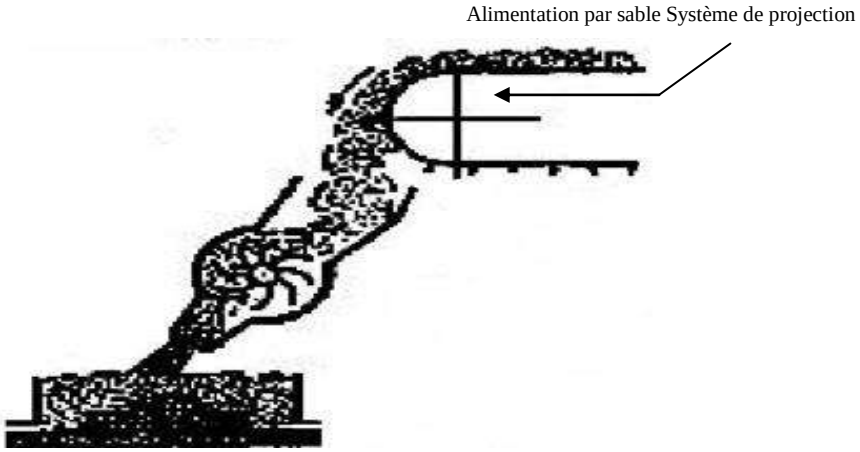


Figure (I.7) : Système de projection [5]

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).

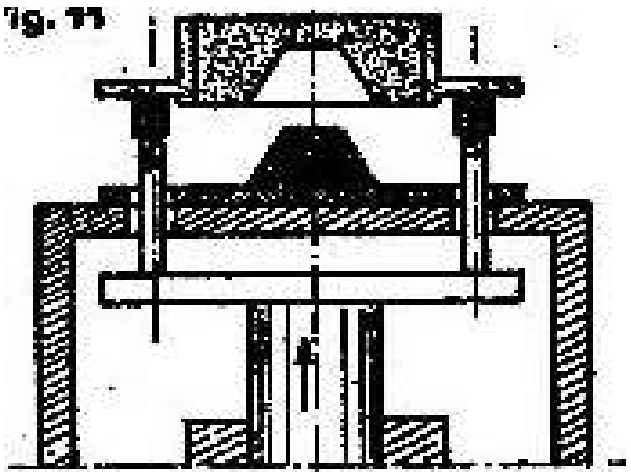


Figure (I.8) : Système d'aide au démontage [5]

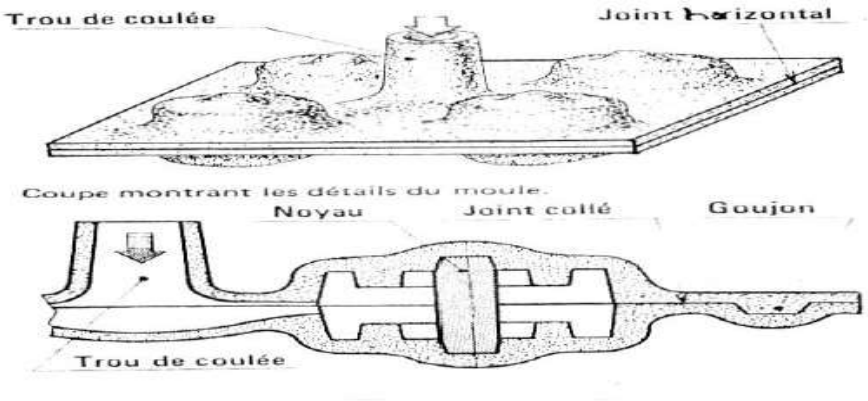
I.2.3. Moulage en carapace (procédé Corning) :

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.

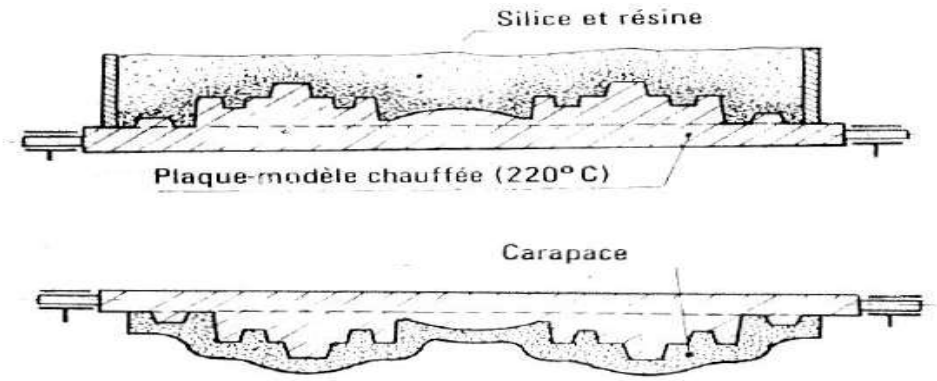


Figure (I. 10): moulage en carapace

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]

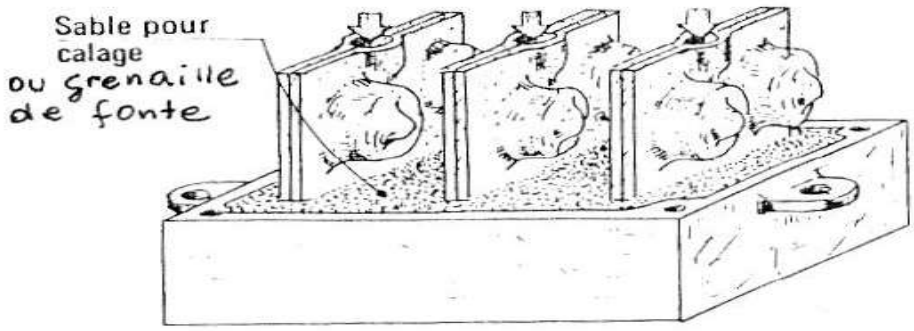


Figure (I.11): des moules à joints verticaux.

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 quant 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 série

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.

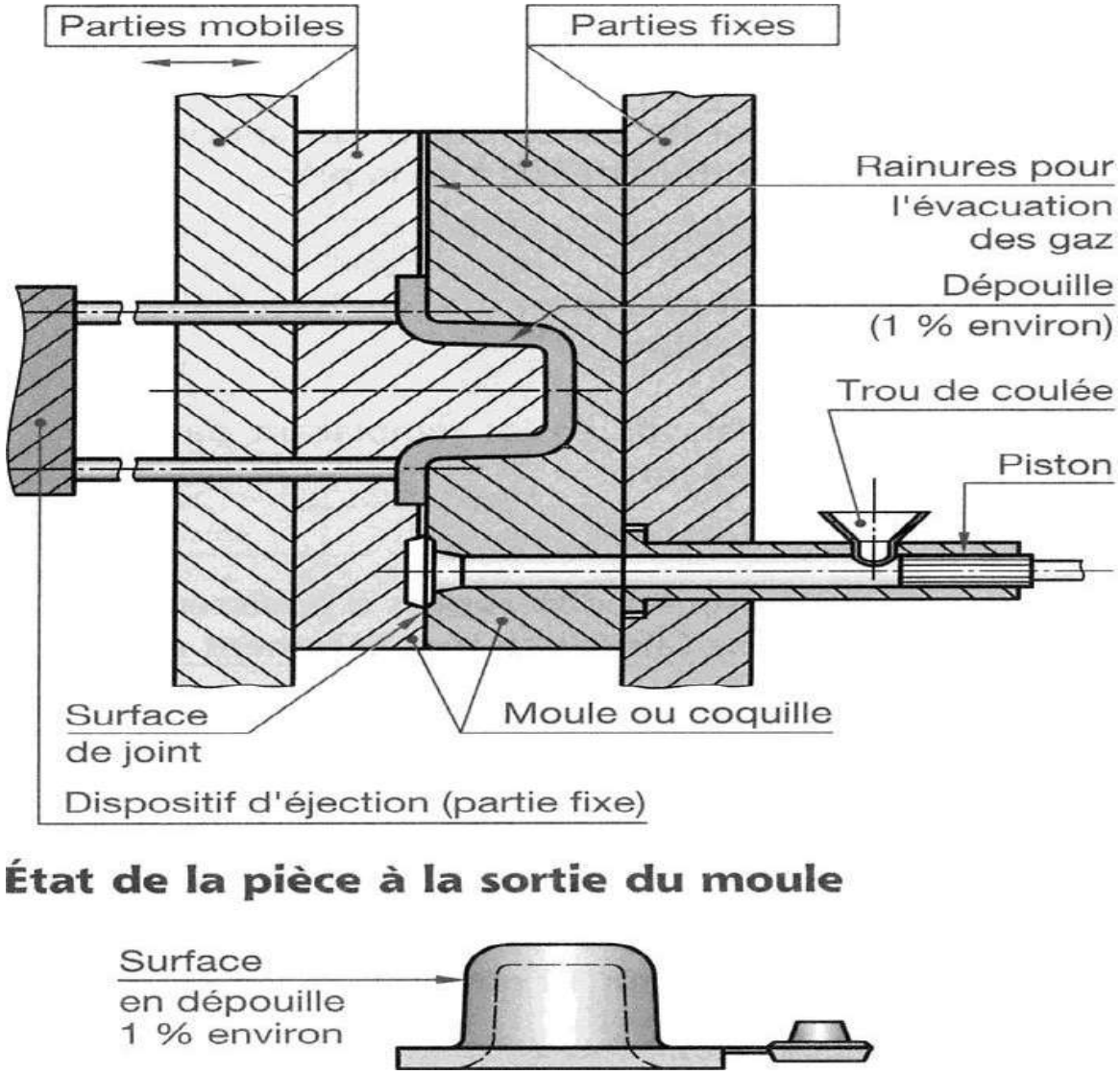


Figure (I. 12) : Moulage en coquille sous pression [4]

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 INCORRECTES		la partie intérieure de la pièce est déportée par rapport à la partie	excès de jeu dans les portées de noyaux ou les guidages de broches, mauvais remmoulage par défaut de repérage.

		extérieure.	
Retassures	**Macroretassures**	Cavités de dimensions souvent importantes situées en général dans les parties hautes des pièces ou dans les parties massives	contraction volumétrique de l'alliage lors de son passage de l'état liquide à l'état solide; les températures des diverses parties du moule, le tracé de la pièce, le gradient thermique de coulée, . l'effet de pression pendant la solidification,
Retassures	**Microretassures**	Nombreuses petites cavités affectant des parties limitées d'une pièce et situées en général dans des zones éloignées des masselottes, ou mal refroidies	tracé contrariant la solidification rationnelle; mauvaise répartition du liquide interdendritique en fin de solidification; manque d'action du masselottage et du refroidissement ; présence d'éléments étrangers gênant l'écoulement interdendritique.
	Retassures de surface	la surface de certaines parties de pièces coulées en alliage A-Sl3, ou de composition voisine, présente de petits affaissements faibles (de	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.

		'ordre du millimètre).	
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 cette 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 physique ; thermique et dynamique de remplissage des moules.

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 couplé (dynamique et thermique) où les lois de base seront établir.

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 :

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

Ou dans une notation plus compacte

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

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

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

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 :

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

Suivant OY :

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

Suivant OZ :

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

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

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

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

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

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

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 :

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

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

Avec :

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

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

$\text{div}(\lambda\,\text{grad}T)$: La variation d'énergie par conduction

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

II.2. Modélisation thermique :

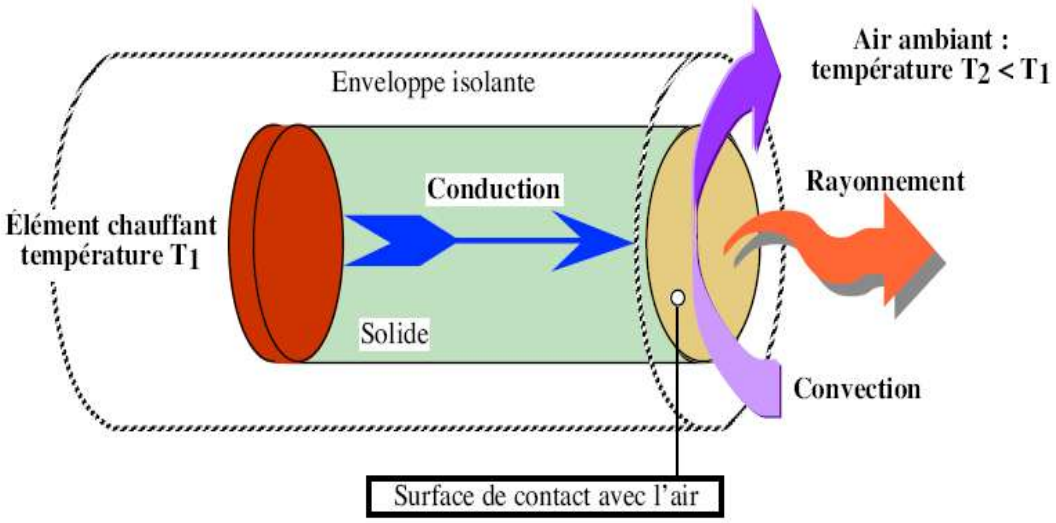
Le transfert d'énergie se produit chaque fois qu'un gradient de température existe à l'intérieur d'un système, ou lorsque deux systèmes de températures différentes sont mis en contact. Le processus par lequel le transfert de l'énergie s'effectue est désigné parle terme générale de ' transmission de la 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]

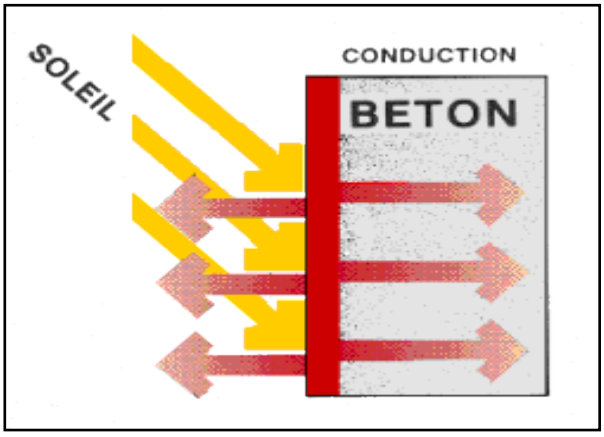
II.2.1.1.4.Loi de Fourier :

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 froide) et T1. (Source chaude). 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

$$\mathbf{dQ = -\lambda A \frac{dT}{dx} dt} \qquad \textbf{(II.13)}$$

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 différance 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

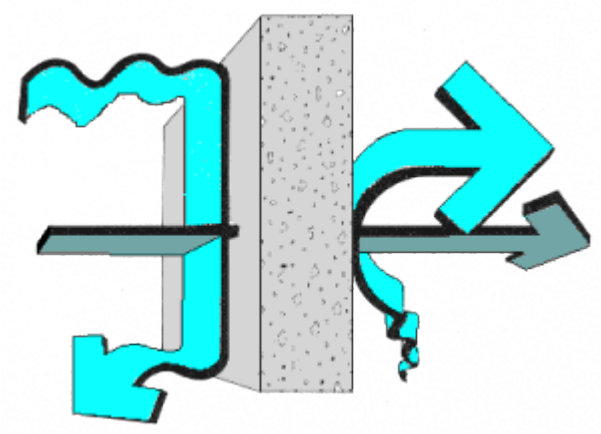
a) La convection naturelle :

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.

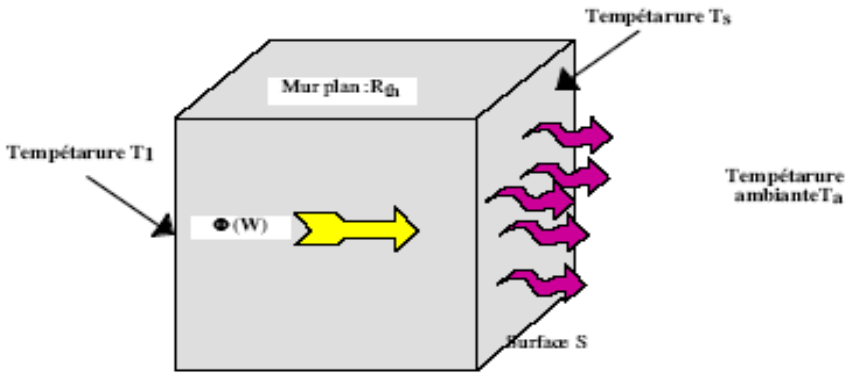
II.2.2.3- transfert de chaleur par rayonnement :

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 :

$$\boldsymbol{\varphi(W) = \varepsilon.\sigma.A\left(T_s{}^4 - T_a{}^4\right)} \qquad \textbf{(II.14)}$$

- $\boldsymbol{\sigma}$: 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:

$$T_S=T\ (x_s\ .y_s\ .z_s\ ) \qquad (II.15)$$

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

$$\boldsymbol{\varphi = h\ (T_c - T_e)} \qquad \textbf{(II.16)}$$

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]

$$\overline{-\rho u_i' \rho u'_j} = ?_t \left[\frac{\overline{\partial U_i}}{\partial x_j} + \frac{\overline{\partial U_j}}{\partial i}\right] - \frac{2}{3}\delta_{ij}\rho k \qquad \textbf{(II.17)}$$

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

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

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

$$\nu_t = C_\mu \sqrt{K}\,\frac{k^{3/2}}{\varepsilon} = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \qquad \textbf{(II.18)}$$

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 :

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

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 :

$$\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu+\frac{\mu_t}{\sigma\varepsilon}\right)\frac{\partial\varepsilon}{\partial x}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \qquad \textbf{(II.20)}$$

Le terme de production G_k est donnée par :

$$G_k = -\rho\overline{U_i U_j} = \rho\nu_t\left(\frac{\partial \overline{Ui}}{\partial x_j}+\frac{\partial \overline{Uj}}{\partial x_i}\right)\frac{\partial \overline{Ui}}{\partial x_j} \qquad \textbf{(II.21)}$$

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]

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

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 :

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

$\partial\Omega_{maill}$ **:** 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.(renvoi à la page 47).

