الجمهـــوريـــة الـجـزائـريـة الـديـمـقـراطـيـة الـشـعـبـيـة

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA
FACULTE DES SCIENCES ET DE LA T E C H N O L O G I E

Département de Génie Mécanique

Mémoire de Fin d'Études

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

Option **: Energétique**

Simulation numérique EF/VOF de l'effet du champ magnétique sur le développement des défauts d'occlusion d'air provoqué par le remplissage du métal liquide

Proposé et dirigé par :

Pr. Zirari Mounir
Dr. Tahar Souad

Préparé et présenté par :
Mr. **MEHLOUL RABAH**
Mr. **FADHLOU SOFIANE**

Année universitaire 2024 – 2025

Remerciements

Nous tenons d'abord à présenter nos profondes gratitudes à Allah le Tout-Puissant qui nous a donné l'opportunité de mener à bien ce travail. Nous remercions également notre promoteur professeure. ZIRARI MOUNIR et Dr. Tahar Souad pour le soutien et l'accompagnement qu'il nous a guidés, durant toute la période de réalisation de ce projet, sans oublions les membres de jury pour leur participation dans le jugement de ce travail, ainsi que tous nos professeurs, pour l'aide inconditionnel que nous avons reçu durant toutes les années d'étude à l'université de Médéa. Nous remercions sincèrement tous ceux qui nous ont encouragé et contribué de près ou de loin dans la préparation de ce projet.

Médéa, juin 2025

& Fadhlou S & Mehloul R

Dédicace

C'est avec une grande gratitude que je dédie ce modeste travail :

A mes chers parents, la chose la plus précieuse que j'ai dans cette vie, en espérant que Dieu les gardera comme une couronne sur ma tête et les protègeront se ses soins.

A ma petite famille ; ma femme et mes enfants pour leurs soutien sans faille.

A ma sœur, mes frères et mes amis sans cité les noms merci pour votre soutien et pour votre présence précieuse à chaque étape de ma vie.

J'espère que cette dédicace reflète ma profonde gratitude envers vous tous pour votre soutien et votre contribution à ma réussite.

Avec tous mes gratitudes et mes sincères remerciements.

Mehloul Rabah

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à la mémoire de celui qui fut un pilier dans ma vie, la voix de la sagesse, à celui que la mort a arraché à notre regard, mais jamais à notre cœur ni à nos pensées mon cher père, qu'Allah lui accorde Sa miséricorde.

À ma mère bien-aimée, celle qui a tant peiné et sacrifié sans jamais faillir, qui nous a tout appris et continue de nous inspirer, celle qui nous a transmis la patience et la force face aux épreuves de la vie.

À mes frères chers à mon cœur : Hannachi, Saïd, Malki, Samir, ainsi qu'à leurs familles respectives.

À mon plus jeune frère, Soheyb.

À mes enfants, Adam et Idriss, sources constantes de motivation et d'espoir.

Et enfin, à leur mère, mon épouse, dont le soutien indéfectible, la patience et la présence à mes côtés dans les moments les plus difficiles ont été essentiels pour que je puisse reprendre et achever ce parcours académique.

Fadhlou Sofiane

Résumé :

Ce projet de fin d'étude vise à simuler numériquement le remplissage d'un moule en alliage métallique afin de réduire ou d'éliminer complètement les défauts résultant du processus de coulée du moule. Cela se fait en utilisant la méthode VOF. Les logiciels basés sur la méthode des éléments finis ont été utilisés pour analyser les diagrammes de simulation pendant la coulée. Les valeurs de la densité, de la conductivité thermique et de la chaleur spécifique du métal liquide et de solide ont été utilisés comme valeurs constantes, et l'état de turbulence a été défini comme le modèle k-ε.

Les résultats de la simulation lors de l'analyse des phénomènes après le processus de coulée ont montré l'importance de l'utilisation du champ magnétique a pour but d'éliminer ou déminuer les défauts d'occlusion d'air pendant un remplissage du métal liquide.

Mots clés : Simulation numérique, méthode des éléments finis, moulage sous pression et volume de fluide (VOF), champ magnétique.

Abstract:

This final year project aims to numerically simulate the filling of a metal alloy mold in order to reduce or completely eliminate defects resulting from the mold casting process. This is done using the VOF method. Finite element method software was used to analyze the simulation diagrams during casting. The density, thermal conductivity, and specific heat of the liquid and solid metals were used as constant values, and the turbulence state was defined as the k-ε model.

The simulation results during the analysis of phenomena after the casting process demonstrated the importance of using a magnetic field to eliminate or minimize air entrapment defects during liquid metal filling.

Keywords: Numerical simulation, finite element method, die casting and volume of fluid (VOF), magnetic field.

ملخص:

يهدف مشروع التخرج هذا إلى إجراء محاكاة عددية لعملية ملء قالب بسبيكة معدنية، بهدف الحد من العيوب الناتجة عن عملية الصب أو القضاء عليها. لتحقيق ذلك، تم اعتماد طريقة حجم السائل (VOF) لتتبع الواجهة بين الطورين، بالإضافة إلى استخدام طريقة العناصر المحدودة لتحليل نتائج المحاكاة أثناء مرحلة الصب. تم التعامل مع خصائص المادة مثل الكثافة، والموصلية الحرارية، والسعة الحرارية للمعدن في حالته السائلة والصلبة كقيم ثابتة، كما تم اعتماد نموذج الاضطراب k-ε لتمثيل الحالة المضطربة للتدفق.

أظهرت نتائج المحاكاة أن إدخال مجال مغناطيسي أثناء عملية الصب يساهم بشكل فعّال في تقليل عيوب احتباس الهواء، مما يعزز جودة القطع المصبوبة.

الكلمات المفتاحية :المحاكاة العددية، طريقة العناصر المحدودة، الصب في القوالب، حجم السائل(VOF) ، المجال المغناطيسي .

SOMMAIRE

LISTE DES FIGURES I

LISTE DES TABLEAUX II

Nomenclature III

INTRODUCTION GENERALE 4

PROBLEMATIQUE : 6

ETAT DE L'ART : 6

CHAPITRE I GENERALITE SUR LE MOULAGE

I.1 Introduction : 9

I.2 Le Moulage : 9

I.2.1 Généralité sur le moulage : 10

I.2.2 Classification de moulage 12

I.2.3 Possibilité et avantage des moulages 13

I.2.4 Les inconvénients du moulage : 13

I.2.5 Types du procédé de moulage : 14

I.3 Mécanisme de moulage : 14

I.3.1 3-1. Moulage en sable : 14

I.3.2 Moulage en cire perdue : 16

I.3.3 Moulage mécanique 17

I.3.4 Moulage en moule métalliques 17

I.4 Configuration expérimentale 27

I.4.1 Dimensions du moule 27

I.4.2 Procédure expérimentale 28

I.5 Effet du champ magnétique pendant le processus de remplissage dans le moulage : 29

I.5.1 Définition plus fondamentale du champ magnétique : 29

I.5.2 Relation entre courant électrique et champ magnétique : 30

I.5.3 Simulations numériques : 31

I.5.4 Matériaux ferromagnétiques : 31
I.6 Défauts de moulage : 32
I.6.1 Défauts formés pendant le retrait de solidification : 32
I.6.2 Défaut du aux gaz : 33
I.6.3 Défaut du au matériau avec lequel est réalisé le moule : 34
I.6.4 Défaut formé pendant le remplissage du moule : 34
I.6.5 Défaut de construction : 34
I.7 Conclusion : 35

CHAPITRE II FORMULATION MATHEMATIQUE

II.1 Introduction 36
II.2 Modélisation de l'écoulement des fluides 36
II.2.1 Equation de continuité 36
II.2.2 Equation de quantité de mouvement 36
II.2.3 Equation de conservation d'énergie 37
II.2.4 Equation électromagnétique 38
II.3 Modélisation thermique 39
II.3.1 . Les différents modes de transfert thermique 39
II.3.2 Les conditions aux limites 46
II.3.3 Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente k 48
II.3.4 Equation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ε 49
II.4 La méthode volume-of-fluide (VOF) 49
II.4.1 Calculs équilibrés et transitoires de la méthode VOF 49
II.4.2 Equation de la fraction volumique 50
II.6 Conclusion 51

CHAPITRE III METHODES DE DISCRETISATION

III.1 Introduction 52
III.2 Méthodes numériques 52

III.2.1 Méthode des différences finies 52
III.2.2 Méthode des éléments finis 53
III.2.3 Méthode des volumes finis 53
III.3 Calcul d'interface ME 55
III.4 Simulation numérique en fonderie : 60
III.4.1 Apports et enjeux de la simulation 60
III.4.2 Mise en œuvre numérique 61
III.5 Conclusion : 64
CHAPITRE IV INTERPRETATIONS DES RESULTATS
IV.1 Introduction : 66
IV.2 Description du domaine d'application 66
IV.3 Les conditions initiales 67
IV.4 Les conditions de limite 67
IV.5 Validation 67
IV.6 Influence du champ magnétique 69
IV.7 L'emplacement des capteurs pour l'analyse 69
IV.8 Expérience 01 : Sans champ magnétique 70
IV.8.1 Interprétation des résultats de simulation : 70
IV.8.4 Défauts détectés après le remplissage sans champ magnétique : 76
IV.9 Expérience 02 En présence de champ magnétique 77
IV.10 Comparaison entre la première et la deuxième expérience (v=15m/s) 87
IV.11 Comparaison entre la première expérience (v=25 m/s) et la deuxième expérience (v=15m/s) pour B=0.48Tesla 92
IV.12 Conclusion 97
CONCLUSION GENERALE 98
References bibliographies 99

LISTE DES FIGURES

Figure I.1:Représente un moule complet 9
Figure I.2:Schéma général de fabrication d'une pièce moulée 11
Figure I.3:Principe de moulage en moule non permanent 12
Figure I.4:Etapes de coulée en moule permanent 13
Figure I.5:Principales étapes du procédé de moulage au sable 15
Figure I.6:Principales étapes du procédé de moulage à la cire perdue 16
Figure I.7:Moulage mécanique 17
Figure I.8:Moulage en coquille 18
Figure I.9:Moulage sous pression 19
Figure I.10:Procédé de coulée sous pression en chambre froide 19
Figure I.11:Procédé de coulée sous pression en chambre chaude 20
Figure I.12:Moulage par centrifugation 22
Figure I.13:Le moulage par centrifugation vertical 23
Figure I.14:Le moulage par centrifugation horizontal 23
Figure I.15:Schéma de machine de coulée continue horizontale 24
Figure I.16:Moulage par forgeage liquide 25
Figure I.17:Le moulage magnétique 26
Figure I.18:Configuration fabriquée 27
Figure I.19:la direction du champ magnétique 31
Figure I.20:Défaut du aux gaz 33
Figure I.21:Métal pénétration 34
Figure I.22:Défaut de remplissage 34
Figure I.23:Défaut de joint 34
Figure II.1:Différent mode de transfert thermique 40
Figure II.2:Transfert de chaleur par conduction 40
Figure II.3:Conduction thermique 42
Figure II.4:convection libre ou naturelle 43
Figure II.5:convection forcée 43
Figure II.6:Convection thermique 44
Figure II.7: Longueur d'onde du rayonnement thermique 45
Figure II.8:transfert thermique par rayonnement 46
Figure III.1:méthode de discrétisation 54

Figure III.2:Présentation des méthodes de calcul d'interface 55
Figure III.3:Example de maillage structuré (gauche), maillage non structuré (centre) et maillage adapté à une interface en coin (droite) 56
Figure III.4:Les trois composants principaux du maillage 56
Figure III.5:Approche lagrangienne 57
Figure III.6:Approche eulérienne 57
Figure III.7:Différentes méthodes de suivi de front 58
Figure III.8: Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque 59
Figure III.9:Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret 59
Figure III.10:Définition de la géométrie 62
Figure IV.1:Géométrie de moule et de la cavité 66
Figure IV.2:le moule multi-empreinte utilisé pour la validation 68
Figure IV.3:(a) Champs de fraction volumique de résultats de simulation Thierry BARRIERE, Boa sheng LIU, Jean-Claude GELIN. (b) nos résultats de simulation par EF\VOF. 68
Figure IV.4:maillage du domaine de calcul 69
Figure IV.5:L'emplacement des capteurs pour analyse 69
Figure IV.6:Volume de fraction pendant le remplissage du moule (v=25m/s) 70
Figure IV.7:Représentation spatiale de température dans le domaine de calcul 71
Figure IV.8:variation température dans le temps pour différentes positions 71
Figure IV.9;Représentation spatiale de pression dans le domaine de calcul 72
Figure IV.10:La variation de pression dans le temps pour différents capteurs 72
Figure IV.11:Volume de fraction pendant le remplissage du moule 73
Figure IV.12:Représentation spatiale de température dans le domaine de calcul 73
Figure IV.13:Variation température dans le temps pour différentes positions 74
Figure IV.14:Représentation spatiale de pression dans le domaine de calcul 75
Figure IV.15:La variation de pression dans le temps pour différents capteurs. 75
Figure IV.16:détection des défauts de remplissage dans les empreintes 76
Figure IV.17:Volume de fraction pendant le remplissage du moule 77
Figure IV.18:Représentation spatiale de température dans le domaine de calcul 77
Figure IV.19:variation température dans le temps pour différentes positions 78
Figure IV.20:Représentation spatiale de pression dans le domaine de calcul 79
Figure IV.21:la variation de pression dans le temps pour différents capteurs 79
Figure IV.22:Volume de fraction pendant le remplissage du moule 80

Figure IV.23:: Représentation spatiale de température dans le domaine de calcul 80
Figure IV.24:variation température dans le temps pour différentes positions 81
Figure IV.25:Représentation spatiale de pression dans le domaine de calcul 82
Figure IV.26:la variation de pression dans le temps pour différents capteurs 82
Figure IV.27:Volume de fraction pendant le remplissage du moule 83
Figure IV.28:: Représentation spatiale de température dans le domaine de calcul 83
Figure IV.29:variation température dans le temps pour différentes positions 84
Figure IV.30: Représentation spatiale de pression dans le domaine de calcul 85
Figure IV.31:la variation de pression dans le temps pour différents capteurs 85
Figure IV.32:détection des défauts de remplissage dans les empreintes avec champ magnétique 86
Figure IV.33:Comparaison entre les Champs des températures dans chaque point pour les deux simulations 88
Figure IV.34:Comparaison entre les Champs des Pression dans chaque point pour les deux simulations. 89
Figure IV.35:Volume de fraction pendant le remplissage du moule 91
Figure IV.36:Comparaison entre les Champs des Pression dans chaque point pour les deux simulations 93
Figure IV.37:Comparaison entre les Champs des températures dans chaque point pour les deux simulations. 94
Figure IV.38:Volume de fraction pendant le remplissage du moule 96

LISTE DES TABLEAUX

Tableau II.1 :conductivité thermique de quelques corps, à la température ambiante 41
Tableau IV.1 :les propriétés thermiques de Fer 67
Tableau IV.2 :Propriétés du matériau de moule (Acier) 67

Nomenclature

Notation	Signification	unité
A	surface d'échange	m^2
B :	la densité de flux magnétique	tesla
C_p	chaleur spécifique	$j.kg^{-1}.K^{-1}$
dt	Temps élémentaire	s
dQ	Énergie élémentaire	en Joule
$\frac{dT}{dx}$	Gradient de température en x	(K/m)
g_x, g_y, g_z	composants du champ gravitationnel suivant x, y et z	$m.s^{-2}$
H	diamètre du cylindre d'injection	cm
h_0	hauteur initiale du métal liquide	cm
H	intensité du champ magnétique périphérique appliqué	(G)
h	conductivité thermique	$W.m$
L	longueur du cylindre d'injection	cm
L_0	diamètre de l'orifice de refoulement	cm
L_s	chaleur latente de fusion	$j.kg^{-1}$
M	l'intensité de l'aimantation.	(A/m)
p	pression	Pa
q_0	masse volumique de référence	$Kg.m^{-3}$
T	température	K
T	variable du temps	s
T_s	Température de surface du corps	K
T_s	Température ambiante	K
$\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}$	contraintes visqueuses normales	$N.m^2$
$\tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}$	contraintes visqueuses tangentielles	$N.m^2$
U_g	composante de la vitesse de la grille	$m.s^{-1}$
U_p	vitesse du piston	$m.s^{-1}$
u	vitesse suivant x	$m.s^{-1}$
μ_r	la perméabilité relative	

μ_0	permittivité magnétique de l'espace libre.	(H/m)
v	vitesse suivant y	$m.s^{-1}$
w	vitesse suivant z	$m.s^{-1}$
λ	Conductivité thermique du matériau	$W.m^{1}.K^{-1}$
ε	Coefficient d'émission de la surface (ε= 1 pour un corps noir, ε<<1 corps brillant)	
$\emptyset$	La dissipation irréversible due au frottement visqueux	(W/m³)
ρ	masse volumique	$Kg.m^{-3}$
μ	viscosité dynamique	$Kg.m^{-1}.s$
Δt:	pas de temps	s
σ	constante de Stephan Boltzmann	$5.67.10^{-8}W.m^{-2}$
ε	le taux de remplissage du cylindre d'injection	%

Abréviation

x_m	la susceptibilité magnétique
α, β	Constates réelles positive
x, y, z	Coordonnées cartésiennes
S	terme source spécifiques au changement de phase
f_{liq}	fraction liquide
$\rho C_p \frac{dT}{dt}$	La variation totale d'énergie
$\rho C_p U.\nabla T$	La variation d'énergie par convection
$div(\lambda\, grad\, T)$	La variation d'énergie par conduction
2D	deux dimensions
EF	élément finis
VF	volume finis
EDP	Equation aux Dérivées Partielles
MDF	méthodes des différence finis
VOF	volume of fluid (volume de fluide)
MAC	Marker And Cells (méthode de marqueur de volume)
TVD	Total Variation Diminishing

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

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

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

Le terme fonderie définit aussi bien les installations métallurgiques dans lesquelles on fond les métaux et où on les coule dans des moules pour leur donner la forme des objets à fabriquer, que l'ensemble des opérations nécessaires à leur production. Ainsi le contrôle de qualité des pièces est un impératif pour livrer des pièces conformes au client.

C'est, tout à la fois, un art et un métier utilisant et mettant en œuvre des techniques aussi diverses que variées, comme le moulage, le noyautage, la métallurgie, la fusion et la coulée des métaux et alliages métalliques, les traitements thermiques, la finition, le parachèvement des pièces, etc. La fonderie, c'est aussi une industrie produisant des pièces de toutes natures finies ou semi-finies, en toutes quantités, de la façon la plus économique à partir de matières premières brutes (métaux, ferrailles, déchets de tôles, bocages), contrairement à certaines techniques concurrentes (forgeage, mécano soudage...) utilisant des produits semi-finis comme les tôles neuves, les barres et billettes en acier de toutes nuances, élaborés par la sidérurgie. On s'adresse à elle soit pour la fabrication de pièces de formes compliquées qu'il serait difficile ou impossible de réaliser par tout autre procédé, soit pour la production à des prix de revient plus intéressants de pièces plus simples, soit encore pour profiter des propriétés physiques ou d'utilisation (dilatation, corrosion, frottement, usure, basses et hautes températures) et des propriétés mécaniques des divers métaux et alliages coulés, soit enfin pour couler des alliages non corrodables ou difficilement usinées.

Cette qualité peut être définie comme son aptitude à satisfaire les exigences spécifiées par le cahier des charges du client. Elle dépend de la conception de la pièce par le donneur d'ordres,

et du soin apporté à sa réalisation par le fondeur, qui doit maîtriser un grand nombre de paramètres de fabrication. La recherche de cette qualité passe entre autres par la reconnaissance et la description des anomalies ou défauts qui peuvent se produire au cours du processus de fonderie, indispensables pour la mise en place d'actions correctives.

Le présent travail porte sur la simulation numérique, en utilisant un champ magnétique durant le moulage par pression du métal à l'état liquide afin de prévoir l'élimination de la totalité des pores.

A cette fin, une analyse numérique basée sur la méthode des éléments finis/volume de fluide (FE/VOF) et le logiciel basé sur la méthode des éléments finis ont été appliqués pour la simulation de l'écoulement du métal liquide pendant le remplissage du moule.

Les grandes lignes de ce mémoire sont les suivantes :

● Une introduction générale présentant le but du travail et montrant l'intérêt de l'étude numérique du processus MSP.

Puis nous avons subdivisé ce mémoire comme suit : Les trois premiers chapitres de ce manuscrit sont consacrés à une synthèse bibliographique.

Le chapitre I : présente une généralité sur les procédés de moulage, moulage magnétique, défauts de moulage. On commence par une définition de ces moulages, les techniques de moulage et l'effet du champ magnétique.

Le chapitre II : présente formulation mathématique (modélisation de l'écoulement de fluide, modélisation thermique modèle de turbulence k- ε, la méthode volume-of-fluide [VOF]).

Le chapitre III : on parle les méthodes de discrétisation, calcul d'interfaces, simulation numérique en fenderie.

Le dernier chapitre, chapitre IV : Il est consacré à la présentation et la discussion des résultats. Il est basé sur l'étude de Transfer de chaleur et de l'écoulement du fluide évalué par un modèle CFD appliqué sur le code d'un logiciel basé sur la méthode des éléments finis avec comparaison de la présence ou l'absence de champ magnétique, Il contient plusieurs points (identification et validation de la simulation numérique, influence sur champ magnétique, interprétation de résultat de simulation, comparaison entre les deux expériences.

Nous terminons ce mémoire par une conclusion générale qui trace les principaux résultats obtenus dans cette étude ainsi que les perspectives à envisagées éventuellement dans le futur.

PROBLEMATIQUE :

Aujourd'hui, les plus grandes fonderies perte Beaucoup de pièces moulées sous pression contiennent des défauts de porosité qui limitent leurs propriétés mécaniques et par conséquent engendrent des couts importants de non-qualité.

Les porosités sont les principaux problèmes de qualité rencontrées dans les pièces moulées sous pression. Elles s'agissent d'un défaut invisible, se manifestent par des pores plus ou moins grands à l'intérieur de la pièce qui réduisent considérablement les propriétés mécaniques de la pièce et sa tenue en service

Dans cette étude nous proposons d'analysée par simulation numérique l'influence du champ magnétique sur le développement des défauts d'occlusion d'air provoqué par le remplissage du métal liquide.

ETAT DE L'ART :

Les procédés de moulage sont largement utilisés pour produire des composants en métal. La demande des pièces de haute précision de coulée continue d'augmenter en raison des exigences rigoureuses de l'industrie des métaux. Le moulage mécanique sous pression (MSP) prend de nos jours une place très importante, c'est l'une des techniques de fabrication utilisées dans la plupart des processus industriels. L'occlusion d'air provoquée par l'écoulement du métal liquide durant la phase lente d'injection est l'un des facteurs qui contribue au défaut de porosité. L'objectif de cette étude est d'analyser les défauts de moulage afin de réduire au minimum l'occlusion d'air durant le remplissage sous l'effet du champ magnétique, et de réduire ainsi la porosité dans les pièces fabriquées. Un modèle numérique bidimensionnel, basé sur les équations de la conservation de la masse, la quantité de mouvement et l'équation d'énergie, est employé pour simuler l'écoulement du métal liquide dans une étude expérimentale de Thierry Barriere et al. 2000. Le suivie de la surface libre est assuré par la méthode VOF.

Beaucoup de recherches ont été consacrées vers le développement de processus pour la production de biens de haute qualité de coulée à faible coût et parmi Les études sur l'effet du champ magnétique sur le moulage de métaux et l'utilisation de la méthode EF/VOF (Eulérien-Volume of Fluide) dans les processus de coulée ont évolué au fil du temps, mais il existe plusieurs arrêtés ou documents techniques issus des années passées qui traitent de ces questions. Ces documents peuvent être utiles pour mieux comprendre les bases de l'étude actuelle et voir comment les méthodes ont été appliquées ou développées dans des contextes précédents.

1./ J.C Gelin1, T Barriere and B Liu (2001) [01].

Une procédure est proposée pour la conception de l'empreinte du moule et le choix optimal des paramètres d'injection. Cette procédure repose à la fois sur la simulation numérique par la méthode des éléments finis et sur des expériences permettant le choix de l'amorce et la mise à jour des paramètres de moulage par injection.