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 :

$$\sum_{k=1}^{n} Ck = 1 \quad \textbf{(II.25)}$$

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.

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.

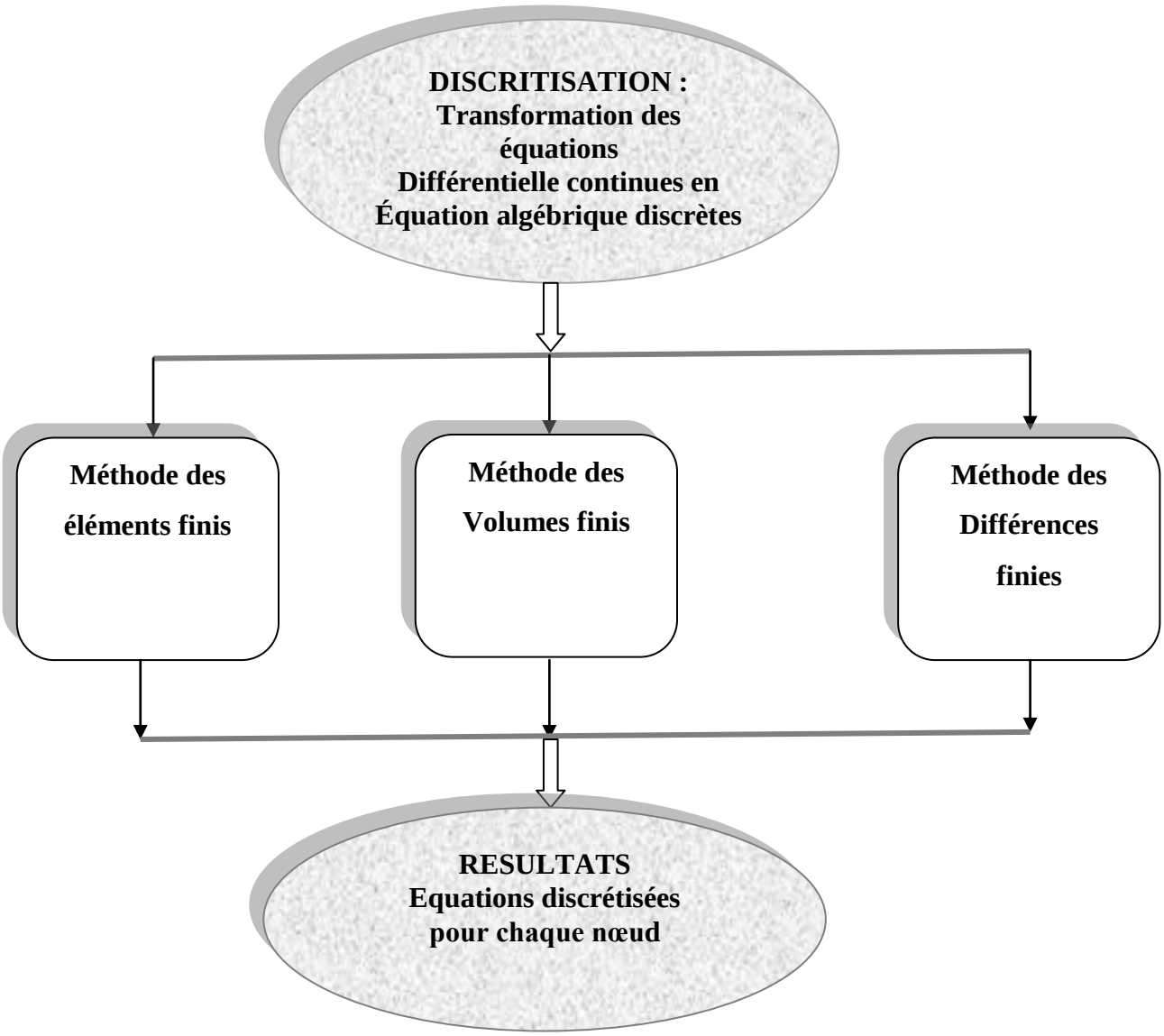


Figure (III.1) : méthode de discrétisations [13]

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 variationelle (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]

Avantage :

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

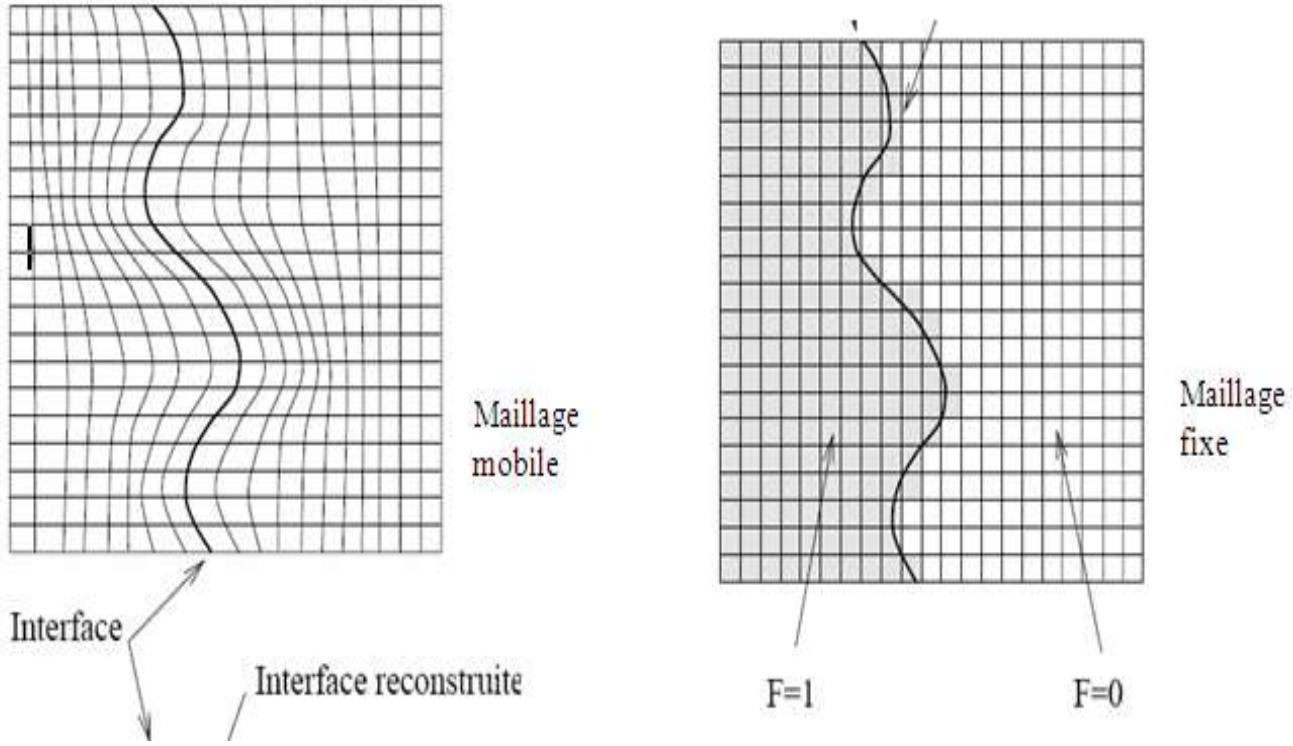
Inconvénients :

- ✓ 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]

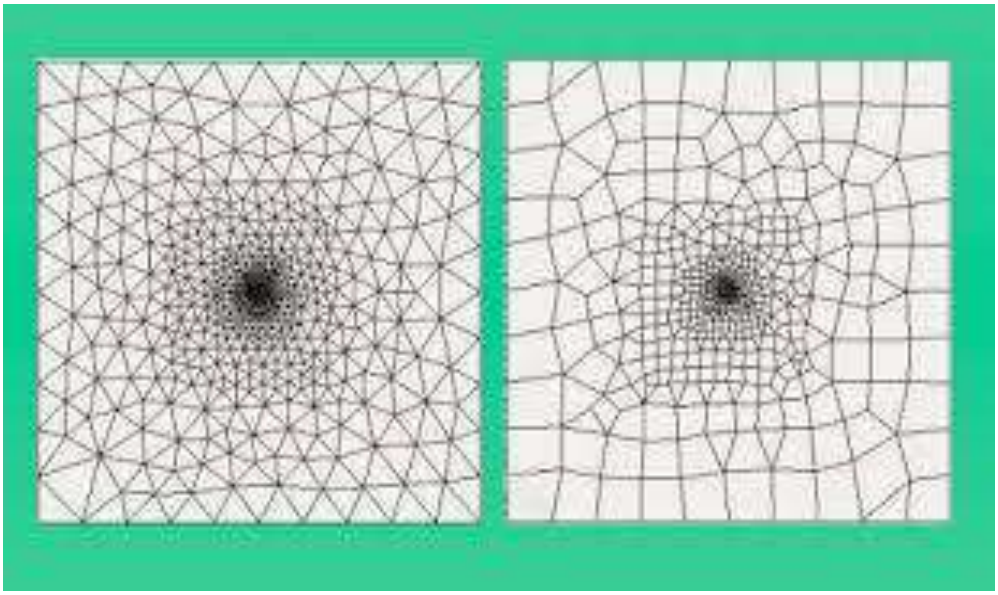


Figure (III.3) : Maillage carré [4]

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

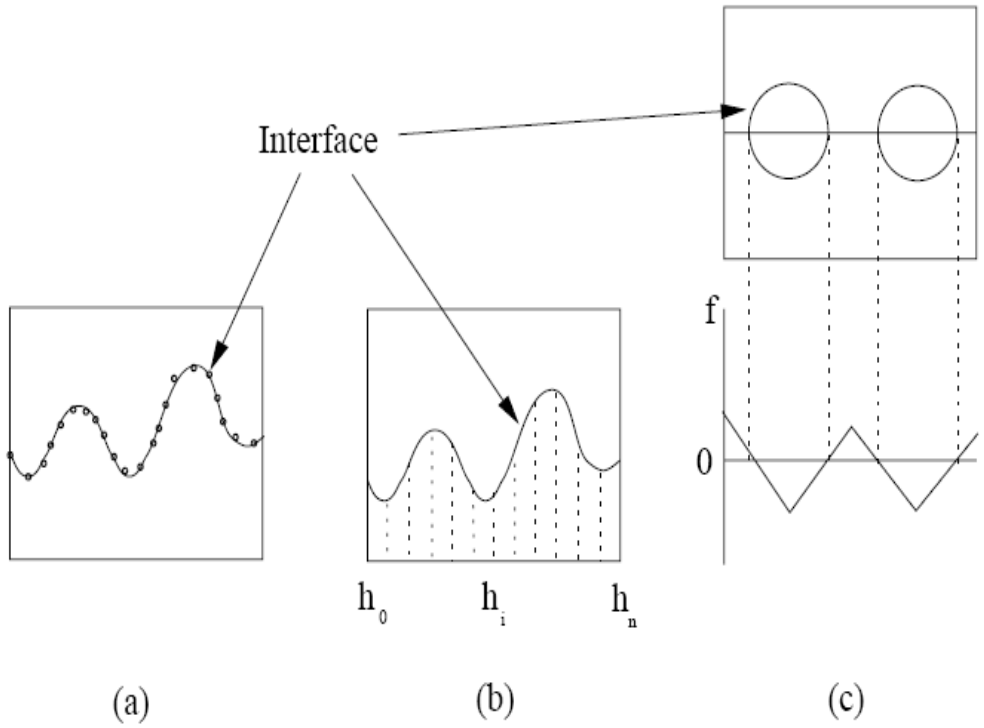
III.4.1.2.1.Les méthodes de suivi de front :

Il existe différente méthode pour marquer l'interface:

a) Marqueurs de surface

b) Fonction de hauteur

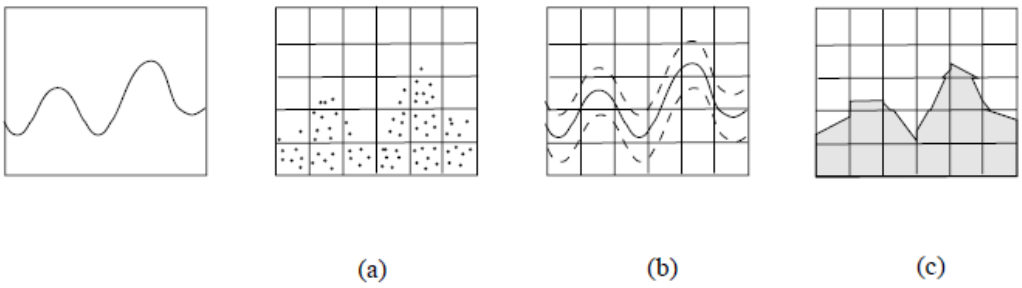
c) Méthode de ligne de niveau (lève set)



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).

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

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

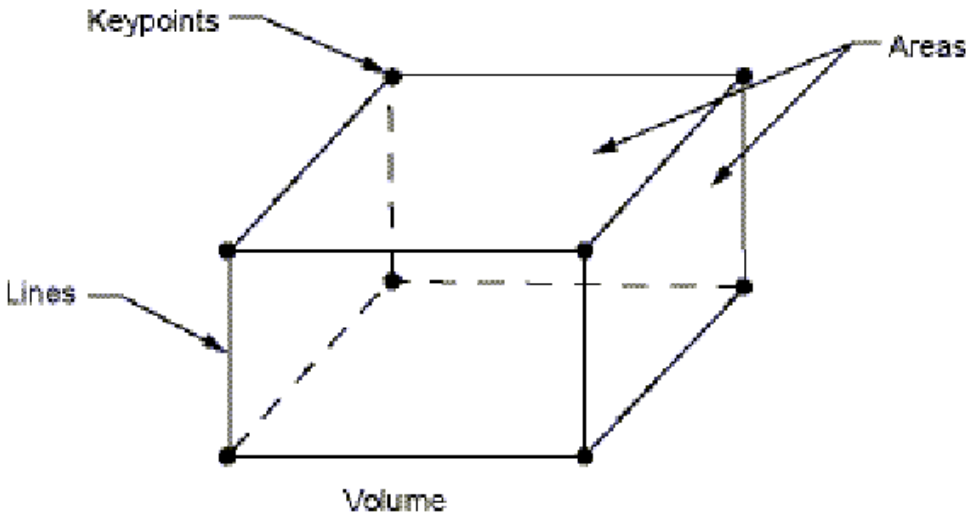
Le programme ANSYS a été dans l'utilisation commerciale depuis 1970 et a été utilisé intensivement dans l'espace, véhicules à moteur, la construction, le service électronique, d'énergie, la fabrication, nucléaire, les plastiques, le pétrole, et les industries en acier. En outre, beaucoup de sociétés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

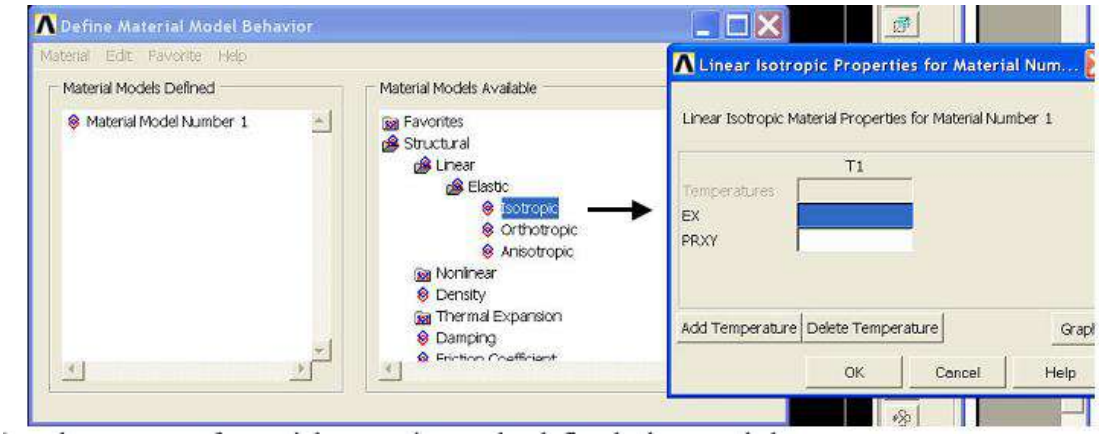
III.5.1.2.Définition des matériaux et des paramètres du procédé :

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 donnée.