2./ J. F. O'hara et A. P. MacDonald (1986) [02].

C'est une analyse approfondie de l'utilisation des champs magnétiques dans le traitement des métaux liquides. Bien que cet ouvrage soit plus général, il propose des résultats expérimentaux et théoriques sur l'impact des champs magnétiques dans les fonderies et sur les méthodes de contrôle de l'écoulement du métal pour minimiser les défauts dans les pièces moulées.

3./ Barriere, Renault, Dutilly and Gelin (2000) [03].

Le procédé de moulage par injection de métal est analysé à la fois par des expériences et par modélisation numérique. Une approche numérique pour les mélanges biphasiques a été développée afin d'analyser l'écoulement de la matière première pendant l'injection. La résolution des équations de Navier-Stokes est réalisée par une méthode des éléments finis implicites. La simulation du remplissage du moule utilise une formulation eulérienne avec une méthode VOF. La simulation fournit le champ de masse volumique afin de détecter les zones de ségrégation conduisant à un retrait anisotrope. La modélisation du frittage à l'état solide repose sur un modèle viscoplastique. Les résultats obtenus par les expériences et les simulations numériques sont comparés et révèlent une bonne concordance.

4./ " - T. P. K. T. S. Jha et M. B. Ghosh (1977) [04].

Dans cette étude pionnière explore les effets des champs magnétiques sur l'écoulement des métaux liquides pendant la coulée. Les auteurs proposent que les champs magnétiques soient utilisés pour atténuer les turbulences du métal liquide et améliorer la répartition du métal dans le moule, réduisant ainsi la probabilité d'inclusions d'air et de porosité.

5./ R. E. Miller et C. H. Robles (1980) [05].

Dans Cet article explore l'application de champs magnétiques contrôlés pour influencer la dynamique du métal liquide dans les processus de moulage, en particulier pour éviter les défauts de coulée. Il discute également de l'effet des champs magnétiques sur la solidification et les structures internes des pièces moulées.

6./ Daoudi Moussa et Dhaoui Lahcen (promotion2013-2014) [06].

Dans cette étude les expériences numériques basées sur la méthode des EF\VOF, du remplissage des empreintes d'un moule métallique, en préséance de plusieurs configurations géométriques complexes ou ces résultats ont montrés l'influence directe de l'orientation des obstacles à l'écoulement sur la formation des défauts.

7./ F. B. E. Yates (1992) [07].

Ce livre fait une revue approfondie des différentes méthodes de simulation utilisées dans le moulage, avec un accent particulier sur les méthodes numériques, y compris la méthode VOF. L'ouvrage présente une analyse détaillée des applications de la simulation multiphasique dans la simulation du flux de métal, en mettant l'accent sur les défauts de coulée tels que les porosités et les inclusions d'air.

8./ S. G. Wang et al. (1991) [08].

Cette étude applique la méthode VOF pour simuler l'écoulement du métal liquide dans un moule complexe. Elle met en évidence les défis liés à la capture correcte des interfaces entre le métal et l'air, en particulier dans des situations où le remplissage du moule produit des zones de turbulence susceptibles de générer des défauts de coulée, comme les inclusions d'air.

9./ J. A. M. Wiebenga et al. (1985) [09].

Cette étude est l'une des premières à aborder la simulation numérique dans les processus de fonderie à l'aide des équations de Navier-Stokes et de la méthode VOF pour le suivi de l'écoulement du métal liquide. Elle explore les difficultés liées à la modélisation de l'interface fluide-air et à la prédiction des défauts liés à l'écoulement turbulent du métal.

CHAPITRE I

GENERALITE SUR LE MOULAGE

I.1 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.

L'objectif de ce chapitre est de présenter la problématique industrielle liée à la formation des défauts de remplissage, ainsi qu'une synthèse sur le principe de la fabrication de pièces de fonderie. Après une présentation exhaustive des différentes techniques de moulage nous avons défini plus précisément les défauts de moulage, avec quelques remèdes possibles.

I.2 Le Moulage :

Le moulage ou fonderie est un ensemble de procédés qui permet de réaliser des pièces métalliques brutes. Le moulage proprement dit consiste à réaliser des pièces brutes par coulée du métal en fusion dans un moule en sable ou en métal (représentant l'empreinte de la pièce à Obtenir), le métal en se solidifiant, reproduit les contours et dimensions de l'empreinte du moule (Fig. I.1).[10]

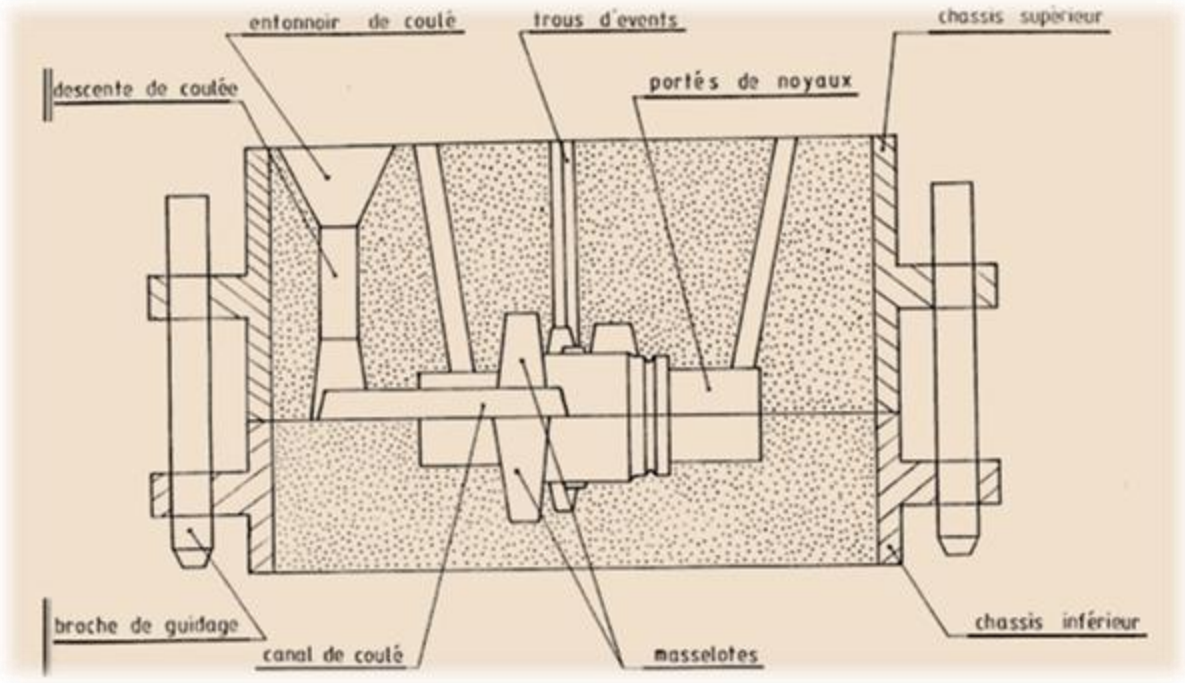


Figure I.1: Représente un moule complet

I.2.1 Généralité sur le moulage :

Les accessoires et les pièces constituants les machines et les appareils proviennent de sources diverses de fabrication telles que le forgeage, l'usinage, l'estampage, la fonderie, etc. Le mécanisme de fonderie est le plus souvent utilisée, car elle est non seulement économique, mais :

Elle permet de produire des pièces de formes complexes (difficilement réalisables par usinage ou par d'autres procédés).

- La série des pièces est identique.
- L'obtention de pièces massives telles que bâtis, volants, … etc.

La méthode peut- être décrit d'une manière générale en plusieurs étapes (Fig.I.2) [11] :

- L'élaboration des plans.
- La construction des moules.
- La préparation et la conduite de la fusion du métal ou de l'alliage.
- La coulée, c'est-à-dire le versement du métal liquide dans le moule.
- Le démoulage.
- Et enfin, le nettoyage, la finition et la vérification finale de la pièce.

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

a. La nature des métaux et alliages :

- Fonderie de fonte
- Fonderie d'acier
- Fonderie d'aluminium et ses alliages.
- Fonderie de cuivre. Bronzes, laitons, etc.

b. Selon l'utilisation :

- Fonderie d'art.
- Fonderie d'ornement (bijoux).
- Fonderie de mécanique industrielle.

c. Selon le procédé de moulage :

- Moulage en sable (manuel ou mécanique).
- Moulage en carapaces.
- Moulage à la cire perdue.
- Moulage en coquilles (moule permanent).

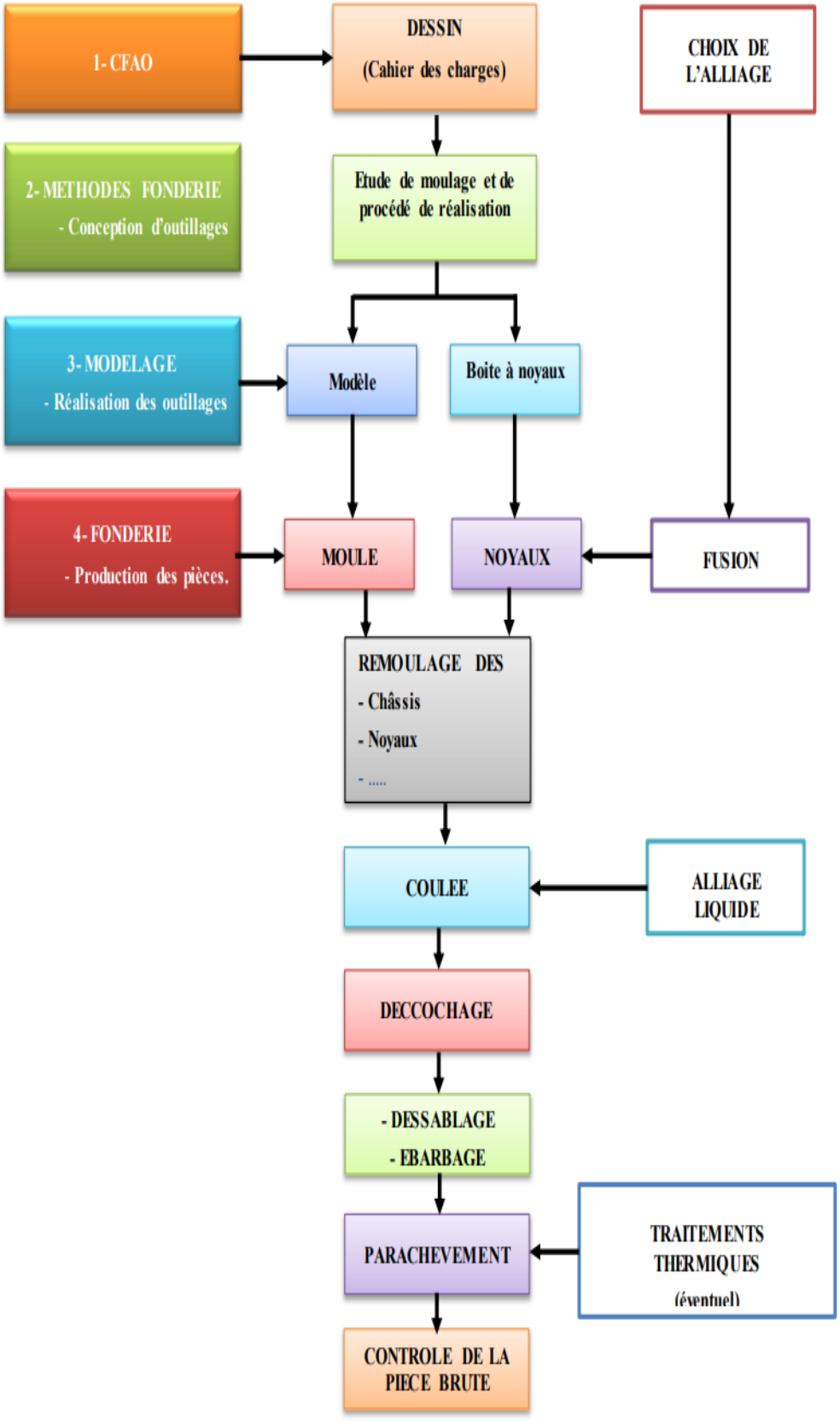


Figure I.2: Schéma général de fabrication d'une pièce moulée

I.2.2 Classification de moulage

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

I.2.2.1 Moulage en moule non permanent

Les moules destructibles sont fabriqués en sable ou en céramique. Après la coulée et la solidification du métal, ils doivent être désagrégés pour libérer les pièces. Le moulage en sable est utilisé pour tous les alliages, mais particulièrement pour la réalisation de pièces en fontes ou en acier. Le procédé permet de réaliser des formes complexes de pièces unitaires ou de faibles séries pour un outillage de faible coût (Fig.I.3). [12]

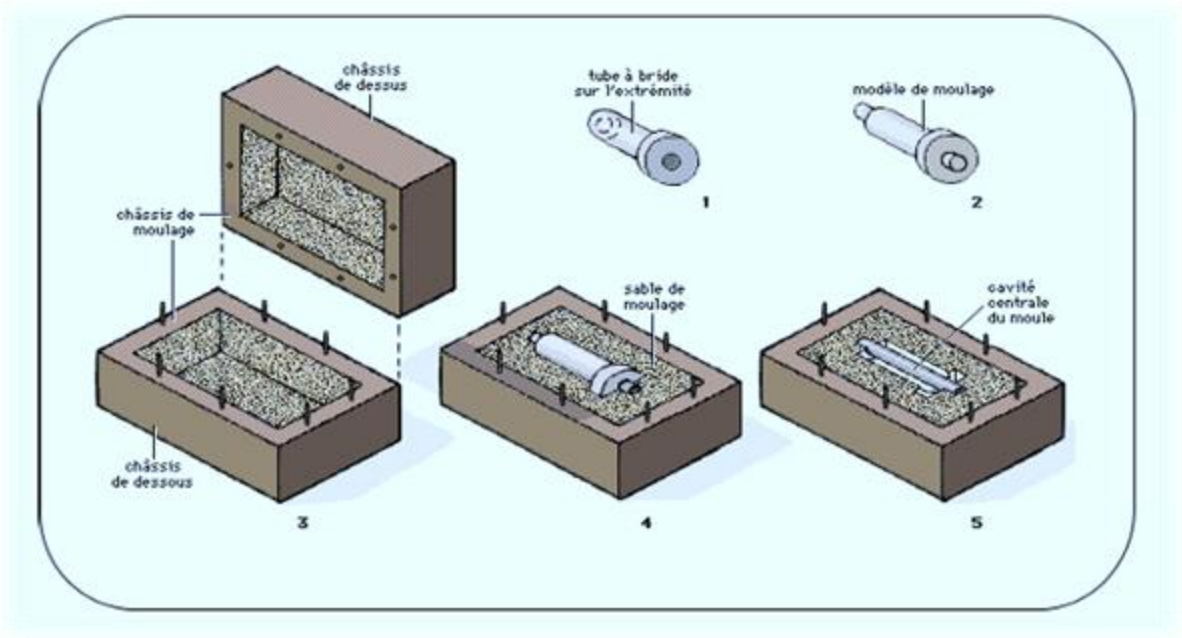


Figure I.3: Principe de moulage en moule non permanent

I.2.2.2 Moulage en moule permanent :

Les moules permanents sont métalliques, réutilisables plusieurs centaines de milliers de fois. Ils permettent de couler des alliages légers (aluminium, magnésium, zinc). Le procédé permet de réaliser des formes complexes, le coût de l'outillage est élevé, il est adapté pour la production en grande série (Fig.I.4). [13]

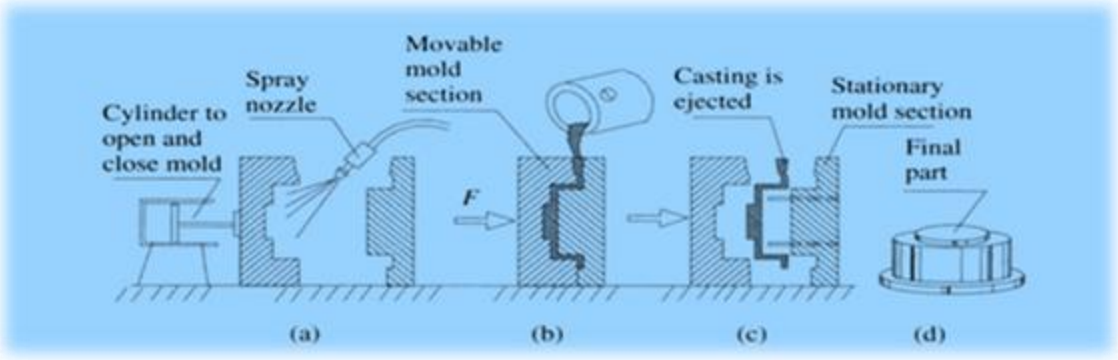


Figure I.4: Etapes de coulée en moule permanent

a- Le moulage est préchauffé et revêtu
b- Le moule est fermé et le métal en fusion est coulé
c- Le moule est ouvert et la pièce moulée est injectée
d- La pièce finie

I.2.3 Possibilité et avantage des moulages

- Permet de réaliser des pièces de forme complexe ;
- Permet de réaliser des formes intérieur et extérieur ;
- Suivent les procédés de moulage on peut obtenir des pièces dont les dimensions sont plus au moins proches de la pièce finie ;
- On peut réaliser des pièces de très dimension ;
- Certains procédés de moulage permettent une production eu très grande série.

I.2.4 Les inconvénients du moulage :

Les inconvénients dépendent des procèdes de moulage.

- Limitation de propriété mécanique des pièces (matériaux) ;
- Faible précision dimensionnelle et mauvaise état des surfaces certaines procédé (Exemple : moulage au sable) ;
- Problème environnement aux (fumées).

I.2.5 Types du procédé de moulage :

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

Types de moulage			
Moulage à modèle permanent : **1-** Sables restant plastiques. **2-** Sables durcissement thermique. **3-** Sables durcissement chimique. ➢ Autodurcissants. ➢ Par gazage. **4-** Sables durcissement physique. ➢ V process. ➢ Congélation.	**Moulage à modèles perdus :** **1-** Polystyrène expansé. **2-** Cire perdue **3-** Mercure congelé	**Moulage en moules métallique :** **1-** Coquille gravité. **2-** Coquille basse pression. **3-** Moulage sous pression. **4-** Moulage par forgeage liquide.	**Procédés spéciaux :** **1-** Moulage avec refroidisseurs. **2-** Moulage avec inserts. **3-** Moulage pièces bimétal. **4-** Moulage par centrifugation. **5-** Moulage en coulée continue. **6** Moulage à empreintes souples.

I.3 Mécanisme de moulage :

I.3.1 3-1. Moulage en sable :

Le matériau est coulé dans un moule en sable. Le moule sera démoli après la fabrication de chaque pièce (moule non permanent), 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) qu'enfoncé dans le sable va laisser son 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 arrachement 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 (Fig.I.5). [14]

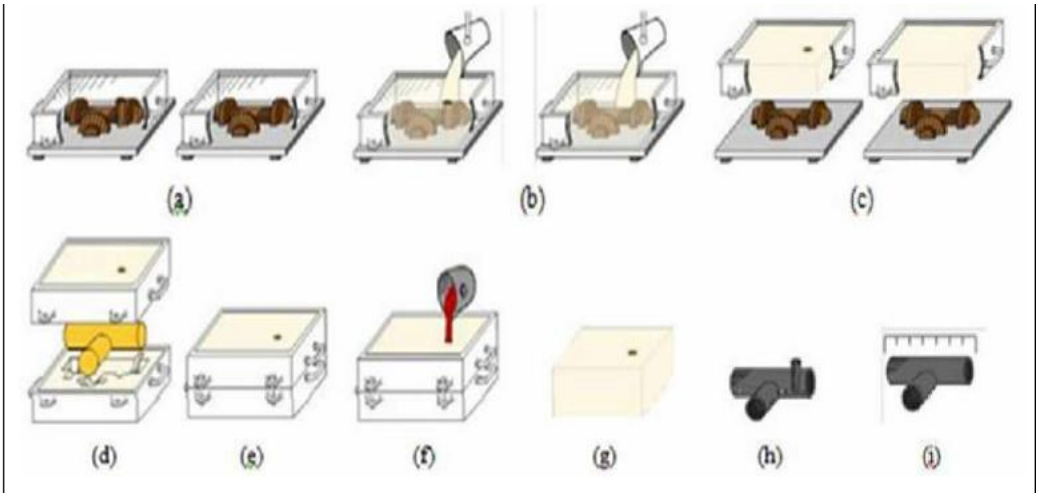


Figure I.5: Principales étapes du procédé de moulage au sable

(A) : châssis métalliques,

(B) : remplissage de châssis,

(C) : séparation de modèle,

(D) : insertion de noyaux de sable,

(E) : mise en position des châssis :

(F) : La réalisation de la coulée,

(G) : détruisant le sable du moule,

(H) : récupération de la grappe,

(I) : pièce finale

I.3.1.1 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.3.1.2 Inconvénients du procédé :

- Surfaces obtenues peu précises (± 0,5 mm)
- Nécessite un usinage des surfaces fonctionnelles
- Technique peu rentable pour les grandes séries

I.3.2 Moulage en cire perdue :

La fonderie en cire perdue, parfois appelée fonderie de précision, est une méthode qui ressemble au moulage au sable, mais qui présente l'avantage de réaliser des pièces avec une précision bien meilleure. Le moule est réalisé en céramique à partir de modèles en cire. Des modèles de la pièce à réaliser sont fabriqués en cire, par différentes méthodes suivant l'importance de la série : injection pour des grandes série, prototypage rapide, moules silicones. Les modèles sont ensuite reliés sous forme de grappes de pièces par des éléments en cire qui représentent les futurs canaux d'alimentation. Cet assemblage est plongé plusieurs fois dans un bain appelé barbotine, puis recouvert de sable réfractaire afin de former une couche suffisamment résistante pour supporter la coulée du métal. L'ensemble est placé dans un four pour éliminer la cire, puis cuire la céramique. Enfin le métal choisi est coulé dans le moule ainsi formé, puis le moule est cassé et les pièces séparées de la grappe. La précision des modèles en cire perdue et la gestion des dilatations dues à la température détermineront la précision de la pièce finie (Fig.I.6). [15]

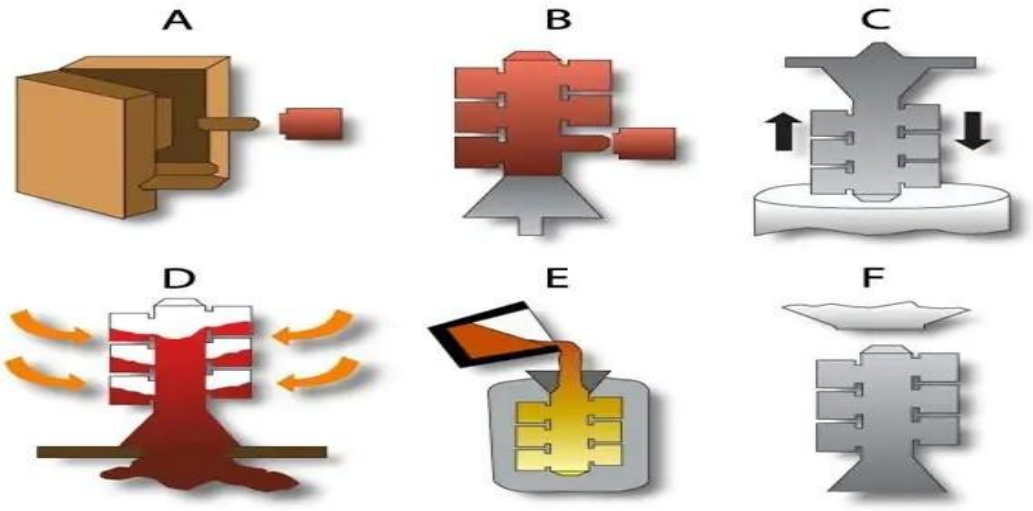


Figure I.6: Principales étapes du procédé de moulage à la cire perdue

Une fois le revêtement final durci, la cire est fondue à la chaleur pour laisser la cavité du moule dans la forme du composant. Le fabricant verse ensuite du métal en fusion dans la cavité pour essentiellement remplacer le modèle en cire par du métal. Enfin, le métal refroidit et se solidifie dans le moule avant que la pièce moulée ne soit retirée.