Pour définie les propriétés matérielles :

Main Menu>Preprocessor>Material Props>Material Models

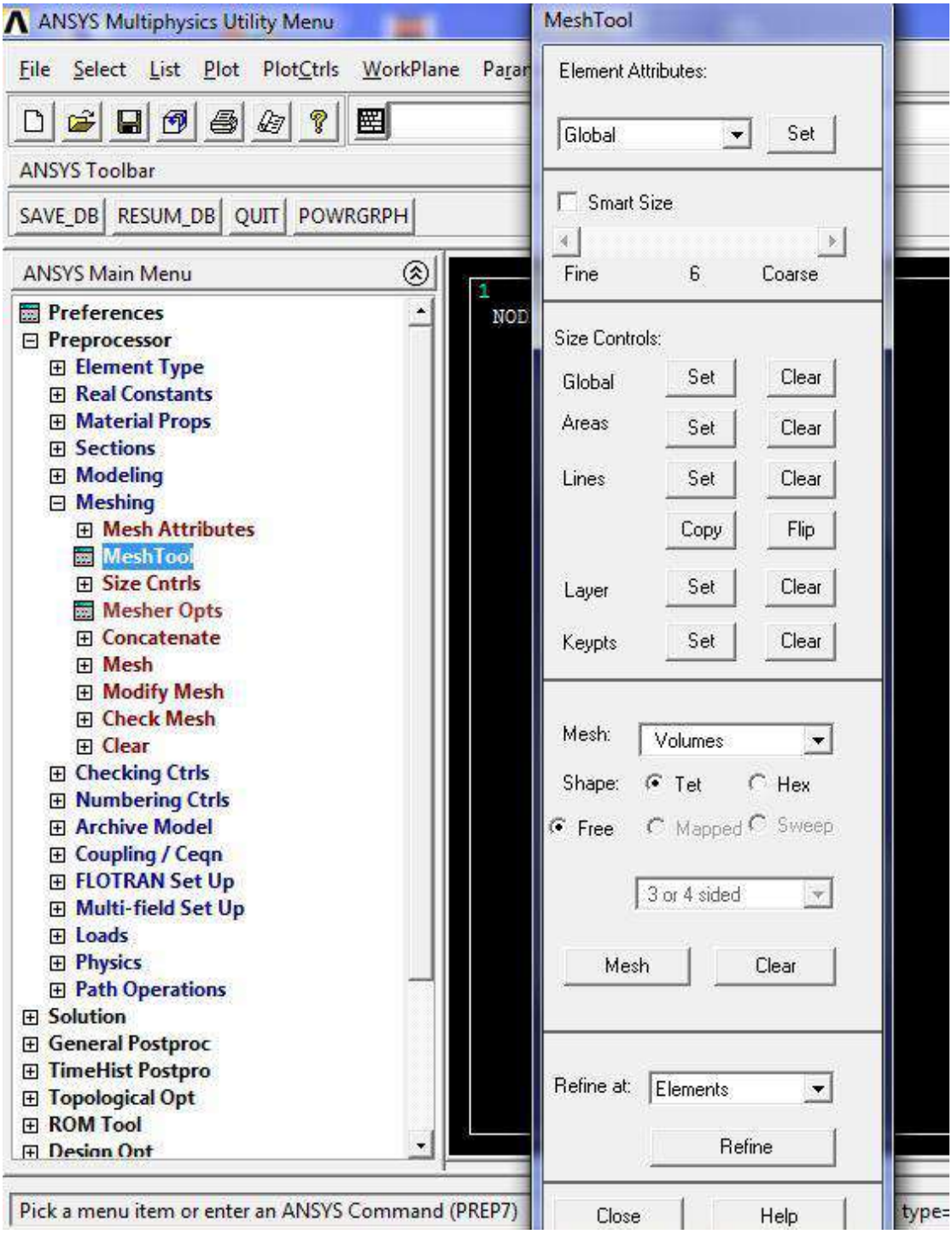


Figure(III.8): Définition des propriétés des matériaux

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



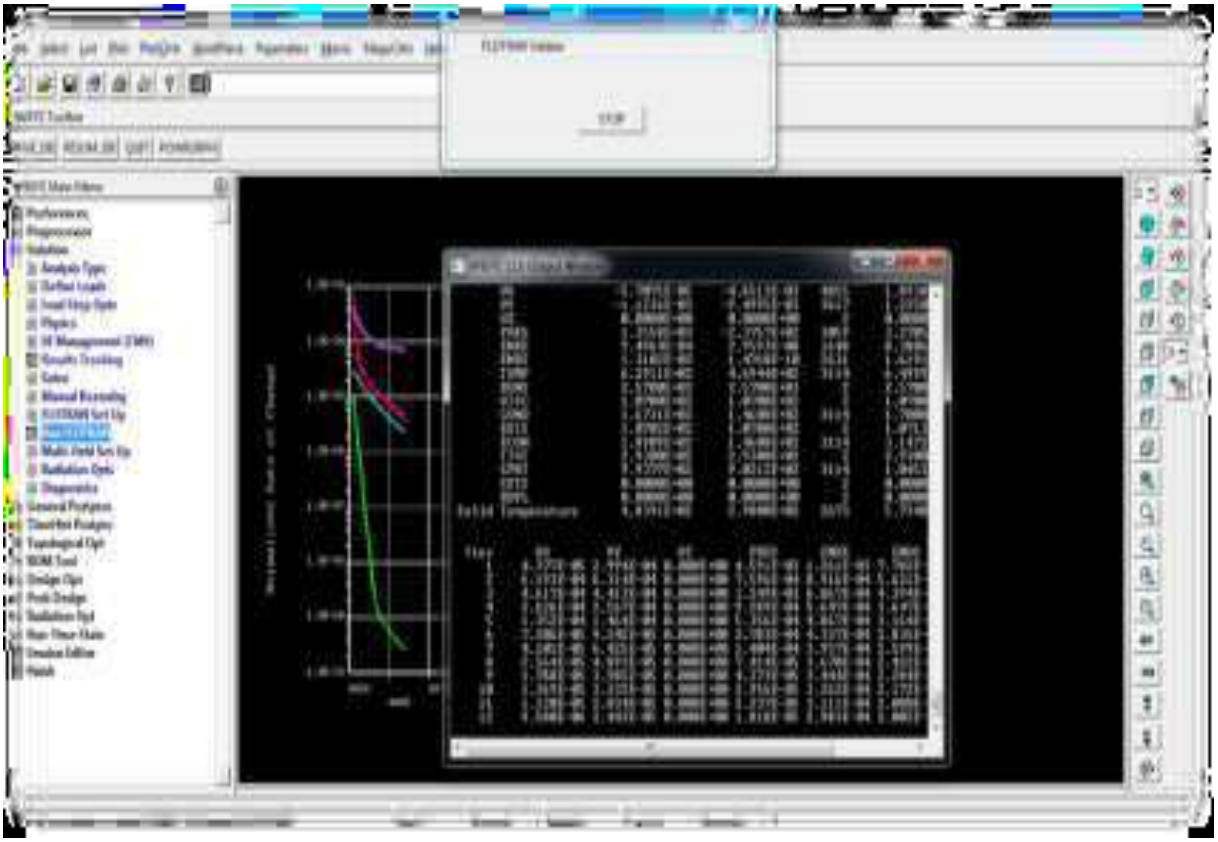
Figure(III.9) : Maillage de la géométrie

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 ne 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).

IV. 1.Introduction :

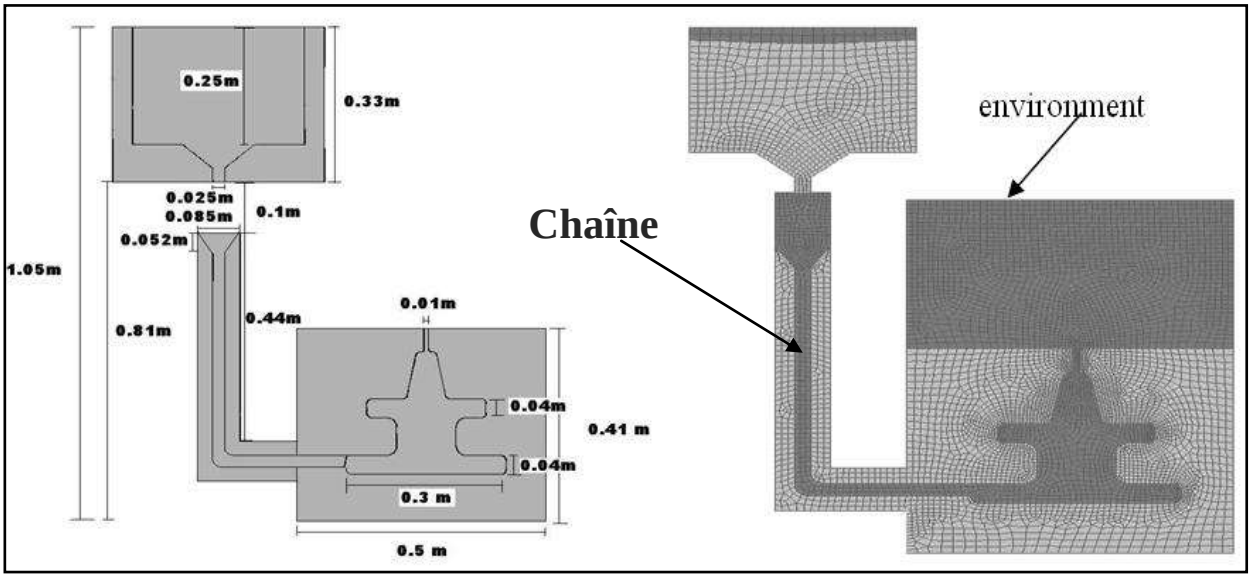
La simulation numérique en fonderie est désormais indispensable dans la conception et la mise au point des pièces, car en représentant fidèlement ce qui se passe à l'intérieur du moule, elle peut être utilisée comme base de dialogue entre les différent acteurs du développement des pièces de fonderie.

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

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

IV.2.1.Description du domaine d'application :

La géométrie modélisée est représentée à la figure(IV.1) dans cette figure nous pouvons observer que entre la sortie de la cavité et l'entrée de moule il ya un espace libre de 0,1 m. non seulement cet espace libre mais également la sortie de la poche est exposée à l'environnement. Pour atteindre la convergence selon l'état du volume de fluide de l'algorithme (VOF), la géométrie de la maille de l'élément doit être de forme quadrilatère et le maillage de la chaîne moule doit avoir une continuité, comme le montre la Figure (IV.1).



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

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

- ✓ le métal liquide et le moule de sable ont été stabilisés dans des conditions normales de la pression atmosphérique.
- ✓ la température initiale du métal liquide était de 1550 K et la température de moule a été considérée égale à celle de l'environnement.
- ✓ la vitesse du liquide a été fixée à zéro sur les parois du moule.
- ✓ le modèle mathématique pour la turbulence est le modèle de k-ε.
- ✓ l'algorithme de VOF a été employé pour le remplissage de moule.
- ✓ le temps total pour le remplissage de moule est de 0.01s.
- ✓ le nombre d'itérations par étape était 30.
- ✓ les propriétés des matériaux est variable en fonction de la température.
- ✓ La solution en 2D a été considérée.

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

Propriétés	Valeur	
Densité (Kg/m^3)	7841.18	
Chaleur Spécifique (J/Kg.K)	492.86	
Viscosité (Pa.s)	0.0034	
Température(K)	1321.46	314.29
	1323.77	307.14
	1326.08	300.00
	1328.38	292.86
	1330.69	278.57
	1333.00	257.14
	1335.31	228.57
	1337.62	178.57
Conductivité thermique (W/m.k)	1342.23	107.14
	1376.85	107.14
	1399.92	107.14
	1423.00	107.14

Tab. IV. 2 : Propriétés des matériaux de moule

Densité (Kg/m^3)	Chaleur Spécifique (J/Kg.K)	Conductivité thermique (W/m.k)
1500.00	900.00	0.05

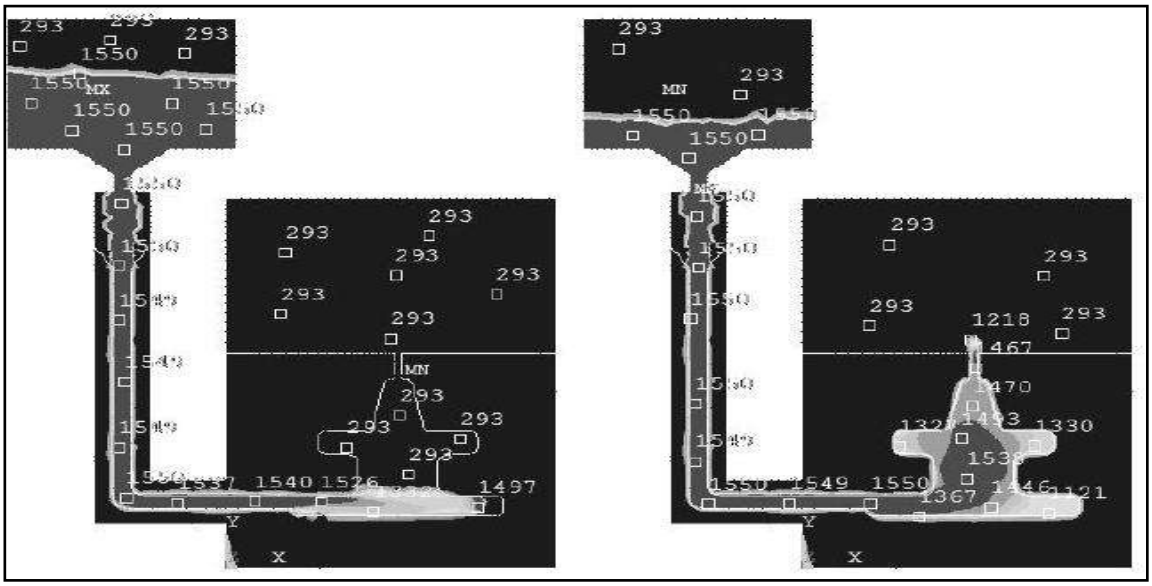
IV.2.2.Validation :

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

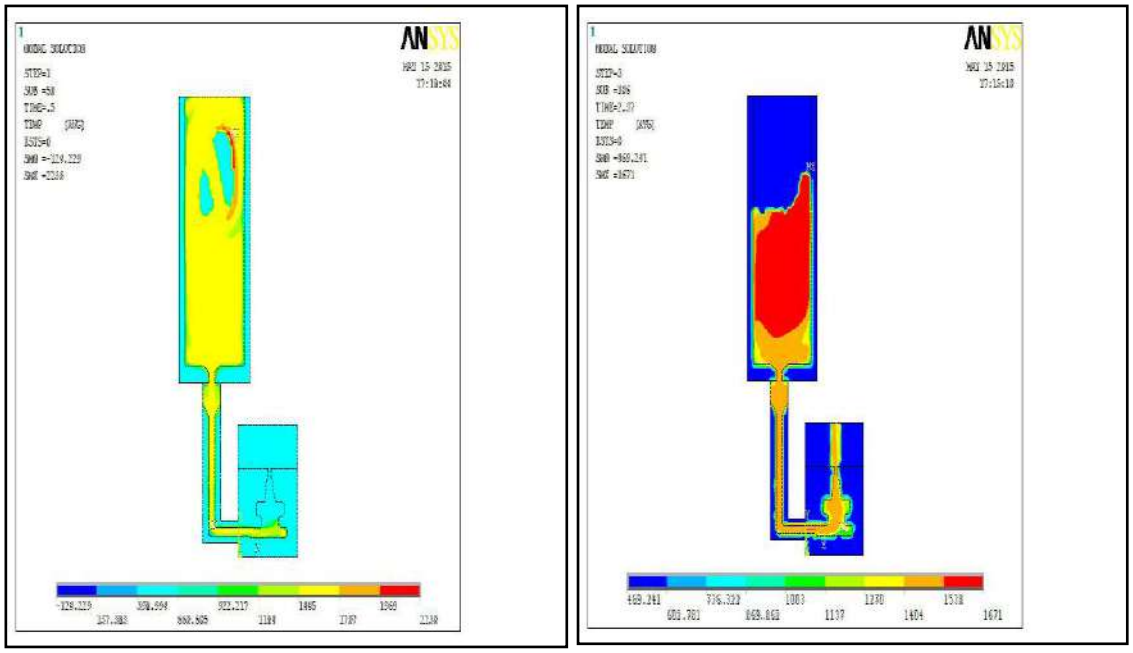
Nous nous sommes assuré que chaque étape était correctement simulée, c'est l'objet de ce chapitre de validations.

Dans cette partie dont l'objectif est d'assurer le bon déroulement de notre simulation numérique, nous comparons nos résultats à ceux obtenue dans les mêmes conditions de simulation par de Moisés M, Guilherme A. Salem, Felipe Bertelli, et Noé Cheung du département de mathématique et statique au Brésil **[19].**En outre, nous avons varié tous les paramètres thermiques du métal et du moule : la densité, la chaleur spécifique, la viscosité dynamique et la conductivité thermique qui fonctionné de la température.

Les figure (IV.2.a ; IV.2.b) montrent la distribution de la température dans le moule, la Noé Cheung et la deuxième affiche notre modèle [19].



(a)



Le temps (0.5s) **Le temps (2.57s)**

(b)

Figure. (IV.2) : Representation Spatiale des Champs de température lors du remplissage

a)- Moisés M, Guilherme A. Salem, Felipe Bertelli, et Noé Cheung [19]

b)- nos résultats de simulations

D'après les calculs numériques des éléments finies par ANSYS, le graphe obtenue de cette essaie sont les suivant à le graphe si après.

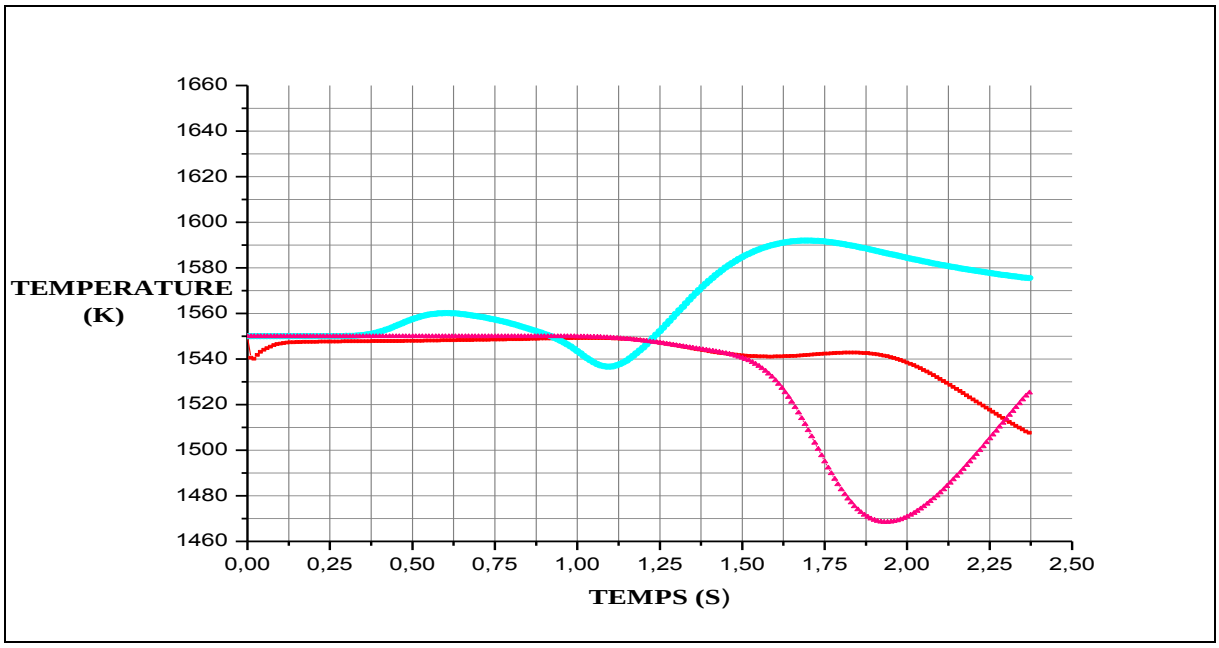
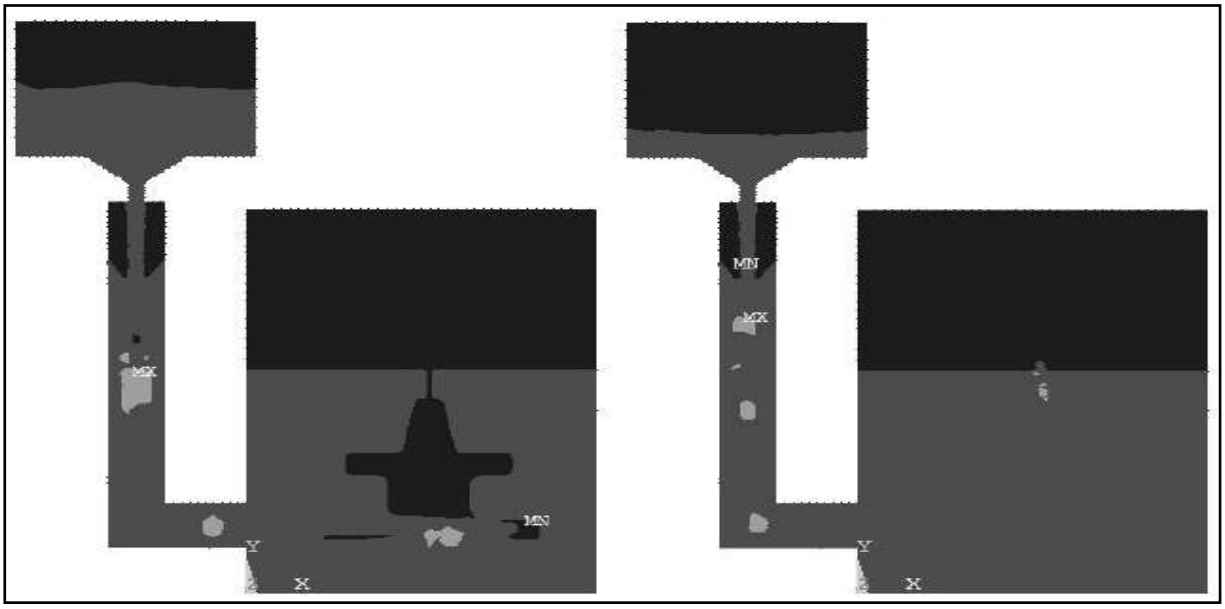


Figure (IV.3): profils de température des points témoin pendant le remplissage

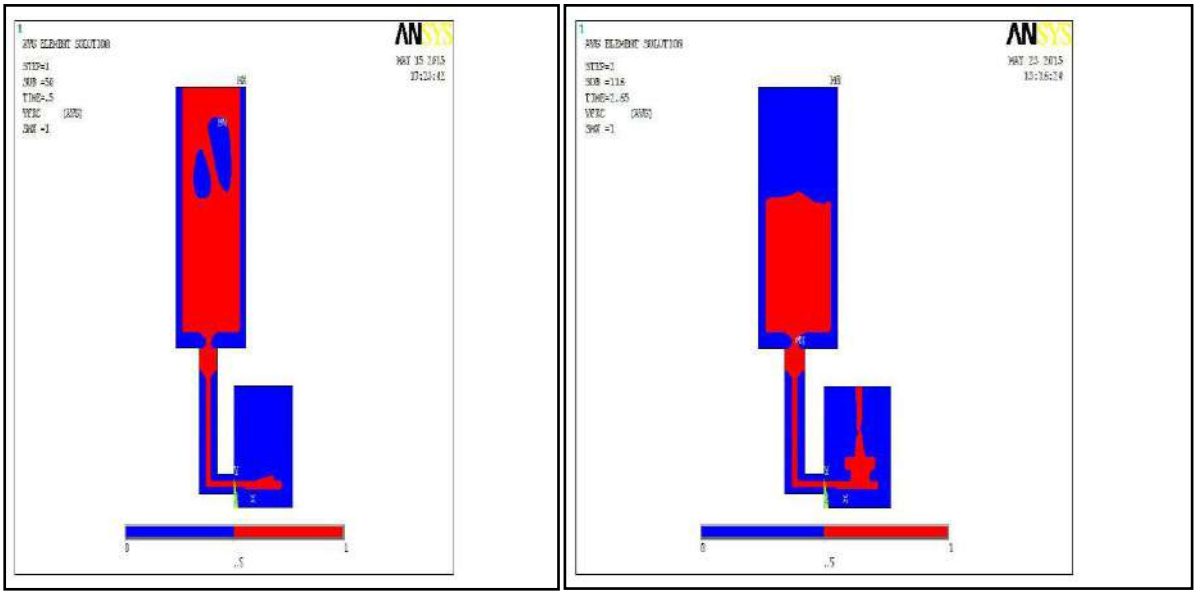
La variation de la température au cours de remplissage de moule, est montrée sur la figure (IV.2) ou on constat :

- la température et pendant un certain moment est presque constante sur les parois et à l'intérieur du moule. Pendant cette période les points témoins ne sont pas sollicités par le flux de chaleur de la coulée.
- Pour les points internes de l'empreinte et après une certaine oscillation autour 1550K, la température augmente rapidement vers une valeur max, ce qui justifie l'arrivé de la coulée, et après 0.5 seconde commence le palier de refroidissement avec une pente relativement faible.
- Pour les points externes de l'empreinte et après un certain moment la température diminue jusqu'à une valeur minimale (1470k), un refroidissement due essentiellement au condition thermique de l'environnement, alors que l'arrivé de coulé change le sens d'écoulement de la chaleur.
- Les trois graphes représente le profile de température en trois points il faut voir (page62).

Les figures (IV.4.a ; IV.4.b) affichent l'écoulement du métal dans le moule, la première affiche le modèle de Moisés M, Guilherme A. Salem, Felipe Bertelli, et
Noé Cheung et la deuxième affiche notre modèle [19].



(a)



Le temps (0.5s) **Le temps (1.36s)**

(b)

Figure (IV.4) : Volume de fraction pendant le remplissage du moule ;

a)-Modèle de Moisése M, Guilherme A. Salem, Felipe Bertelli, et Noé Cheung [19]

b)-nos simulations

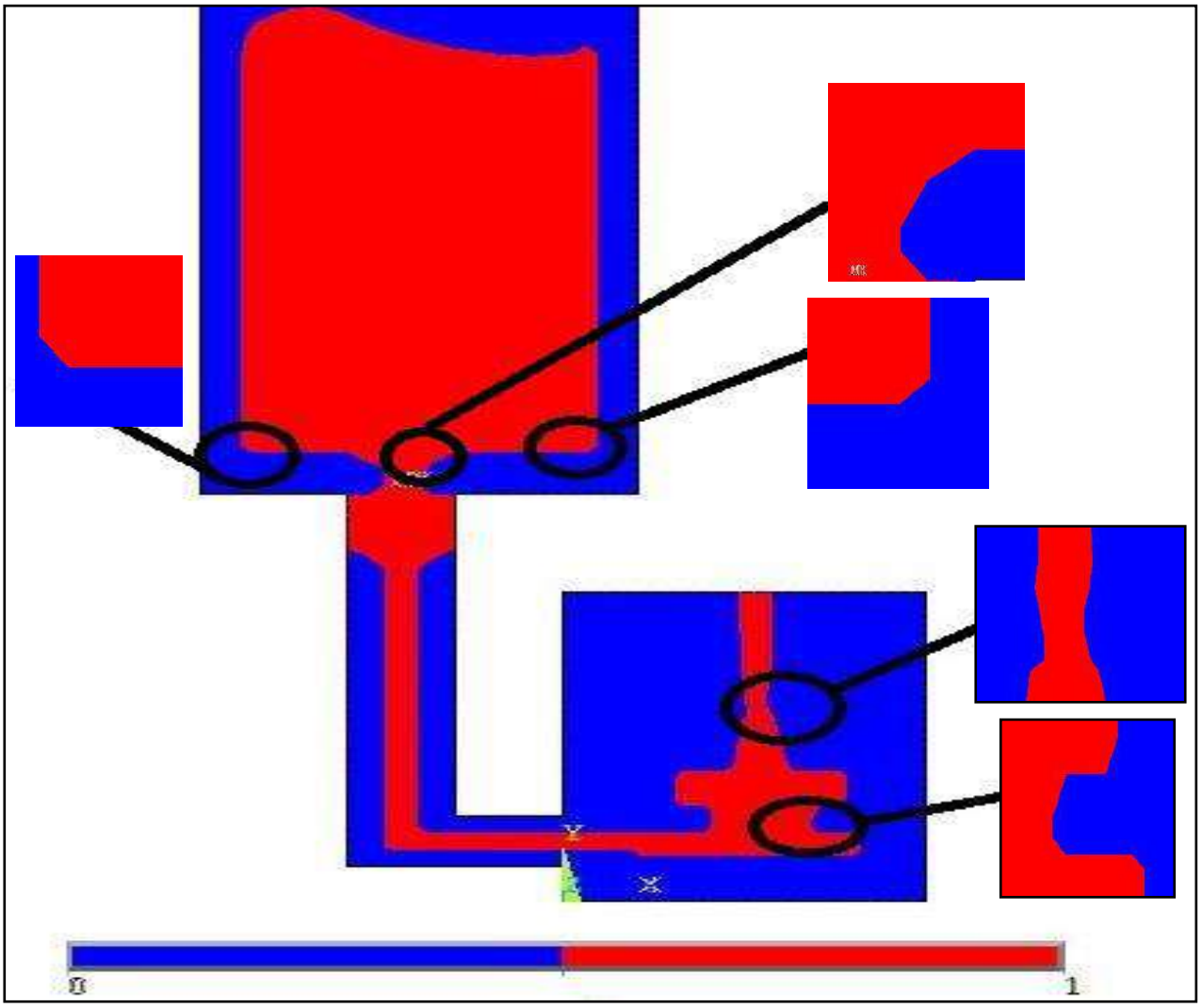
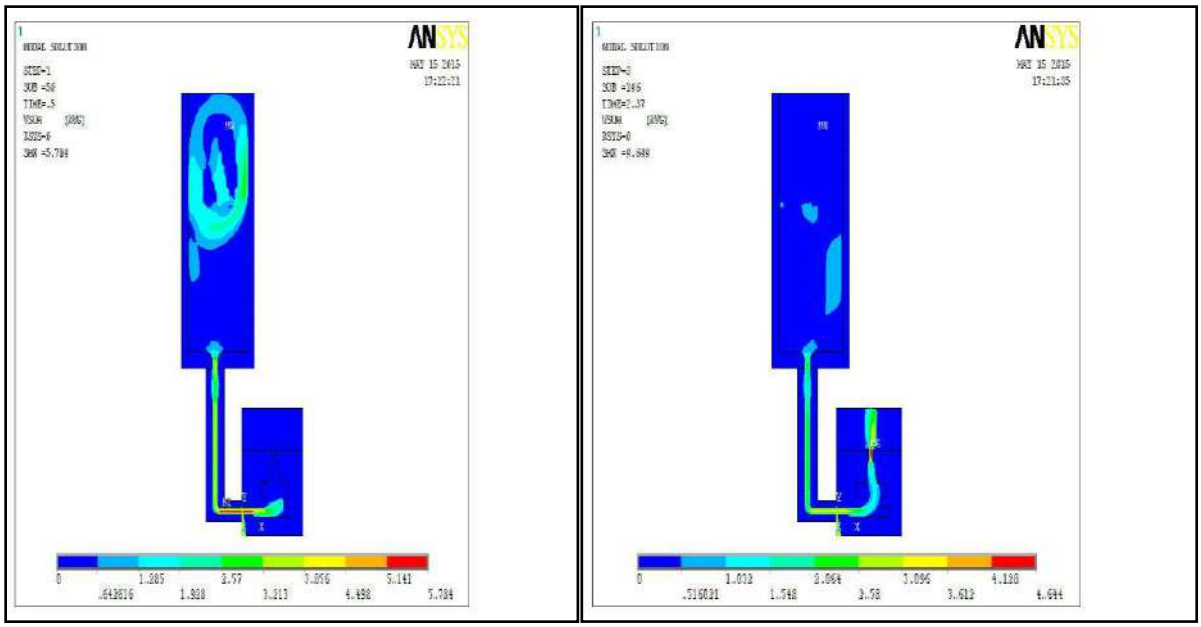


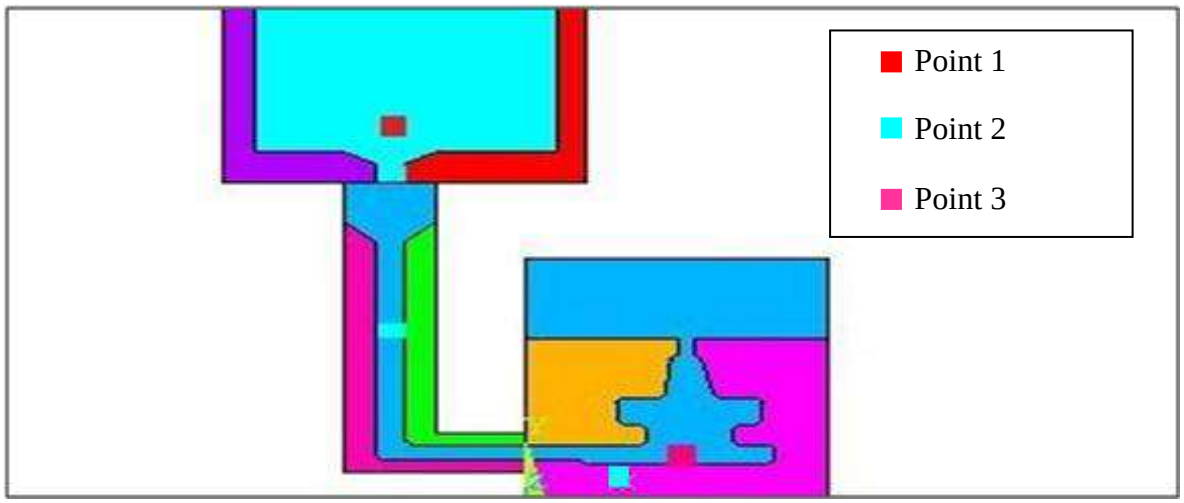
Figure (IV.5) : détection des défauts de remplissage dans l'empreinte.



Le temps (0.5s) **Le temps (2.57s)**

Figure(IV.6) : Champs de Vitesse

Pour connaître la variation des grandeurs physique (la pression, la vitesse, la température…) pour déférents zones préférable de l'empreinte, on a choisies des points différents au sein de la section de l'empreinte suivant la figure c'après.



Figure(IV.7) : Localisation des points témoins.