I.3.3 Moulage mécanique

De nombreux types de machines ont été créés pour réaliser le remplissage, le serrage et le démoulage mécanique. Le sable est serré mécaniquement contre la plaque-modèle selon plusieurs techniques (pression, secousses, pression et secousses, projection). L'empreinte de la pièce n'est plus donnée par un modèle ordinaire, mais par un modèle fixe sur un support (plaque) dont l'ensemble est appelé plaque modèle. Le moulage mécanique permet la réalisation des pièces de toute forme et de la petite à la très grande série, mais il est limité par la capacité des machines(4m2) (Fig.I.7) [16]. Les moules sont réalisés le plus rapidement possible (prix) et rigoureusement semblables (Exactitude, tolérances). Les cadences de moulage sont très élevées (100 à 200 moules par heure selon dimensions des pièces, 400 moules par heure avec plaque modèle double face).

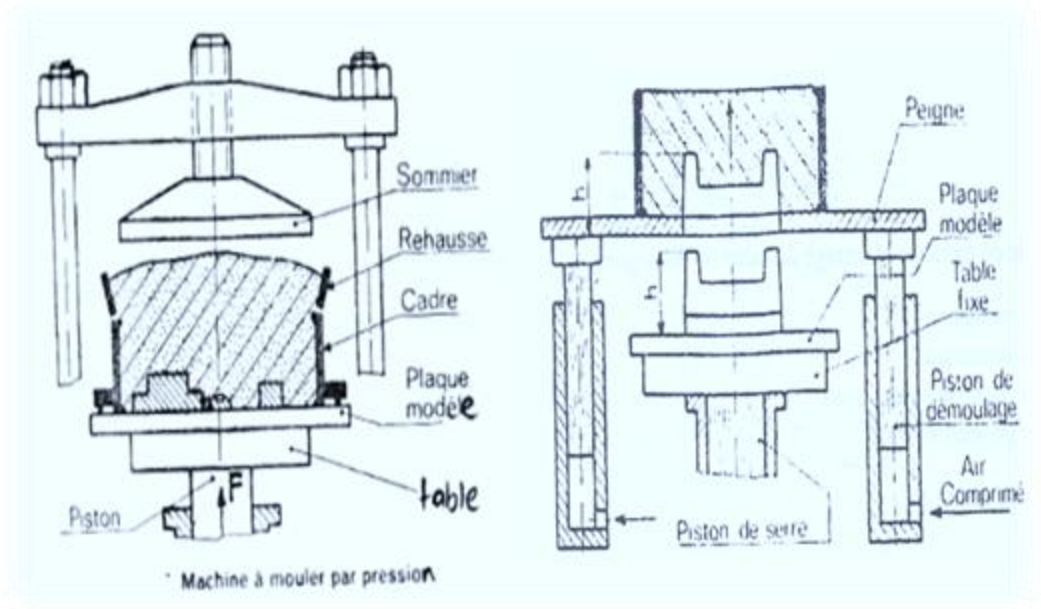


Figure I.7: Moulage mécanique

I.3.4 Moulage en moule métalliques

Dans les moules permanents les moules sont métalliques (en fonte ou en aciers spéciaux réfractaires), permettent de couler un grand nombre de pièces. On distingue les procédés suivants :

- Le moulage en coquille par gravité
- Le moulage sous pression
- Le moulage par centrifugation
- La coulée en continue

I.3.4.1 Le moulage en coquille par gravité

Moulage par gravité on vers par gravité le métal fondu dans un moule en métal jusqu'à ce qu'il se solidifie. On ouvre alors le moule et on en retire la pièce. Le moule est généralement fait en font de fer mais on peut également utiliser des aciers à bas taux de carbone et des aciers pour moules. Les moules peuvent être de construction relativement.

Principe :

La pièce est obtenue à partir d'un moule métallique appelé coquille. L'introduction de l'alliage dans la coquille est assurée par la seule action de la pesanteur, ce qui lui fait donner le nom de moulage en coquille par gravité à ce procédé (Fig.I.8) [17].

Outillages

Le moule comprend :

- L'empreinte, les noyaux et les broches qui permettent d'évider la pièce
- Le système d'alimentation, coulée, masselottes, évents…
- Les organes de manutention, de fermeture, d'éjection…

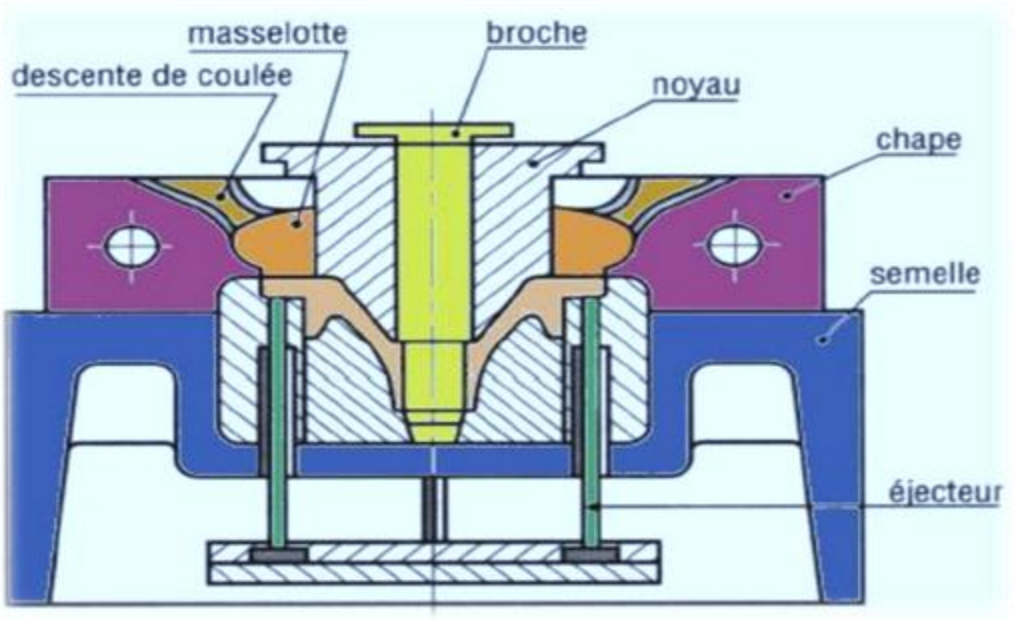


Figure I.8: Moulage en coquille

I.3.4.2 Le moulage sous pression

La fonderie sous pression est destinée à réaliser des pièces en grandes séries. Cette technologie consiste à injecter à grande vitesse le métal liquide dans un moule métallique on obtient ainsi un bon état de surface et on évite le maximum de reprise d'usinage. Il existe l'emploi de machine spéciale à couler, le métal est injecté dans la coquille sous l'action d'un piston (Fig.I.9) [18].

Principe :

Le métal liquide est injecté sous forte pression (Al Si9Cu3Fe) peut aller jusqu'à 1200 bar et à grande vitesse d'injection dans un moule (jusqu'à 50 m/s) fixé sur les plateaux de la machine.

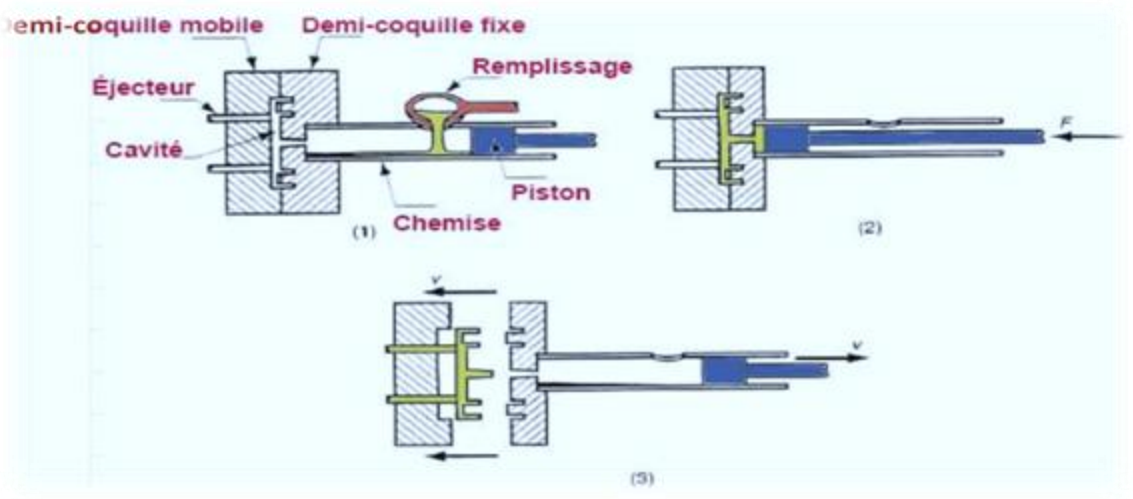


Figure I.9: Moulage sous pression

Machines : Elles sont de deux types :

A- Machine à chambre froide :

L'alliage liquide est maintenu liquide dans un four indépendant de la machine. A chaque injection, l'alliage est versé dans le conteneur au moyen d'une louche ou d'un dispositif mécanisé (Fig.I.10) [19].

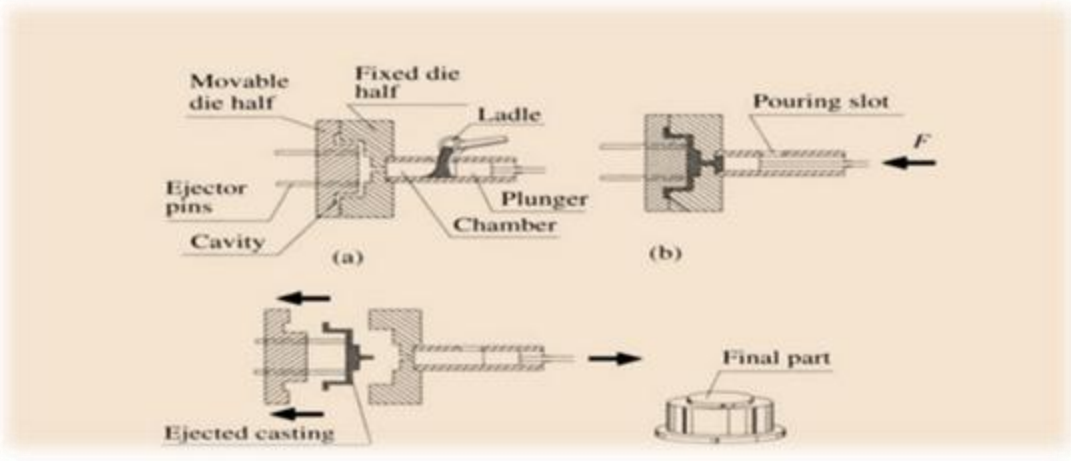


Figure I.10: Procédé de coulée sous pression en chambre froide

a- La matrice fermée, le piston retiré et le métal versé dans la chambre

b- Le piston force le métal de la chambre à s'écouler dans la cavité de la matrice, maintenant la pression pendant la solidification ;

c- Le piston est retiré, la matrice est ouverte et la pièce moulée est éjectée ;

d- La pièce finie est représentée

Une presse d'injection sous pression à chambre froide :

Sa force de fermeture varie 500 à 40000 KN soit 50 à 4000 tonnes.

Ces machines permettent de couler :

- Les alliages légers,
- Les alliages cuivreux à base de magnésium

B- Machine à chambre chaude :

Dans ce type de machine la chambre de pression est immergée dans l'alliage liquide du creuset (d'où le nom de chambre chaude) (Fig.I.11) [20].

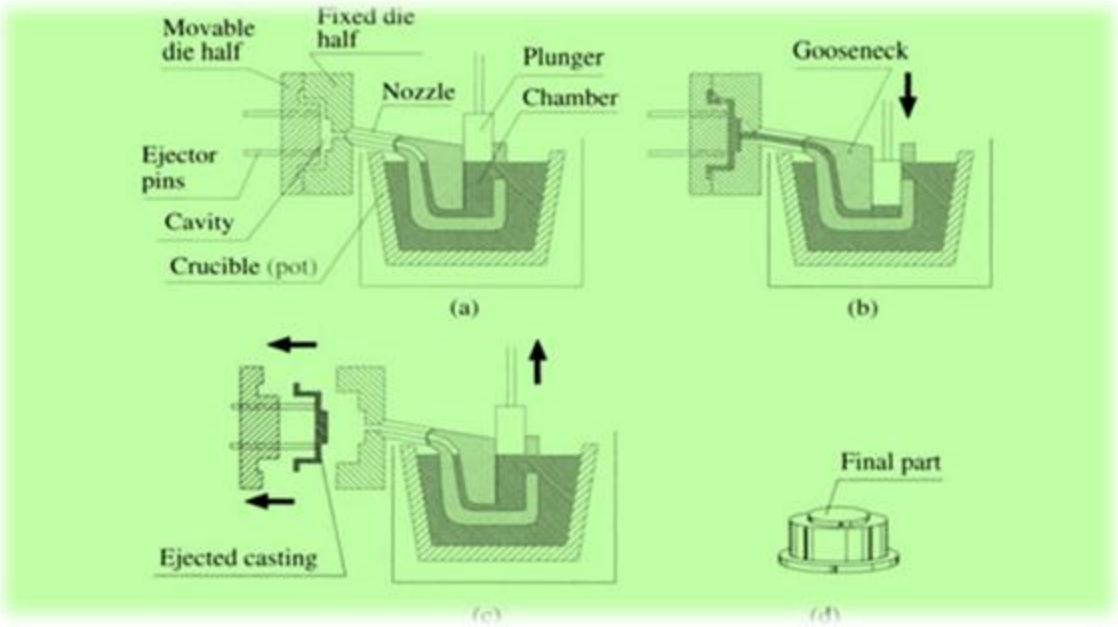


Figure I.11: Procédé de coulée sous pression en chambre chaude

a- La matrice fermée, le piston retiré et le métal versé dans la chambre

b- Le piston force le métal de la chambre à s'écouler dans la cavité de la matrice, maintenant la pression pendant la solidification ;

c- Le piston est retiré, la matrice est ouverte t la pièce est éjectée ;

d- La pièce finie est représentée

Une presse d'injection sous pression à chambre chaude :

Sa force de fermeture varie 50 à 3000 KN soit 5 à 30 tonnes.

Ces machines sont réservées aux alliages à point de fusion bas :

- Les alliages d'aluminium,
- Les alliages de plomb,
- Les alliages de zinc

Outillages :

Le moule comprend :

- L'empreinte souvent rapportée, ce qui facilite le remplacement et la remise à l'état
- Les noyaux sont métalliques et les broches permettent d'obtenir des formes intérieures
- Le système d'alimentation, coulée, masselottes, évents…
- Un système de circulation d'eau placé dans le moule permet de réguler la température.

Les avantages :

- Grande précision dimensionnelle ;
- Très bon état surface ;
- Suppression de certains usinages ;
- Obtention de pièces légères ;
- Bonne caractéristique mécanique.

Les inconvénients :

Le remplissage turbulent, par définition, conduit à des entraînements d'air et à la formation d'oxydes, qui créent des soufflures et des replis.

- Les pièces présentent des retassures à cœur malgré la pression appliquée. Les retassures sont des défauts de fonderie rencontrés lorsque le métal passe de l'état liquide à l'état solide.
- Les pièces ne peuvent pas être traitées thermiquement, ce qui limite les propriétés mécaniques des pièces.
- La faible liberté de formes due aux difficultés d'utilisation de noyaux.
- Les pièces ne peuvent pas être assemblées par soudage.

I.3.4.3 Moulage par centrifugation

La densité d'un métal coulé, dépend essentiellement de la pression P avec laquelle le métal liquide se trouve durant le processus de refroidissement. Pour la coulée normale (par

gravitation), la pression P est déterminée à partir de la hauteur de coulée du métal liquide dans le moule et de sa densité.

Une pression importante peut être obtenue grâce à une rotation rapide du métal liquide dans le moule. Suite à la rotation du métal liquide coulé, les particules sont soumises à une force centrifuge de la forme :

$$\mathbf{F_{cen}} = \mathbf{m}.\mathbf{w}^2.\mathcal{R} = \frac{\mathbf{m}.\mathbf{v}^2}{\mathcal{R}} \quad [\mathbf{N}] \qquad (1\text{-}1)$$

Avec :

$\mathbf{F_{cen}}$ **:** Force centrifuge (N)

m : La masse de l'objet en (kg)

$\mathcal{R}$ **:** La distance de l'axe de rotation au centre de gravité en (m)

w : La vitesse angulaire en (rad/s)

v : La vitesse linéaire en (m/s)

La force centrifuge peut être augmentée, par augmentation du nombre de tours et ce qui conduit à l'augmentation de l'action de la force de pesanteur. Cette augmentation répartit toute la masse du métal liquide uniformément sur toute la longueur du moule cylindrique (Fig.I.12) [21].

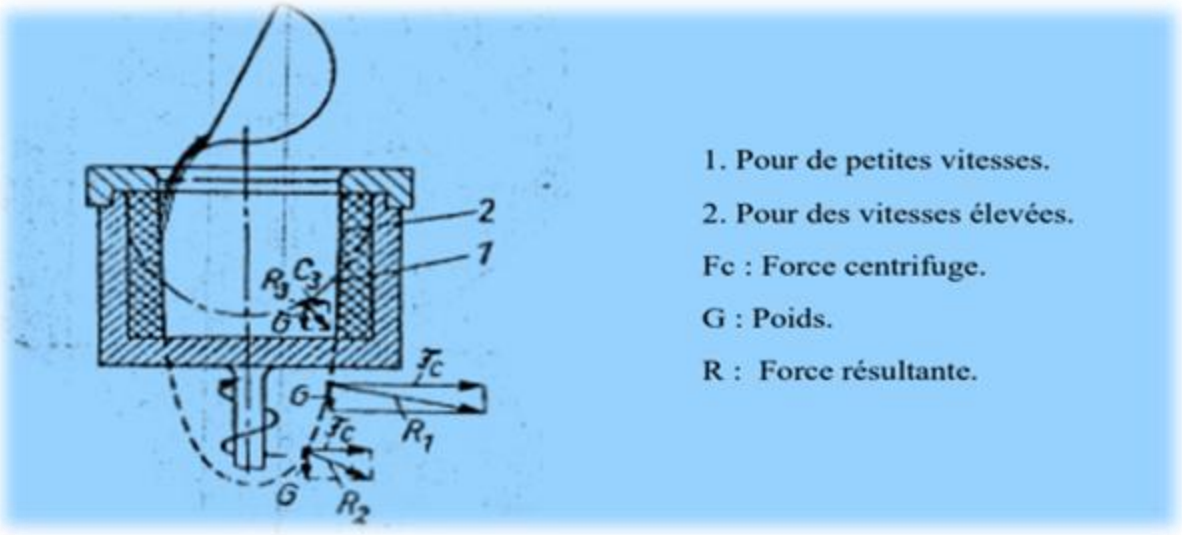


Figure I.12: Moulage par centrifugation

La coulée par centrifugation s'est beaucoup développée en raison des avantages qu'elle présente. Ce procédé est utilisé surtout pour les pièces de révolution tels que tubes, couronnes, etc.

En général le moule est métallique, mais il peut être garnis intérieurement d'un revêtement réfractaire. Le métal liquide est coulé à partir d'une poche à travers une gouttière, le volume du

métal coulé est déterminé à l'avance. Le remplissage du moule se fait soit par la rotation du moule, soit par rotation de la gouttière. Le moulage par centrifugation peut être vertical (Fig. 13) ou horizontal (Fig. I.14). [22].

Le moulage horizontal est utilisé lorsque la longueur du cylindre à mouler est très supérieure à son diamètre.

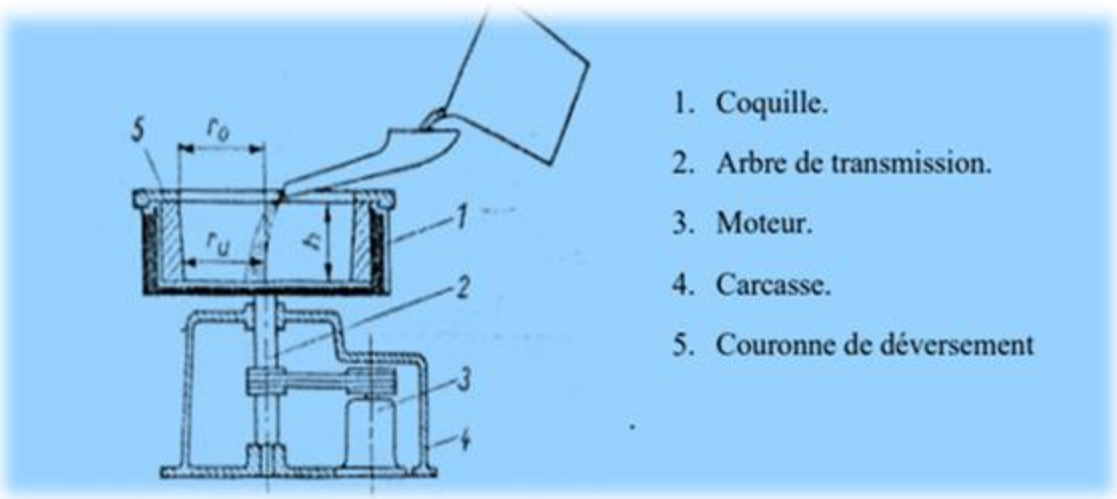


Figure I.13: Le moulage par centrifugation vertical

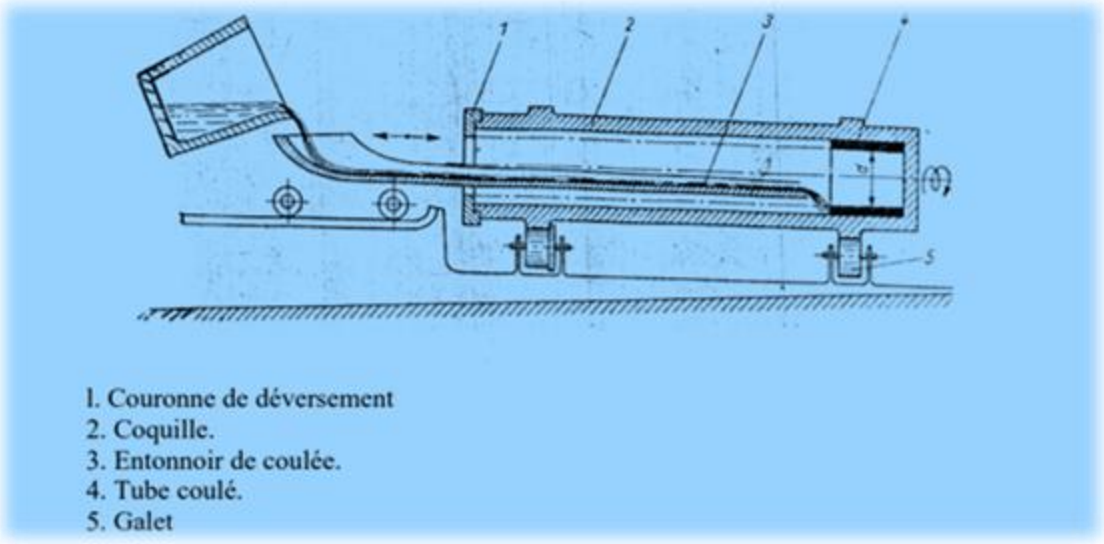


Figure I.14: Le moulage par centrifugation horizontal

Les avantages que présente ce procédé sont :

- Aucune perte de métal.
- Propriétés mécaniques élevées du produit coulé.
- Structure à grains fins.
- Possibilité d'obtenir des pièces bimétalliques.

- Rendement élevé. L'inconvénient réside dans le coût élevé des équipements et installations.

L'inconvénient réside dans le coût élevé des équipements et installations.