Après les calculs numériques, les allures de variation au cours de temps de la vitesse, pour les points témoin sont représenté sur les figures suivantes :

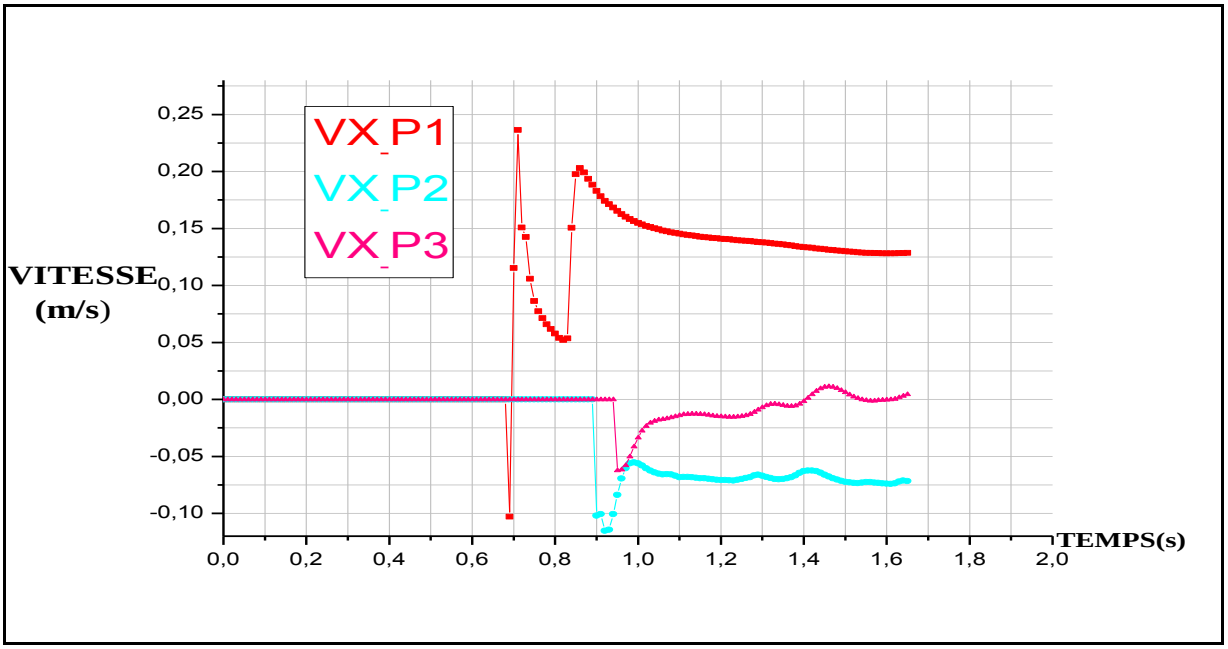
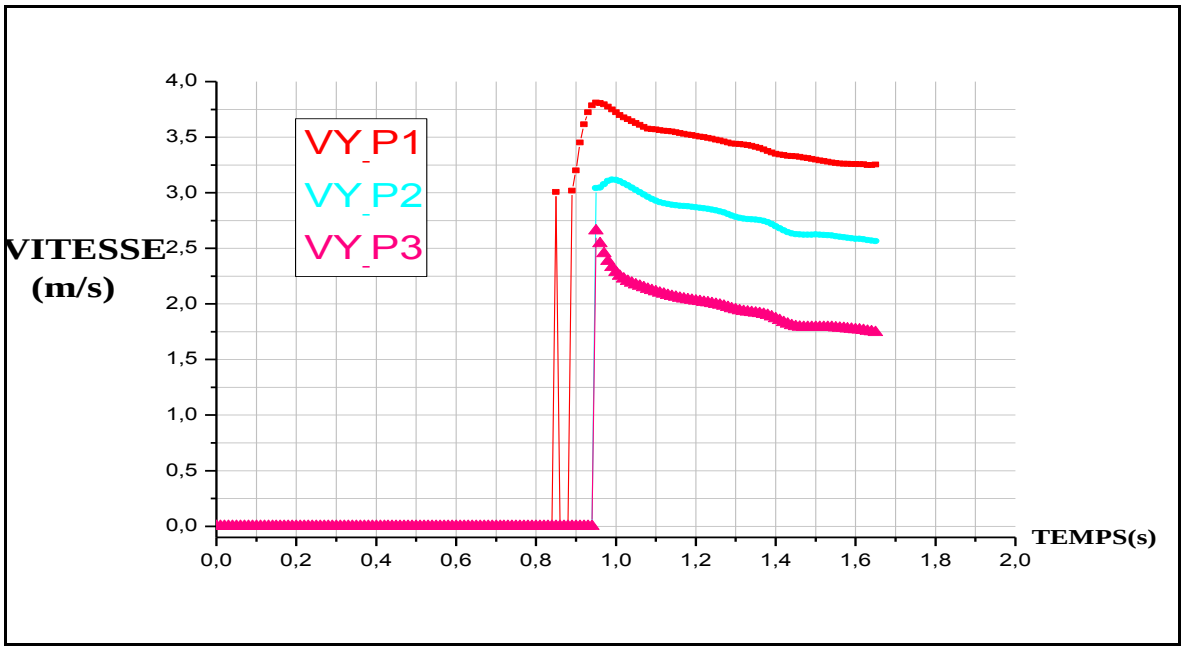
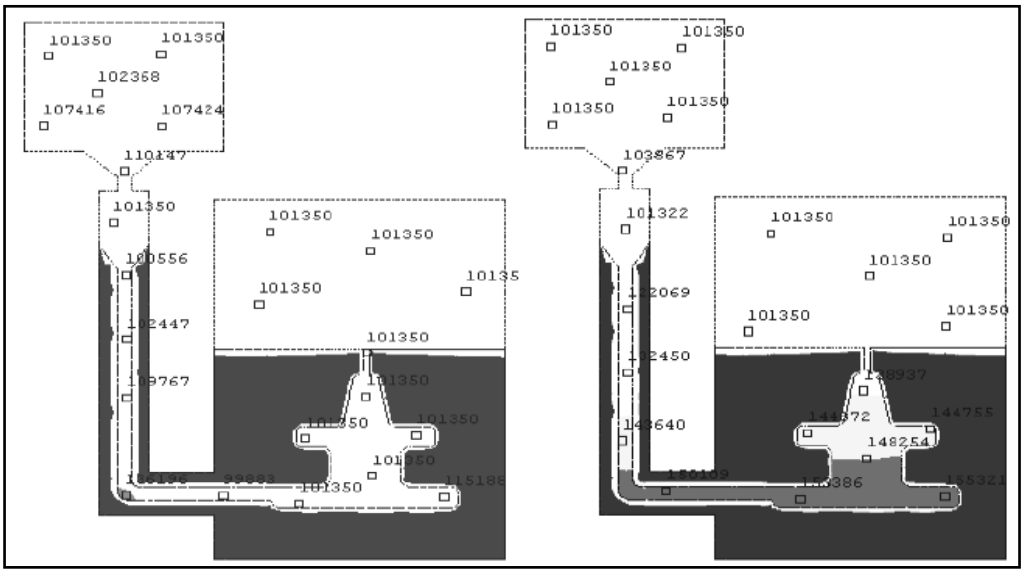


Figure (IV.8) : la variation de la vitesse(V_X) des points choisis en fonction de temps de remplissage

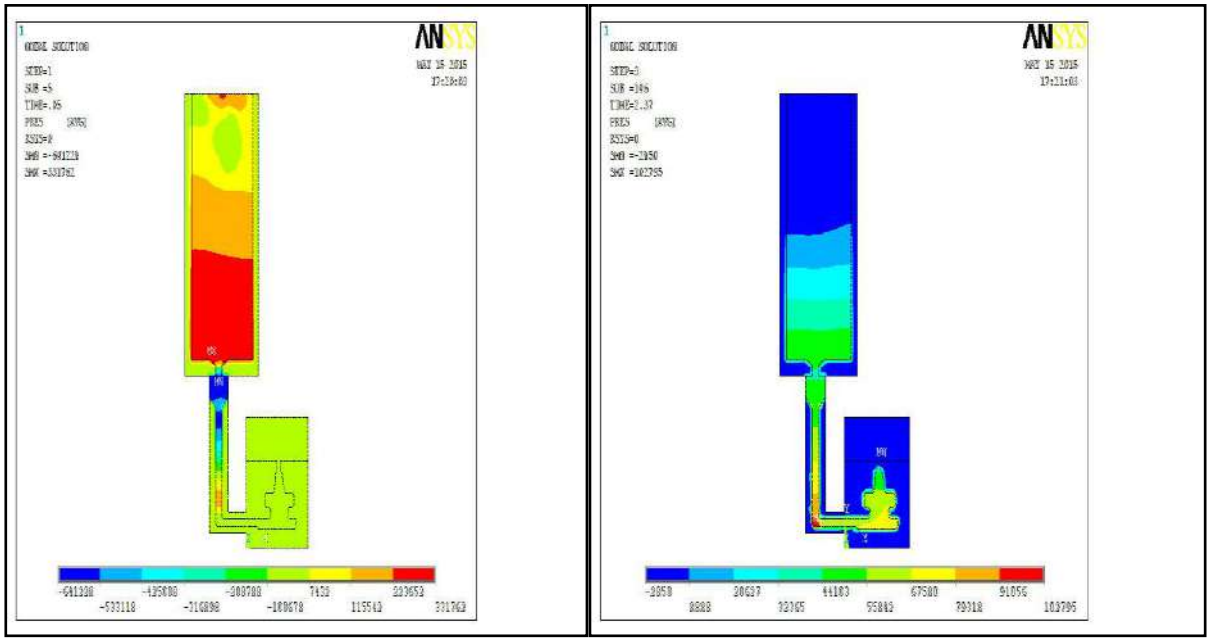


Figure(IV.9) : la variation de la vitesse(Vy) des points choisis en fonction de temps de remplissage

Les figures (IV.10.a ; IV.10.b) affichent la variation de la pression dans le moule, la première affiche le modèle de Moisés M, Guilherme A. Salem, Felipe Bertelli, et Noé Cheung et la deuxième affiche notre modèle [19].



(a)



Le temps(0.5s) **Le temps (2.57s)**

(b)

Figure(IV.10) : Representation Spatiale des Champs de pression lors du remplissage

a)-Moisés M,Guilherme A.Salem,Felipe Bertelli et Noé Cheung,[19]

b) nos résultats de simulations.

La varaition de la pression est affichée dans le moule comme elle est illustrée sur la figure(IV.10),au démarrage la valeur de la pression est 131875Pa ,et elle augmente jusqu'à une valeur maximale 331762 Pa grace à la convergence de la section .Il y a aussi une diminution jusqu'à une valeur de 102795Pa à caus de libération de liquide.

Après les calculs numériques, les allures de variation au cours de temps de le pression, pour les points témoin sont représenté sur les figures suivantes :

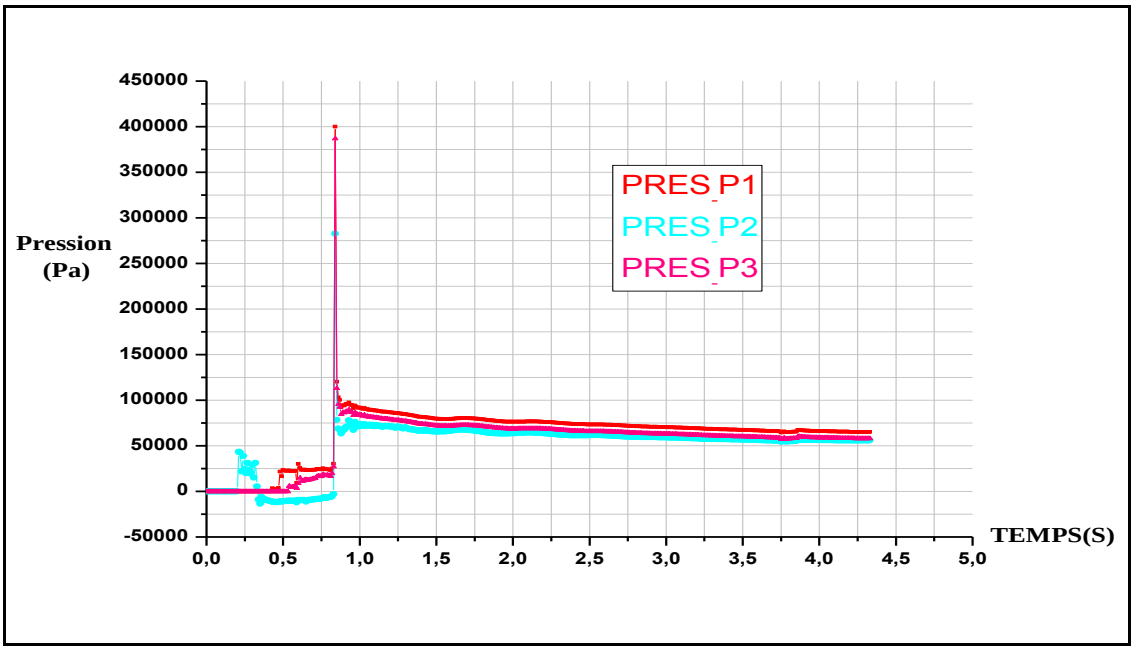


Figure (VI.11) : la variation de la pression des points choisis en fonction de temps de remplissage

IV.2.2.1. Observation des résultats :

Au début de remplissage l'écoulement est lent à cause de la diminution de la section (convergence), quand la section diminue la vitesse augmente. Le liquide continue jusqu'à le chargement complet du moule. Nous constatons aussi l'existence des zones non remplie, ils sont des défauts de bulles d'aire. Malgré la vitesse d'entré est au voisinage de (42m/s)et la vitesse de sortie au voisinage de (5.227m/s).

IV.2.2.2. Interprétation des résultats :

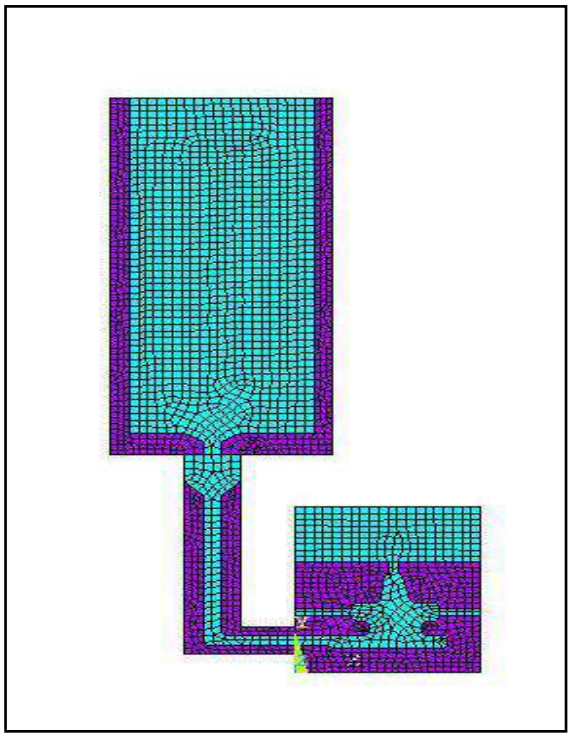
Avant le remplissage l'espace libre de moule est en contacte avec l'aire atmosphérique, et puisque le remplissage de métal au sein de moule rencontrait des arêtes de moule ce qui créer un volume d'aire qui est engendré par le métal et est former une bulle d'air, malgré le métal déplacé cette bulle d'air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

n'est pas disparaître. Ce phénomène est dit : la cavitation, il est progressé sous l'effet contact le fluide avec ces types des arrêtes.

IV.3.propositions de notre modèle :

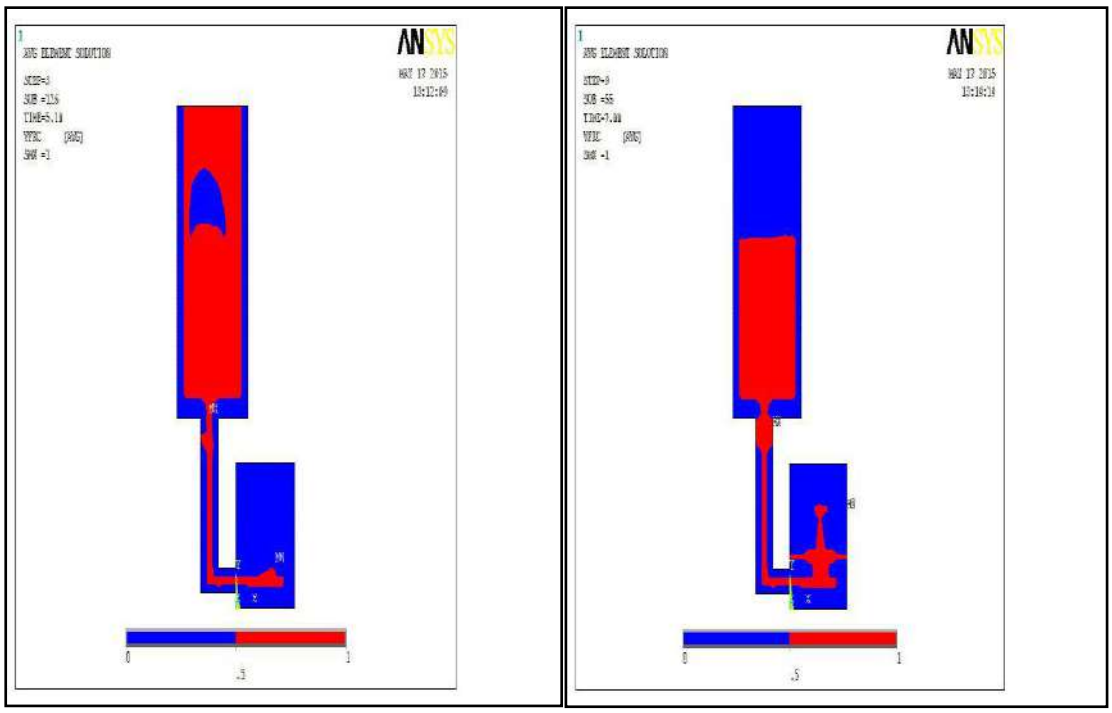
IV.3.1. Première expérience :

Dans cette expérience, nous avons quelques changements sur la géométrie précédente, et nous espérons d'éliminer les défauts de remplissage constaté précédemment, en gardons les conditions limite et initial du cas précédent.



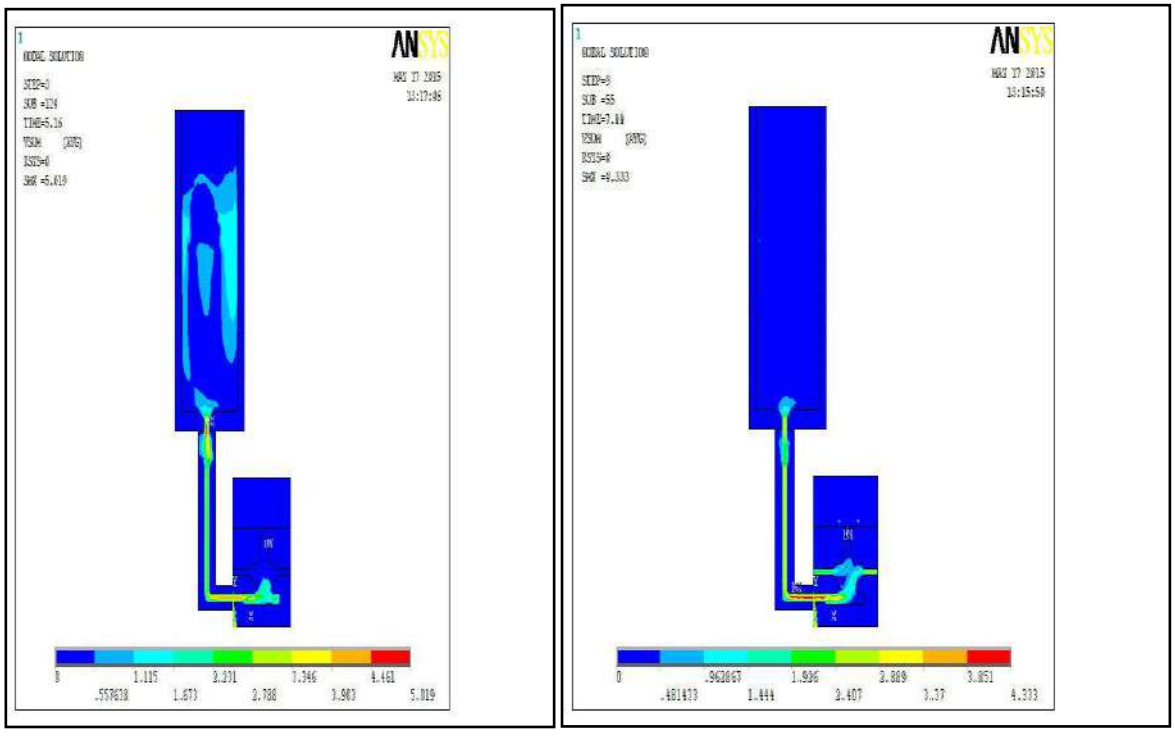
Figure(VI.12) : Géomètre et maillage de moule

D'après les calculs de simulation les résultats obtenues sont représentés sur la figure si après.



Le temps (5.16s) **Le temps (7.85s)**

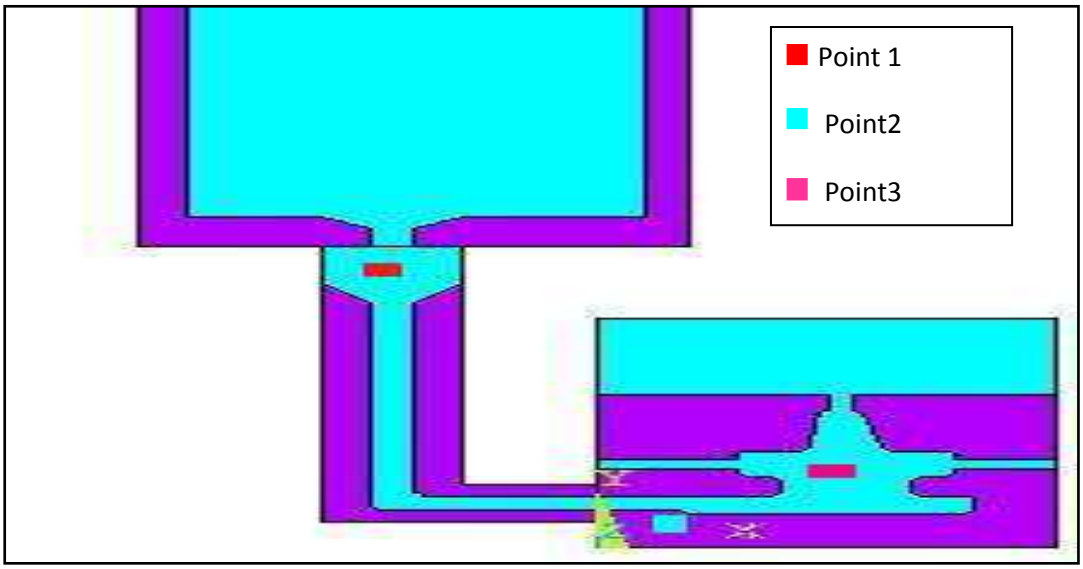
Figure(IV.13) : Volume Fraction



Le temps (5.16s) **Le temps (7.88s)**

Figure(IV.14) : Champ de Vitesse

Pour connaître la variation des grandeurs physique (la pression, la vitesse, la température…) pour déférents zones préférable de moule, on a choisies des points différents au sein de la section de l'empreinte suivant la figure ci-après.



Figure(IV.15) : Localisation des points témoins.

Après les calculs numériques, les allures de variation au cours de temps de la vitesse, pour les points témoin sont représenté sur les figures suivantes :

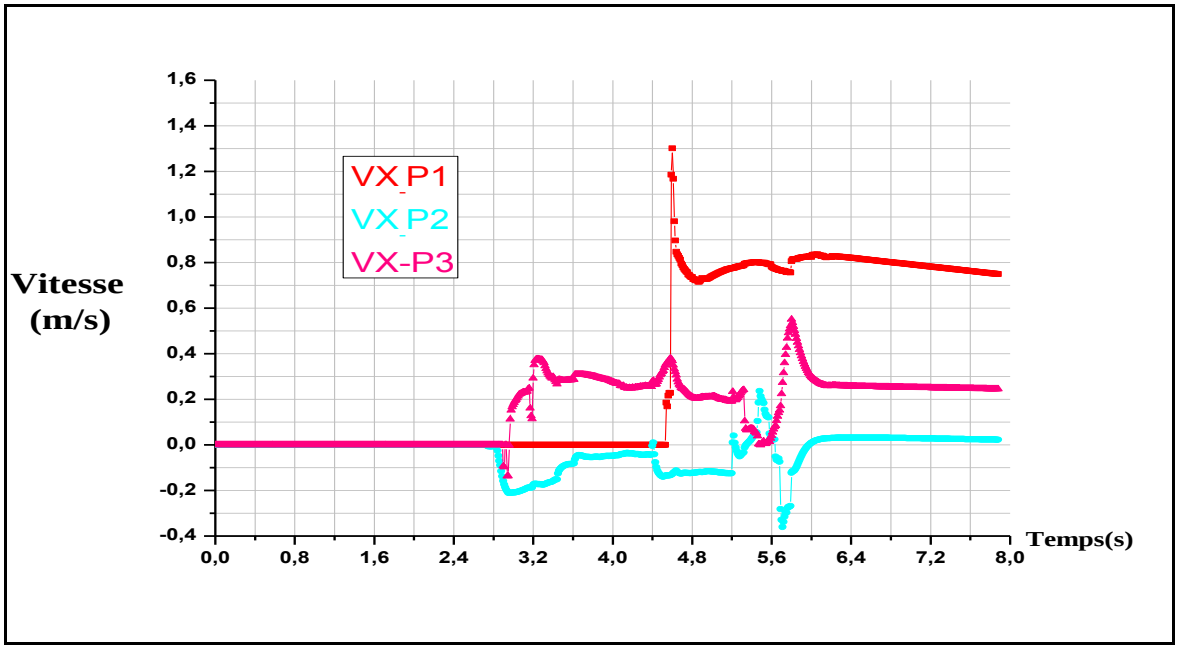


Figure (IV.16) : la variation de la vitesse (Vx) des points choisis en fonction de temps de remplissage

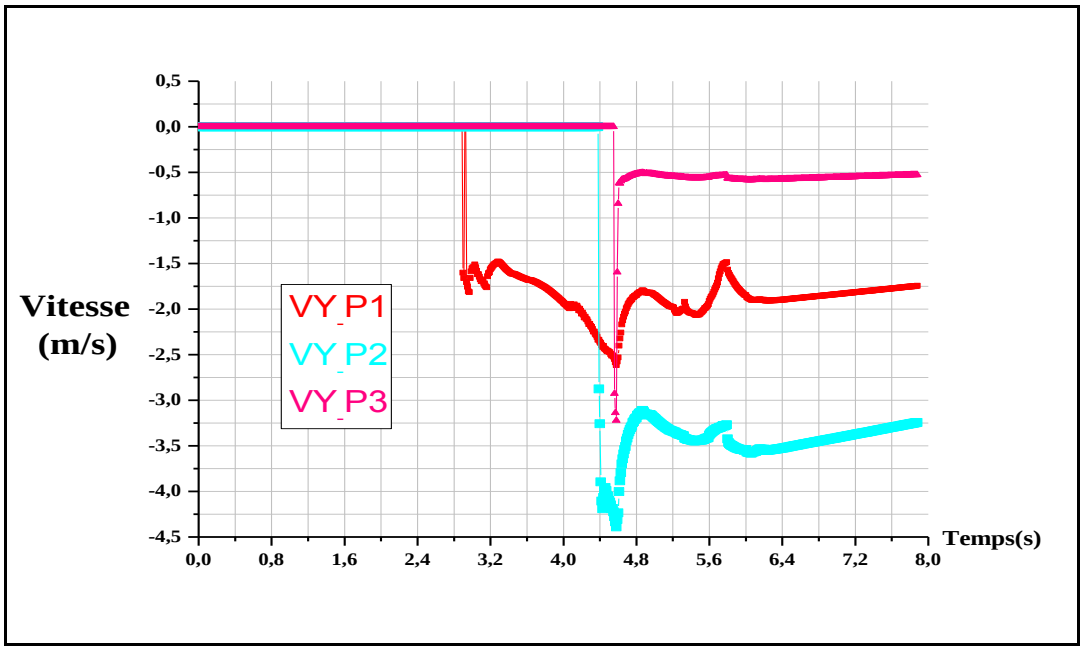
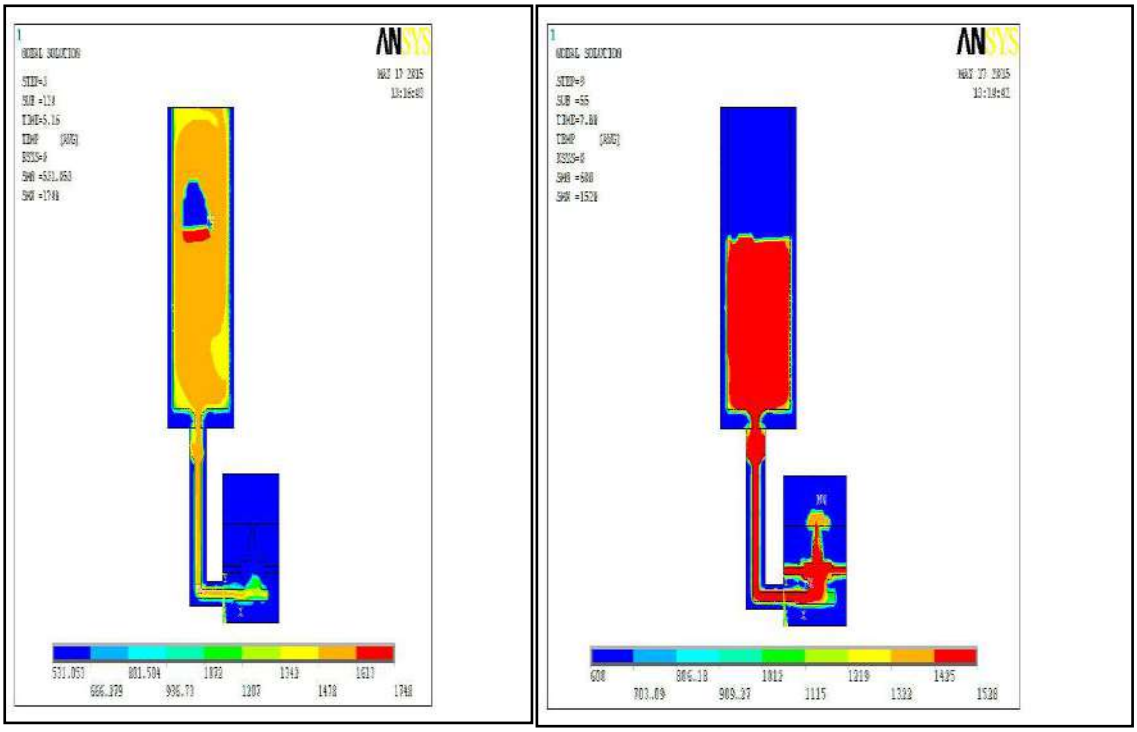


Figure (IV.17) : la variation de la vitesse (Vy) des points choisis en fonction de temps de remplissage



Le temps (5.16s) **Le temps (7.88s)**

Figure(IV.18) : La variation de température

Après les calculs numériques, les allures de variation au cours de temps de la température, pour les points témoin sont représenté sur les figures suivantes :

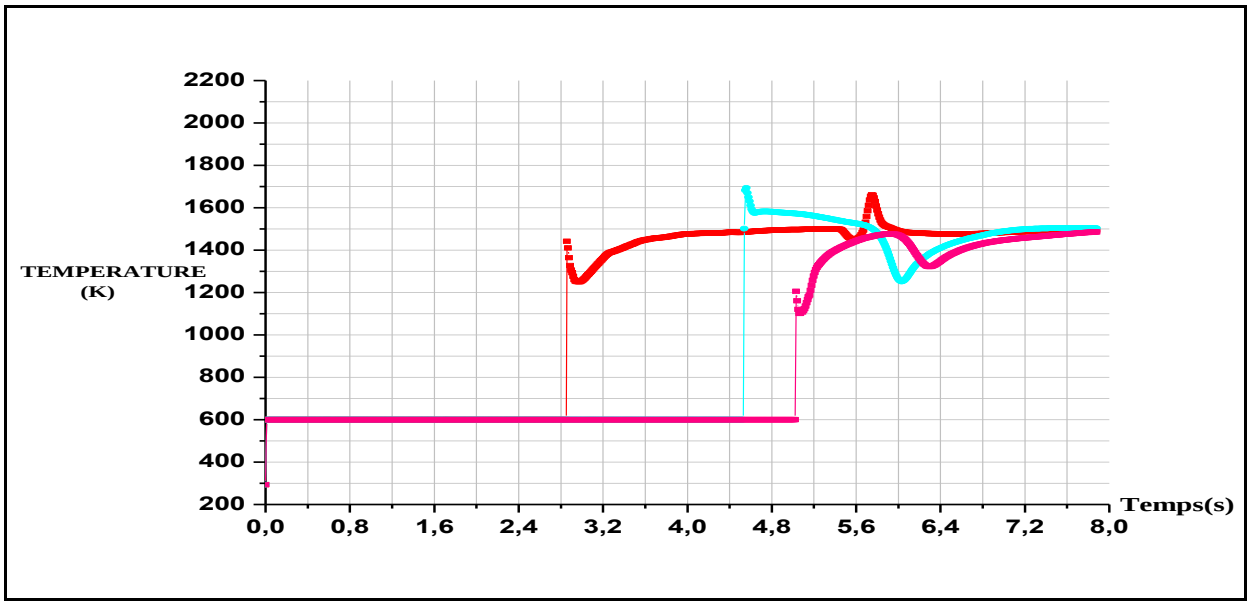
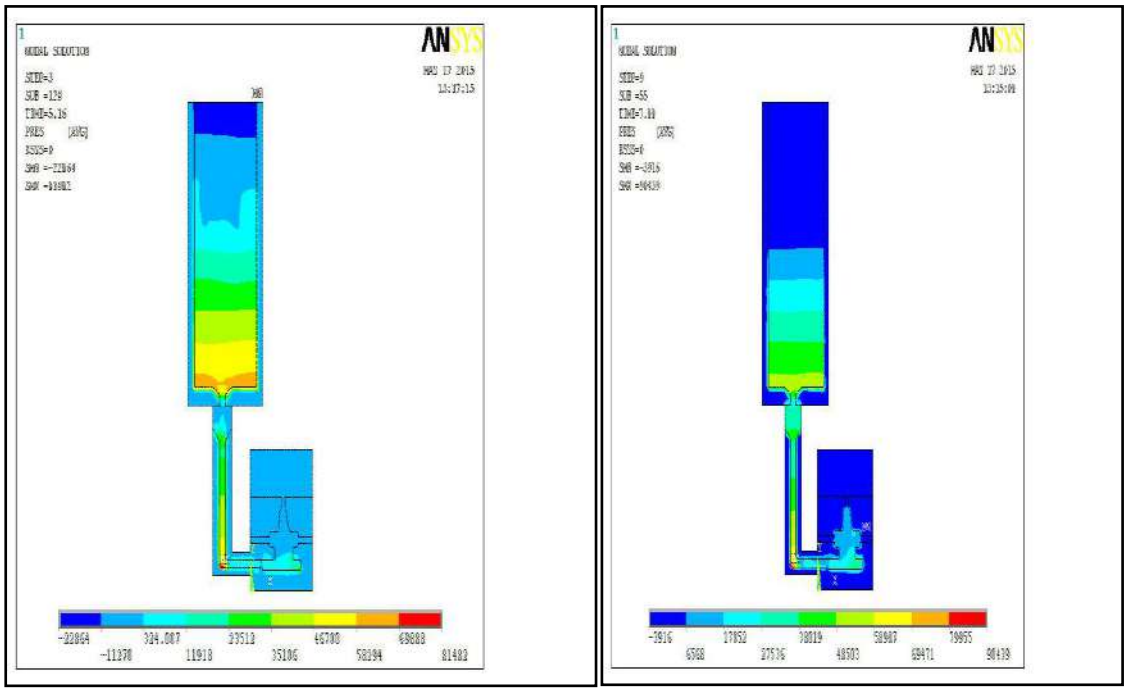


Figure (IV.19) : la variation de la température des points choisis en fonction de temps de remplissage

La variation de la température au cours de remplissage de moule, est montrée sur la figure (IV.18) la température est presque constante sur les parois et à l'intérieur du moule, mais elle augmente jusqu'à 1528K grasse à la convergence de la section.