I.3.4.4 Moulage en coulée continue :

Description du procédé :

Après fusion et traitement éventuel dans un four de maintien, le métal liquide est coulé dans une filière ou une coquille, refroidie par circulation d'eau, ayant la forme du profil à fabriquer. A la sortie de cette filière, une couche solidifiée assure la tenue de l'ensemble jusqu'à la fin de la solidification. La pellicule d'alliage solidifiée, d'épaisseur contrôlée, présente un certain retrait lors de sa solidification, ce qui facilite son décollement de la coquille, alors que le métal au centre du profilé est encore liquide, formant une sorte de V plus ou moins effilé. La barre profilée, totalement solidifiée à une distance également réglée à partir de la coquille (longueur de V), est tirée au moyen de galets commandés qui servent également de guides pour soutenir la barre encore chaude en la maintenant rectiligne, l'extraction des barres peut se faire à vitesse constante ou par à-coups. Après solidification, et toujours en continu, les barres sont tronçonnées à la longueur voulue (Fig.I.15). [23].

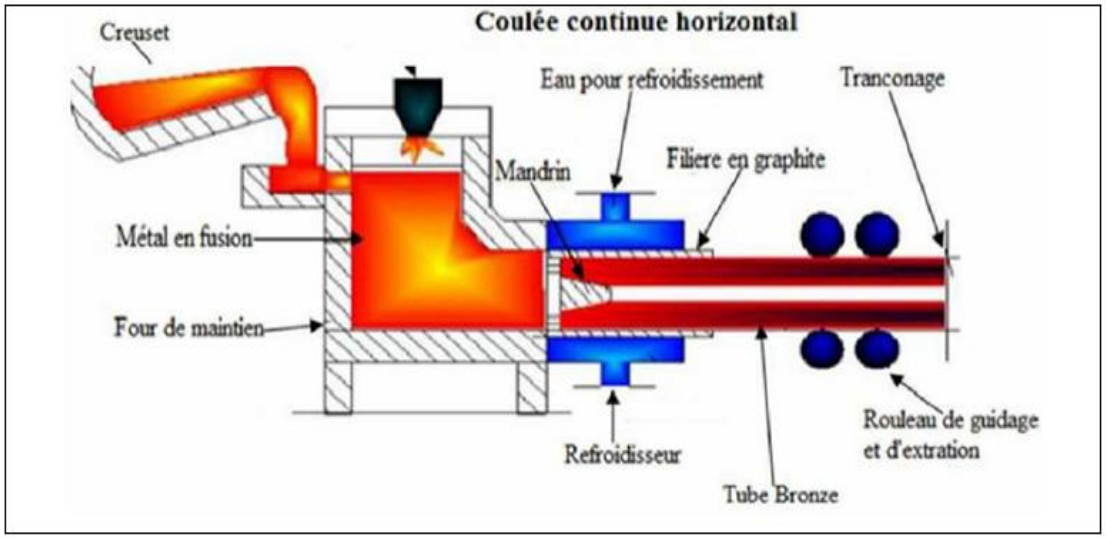


Figure I.15: Schéma de machine de coulée continue horizontale

I.3.4.5 Moulage par forgeage liquide :

Le forgeage s'applique aux alliages légers et se distingue des autres procédés en moules métalliques (Fig.I.16) [24] par :

- Un remplissage très calme de l'empreinte
- Une solidification sous une pression très élevée (100 MPa et jusqu'à 150 MPa), ce qui confère aux pièces fabriquées de très bonnes caractéristiques mécaniques grâce à une structure très fine et à l'absence de porosités et permettra également de réaliser des composites à matrice métallique renforcée de fibres céramiques.

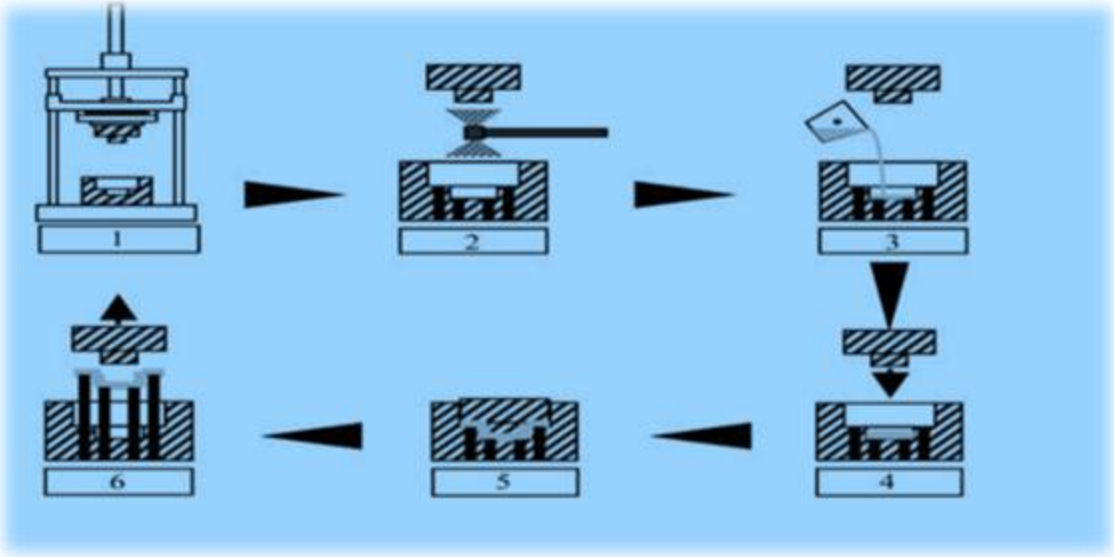


Figure I.16: Moulage par forgeage liquide

1. presse hydraulique ouverte
2. poteyage du moule
3. verse métal
4. fermeture presse
5. solidification sous pression
6. ouverture puis éjection de la pièce

II existe deux variantes :

- Le squeeze-casting indirect, qui utilise des moules semblables à ceux de la fonderie sous Pression ; le remplissage de l'empreinte se fait à faible vitesse, de bas en haut, le piston d'injection servant ensuite à l'application de la pression de solidification.
- Le squeeze-casting direct, ou forgeage liquide, qui utilise des outillages semblables à des Matrices de forge ; le métal liquide est dosé au préalable, puis versé directement dans la matrice. Une pression très élevée est ensuite appliquée par le poinçon supérieur sur toute la surface libre du métal pendant la durée de la solidification et du refroidissement.

I.3.4.6 Moulage magnétique :

La coulée en moule magnétique est un procédé innovant qui présente un grand potentiel pour remplacer les méthodes de coulée conventionnelles en raison des divers avantages qui lui sont associés. Il s'agit d'un processus de fabrication primaire qui influe sur les propriétés du produit résultant. A cette époque, il existe une demande d'innovation de procédés permettant de réduire les délais, les coûts de production sans compromettre la qualité des produits et de réduire les effets néfastes sur l'environnement (Fig.I.17). [25].

La configuration de la MMC comprend l'enroulement du fil de cuivre afin qu'il se comporte comme un solénoïde à cavité creuse dans lequel le processus de moulage doit être exécuté. La configuration a été préparée avec un fil de cuivre de calibre 19 et l'enroulement est effectué jusqu'à ce que le champ magnétique requis soit créé.

La configuration de la préparation et les essais montrent qu'il est possible de créer une configuration similaire à grande échelle, de sorte que MMC puisse être utilisée au niveau industriel pour exploiter ses avantages de réduction des coûts, de réduction des délais, de l'effet réduit sur l'environnement et de la comptabilisation de propriétés améliorées au produit résultant.

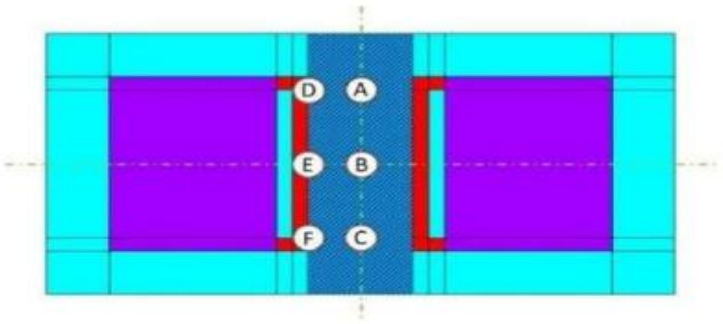


Figure I.17: Le moulage magnétique

I.4 Configuration expérimentale

I.4.1 Dimensions du moule

Le cylindre creux de diamètre = 200 mm et de hauteur = 250 mm est fabriqué en enroulant un fil de cuivre sur une âme creuse en acier. L'acier est utilisé comme noyau afin de confiner le champ magnétique à l'intérieur du solénoïde, car l'acier a une perméabilité magnétique élevée.

Un fil de cuivre de calibre 19 est utilisé pour maintenir le courant pendant la période d'expérience requise sans dommage dû au chauffage.

Conteneur en fer - Il est constitué d'une feuille de fer pur de 1 mm d'épaisseur laminée en forme de cylindre de diamètre extérieur de 180 mm et de hauteur de 250 mm et fermée à une extrémité.

Alimentation - L'alimentation en courant continu constant est fournie à l'aide d'un autotransformateur monophasé 0-250 V et d'un redresseur en pont de 230 V et 10 A est utilisé.

Le nombre de tours a été déterminé en vérifiant la valeur du champ magnétique à différentes valeurs de tour et l'enroulement a été arrêté lorsque la valeur de champ requise a été obtenue.

Le capteur à effet Hall est utilisé pour la détection de champ magnétique produit à l'intérieur du moule. Le moule est conçu pour produire un champ magnétique de 0-0,5 Tesla (Fig.I.18). [26].

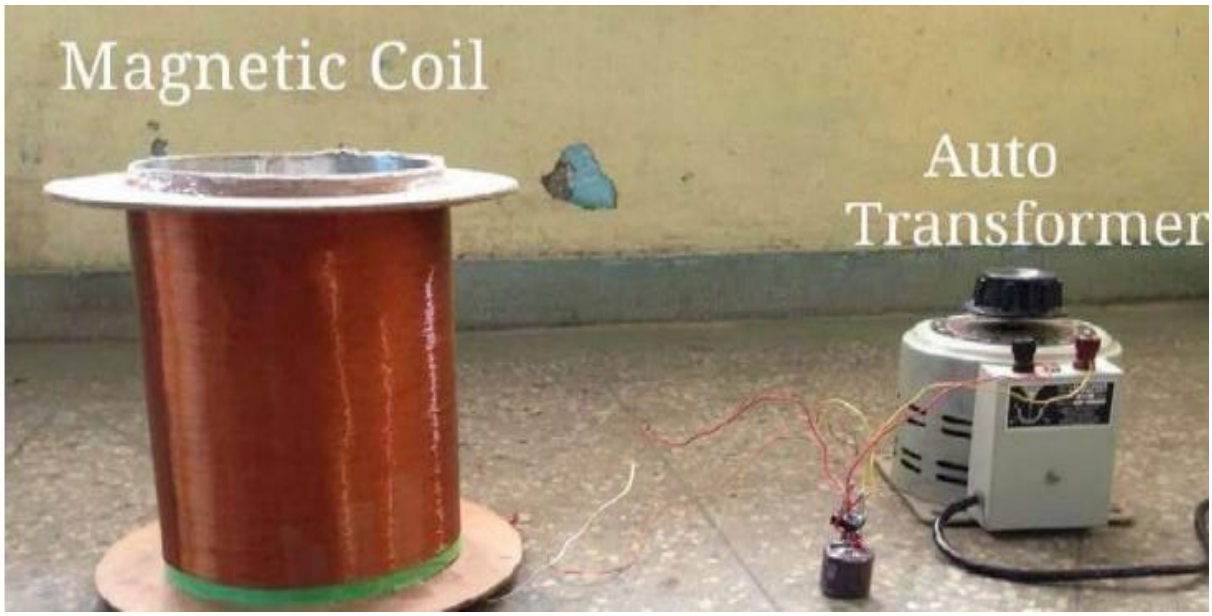


Figure I.18: Configuration fabriquée

I.4.2 Procédure expérimentale

Initialement, les paramètres pour MMC sont définis. La première étape consiste à sélectionner un modèle de montage magnétique et à définir des paramètres tels que le calibre du fil de cuivre, l'intensité du champ requis, la taille des tirs en acier, la composition des tirs en acier, la taille des consommables motif en polystyrène et revêtement réfractaire sur sa surface. Les étapes suivantes sont suivies pour effectuer le moulage magnétique :

A. Préparation de l'installation magnétique :

Une boîte cylindrique creuse en aluminium est utilisée pour enrouler les bobines dessus. Du fil de cuivre de calibre 19 est utilisé. Une bobine de cuivre de 6,5 kg est utilisée pour l'enroulement. Une boîte en fer est insérée dans la boîte à moules pour former le noyau du champ magnétique.

Pour l'alimentation de la bobine de cuivre, un redresseur de puissance en série pour un autotransformateur est connecté. L'alimentation en courant alternatif est fournie à l'autotransformateur à travers lequel la tension est modifiée. La sortie de l'autotransformateur est connectée au redresseur de puissance, qui convertit le courant alternatif en courant continu, et cette alimentation en sortie continue est fournie aux bobines de cuivre.

B. Motif EPS et revêtement réfractaire :

La feuille EPS est découpée dans la forme souhaitée. Ce motif va se vaporiser pendant le processus de coulée. Le revêtement réfractaire du modèle joue un rôle essentiel dans le CMM, il forme une barrière physique et thermique entre le modèle et le moule magnétique. Ce revêtement empêche la diffusion de la masse fondue dans le moule en acier (Pierre-marie Geoffrey et. Al.). L'argile réfractaire est utilisée pour le revêtement réfractaire du motif. Sa composition chimique est de 30% d'oxyde d'aluminium, 60% de silice et le reste est constitué de MgO, Cao et oxydes de fer. Il peut supporter une température de 1600 ° C. Le motif est plongé dans la boue à base d'eau d'argile réfractaire, qui est un revêtement réfractaire. Une épaisseur constante de suspension sur le motif est maintenue. On laisse ensuite le motif sécher à la température ambiante.

C. Formation du moule magnétique :

Les cartouches en acier sont placées dans la boîte à moules, puis le motif EPS est conservé au centre et les cartouches en acier continuent à couler. Les grenailles d'acier sont coulées jusqu'au niveau du bassin verseur. Après le tassement du motif dans les grenailles d'acier environnantes, l'alimentation est activée et un champ magnétique est appliqué sur les grenailles d'acier. Ces grenailles d'acier se lient les unes aux autres en raison de la force magnétique et

forment ainsi un moule constitué de grenailles d'acier autour du motif. Une intensité de champ croissante, qui peut être augmentée en augmentant la tension, augmente la résistance du moule. La tension peut être augmentée en utilisant l'autotransformateur jusqu'à une certaine limite uniquement.

D. Coulée :

L'aluminium utilisé dans diverses industries telles que l'automobile, les biens de consommation, la défense, la construction, etc. est fabriqué par MMC. La fonte d'aluminium est préparée à l'aide d'un four. Cette masse fondue est ensuite versée dans un moule magnétique. Alors que le jet de EPS se vaporisait et que la masse fondue prenait la place de ce motif, après 8 min 30 s, le champ magnétique était désactivé en coupant l'alimentation en tension et le moule s'effondrait soudainement. Le moulage est ensuite sorti et laissé refroidir à température ambiante. Le petit casting de MMC est préparé avec succès. [27]

I.5 Effet du champ magnétique pendant le processus de remplissage dans le moulage :

Un champ magnétique est un champ vectoriel : en tout point M de l'espace il existe un vecteur $\vec{B}(M)$ décrivant localement le champ magnétique.

- Le sens et la direction du vecteur indique comment la boussole se positionne.
- La norme du vecteur renseigne sur l'intensité du champ magnétique au point M considéré. Elle s'exprime en tesla (T).

Un champ magnétique peut avoir diverses origines : un aimant permanent, la Terre ou un courant électrique (expérience d'Œrsted en 1820).

En réalité, toutes ces sources sont liées au même phénomène : des particules chargées en mouvement.

I.5.1 Définition plus fondamentale du champ magnétique :

Le champ magnétique $\vec{\boldsymbol{B}}$ est défini par la composante magnétique de la force de Lorentz $\boldsymbol{F_L}$ qu'il exerce sur une particule chargée de charge $\boldsymbol{q}$ et animée d'une vitesse $\vec{\boldsymbol{v}}$ dans le référentiel du champ : $$\boldsymbol{F_L} = \mathbf{q}.\boldsymbol{\nu}\,.\boldsymbol{B} \quad (1\text{-}2)$$

$\boldsymbol{F_L}$: La force électromagnétique [N].

$\mathbf{q}$: La charge électrique de l'ion [C].

$\boldsymbol{\nu}$: La vitesse de charge [m s-1].

$\boldsymbol{B}$: Champ magnétique [T]

La force électromotrice est proportionnelle au produit vectoriel de la vitesse d'écoulement souhaitée (v), du champ magnétique externe (B) et de la constante de proportionnalité (charge) (q) transportée par le liquide.

Et, selon la loi d'Ohm, la densité de courant peut être exprimée comme suit :

$$\boldsymbol{j = \sigma(v \times \beta)} \quad (1\text{-}3)$$

Où **J** représente la densité de courant traversant le canal et **σ** la conductivité électrique.

En supposant que la différence de potentiel soit directement proportionnelle à la vitesse locale du liquide :

$$\boldsymbol{\nabla\Phi = \Delta x V B} \quad (1\text{-}4)$$

L'amplitude et la direction de la vitesse locale de fusion peuvent être déterminées à l'aide d'une sonde magnétique qui mesure cette différence de potentiel induite sur les électrodes lorsqu'un fluide conducteur s'écoule autour d'un aimant cylindrique.

Des aimants permanents adaptés aux besoins spécifiques du milieu liquide étudié permettent des mesures de vitesse à des températures allant jusqu'à 670 °C, à une vitesse maximale de 10 m/s et avec une sensibilité de 1 mm/s. Cependant, cette sonde n'a pas permis de mesurer la vitesse à des températures supérieures à 720 °C et n'est donc pas pertinente pour la coulée de métaux. De plus, cette technique est également inefficace dans l'aluminium liquide agité à l'argon (c'est-à-dire en écoulement diphasique) à des températures inférieures à 700 °C.

La tomographie inductive de flux sans contact (CIFT) repose sur un principe de reconstruction tridimensionnelle de la vitesse inductive, particulièrement avantageux pour la détermination sans contact des champs de vitesse tridimensionnels à plein débit. Ce principe repose sur le champ magnétique induit supplémentaire et le potentiel électrique dans la FEM générée lors des écoulements MHD. Le champ magnétique peut être mesuré à l'extérieur du volume de fluide, tandis que le potentiel électrique peut être mesuré. [28]

I.5.2 Relation entre courant électrique et champ magnétique :

Le courant électrique, plus généralement tout mouvement de charge électrique, produit un champ magnétique dont la valeur dépend de la quantité et de la vitesse de la charge électrique en mouvement. La valeur du champ magnétique généré par le courant traversant un seul fil est assez faible, mais en raison de l'enroulement du fil qui forme la bobine, un champ magnétique puissant peut être obtenu. [29]

I.5.3 Simulations numériques :

Les données de vitesse collectées par les systèmes de capteurs ont été validées par des simulations utilisant le logiciel de simulation numérique d'écoulement de fluides.

Un modèle de turbulence k-ϵ a été utilisé, et le logiciel a appliqué la méthodologie Navier-Stokes en utilisant la méthode VOF (Volume de fluide) pour résoudre les équations de quantité de mouvement et de continuité. Le gaz environnant a été supposé être de l'air et, par conséquent, la pression initiale dans le vide a été choisie comme atmosphérique.

Lors du remplissage du moule, l'aluminium présentait une minuscule bavure, comme illustré à la figure I.10, au niveau de la surface de séparation de la joue de traînée, déclenchant une vallée asymptote dont le nombre de cycles oscillateurs observés après la coulée était presque égal à un ordre de grandeur inférieur. Lorsque le métal fondu est entré en contact avec la sonde, la capacité de la sonde a augmenté de manière spectaculaire et instantanée. Comme cette bavure s'est produite après le passage du métal devant les capteurs, le calcul de la vitesse moyenne est resté valide.

I.5.4 Matériaux ferromagnétiques :

Les matériaux ferromagnétiques sont les substances qui présentent un fort magnétisme dans la même direction du champ, lorsqu'un champ magnétique leur est appliqué. Premièrement, nous devons savoir ce qu'est un domaine. Il s'agit en réalité d'une toute petite zone de matériaux ferromagnétiques dont l'orientation générale du spin est due à l'effet de la mécanique quantique. Cet effet est vraiment une interaction d'échange. C'est Lorsque nous considérons des électrons non appariés, ils interagissent entre deux atomes et s'alignent dans une région minuscule avec la direction du champ magnétique (Fig.I.19).[30]. Ce mécanisme du matériau ferromagnétique est le ferromagnétisme. Cela peut être défini comme certains matériaux (cobalt, gadolinium, fer, etc.) deviendront des aimants permanents avec l'utilisation du champ magnétique.

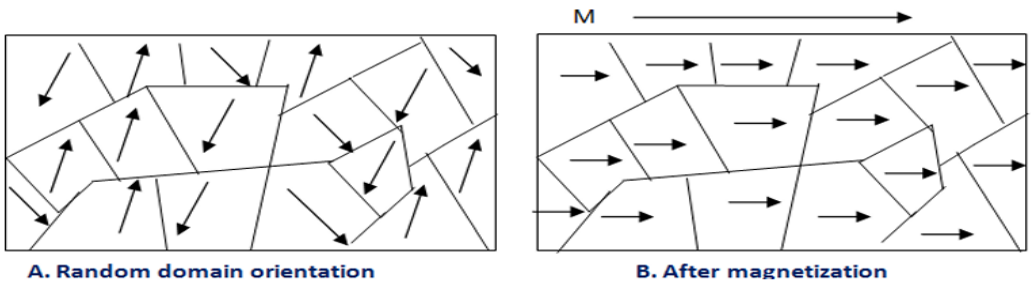


Figure I.19:la direction du champ magnétique

La figure ci-dessous rassemble une sélection de matériaux ferromagnétiques et ferrimagnétiques associés à la température au-delà de laquelle ils cessent d'exhiber des propriétés d'aimantation spontanée.

I.6 Défauts de moulage :

Un défaut de moulage est une irrégularité indésirable dans une pièce obtenue par moulage, et caractéristique du procédé d'obtention et du métal coulé. Certains défauts peuvent être réparés mais ils peuvent aussi mener au rebut de la pièce. On peut distinguer cinq catégories de défauts, en se fondant sur leurs mécanismes de formation, à savoir :

- Les défauts formés pendant le retrait et qui sont liés à la solidification,
- Les défauts dus aux gaz,
- Les défauts liés au matériau avec lequel est réalisé le moule,
- Les défauts formés pendant le remplissage du moule
- Les défauts de construction.

L'apparition d'un défaut peut toutefois résulter de la combinaison de plusieurs phénomènes. Un correctif apporté au procédé peut éviter la formation d'un défaut et peut aussi créer un défaut d'un autre type.

I.6.1 Défauts formés pendant le retrait de solidification :

Les retassures : défaut constitué par une cavité se formant dans la partie massive d'une pièce métallique coulée et due à la contraction du métal au cours de la solidification.
La forme et l'emplacement de la retassure dépendent des conditions de refroidissement.

Ce défaut existe lorsque le métal liquide ne parvient plus à compenser les contractions dues à la solidification du métal : on lutte contre sa formation par un dimensionnement et un positionnement correct de la masselotte, qui va alimenter la pièce en métal liquide au cours du retrait. Si la masselotte est correctement conçue, elle sera la dernière zone solidifiée et il est normal qu'elle soit constellée de défauts dus au retrait.

Les criques : C'est la déchirure à chaud qui se produit au cours de la solidification en présence de contraintes mécaniques. Elle se développe généralement dans les parties chaudes.

Les fissures : se produisent lorsque le matériau se brise en raison de contraintes à l'intérieur et à l'extérieur du matériau. Ils apparaissent sous forme de motifs irréguliers ou linéaires sur les surfaces de moulage sous pression. La première fissure se produit pendant le processus de refroidissement et de solidification.