Le temps (5.16s) **Le temps (7.88s)**

Figure(IV.20) : Champ de Pression

La varaition de la pression est affichée dans le moule comme elle est illustrée sur la figure(IV.10),au démarrage la valeur de la pression est 131875Pa ,et elle augmente jusqu'à une valeur maximale 90439 Pa grace à la convergence de la section .

On a obtenues le graphe suivant :

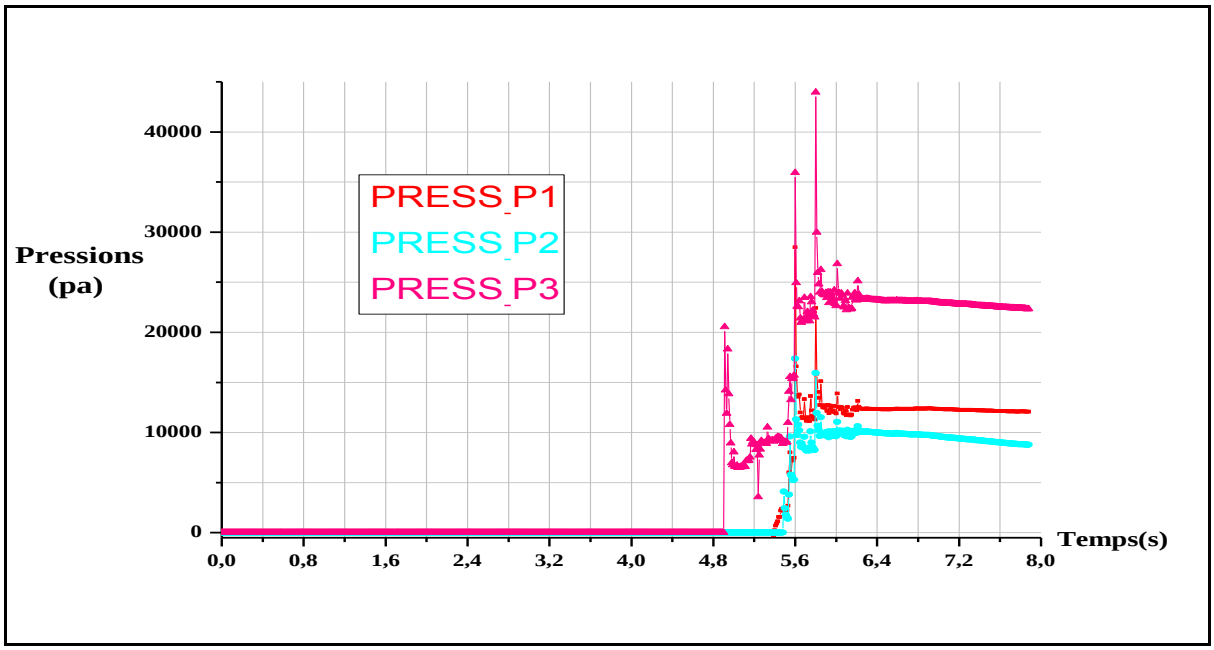


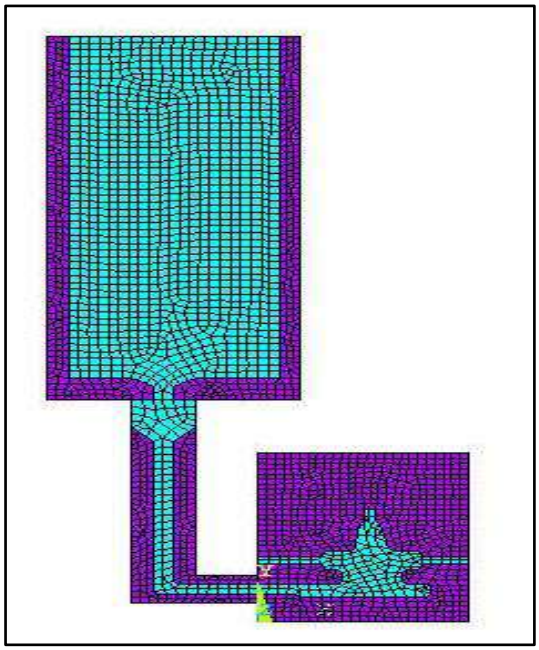
Figure (IV.21) : la variation de la pression des points choisis en fonction de temps de remplissage

IV.3.1.1. Observation des résultats de 1ere expérience :

Dans cette expérience, l'écoulement est lent à Caus de la diminution de la section (convergent), mais quand la section diminue la vitesse diminue. Mais elle est prendre un peut de temps plus que la première (7.88s), Malgré la vitesse d'entré est au voisinage de (420m/s)et la vitesse de sortie au voisinage de (4.333m/s).

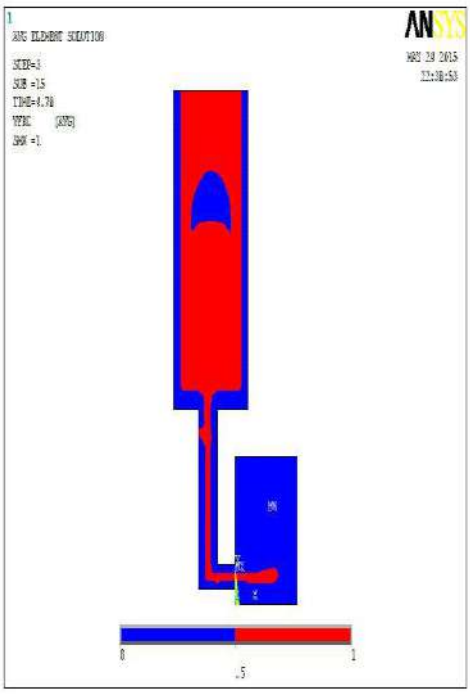
IV.3.2. Proposition une 2emeexpérience:

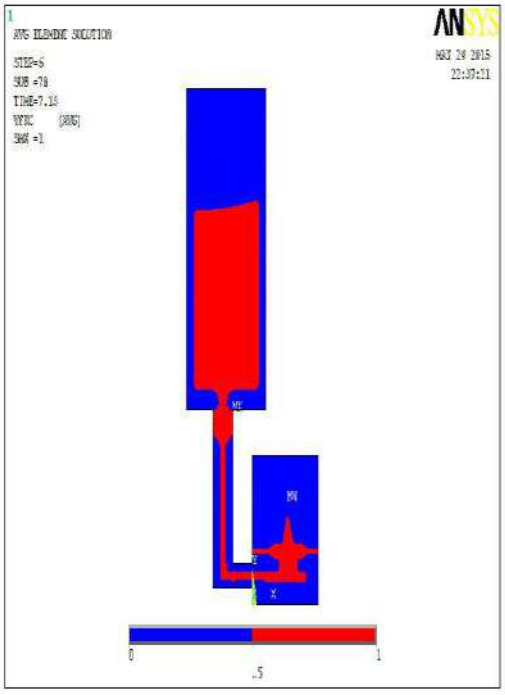
Dans la deuxième expérience, nous avons eu quelques changements dans la géométrie de la première à l'expérience. Afin de savoir ce qui va arriver à des moyens de changements. Aussi bien dans ses caractéristiques, les conditions initiales (vitesse, température et pression).Comme le montre la Figure (IV.22).



Figure(IV.22) : Géométrie et maillage de moule

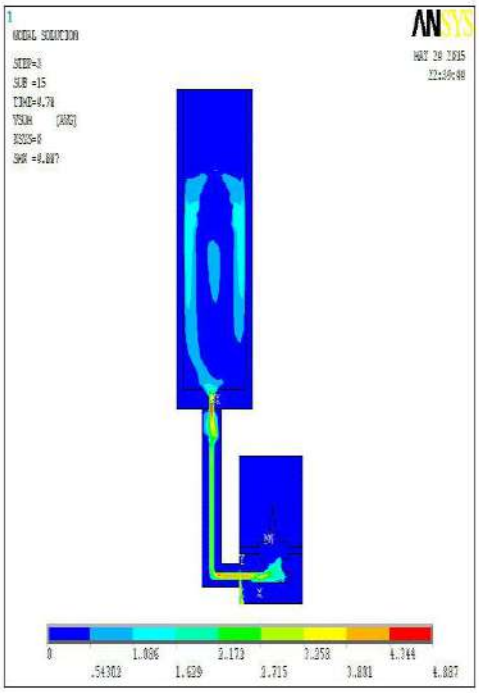
D'après les calculs de simulation les résultats obtenues sont représentés sur la figure si après.

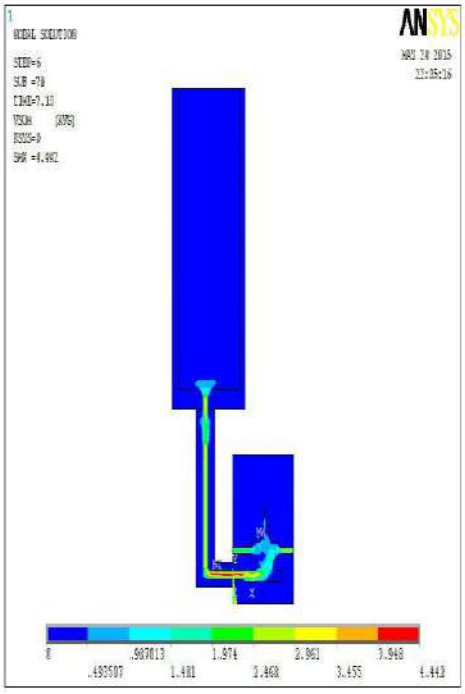




Le temps (4.78s) **Le temps (7.13s)**

Figure (IV.23) : Volume Faction.

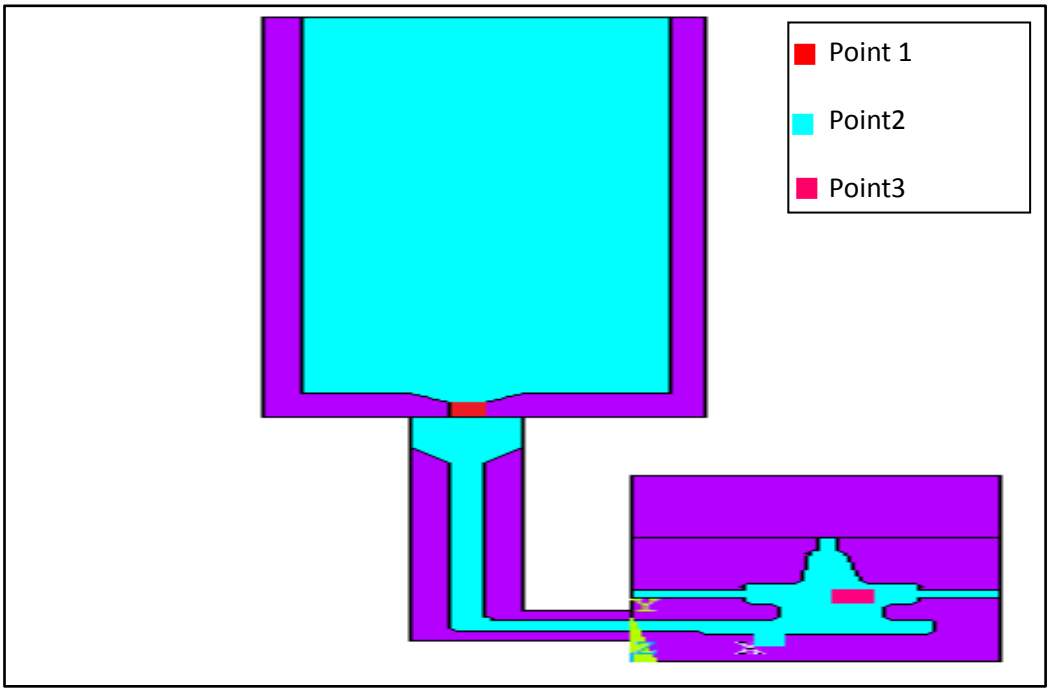




Le temps (4.78s) **Le temps (7.13s)**

Figure (IV.24) : Champ de Vitesse

Pour analyser les résultats de la simulation obtenue pour cette expérience on a choisie des points témoins et qui sont représenté sur la figure ci-après :



Figure(IV.25) : Localisation des points témoins.

Après les calculs numériques, les allures de variation au cours de temps de la vitesse, pour les points témoin sont représenté sur les figures suivantes :

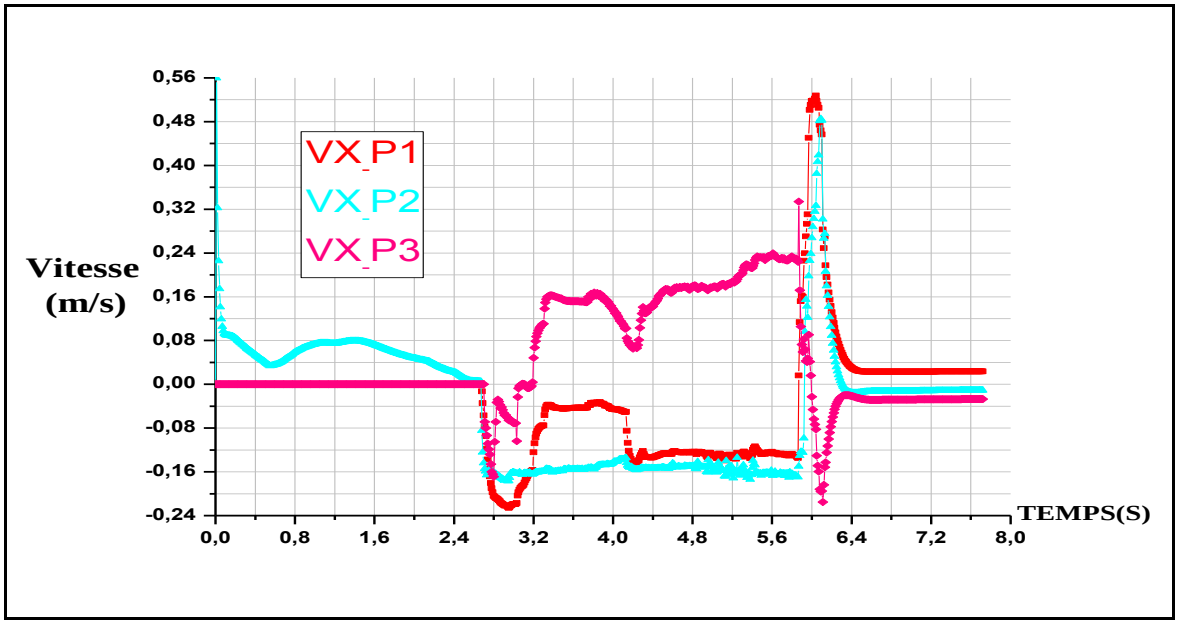


Figure (IV.26) : la variation de la vitesse (Vx) des points choisis en fonction de temps de remplissage

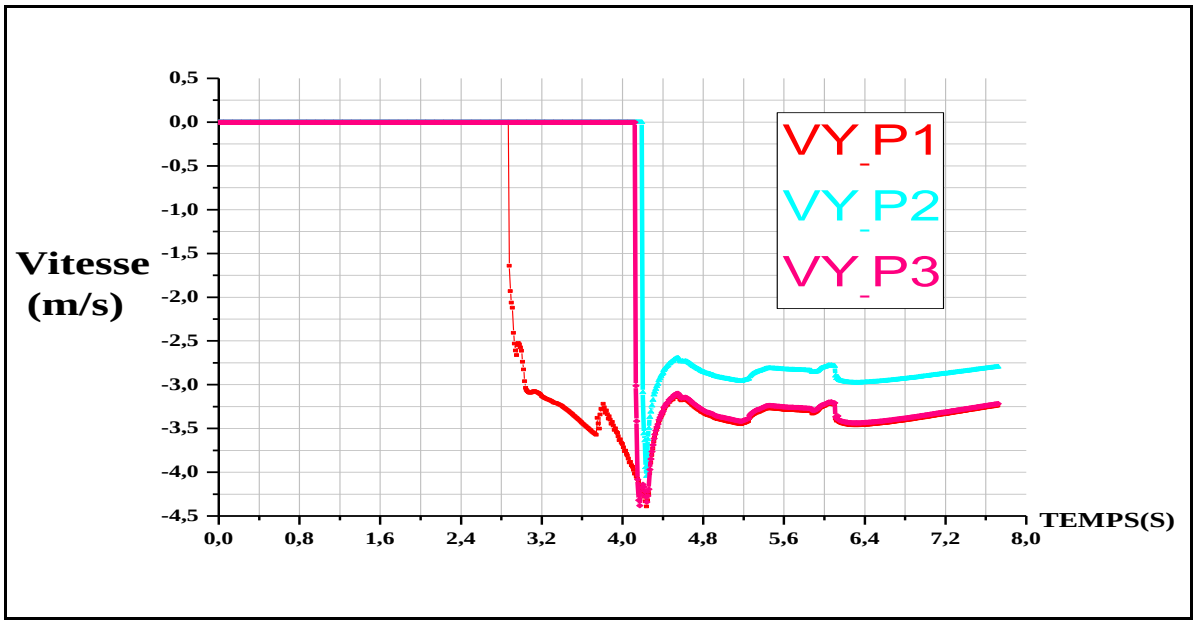
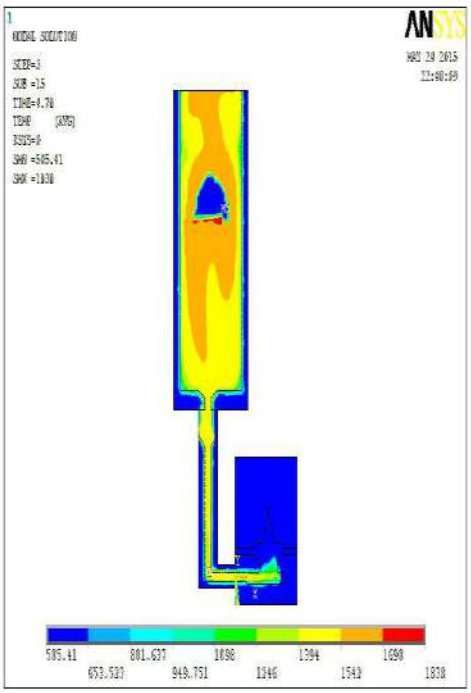
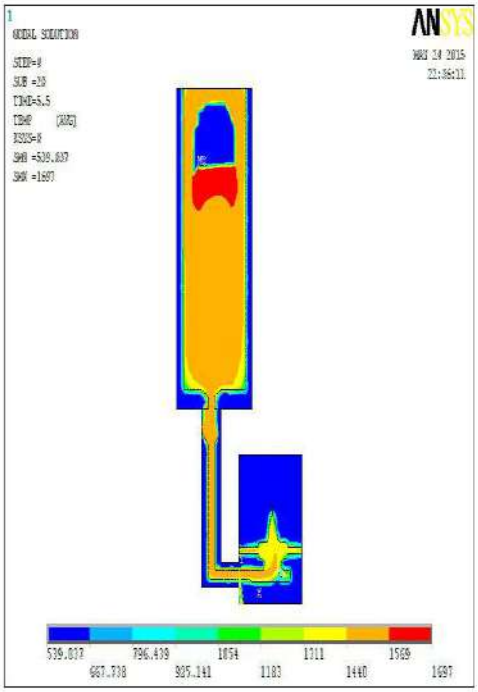


Figure (IV.27) : la variation de la vitesse(Vy) des points choisis en fonction de temps de remplissage



Le temps (5.78s)



Le temps (7.13s)

Figure(IV.28) : Champ de Température

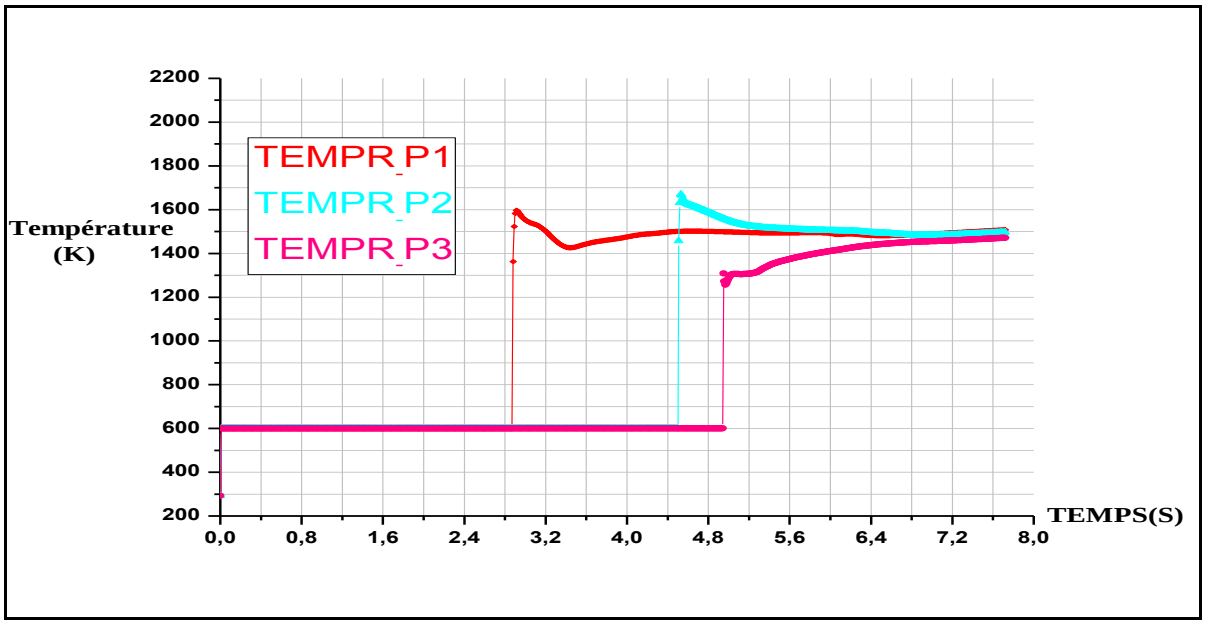
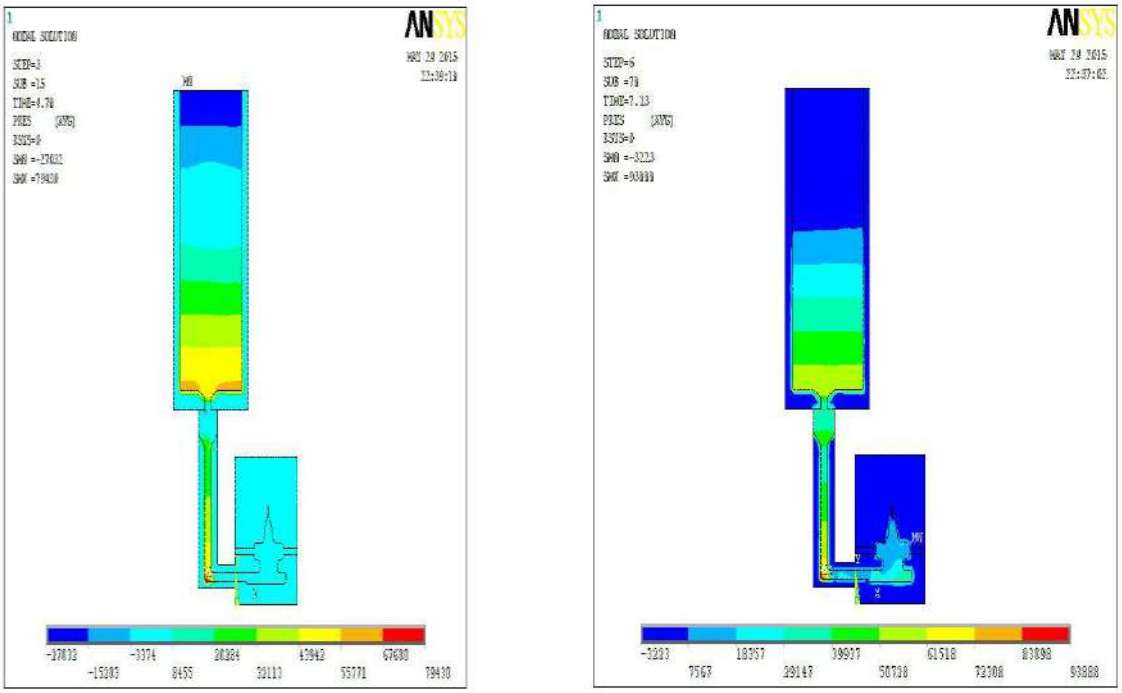


Figure (IV.29) : la variation de la température des points choisis en fonction de temps de remplissage



Le temps (5.78s) **Le temps (7.13s)**

Figure (IV.30) : Champ de Pression

Après les calculs numériques, les allures de variation au cours de temps de la pression, pour les points témoin sont représenté sur les figures suivantes :

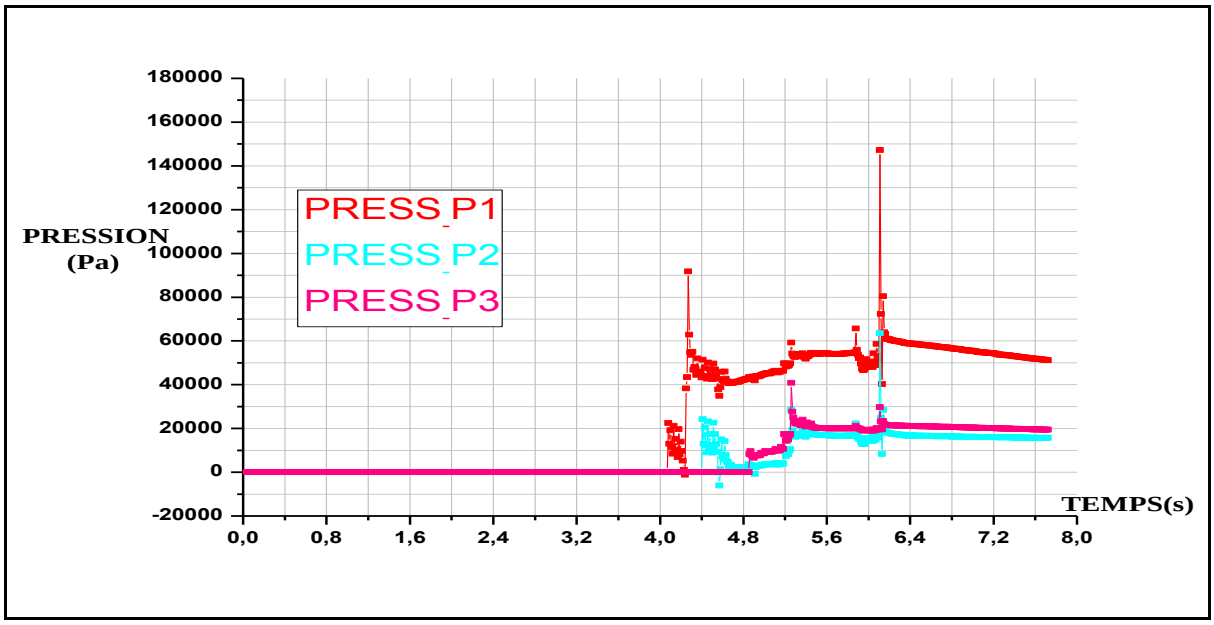


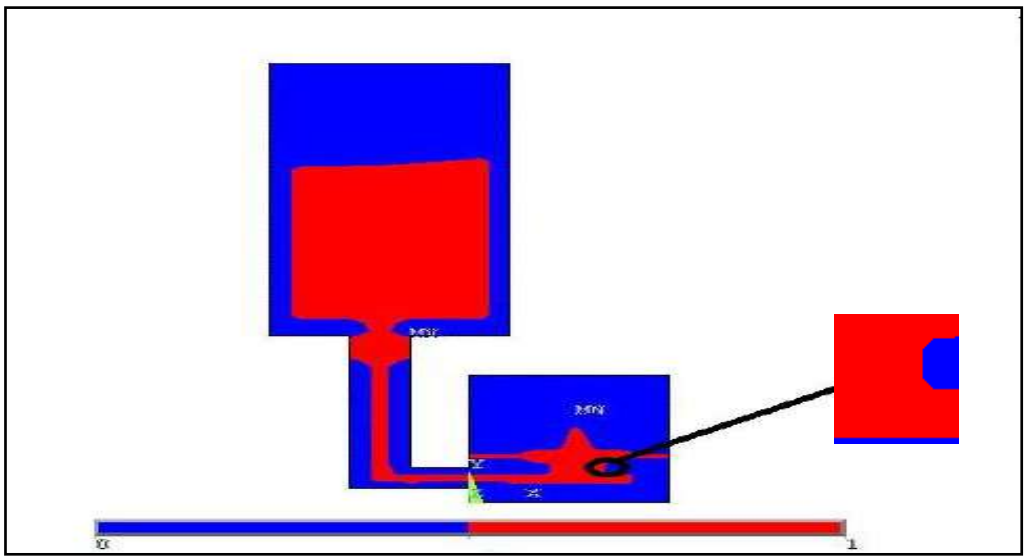
Figure (IV.31) : la variation de la pression des points témoins en fonction de temps de remplissage

VI.3.2.1. Interprétation des résultats 2 eme expérience:

On remarque que le métal liquide pénètre dans le moule et commence à se refroidir, ce qui influe d'un par sur la viscosité du métal et d'autre part sur la solidification avancée du métal. Cela peut être expliqué par l'effet thermique entre le métal liquide et l'air qui se trouve dans le moule où le gradient de température augmente au niveau de moule et la viscosité augmente, donc automatiquement la vitesse du métal diminue.

Ces résultats prouvent qu'on ne peut pas négliger l'effet de la pression, car elle influe sur le comportement thermique du métal, du fait qu'est couplé. Pour éviter cette solidification avancée, il faut remplie le métal liquide soit aussi rapide que possible, mais sans dépasser la vitesse optimale pour éviter l'emprisonnement d'air.

Après la comparaison entre les deux expériences proposées on constats que la solution proposée basé sur le principe de ventouse à éliminer les défauts remarquer et visualiser lors de la première expérience, Comme le montre la Figure (IV.32).



Figure(IV.32) : l'élimination des défauts de remplissage dans l'empreinte.

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'ou les résultats obtenus permettent la bonne compréhension.

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

Dans ce mémoire, on a mené une étude numérique de remplissage du moule .une modélisation du problème, en 2D, a été menée utilisation le code ANSYS, qui se 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.

Dans une première partie, nous avons exposé les bases théoriques du transfert de chaleur et de mécanique de fluide, ensuite nous avons fait une formulation numérique par la méthode des éléments finis.

En dans la deuxième partie, nous avons présenté les résultats de la simulation numérique du remplissage de l'alliage de (Cu, 5%Zn) dans un moule en acier a été réalisée. aussi présenté les résultats de notre modèle, en insistant plus particulièrement sur le paramètre de dynamique de remplissage et les champs température, de pression dans le moule, et représenté les graphs de variation de la pression, température, et la vitesse de différente position fonction de temps.

Sur la base des résultats de L'ANSYS, en peut dire que l'avantage de la simulation est d'analyser plusieurs phénomènes présentes dans le processus de remplissage du moule afin de mieux comprendre et de mieux analyser ces phénomènes, et qui est affecté certainement sur la qualité de 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.

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.

Perspectives d'avenir :

Après avoir arrivé à un taux de remplissage de 72% ce que on désire alors on propose deux modification pour arrive a un taux remplissage de 100%.

- les deux expériences proposées on constats que la solution proposée basé sur le principe de ventouse à éliminer les défauts remarquer et visualiser lors de la première expérience.

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] –Les site :

*http://www.google.moulage.dz.

*http://www.google.moulagesouspression.fr.

*http://www.google. défauts de moulage.fr.

*http://www.google.transfert de chaleur .convection.fr

*http://www.google.méthode volume of fluide.fr

*http://www.google.les méthodes numériques.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]- Moisése M, Guilherme A. Salem, Felipe Bertelli, et Noé Cheung**,** Pós-graduaçao en Engenharia e Ciencia de Materiasa e Estatistica,Universaide Estadual de ponta Grossa,UEPG Campus Uvaranas Bloco GIPP Laboratorio LIMAC ,CEP :84030900,Ponta,PR,Brazil , article(2008),28(2):99-110.