Cela se produit parce que les matériaux à géométrie de cavité ne peuvent pas rétrécir dans leur état naturel. Par conséquent, les contraintes résiduelles génèrent des fissures ou des déformations dans le moule. La deuxième forme de fissure se produit en raison d'une force externe sur le composant. Les efforts proviennent de la phase de coupe ou du moule lors de l'éjection de la pièce.

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

I.6.2 Défaut du aux gaz :

Les soufflures : C'est les cavités à parois lisses crées et occupées par les gaz provenant de l'air entraîné pendant le remplissage et non évacué (mauvaise perméabilité du moule), de la réaction métal liquide/moule/poteyage, formées lors des réactions d'élaboration ou provenant du moule (humidité,). Les soufflures apparaissent comme une piqure ou un cratère. Elles peuvent également rester piégées au sein du métal, affaiblissant alors dangereusement la pièce moulée. Pour limiter l'absorption de gaz par le métal en fusion, on peut traiter le métal avant la coulée, en le maintenant sous vide ou sous une atmosphère de gaz peu solubles comme l'argon. On limite aussi la solubilité des gaz en travaillant avec des surchauffes, en réduisant les turbulences au moment de la versée du métal dans le moule, en travaillant la forme des canaux d'alimentation et la vitesse de remplissage et en stockant le moule dans un endroit sec pour éviter les reprises en hydrogène. Les méthodes de détection des soufflures utilisées actuellement sont la radiographie, le contrôle par ultrasons et la magnétoscopie.

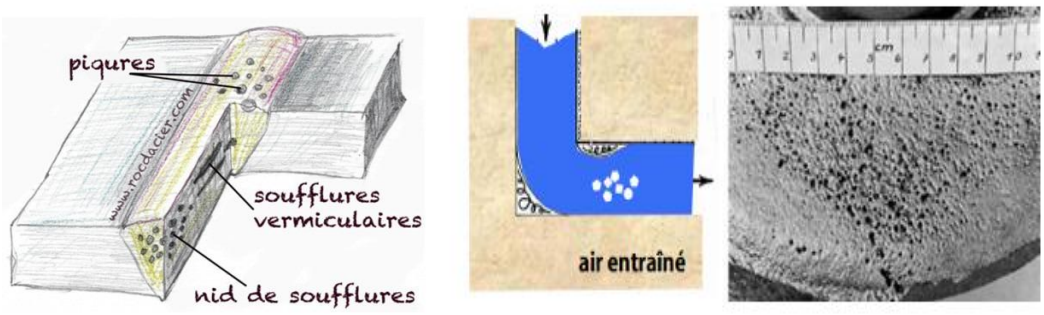


Figure I.20:Défaut du aux gaz

I.6.3 Défaut du au matériau avec lequel est réalisé le moule :

Pénétration : Quand le métal coulé est très fluide, il peut pénétrer dans les porosités du sable. La surface de la pièce est un mélange de métal et de sable.

La pénétration du métal est causée par l'utilisation de faible résistance, de grande taille de grain et de sable très perméable. Par conséquent, le métal fondu pénètre dans le sable moulant, produisant une surface de fonte rugueuse et inégale (Fig.I.21). [31].



Figure I.21:Métal pénétration

I.6.4 Défaut formé pendant le remplissage du moule :

Défaut de remplissage : La pièce se solidifie avant de remplir complètement l'empreinte ou présente un manque de matière dans les parties supérieures du moulage. Ceci peut être due à une température de coulée basse, une fluidité et coulabilité insuffisantes ou un tracé incorrect de la pièce (sections trop faibles) (Fig.I.22). [32].



Figure I.22:Défaut de remplissage

I.6.5 Défaut de construction :

Défaut de joint : Défaut de mise en position des deux demi moules l'un par rapport à l'autre (Fig.I.23).

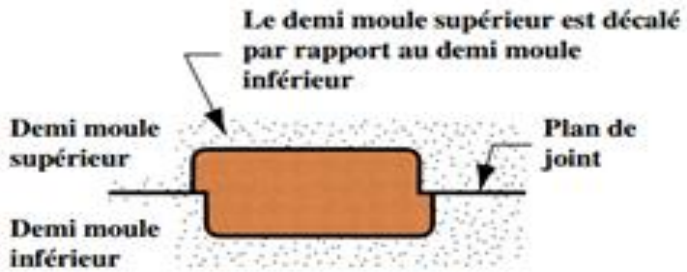


Figure I.23:Défaut de joint

I.7 Conclusion :

On peut dire que la compréhension et la prévention des défauts de moulage sont cruciales dans l'industrie de la coulée de métaux, car ces défauts affectent considérablement la qualité, la fonctionnalité et la fiabilité des produits moulés.

Une identification précise et des mesures proactives pour prévenir ces défauts sont essentielles pour maintenir des normes de qualité élevées. Il est essentiel de mettre l'accent sur l'amélioration continue de la qualité dans les processus de moulage.

Cela répond aux défis existants, stimule l'innovation et favorise l'efficacité et la durabilité globales de l'industrie.

Une attention constante portée au contrôle de la qualité et au perfectionnement des processus est essentielle pour l'avancement et la fiabilité du secteur de la fonderie.

L'effet du champ magnétique sur le développement des défauts d'occlusion d'air dans les procédés de remplissage du métal liquide est un sujet intéressant, particulièrement dans les domaines de la métallurgie, de la fonderie et de la fabrication des alliages. Il existe plusieurs façons dont un champ magnétique pourrait influencer ce phénomène.

L'utilisation des champs magnétiques pour contrôler le métal liquide dans le processus de moulage a également été une zone de recherche active depuis les années 1970. L'idée est d'utiliser des champs magnétiques pour stabiliser l'écoulement du métal, réduire les turbulences, améliorer la qualité des pièces moulées et de minimiser le coût du moulage.

CHAPITRE II

FORMULATION MATHEMATIQUE

II.1 Introduction

Dans ce chapitre On traite la modélisation mathématique de transfert de chaleur et d'écoulement turbulent de fluide non miscibles incompressible en régime variable, ou les modèles de fermeture sont abordés, ainsi que les modèles de suivi de front (VOF).

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 abordant la formulation des équations de mouvement dans le cas des fluides non miscible.

II.2 Modélisation de l'écoulement des fluides

C'est le mouvement de l'écoulement d'un fluide qui permet à partir des équations de Navier-Stockes de traiter les fluides classiques comme l'air, l'eau, l'huile ou aussi les métaux fondus. [33]

II.2.1 Equation de continuité

On appelle équation de continuité l'équation qui exprime la loi de conservation de la masse pour un volume de contrôle matériel. Elle s'exprime par la formule suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \mu)}{\partial x} + \frac{\delta(\rho v)}{\delta y} + \frac{\partial(\rho \omega)}{\partial z} = 0 \qquad (2\text{-}1)$$

Ou dans une notation plus compacte :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}\,(\rho \mu) = 0 \qquad (2\text{-}2)$$

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

$$\text{div}\,\mu = 0 \qquad (2\text{-}3)$$

II.2.2 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 :

$$\left(\frac{\partial \mu}{\partial t}+\mu\frac{\partial \mu}{\partial t}+v\frac{\partial \mu}{\partial y}+w\frac{\partial \mu}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\left(\frac{\partial_{\tau xx}}{\partial x}+\frac{\partial_{\tau yx}}{\partial y}+\frac{\partial_{\tau zx}}{\partial z}\right)+(\rho+\rho_0)g_x \quad (2\text{-}4)$$

Suivant OY :

$$\left(\frac{\partial v}{\partial t}+\mu\frac{\partial v}{\partial t}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\left(\frac{\partial_{\tau xy}}{\partial x}+\frac{\partial_{\tau yy}}{\partial y}+\frac{\partial_{\tau zy}}{\partial z}\right)+(jxB)+(\rho+\rho_0)g_y \quad (2\text{-}5)$$

Suivant OZ :

$$\left(\frac{\partial w}{\partial t}+\mu\frac{\partial w}{\partial t}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial x}+\left(\frac{\partial_{\tau xw}}{\partial x}+\frac{\partial_{\tau yw}}{\partial y}+\frac{\partial_{\tau zw}}{\partial z}\right)+(\rho+\rho_0)g_z \quad (2\text{-}6)$$

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

$$\mu=\tau_{xy}=\mu\left[\frac{\partial \mu}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right] \quad (2\text{-}7)$$

$$\tau_{yz}=\tau_{zy}=\mu\left[\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial x}\right] \quad (2\text{-}8)$$

$$\tau_{xx}=\tau_{zx}=\mu\left[\frac{\partial \mu}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial x}\right] \quad (2\text{-}9)$$

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

II.2.3 Equation de conservation d'énergie

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

$$\rho\, C_p\frac{\partial T}{\partial t}+\rho\, C_p U.\nabla T=\mathrm{div}(\lambda\, \mathrm{grad}T)+\phi \quad (2\text{-}11)$$

$$\phi=\tau_{xx}\frac{\partial_\mu}{\partial_x}+\tau_{yx}\frac{\partial_\mu}{\partial_y}+\tau_{zx}\frac{\partial_\mu}{\partial_z}+\tau_{xy}\frac{\partial_v}{\partial_x}+\tau_{yy}\frac{\partial_v}{\partial_y}+\tau_{zy}\frac{\partial_v}{\partial_z}+\tau_{xz}\frac{\partial_w}{\partial_x}+\tau_{yz}\frac{\partial_w}{\partial_y}+\tau_{zz}\frac{\partial_w}{\partial_z} \quad (2\text{-}12)$$

Avec :

$\rho\, C_p \frac{\partial T}{\partial t}$: La variation totale d'énergie

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

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

ϕ : La dissipation irréversible due au frottement visqueux. [33]

II.2.4 Equation électromagnétique

L'équation électromagnétique en coordonnées cylindriques :

$$\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{1}{\mu r}\frac{\partial A^*}{\partial z}\right)+\frac{\partial}{\partial r}\left(\frac{1}{\mu r}\frac{\partial A^*}{\partial z}\right)-\frac{\sigma}{r}\frac{\partial A^*}{\partial t}=-J_s \quad (2\text{-}13)$$

Loi d'Ohm généralisée

$$\mathrm{j}=\sigma(\mathrm{E}+\upsilon\times \mathrm{B}) \quad (2\text{-}14)$$

Avec :

j : densité de courant électrique en A/m^2

σ :conductivité électrique du fluide en S/m

E : champ électrique en V/m

υ : vitesse du fluide en m/s

B : champs magnétiques en Tesla

Force de Lorentz :

$$F_l = j \times B \quad (2\text{-}15)$$

$$F_l = \sigma \times \upsilon \times B^2 \quad (2\text{-}16)$$

Foce de gravité

$$F_g = m \times g \quad (2\text{-}17)$$

Avec :

F_g : force gravitationnelle en(N)

M : masses en(kg)

$$F_g = \rho \times g \quad (2\text{-}18)$$

Avec :

F_g : force gravitationnelle par unité de volume en (N/m^3)

ρ : densité du matériau en (kg/m^3)

Force magnétique :

$F = q \times \upsilon \times B$ (2-19)

Avec :

q : charge électrique de la particule en(C)

υ : vitesse de la particule en(m/s)

B : champ magnétique en(T)

Donc :

$$B = \frac{m \times g}{q \times \upsilon} \quad (2.19A)$$

II.3 Modélisation thermique

La chaleur est l'un des modes d'échange d'énergie thermique entre deux systèmes. C'est une notion fondamentale de la thermodynamique. Contrairement au travail, la chaleur est le bilan de transferts d'énergie microscopiques et désordonnés, ses effets donnent lieu à des observations et des mesures. L'écoulement de la chaleur comme la production de travail est un phénomène qui implique la variation de l'énergie interne.

II.3.1 . Les différents modes de transfert thermique

Les problèmes de transmission d'énergie, et en particulier de la chaleur, ont eu une importance déterminante pour l'étude et le fonctionnement d'appareils tels que les générateurs de vapeur, les fours, les échangeurs, les évaporateurs, les condenseurs, etc., mais aussi pour des opérations de transformations chimiques.

Le transfert de chaleur est la transmission d'énergie d'une zone à une autre sous l'influence d'une différence de température, car que le flux de chaleur n'est pas seulement lié à une relation, mais concerne le mélange de différentes lois des matériaux indépendants. Le caloporteur fonctionne selon trois modes de transfert de chaleur (Fig.II.1) [34]:

- La conduction.
- La convection.
- Le rayonnement

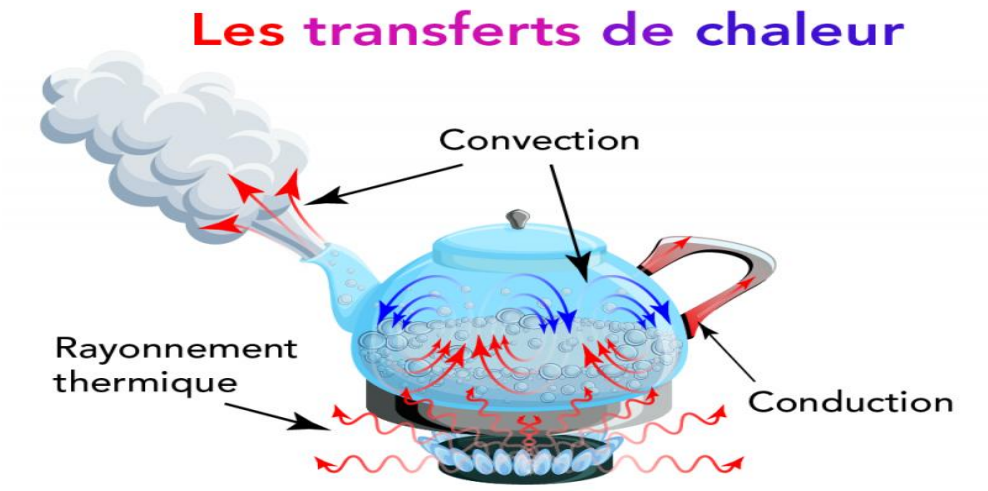


Figure II.1: Différent mode de transfert thermique

II.3.1.1 Transfert de chaleur par conduction

C'est le transfert de chaleur interne c'est-à-dire entre des matériaux ou objets en contact direct les uns avec les autres (exemple : chocs de molécules dans les gaz, vibrations dans les solides cristallins, etc.). Les molécules dans l'objet plus chaud s'agitent plus rapidement que celles dans l'objet plus froid. Cela signifie que les molécules situées dans la partie la plus chaude d'un objet vibrent plus rapidement que celles situées dans les parties plus froides. Les molécules plus rapides entrent ainsi en collision avec les plus lentes, causant leur accélération. C'est de cette façon que l'objet se réchauffe. La conduction peut aussi se produire à l'intérieur d'un même objet (Fig.II.2) [35].

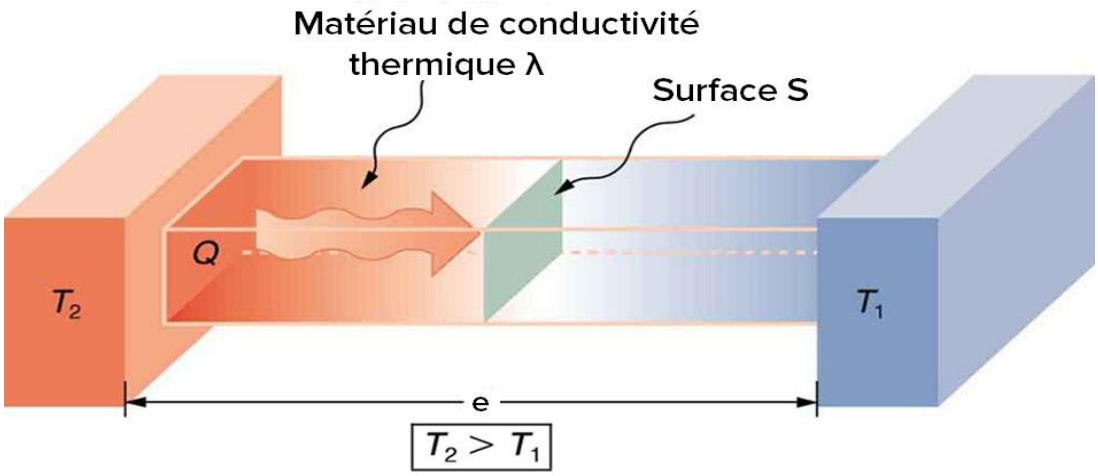


Figure II.2: Transfert de chaleur par conduction

II.3.1.1.1 Cas des gaz

Le volume d'un gaz dans un point M (x, y, z), sa température T (x, y, z) est associée à l'énergie des molécules du gaz trouvons à proximité de ce point. Les molécules d'un gaz sont animées d'un mouvement de translation aléatoire, d'un mouvement de vibration et de rotation interne. L'ensemble de ces mouvements forme le phénomène d'agitation thermique, 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.3.1.1.2 Cas des liquides

Le transfert de chaleur est identique à celui des gaz. Néanmoins, les molécules sont plus proches et donc les interactions sont plus fortes et fréquentes. Généralement les gaz sont des mauvais conducteurs de chaleur.

II.3.1.1.3 Cas des solides

La conduction dans ce cas est attribuée à un transfert d'énergie sous la forme de vibrations du réseau cristallin. Ce sont des bons conducteurs thermiques (tableau.II.1).

Matériaux	Air	Laine de Verre	Bois	Verre	Béton Plein	Acier doux	Cuivre
$\boldsymbol{\lambda}(\mathbf{W m^{-1}.k^{-1}})$	0.026	0.04	0.23	1.1	1.75	50	380

Tableau II.1:conductivité thermique de quelques corps, à la température ambiante

II.3.1.1.4 Loi de Fourier

Le flux de chaleur qui se propage par conduction dans la matière est lié aux variations spatiales de température. Joseph Fourier a trouvé expérimentalement, en 1822, la relation entre la densité de flux de chaleur et le champ de température (loi de Fourier)

Fourier montre l'apport de chaleur au flux de liquide qui se produit des points chauds vers les endroits froids, dont les seules formes dans la matière se traduisent par des changements de température (effet ionique).

Considérons un milieu cylindrique homogène de section S et de longueur e (Fig.II.3), les deux faces du cylindre sont maintenues respectivement à la température T2 (source chaude) et T1 (Source froide). Il se produit un transfert d'énergie orienté de la source chaude vers la source

froide. Le milieu étant homogène, en régime permanent, la température se répartit de manière uniforme (Fig.II.3).

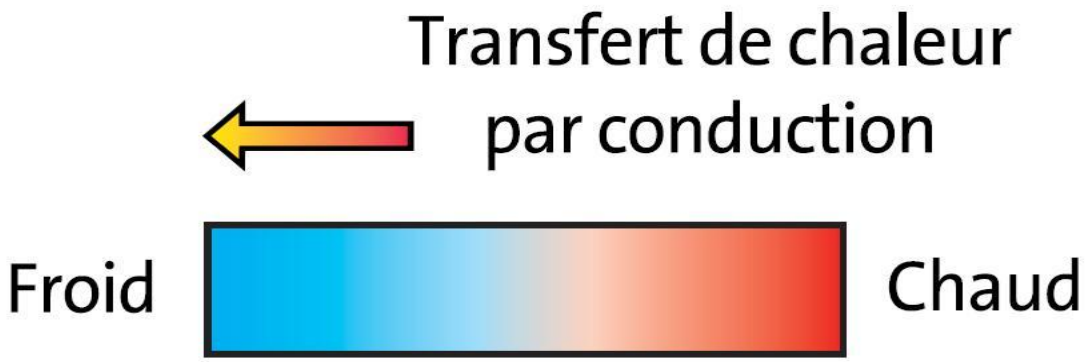


Figure II.3: Conduction thermique

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

$$dQ = -\lambda\, S \frac{dT}{dx} dt \qquad (2\text{-}20)$$

Avec :

dQ : Énergie élémentaire en Joule

λ : Conductivité thermique du matériau en W/m. K

S : section en m²

dt : temps élémentaire en s

$\frac{dT}{dx}$: Gradient de température en x en K/m

II.3.1.2 Transfert de chaleur par convection

II.3.1.2.1 Définition et classification

C'est le transfert d'énergie thermique au sein d'un fluide en mouvement ou entre un fluide en mouvement et une paroi solide (Fig.II.6) [36].

Ou on peut dire que la convection est un mode de transfert de chaleur qui s'effectue simultanément avec des transferts de masse où celle-ci est advectée (transportée, conduite) par au moins un fluide.

Selon la nature du mécanisme qui provoque le mouvement du fluide on distingue :

- La convection libre ou naturelle
- La convection forcée

A- La convection libre ou naturelle

Une convection naturelle c'est lorsque le mouvement du fluide est uniquement dû à la poussée d'Archimède induite par les variations de masse volumique au sein du fluide, lesquelles sont la conséquence des variations spatiales de température. L'air chaud, plus léger, tend alors à monter, alors que l'air froid descend. Ce mécanisme se produit dans des situations très diverses : il est responsable de l'homogénéisation de la température dans une pièce d'habitation (transfert de chaleur du radiateur vers les parties froides de la pièce), mais également des courants marins ainsi que de la circulation générale de l'atmosphère terrestre.

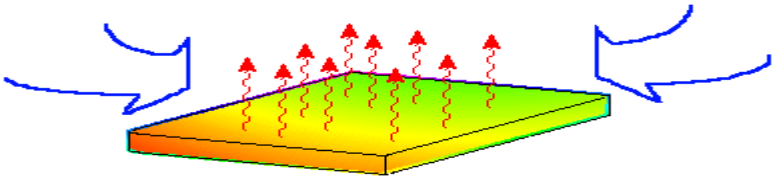


Figure II.4:convection libre ou naturelle

B- La convection forcée

C'est le cas où le fluide doit son mouvement à une cause extérieure (pompe, ventilateur, agitateur, etc.). En convection forcée proprement dite, la poussée d'Archimède est négligeable devant les forces servant à mettre le fluide en mouvement. C'est le cas, par exemple, du refroidissement des moteurs à combustion interne : la pompe à eau pousse le liquide de refroidissement à travers le moteur, puis dans l'échangeur.

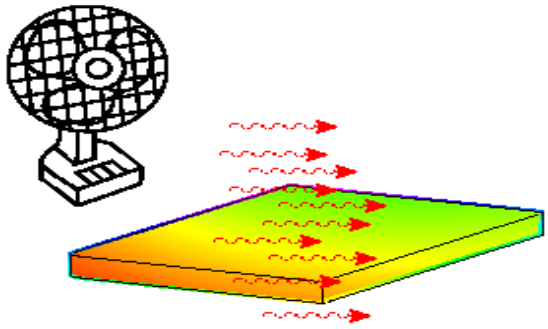


Figure II.5:convection forcée

II.3.1.2.2 Échanges convectifs entre un fluide et une paroi solide

Pour les calculs thermiques, on a la plupart du temps besoin de connaitre le flux échangé entre un fluide et une paroi solide (transfert de chaleur des parois du moteur vers le liquide de refroidissement, refroidissement d'un microprocesseur d'ordinateur...). L'interface entre le fluide et le solide, laquelle est traversée par le flux de chaleur, est appelée surface d'échange. Dans tous les problèmes que nous traiterons cette année, nous admettrons que la densité de flux

échangée entre une paroi à la température Tp est un fluide à la température *Tf* est donnée par la loi de Newton :

$$q = h_c\ (T_p - T_f) \qquad (2\text{-}21)$$

Avec :

h_c : Coefficient d'échange thermique convectif en W/m²K :

C'est le flux de chaleur transféré entre la paroi et le fluide, par unité de surface, et par unité d'écart de température entre la surface et le fluide.

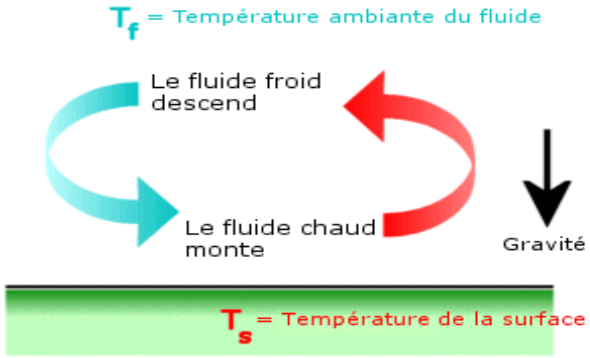


Figure II.6: Convection thermique

II.3.1.3 Transfert de chaleur par rayonnement

Le rayonnement est le troisième type de transfert de chaleur. Contrairement à la convection et à la conduction, aucune matière n'est nécessaire pour le rayonnement. Le rayonnement thermique est le transfert d'énergie par ondes électromagnétiques. Les ondes électromagnétiques transportent l'énergie à travers l'espace. Le rayonnement thermique est la façon dont le Soleil chauffe la Terre. L'énergie du Soleil voyage sous forme d'ondes dans l'espace, et non à travers des atomes ou des molécules. D'autres objets chauds, tels qu'un grille-pain ou notre corps, émettent également de l'énergie thermique. Un micro-ondes utilise aussi un rayonnement pour réchauffer notre nourriture.

Le rayonnement thermique concerne les longueurs d'ondes comprises entre approximativement 10 nm et 1 mm et se situe ainsi de l'ultraviolet à l'infrarouge, en couvrant le visible (Fig.II.7) [37].

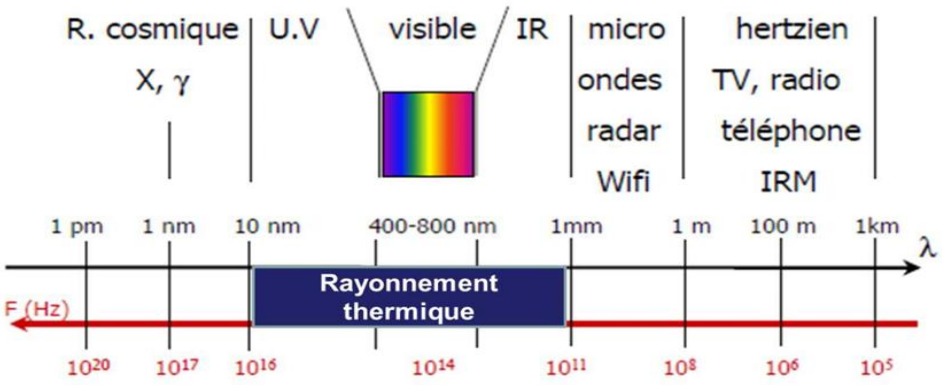


Figure II.7: Longueur d'onde du rayonnement thermique

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 ɣ 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 $\gamma = \frac{C}{\lambda} = 3.1014\ Hz$ et possède une énergie de $dE = h.\gamma = 1{,}98.10^{-19} J$ soit 1.23 eV.

Si un corps rayonne, il émet donc de l'énergie et sa température doit baisser. Cependant dans la pratique un corps n'est jamais isolé. Il est en équilibre avec le milieu 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 (fig.II.8) un mur de surface S dont les deux faces sont respectivement maintenues aux températures T1 et Ts. (T1> Ts). 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 Ta.

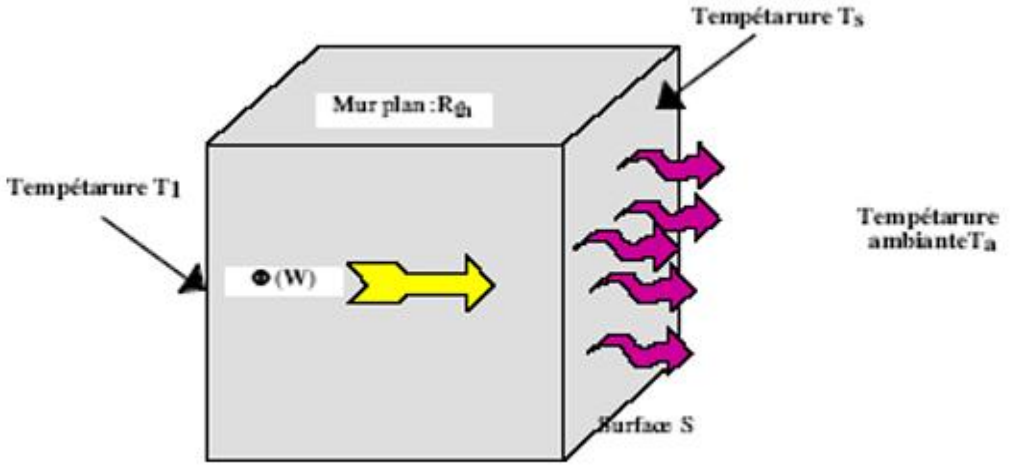


Figure II.8:transfert thermique par rayonnement

Suivant la loi de Stefan-Boltzmann, le flux de chaleur échangé entre la surface S et le milieu ambiant peut S'écrire :

$$\varphi = \varepsilon.\sigma.A(T_s^4 - T_a^4) \quad (2\text{-}22)$$

σ : 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.3.2 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.3.2.1 Conditions de Dirichlet

Sert a fixé la température TS à la surface des corps (ou sur une partie de la surface) à Chaque instant :

$$T_s = T(X_s.Y_s.Z_s) \quad (2\text{-}23)$$

II.3.2.2 . Conditions de Robin-Fourier

Ces conditions donnent la température environnante du corps Te et la loi qui décrit le transfert thermique entre le corps et son environnement. Ce type de transfert qui a lieu à la surface du corps est très complexe, étant donné le grand nombre de variables qui sont

impliquées. La loi de newton établit la relation entre la densité de flux thermique transféré à la surface du corps, de température Tc, vers son milieu environnant de température Te (Te<Tc) :

$$\varphi = \mathrm{h}(T_c - T_e) \qquad [\mathrm{W/m^2}] \qquad (2\text{-}24)$$

Où

h : facteur de proportionnalité appelé coefficient de transfert thermique. [38]

II.3.2.3 Le modèle de turbulence k-ε

Le modèle k-e utilise comme variable l'énergie cinétique turbulente par unité de masse *k* et le taux de dissipation d'énergie cinétique turbulente par unité de masse, noté 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. Cette dernière quantité est directement liée à l'échelle de longueur de la turbulence *l* puisque :

$$\varepsilon = \frac{k^{3/2}}{l} \qquad (2\text{-}25)$$

La viscosité turbulente s'exprime sous la forme :

$$\mu_t = \rho\ c_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \qquad (2\text{-}26)$$

Le modèle k-ε résout deux équations de transport, la première pour *k*, la seconde pour ε. L'équation de transport de *k* s'écrit :

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \overline{u_j}\frac{\partial k}{\partial x_j} = c_\mu \frac{\overline{k^2}}{\varepsilon}\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right)\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{c_\mu}{\sigma_k}\frac{k^2}{\varepsilon}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right) - \varepsilon \qquad (2\text{-}27)$$

Dans cette équation, on identifie facilement la signification des différents termes :

- La variation de l'énergie cinétique turbulente dans une particule fluide que l'on suit dans son mouvement, donnée par

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \overline{u_j}\frac{\partial k}{\partial x_j} \qquad (2\text{-}28)$$

- La production d'énergie cinétique turbulente

$$c_\mu \frac{\overline{k^2}}{\varepsilon}\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right)\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} \qquad (2\text{-}29)$$

Elle correspond à un transfert d'énergie de l'écoulement moyen en turbulence qui s'opère dans les zones où l'écoulement moyen est cisaillé. Ce terme est particulièrement important dans les couches limites. [39]

♦ La diffusion

$$\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{c_\mu}{\sigma_k}\frac{k^2}{\varepsilon}\frac{\partial k}{\partial x_j}\right) \quad (2\text{-}30)$$

♦ La dissipation ε

L'équation de transport pour la quantité e a une forme analogue :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \overline{u_j}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = c_{\varepsilon 1} c_\mu \overline{k}\left(\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u_j}}{\partial x_i}\right)\frac{\partial \overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\frac{c_\mu}{\sigma_\varepsilon}\frac{k^2}{\varepsilon}\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right) - c_{\varepsilon 2}\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2\text{-}31)$$

Le modèle k-ε fait intervenir cinq constantes, définies comme suit

$\boldsymbol{C_\mu}$ = 0,09 $\boldsymbol{C_{\varepsilon 1}}$ = 1,44 $\boldsymbol{C_{\varepsilon 2}}$ = 1,92 $\boldsymbol{\sigma_k}$ =1,0 et $\boldsymbol{\sigma_\varepsilon}$ =1,3

Ces constantes ont été ajustées à partir de la confrontation de ce modèle avec les résultats d'expériences relatives à des écoulements cisaillés. Le modèle k-ε , largement répandu, permet de rendre compte de la variabilité spatiale et temporelle de la turbulence, tout en gardant une relative simplicité de mise en œuvre. Les prédictions d'écoulements cisaillés simples donnent de bons résultats.

En revanche, ce modèle est peu adapté (voire inadapté) pour résoudre des écoulements complexes, comme par exemple les écoulements dans lesquels existent des zones de recirculation, les écoulements présentant une anisotropie forte ou les écoulements dans lesquels la turbulence est à l'origine d'un écoulement moyen (production négative dans la formulation de l'équation de transport de *k*).

Dans certaines situations complexes, le modèle k-ε apparaît aussi comme accentuant le caractère diffusif. Les conditions aux limites en paroi des équations de transport pour *k* et ε sont complexes, l'écoulement est laminaire sur la paroi et ces équations de transport n'y sont plus valides, ce qui implique la nécessité d'utiliser une loi de paroi.

II.3.3 Equation de transport de l'énergie cinétique turbulente k

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial x_i}(\rho K U_i)}_{1} = \underbrace{\frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\bar{\mu} + \frac{\mu t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x}\right]}_{2} + \underbrace{G_K}_{3} + \underbrace{\rho\,\varepsilon}_{4} \quad (2\text{-}32)$$

1 : terme convectif

2 : terme diffusif

3 : taux de production

4 : taux de dissipation

II.3.4 Equation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente ε

$$\frac{\partial}{\partial xj}(\rho\varepsilon U_i) = \frac{\partial}{\partial xj}\left[(\bar{\mu} + \frac{\mu t}{\sigma\varepsilon})\frac{\partial\varepsilon}{\partial x}\right] + C_{1\varepsilon}\frac{\varepsilon}{k} - C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k} \quad (2\text{-}33)$$

Le terme de production Gk est donnée par :

$$G_K = -\rho\overline{U_1 U_J} = \rho V_t(\frac{\partial\overline{U_1}}{\partial x_j} + \frac{\partial\overline{U_J}}{\partial x_i})\frac{\partial\overline{U_1}}{\partial x_j} \quad (2\text{-}34)$$

II.4 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. [40]

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.

$$\frac{\partial F}{\partial T} + U.\nabla F = 0 \quad \text{En } \Omega \quad (2\text{-}35)$$

Avec :

F : représente le facteur de remplissage,

U : désigne vecteur vitesse,

T : représente le temps.

Ω : est le domaine de calcul

II.4.1 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 ajoutons 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 suivants :

C_k = 0 : la cellule et vide (du Kieme fluide) ;

C_k = 1 : la cellule et vide (du Kieme fluide) ;

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

Avec :

$$C_k = \frac{\partial \Omega_k}{\partial \Omega_{maill}} \quad (2\text{-}36)$$

$\partial\Omega_{maill}$: représente le volume total de la maille de calcul

Ω_k: le volume de la partie de la maille occupée par la phase. Basé sur la valeur locale du, les propriétés et les variables appropriées seront assignés à chaque volume de contrôle dans le domaine.

II.4.2 Equation de la fraction volumique

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

$$\frac{1}{\rho k}\left[\frac{\partial}{\partial t}(C_k\rho_k) + \nabla - \left(C_k\rho_k\overrightarrow{V_k}\right) = S_{CK} + \sum_p^n = 1(\dot{m_{pk}} - \dot{m_{kp}})\right] \quad (2\text{-}37)$$

Où :

$\dot{m}_{pk}$ Est le transfert de masse à partir de la phase P à la phase K

m_{kp} Est le transfert de masse à partir de la phase K à la phase P

Par défaut, la limite de source du côté droit de l'équation (2-37), S_{CK} égal 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 :

$$\sum_{k=1}^{n} C_K = 1 \quad (2\text{-}38)$$

II.6 Conclusion

Le présent chapitre a pour but de présenter la prévision numérique d'écoulement turbulent de fluide incompressible en régime variable et les différentes modes de transfert thermique qui influe sur le moule avec la méthode de volume de fluide (VOF) qui est une méthode de construction d'interface et le modèle de fermeture K-ε pour la dynamique**.**

La résolution analytique du problème général est impossible d'où la nécessité des Méthodes numérique qui sont l'objet du chapitre suivant.

CHAPITRE III

METHODES DE DISCRETISATION

III.1 Introduction

Les techniques de simulation connaissent un développement considérable depuis les dernières années. Les mises au point expérimentales, longues et coûteuses sont progressivement remplacées par des études dans lesquelles les outils de simulation prennent une place de plus en plus importante. Les impératifs industriels de rapidité et de limitation des coûts sont pour l'essentiel responsables de cette évolution.

La discrétisation d'une EDP peut être considérée comme un ensemble de techniques destinées à transformer une ou plusieurs relations différentielles continues (au sens mathématique du terme) en un nombre équivalent de relations dites discrètes, applicables en un nombre fini (discret) de points (appelés encore nœuds de coordonnées connues). Donc, le domaine de calcul qui était continue doit être divisé ou discrétisé pour permet de remplacer les EDP très compliqués par des équations algébriques faciles à résoudre.

Notre travail dans ce chapitre pas détailler précisément chaque méthode mais plutôt présenter les différentes approches et de justifier notre choix. Il est consacré à l'aspect numérique de la résolution des équations de la chaleur dans le chapitre précédent.

III.2 Méthodes numériques

Pour le passage d'un problème continu au problème approché on dispose de plusieurs techniques concurrentes et complémentaires :

- Les différences finies
- Les éléments finis
- Les volumes finis.

III.2.1 Méthode des différences finies

Cette méthode est fournie aux problèmes aux limites afin d'obtenir une solution approchée, sur un maillage, en se basant sur la discrétisation de l'opérateur différentiel $\frac{\partial}{\partial x}$,t ,Le principe de cette méthode est la discrétisation du domaine de calcul un nombre fini de points (un maillage prédéfini) sur lesquels on approche les opérateurs de dérivation des équations modèles par des développements en séries de Taylor tronquées à l'ordre de précision choisie où en reliant la valeur des inconnues en un nœud aux valeurs de ces mêmes inconnues aux nœuds voisins. [41]

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.

III.2.2 Méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis (MEF) consiste à approcher, dans un sous-espace de dimension finie, un problème écrit sous forme variationnelle (comme minimisation 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). Dans la MEF, est défini à l'aide du maillage du domaine. Le maillage du domaine d'en définir un pavage dans les pavés sont les éléments finis. Un élément fini est donc la donnée d'une cellule élémentaire et de fonctions de base de l'espace d'approximation.

Avantages :

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

Inconvénients :

Complexité de mise en œuvre et coût en temps de calcul et en Mémoire.

III.2.3 Méthode des volumes finis

Pour cette méthode le principe 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 3 dimensions) [41]

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)

Inconvénients :

- Moins précis que les méthodes spectrales.
- On dispose de peu de résultats théoriques de convergence.

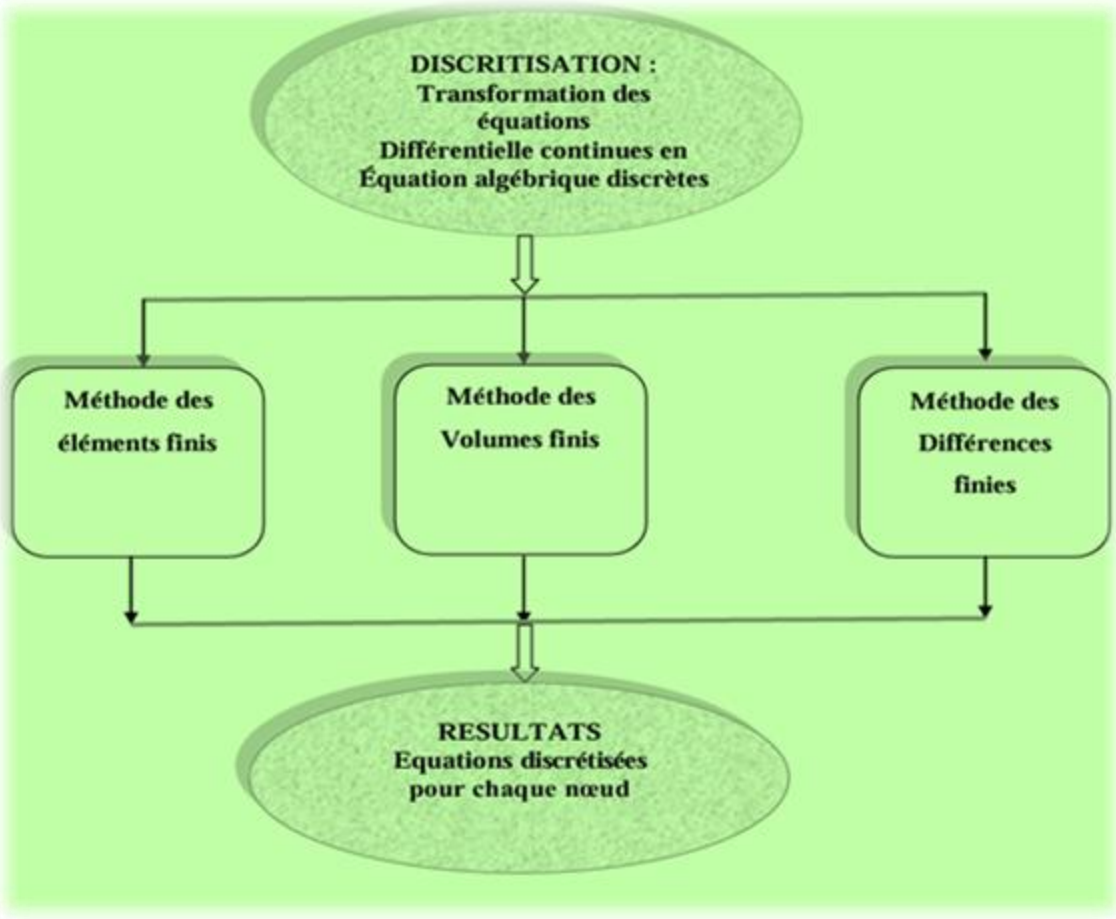


Figure III.1:méthode de discrétisation

III.3 Calcul d'interface ME

Les techniques de calcul d'interface peuvent être très différentes en fonction du problème à résoudre, et se divisent généralement en deux principales familles en fonction de maillage (fig.III.2) que l'on va utiliser : la méthode lagrangienne (sur maillage mobile) et la méthode eulérienne (sur maillage fixe). [42]

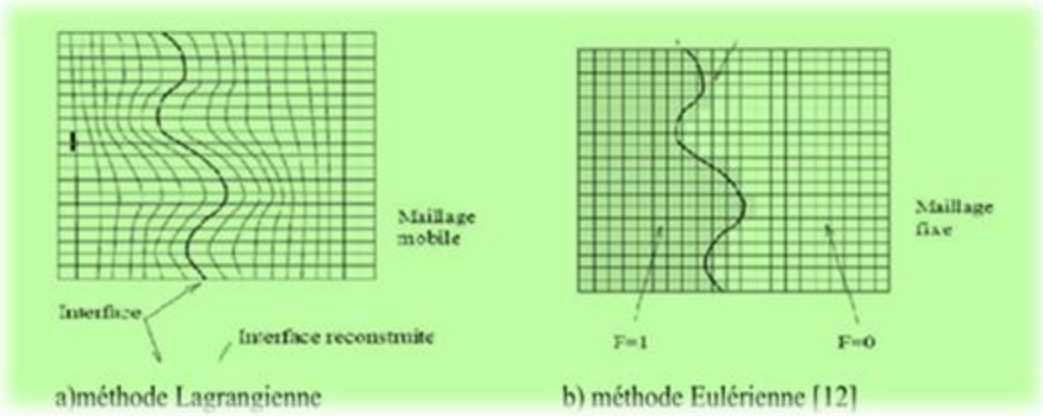


Figure III.2: Présentation des méthodes de calcul d'interface

Un maillage est la discrétisation spatiale d'un milieu continu, ou aussi, une modélisation géométrique d'un domaine par des éléments proportionnés finis et bien définis. 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 (fig.III.3).

Avec un maillage, ce n'est plus le système de coordonnées qui engendre l'espace du domaine, mais plutôt un ensemble de nœuds/sommets qui lui donne sa structure interne.

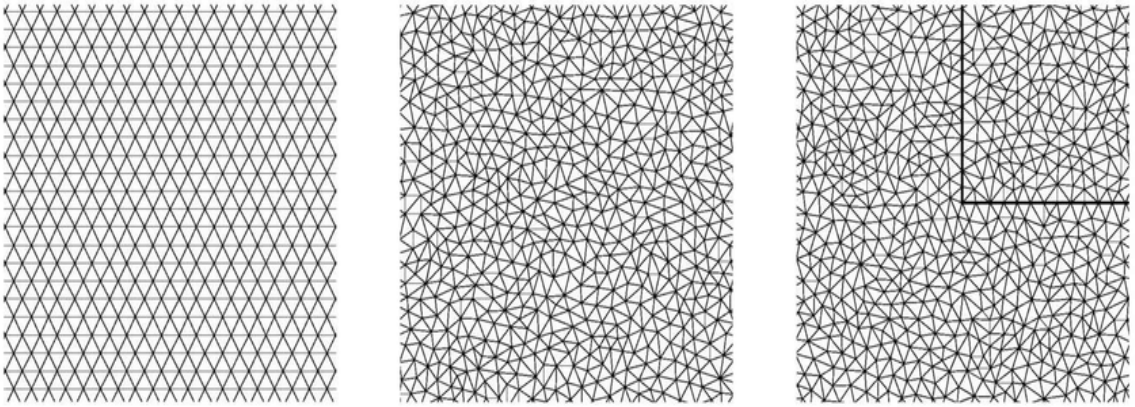


Figure III.3: Example de maillage structuré (gauche), maillage non structuré (centre) et maillage adapté à une interface en coin (droite)

Pour être utilisable pour la simulation numérique, les maillages doivent :

- Représenter suffisamment bien la géométrie
- Comporter suffisamment d'éléments pour calculer précisément
- Avoir des éléments de bonne qualité

Une structure de données représentant un maillage doit stocker plusieurs types d'éléments : des sommets, des arêtes, des faces(fig.III.4).

Plus précisément :

- Les sommets : C'est non seulement un point dans l'espace, mais c'est une unité à laquelle l'ordinateur associe des informations sur la position (du type p (x ; y ; z)), la couleur, etc
- Les arêtes : C'est un segment qui relie deux sommets.
- Les faces : Pour un logiciel d'infographie 3D, une face est un triangle composé de trois arêtes refermées et connectées par leurs sommets.

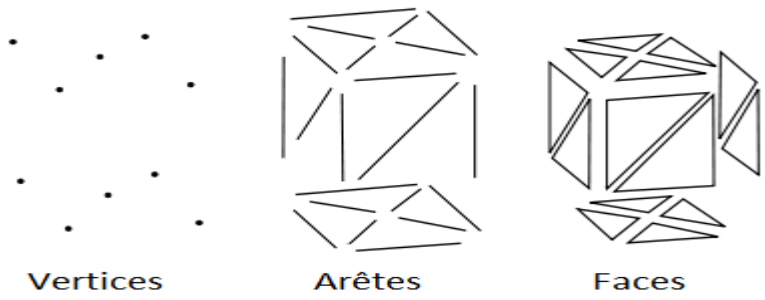


Figure III.4: Les trois composants principaux du maillage

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

III.3.1.1 Les méthodes lagrangiennes

La méthode de Lagrange, ou méthode de la fausse position 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 à des maillages trop déformés(fig.III.5). [43]

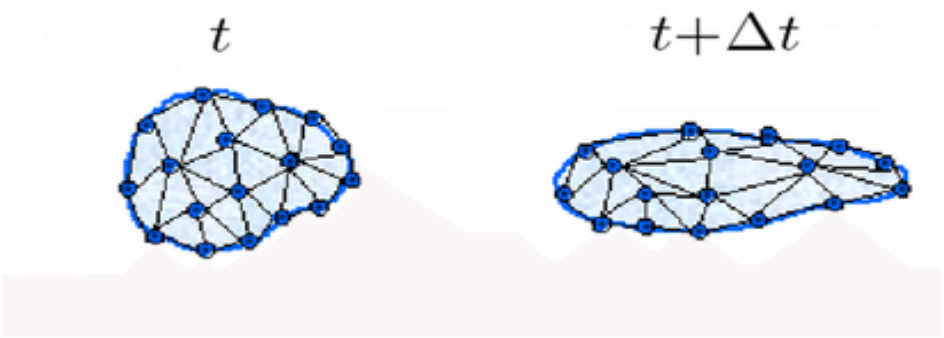


Figure III.5: Approche lagrangienne

III.3.1.2 Les méthodes eulérienne

La méthode eulérienne est l'une des deux techniques qui permettent de caractériser un écoulement. Elle décrit le champ de vitesses qui associe à chaque point un vecteur vitesse. Donc on peut dire que c'est une déformation de l'interface au cours du temps à travers un maillage fixe(fig.III.6). [44]

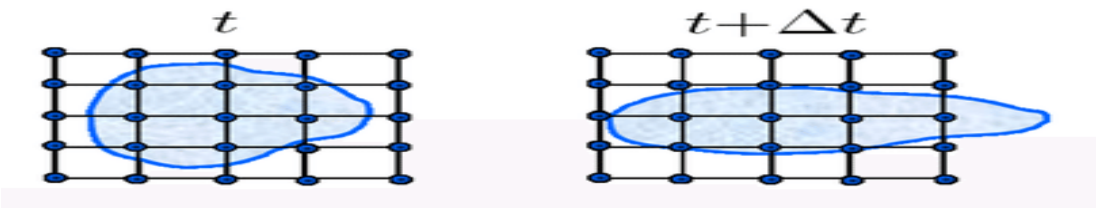


Figure III.6: Approche eulérienne

L'interface est alors reconstruite à partir de chargement des propriétés physiques. Les méthodes eulériennes peut être classées en deux catégories :

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

III.3.1.2.1 Les méthodes de suivi de front

La méthode Front-Tracking est utilisée pour décrire la dynamique de l'interface entre deux fluides. Contrairement aux méthodes de description implicite de l'interface, comme les méthodes Volume Of Fluid (VOF) ou Level-set, cette méthode en offre une description explicite (fig.III.7). Il existe différentes méthodes pour marquer l'interface :

- Marqueurs de surface
- Fonction de hauteur
- Méthode de ligne de niveau (level set) [45]

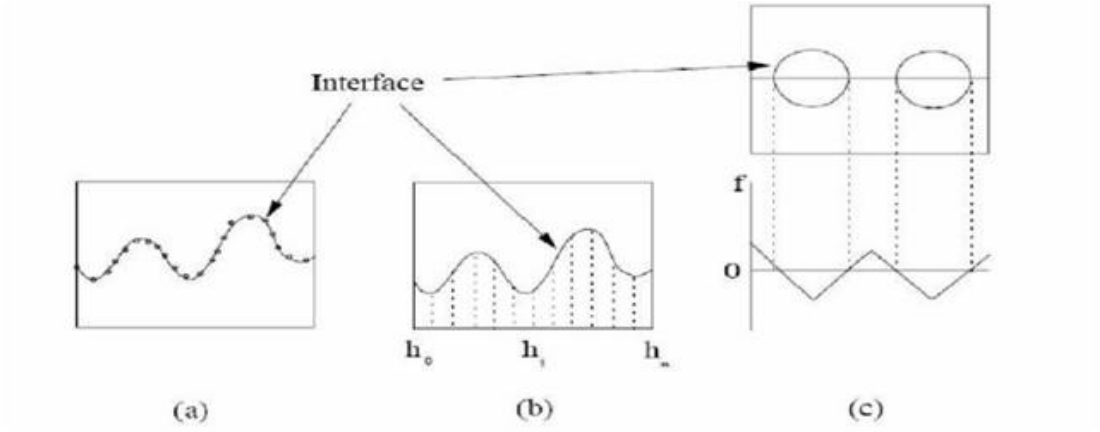


Figure III.7: Différentes méthodes de suivi de front

III.3.1.2.2 Les méthodes de suivi de volume :

La méthode du volume de fluide (VOF) est une méthode utilisée en mécanique des fluides numérique pour le traitement des écoulements diphasiques. C'est l'une des méthodes standard dans ce domaine et elle est presque exclusivement utilisée avec la discrétisation en volumes finis (fig.III.8). [46]

Pour un régime laminaire d'un milieu diphasique sans échanges entre phases. Le milieu est décrit par la fraction volumique C de l'une des phases. La valeur de C dans chaque cellule de calcul est une variable du problème qui est advectée avec la vitesse V

$$\frac{\partial C}{\partial T} + V.\nabla C = 0$$

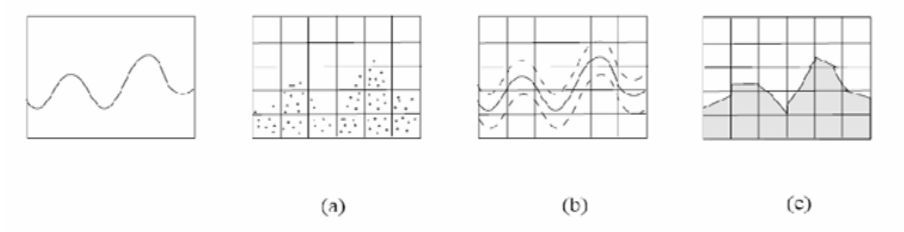


Figure III.8: Différentes méthodes de suivi de volume appliquées à une interface quelconque

(a) Méthode MAC : La méthode d'analyse combinée une méthode d'enquête par questionnaire quanti-quali qui a été créée par Bruno Maurer, avec l'aide de Pierre-Antoine Desrousseaux, en 2013.

(b) schéma TVD : Les schémas développés sont TVD (Total Variation Diminishing). Pour certains, ils sont symétriques d'ordre deux, incorporant les idées clés des méthodes développées pour les équations d'Euler compressibles.

(c) Méthode VOF : 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 1 et une maille vide à une valeur 0. 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 (fig. III.9). [47]

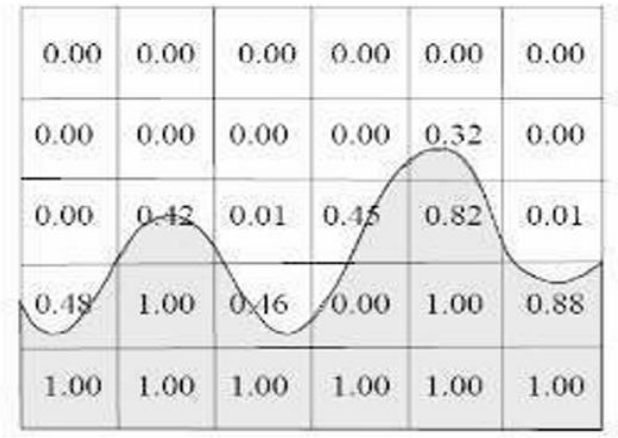


Figure III.9: Fraction volumique associée à une interface sur un maillage discret

III.4 Simulation numérique en fonderie :

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

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

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

Les logiciels de simulation de fonderie simulent, par des méthodes de résolution de type volumes finis ou éléments finis, les différentes phases du process. [48]

III.4.1 Apports et enjeux de la simulation

La simulation de fonderie entraîne alors une réduction de la durée de mise au point par moins de retouche outillage ainsi qu'une réduction du taux de rebut. La géométrie de la pièce peut être modifiée pour permettre une meilleure adéquation avec les contraintes de production. La thermique de moule (position des canaux d'eau ou de thermorégulation) peut être également simulées.

Les enjeux de la simulation vont permettre de vérifier des points importants comme :

- Le remplissage « correct » du moule évitant ainsi :
- Le risque de mal venue
- Le risque de soufflure,
- Le risque de casse.
- La solidification prématurée
- Une pression insuffisante
- Un emprisonnement d'air
- Des efforts sur les noyaux
- Des débits aux attaques

Le refroidissement de la pièce évitant ainsi :

- Le risque de retassure
- Le risque de crique
- Les contraintes résiduelles
- Les zones en traction
- Le refroidissement hétérogène Et permettant de prévoir une solidification dirigée [49]

III.4.2 Mise en œuvre numérique

Il existe actuellement 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, [50]

L'an du 1970 c'est le début d'utiliser le programme basé sur la méthode des éléments finis 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.

Le programme basé sur la méthode des éléments finis offre une plateforme de calcul multi-physique intégrant la mécanique des fluides et des structures, l'électromagnétisme, la thermique ainsi que la simulation de systèmes et de circuits. En outre, beaucoup de sociétés de consultation et centaines d'universités utilisent Le programme basé sur la méthode des éléments finis pour l'analyse, recherche, et l'utilisation éducative, Le programme basé sur la méthode des éléments finis est identifié dans le monde entier pendant qu'un des programmes le plus extensivement utilisés et capables de son type.

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.

III.4.2.1 Définition de la géométrie :

Lors de la modélisation de la géométrie par éléments finis, maillage de type eulérien, il faut savoir que la taille de maille définit le temps de calcul et donc son coût. Il est souvent intéressant de choisir des tailles de mailles différentes par parties comme pour toute modélisation en éléments finis (voir « Dossier Eléments Finis »). Il faut savoir profiter des

symétries, des zones pré-remplies (comme un bassin) et ne pas chercher à tout simuler (congés, petits détails…) (Fig. III.10).

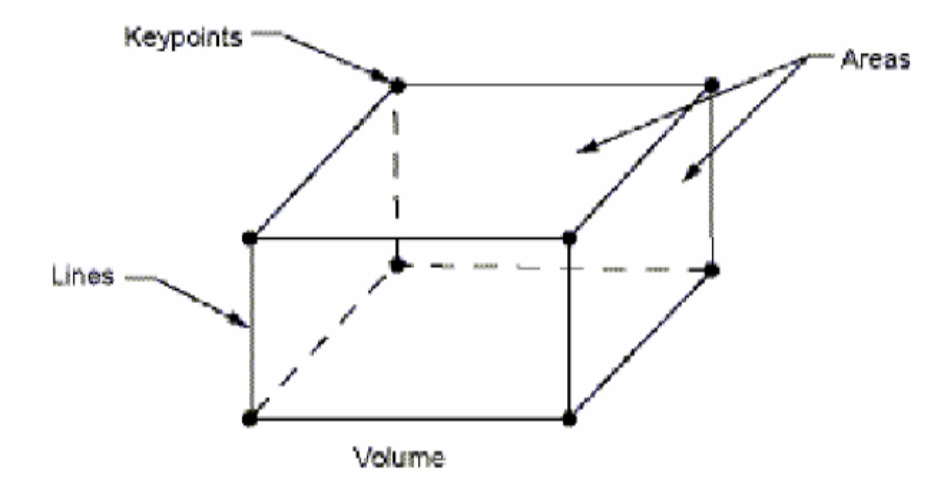


Figure III.10:Définition de la géométrie

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

III.4.2.2 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. Le programme basé sur la méthode des éléments finis 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 des données.

Pour définie les propriétés matérielles :

Main Menu>Préprocesseur>Matériel Props>Matériel Models.

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 Le programme basé sur la méthode des éléments finis 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.

III.4.2.3 Maillage de la géométrie

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

Maillages structurés (réguliers) et maillages non structurés (libres).

- 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.

Les maillages les plus « efficaces » sont les maillages dits « réguliers » ou « structurés » : ils sont constitués de parallélogrammes en 2D, et de parallélépipèdes en 3D.

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

III.4.2.4 Calculs numériques :

Les calculs sont coûteux, ils ne seront pertinents que si le but de leur réalisation est cerné et en conséquence les modèles bien choisis. Le calcul dans sa globalité comprend trois phases : le pré processing avec la récolte de données précises, le calcul proprement dit, et le post-processing.

Dans l'étape de calcul 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.

III.4.2.5 Visualisation et analyse des résultats :

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.

A l'issue du post-processing, il est possible d'obtenir différents résultats comme :

- Des cartes de température,
- Les états de la matière : liquide, solide, intervalle de solidification (fraction de solide)
- Les points chauds
- Le gradient de température
- La vitesse de refroidissement
- Les retraits
- Les fonctions critères : porosité

III.5 Conclusion :

Le chapitre III étudie les méthodes numériques utilisées pour le traitement des problèmes thermiques, par une définition générale des différentes méthodes de discrétisation. Ensuite, nous avons donné brièvement une théorie sur les éléments finis. Celle-ci correspond à la méthode utilisée par notre simulateur de référence (Le programme basé sur la méthode des éléments finis). En effet, il s'agissait uniquement d'exposer la démarche générale et les concepts qui seront nécessaires à la bonne compréhension des travaux ultérieurs.

CHAPITRE IV

INTERPRETATIONS DES RESULTATS

IV.1 Introduction :

Le chapitre IV étudié le transfert de chaleur et l'écoulement du fluide chaud (Fer) qui s'écoule dans un moule pour reproduire, après refroidissement, une pièce donnée. Le champ de température transitoire de la paroi de moule (l'acier) et de trajectoire de fer avec la comparaison de la présence ou l'absence de champ magnétique est évalué par un modèle CFD, il s'agit ici de discuter une expérience numérique du remplissage d'un moule en 2D d'une pièce.

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

IV.2 Description du domaine d'application

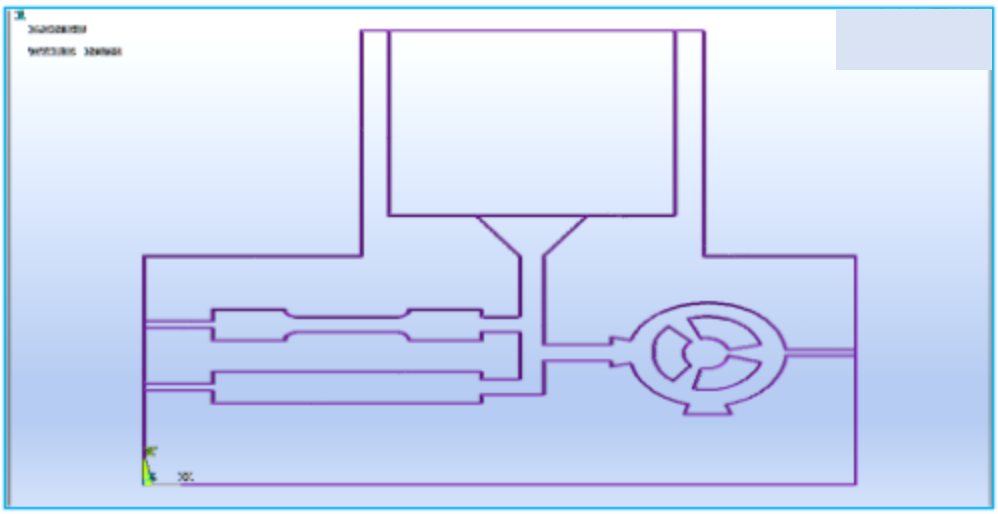


Figure IV.1:Géométrie de moule et de la cavité

Les propriétés du métal liquide utilisé dans la simulation de remplissage du moule sont énumérées dans le Tableau IV.1. Afin de simuler l'écoulement de métal liquide dans le moule en acier Tableau IV.2, les conditions suivantes ont été considérées :

IV.3 Les conditions initiales

- La température initiale du métal liquide était de 1800 k.
- 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 métal liquide et le moule de l'acier ont été stabilisés dans des conditions normales de la pression atmosphérique.

IV.4 Les conditions de limite

- ✓ L'algorithme de VOF a été employé pour le remplissage de moule.
- ✓ Le temps total pour le remplissage de moule est de 0.0099 s avec un pas de temps de 0.01s.
- ✓ La vitesse d'injection du fer liquide a été fixée à 15 m/s et 25 m/s.
- ✓ La solution en 2D a été considérée.

Densité (kg/m)	Chaleur spécifique (J/Kg. K)	Viscosité (Kg/m/s)	Conductivité thermique (w/m. K)	Température de fusion (°C)
6890	438	0.00544	80.2	1554

Tableau IV.1:les propriétés thermiques de Fer

Densité (kg/m)	Chaleur spécifique (J/Kg. K)	Viscosité (Kg/m/s)	Conductivité thermique (W/m. K)
8000	400	/	25

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

IV.5 Validation

L'objectif dans ce chapitre est d'assurer le bon déroulement de notre simulation numérique, nous comparons nos résultats à ceux de l'expérience de Thierry BARRIERE, Boa sheng LIU, Jean-Claude GELIN, on applique les mêmes valeurs des propriétés thermiques de fluide : la densité, la viscosité dynamique et la conductivité thermique en fonction de température. Ainsi la géométrie du moule et pièces sont montrés sur la figure si après (Fig.43).

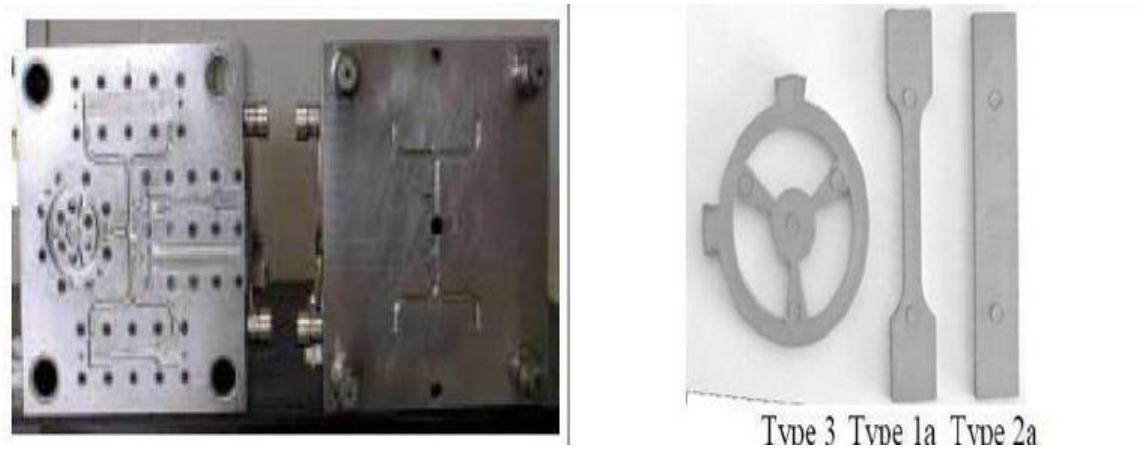


Figure IV.2:le moule multi-empreinte utilisé pour la validation

Les résultats numériques obtenus en utilisant la méthode EF\VOF montre un bon accord avec les résultats obtenus par Thierry BARRIERE et Al.

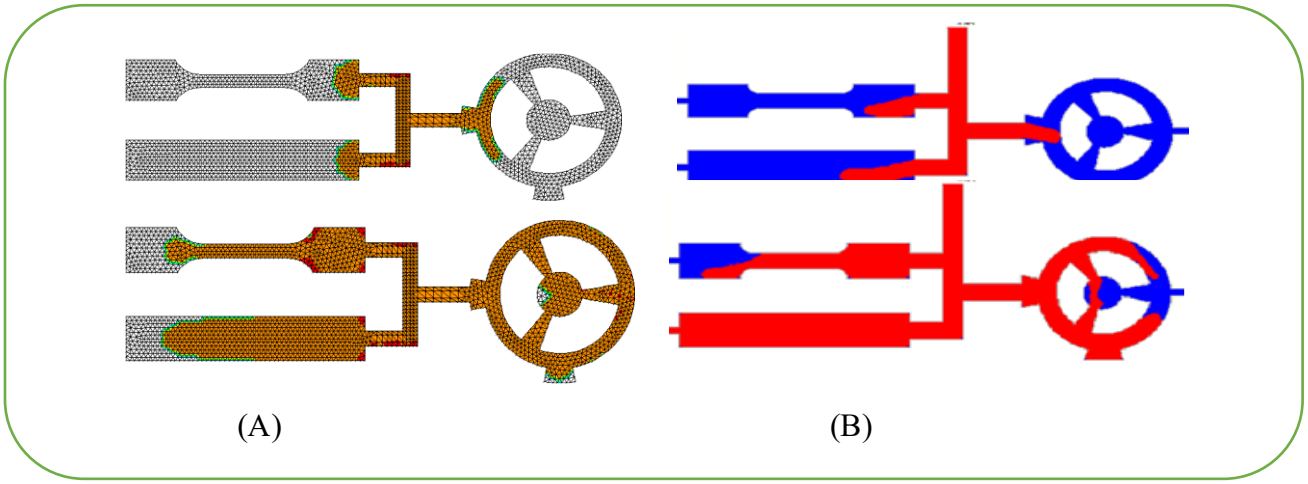


Figure IV.3:(a) Champs de fraction volumique de résultats de simulation Thierry BARRIERE, Boa sheng LIU, Jean-Claude GELIN. (b) nos résultats de simulation par EF\VOF.

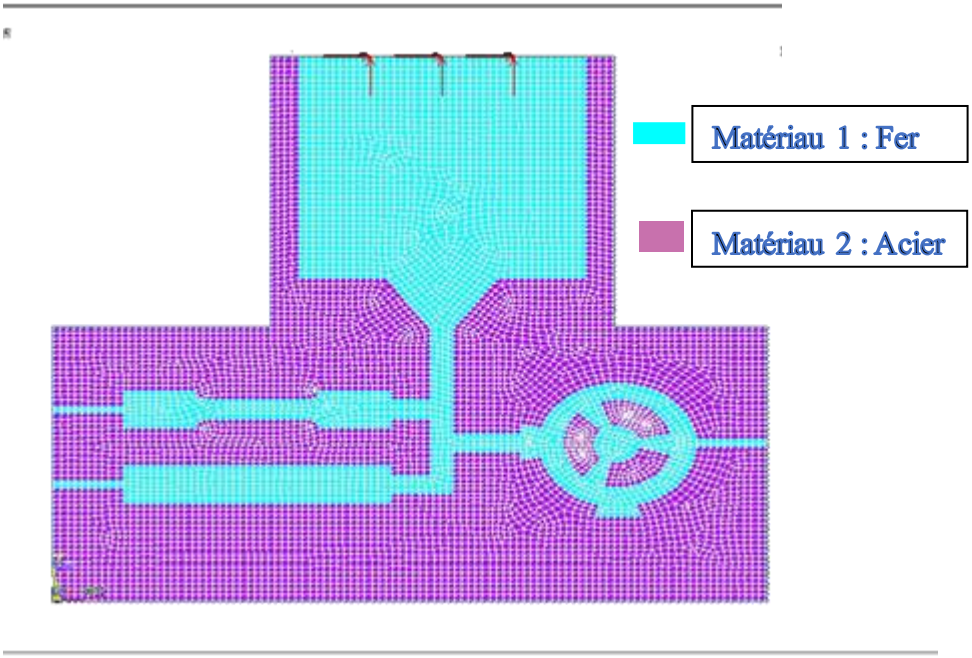


Figure IV.4:maillage du domaine de calcul

IV.6 Influence du champ magnétique

Dans cette partie, nous discutons d'une simulation numérique d'un remplissage du moule avec liquide (fer) de deux manières, la première en présence du champ magnétique et la seconde sans champ magnétique dans les mêmes conditions. Nous examinons également une comparaison entre les deux expériences.

IV.7 L'emplacement des capteurs pour l'analyse

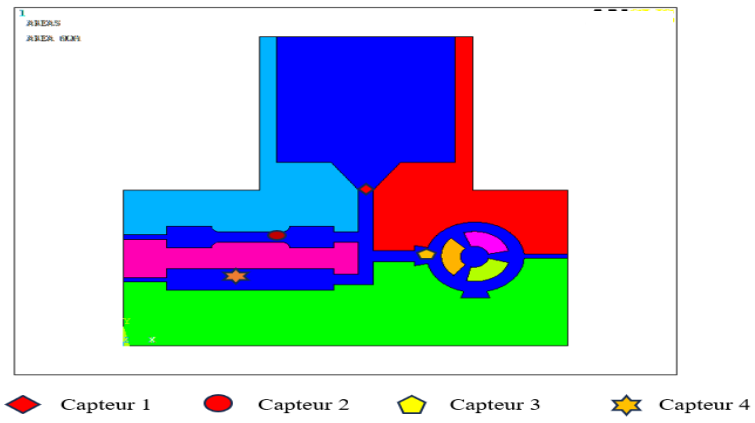


Figure IV.5:L'emplacement des capteurs pour analyse

IV.8 Expérience 01 : Sans champ magnétique

IV.8.1 Interprétation des résultats de simulation :

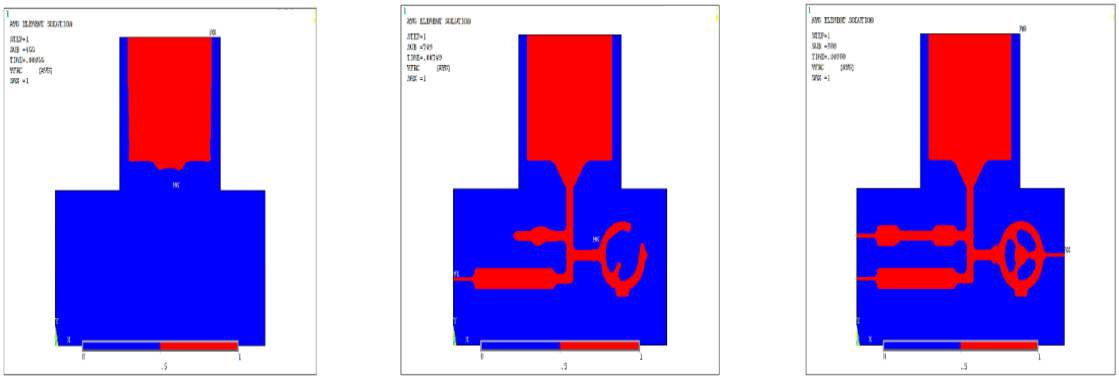
1ére Partie : le remplissage de métal liquide dans le moule sans champ magnétique pour déférent temps

Dans cette partie on choisit un seul point de remplissage par gravitée déterminés les paramètres liés au remplissage de les empreintes.

- La température
- La pression
- Le temps de remplissage

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

IV.8.2 Vitesse 25m/s

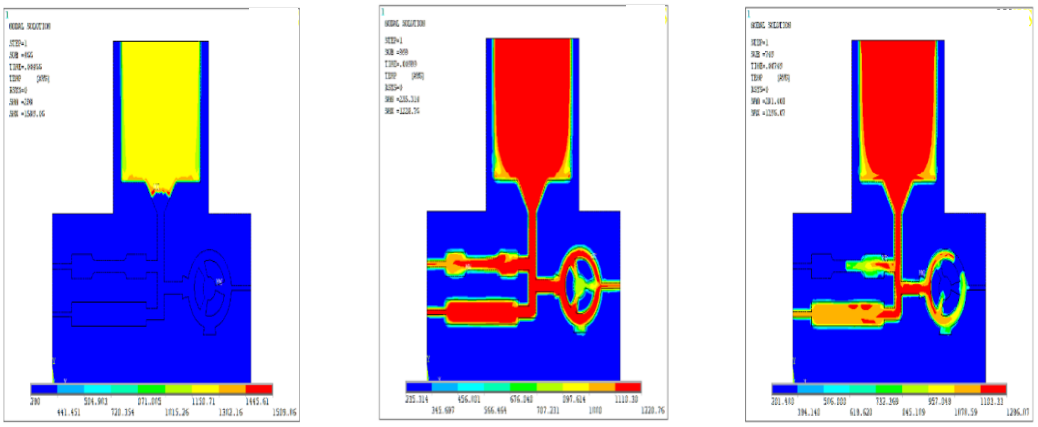


t=0.00466 s **t=0.00749 s** **t=0.00999 s**

Figure IV.6:Volume de fraction pendant le remplissage du moule (v=25m/s)

La figure IV.6 montre le flux de fer métallique liquide rentre à l'intérieur du moule à travers des tubes initialement, le flux de métal est lent puis la vitesse augmente et le liquide continue jusqu'à ce que le moule soit complètement rempli à t =0.00999 s.

Champ de température :



t=0.00466 s **t=0.00749 s** **t=0.00999 s**

Figure IV.7:Représentation spatiale de température dans le domaine de calcul

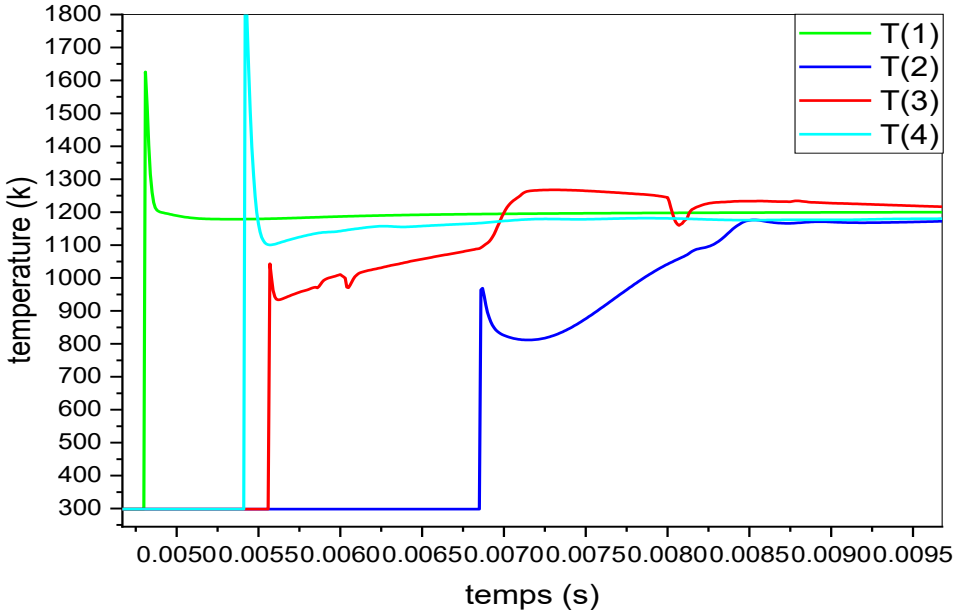


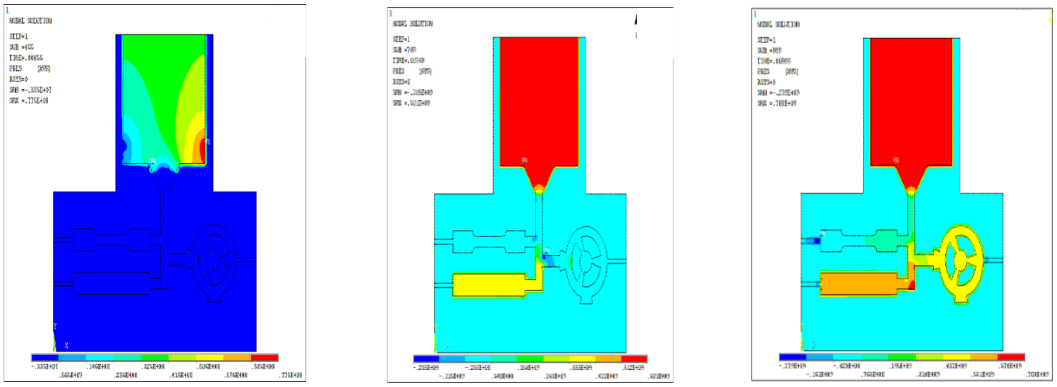
Figure IV.8:variation température dans le temps pour différentes positions

Remarque :

- Capteur (1) : la température constante T=300 k jusqu'à (t=0.0045s). Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=1640K, puis elle chute jusqu'à T=1200K. Après la température se stabilise à cette valeur
- Capteur (2) : la température constante T=300 k jusqu'à (t=0.0068s). Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=950k puis elle chute jusqu'à T=850K (t=0.0072s), après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=1150k

- Capteur (3) : la température constante T=300 k jusqu'à (t=0.0056s). Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=1050k puis elle chute jusqu'à T=950K (t=0.00565s), Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=1250k
- Capteur (4) : la température constante T=300 k jusqu'à (t=0.0054s). Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=1800k puis elle chute jusqu'à T=1100K (t=0.00555s). Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=1200k (t=0.0062s). Après la température stabilise est presque constante à cette valeur.

Champ de la pression :



t=0.00466 s **t=0.00749 s** **t=0.00999 s**

Figure IV.9;Représentation spatiale de pression dans le domaine de calcul

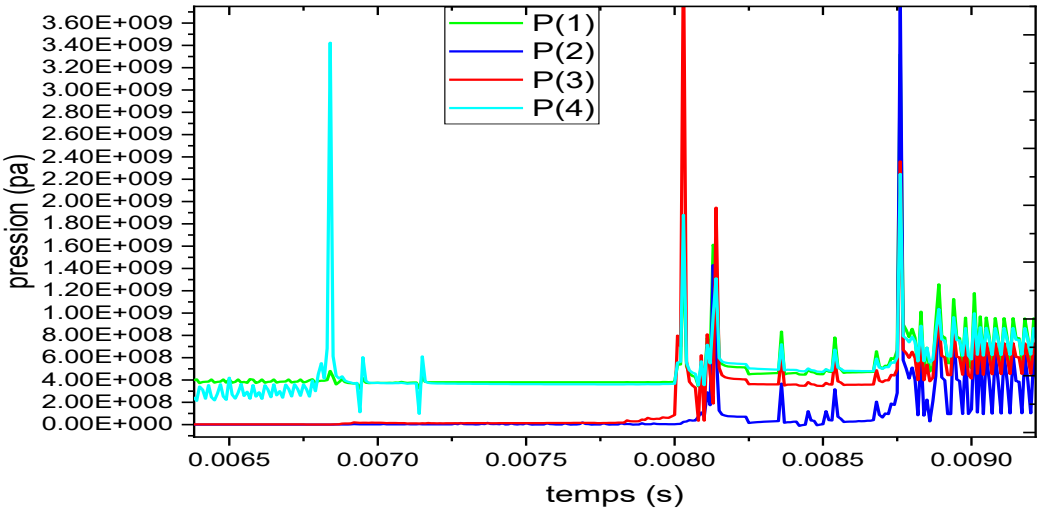
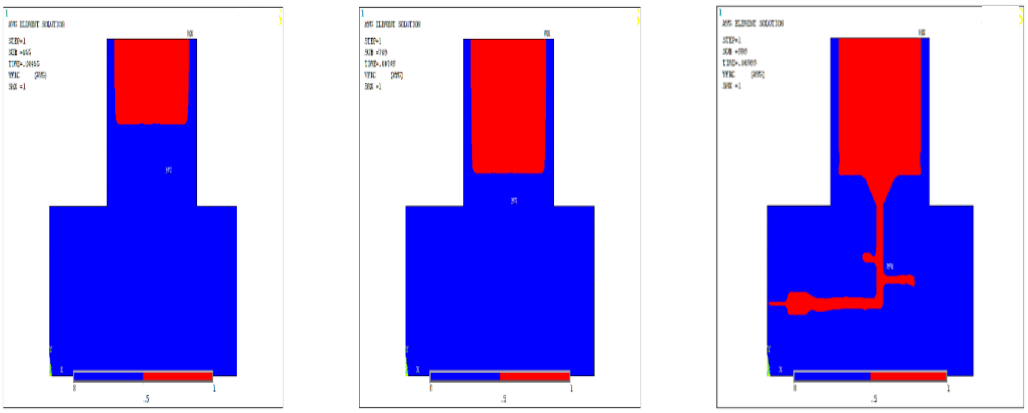


Figure IV.10:La variation de pression dans le temps pour différents capteurs

Remarque :

La pression toujours commence de la pression (p= 0Pa) La variation de la pression est affichée dans le moule comme elle est illustrée sur la figure (IV.10), la valeur de la pression, augmente jusqu'à une valeur maximale de360 MPa grâce à la convergence de la section.

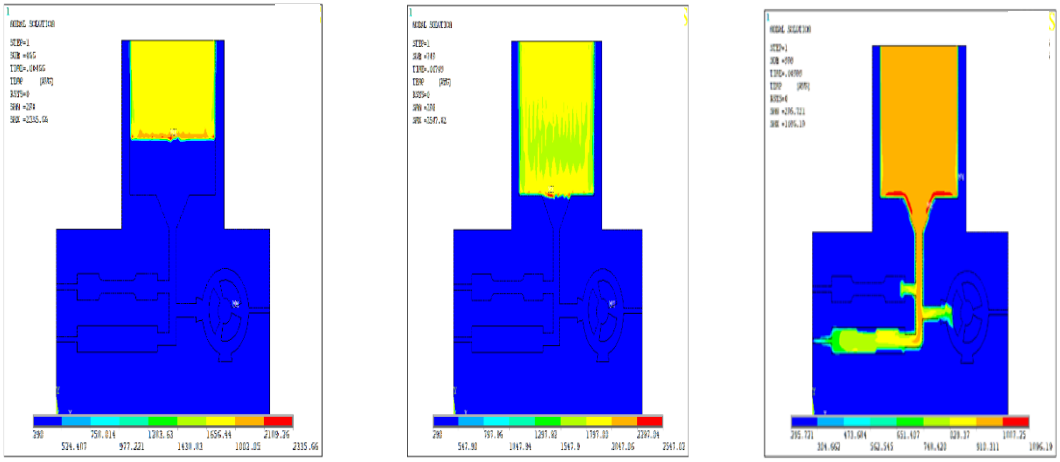
IV.8.3 Vitesse 15m/s



t=0.00466 s **t=0.00749 s** **t=0.00999 s**

Figure IV.11: Volume de fraction pendant le remplissage du moule

Champ de température :



t=0.00466 s t=0.00749 s t=0.00999 s

Figure IV.12: Représentation spatiale de température dans le domaine de calcul

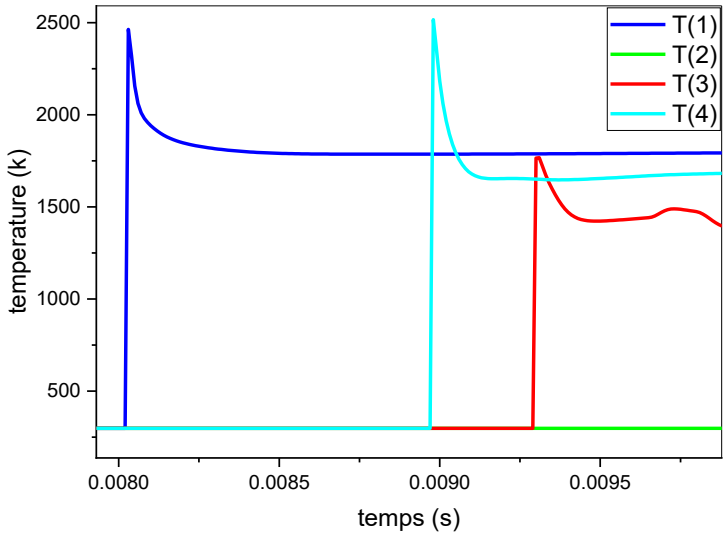
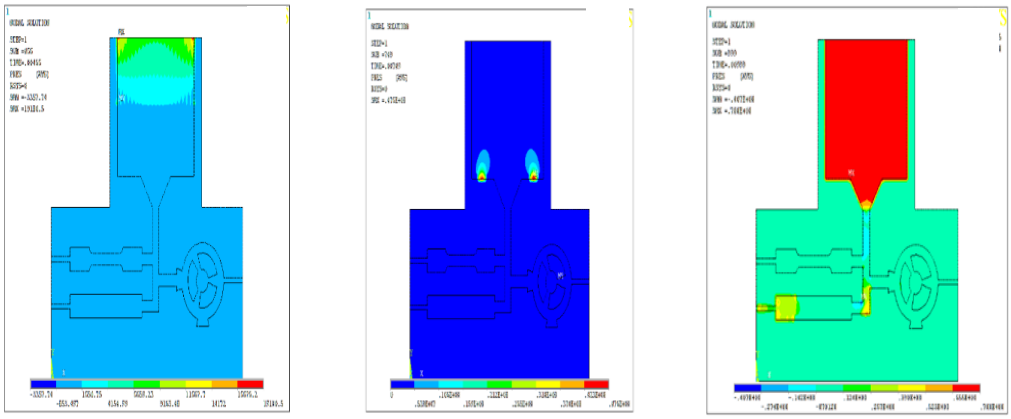


Figure IV.13: Variation température dans le temps pour différentes positions

- **Capteur (1) :** la température constante T=300 k jusqu'à (t=0.008s) Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=2450K Après la température chute jusqu'à T=1800K à (t=0.0085s). Après la température se stabilise à cette valeur.
- **Capteur (2) : :** la température constante T=300 k jusqu'à (t=0.01s) où la fin du remplissage.
- **Capteur (3) :** la température constante T=300 k jusqu'à (t=0.0093s) Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=1800k puis elle chute jusqu'à T=1450K (t=0.0094s), Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=1500k à (t=0.0097). Puis elle chute.
- **Capteur (4) :** la température constante T=300 k jusqu'à (t=0.0089s) Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=2500k puis elle chute jusqu'à T=1750K (t=0.0092s) la température stable est presque constante à cette valeur

Champ de pression



t=0.00466 s **t=0.00749 s** **t=0.00999 s**

Figure IV.14: Représentation spatiale de pression dans le domaine de calcul

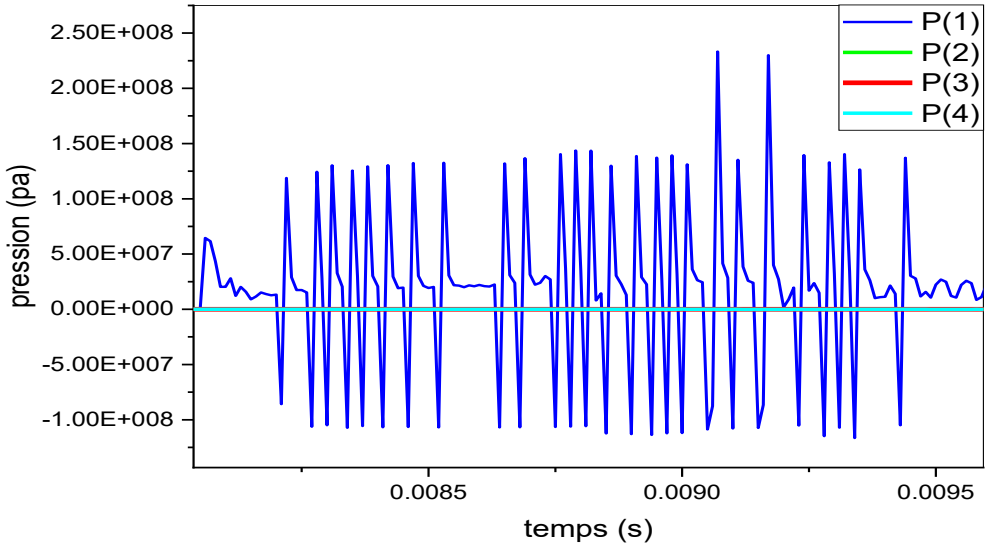


Figure IV.15: La variation de pression dans le temps pour différents capteurs.

Remarque

La pression toujours commence de la pression (p= 0Pa) La variation de la pression est affichée dans le moule comme elle est illustrée sur la figure (IV.15), la valeur de la pression, augmente jusqu'à une valeur maximale de2.30E+008 Pa grâce à la convergence de la section. Il y a aussi une diminution jusqu'à une valeur de 1.00E+008 Pa à cause de dépression à travers les buses d'air de liquide.

IV.8.4 Défauts détectés après le remplissage sans champ magnétique :

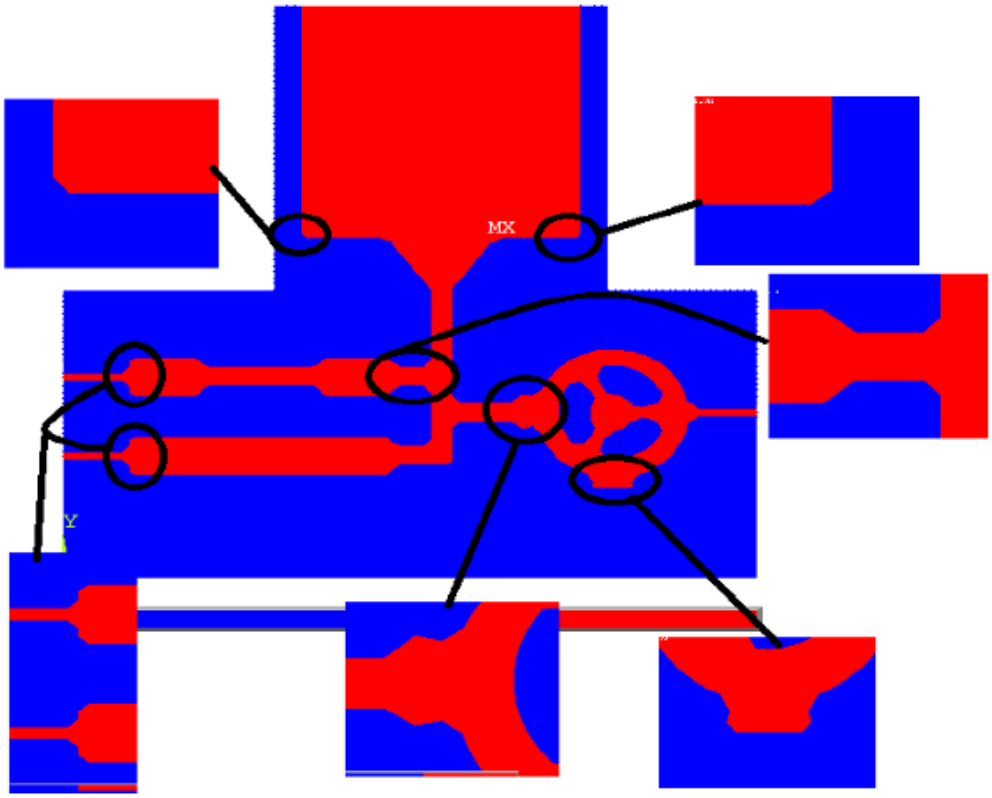


Figure IV.16:détection des défauts de remplissage dans les empreintes

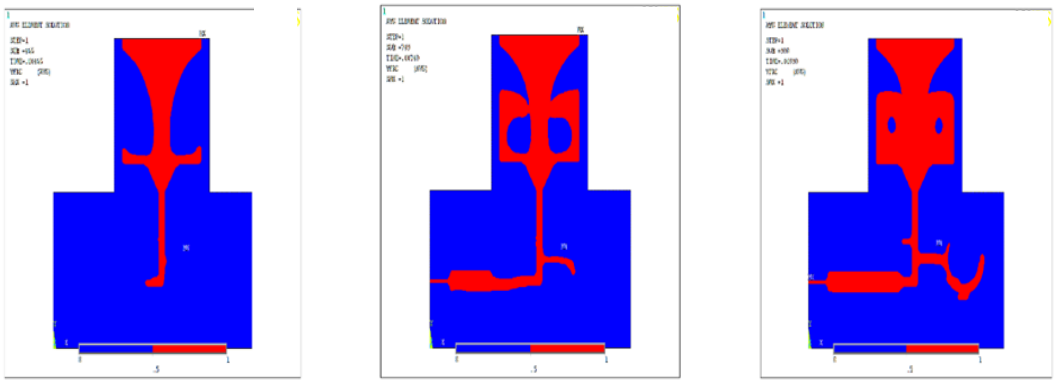
Dans le contiens de ce chapitre on constate que la simulation numérique par un logiciel basé sur la méthode des éléments finis permet de découvre quelques défauts de remplissage des moules, et ça nous pousse toujours d'améliorer la qualité des pièces. C'est pour ça on fait un changement sur la vitesse d'écoulement de métal en fusion et en utilisant le champ magnétique avec différentes valeurs de force pour atteindre à améliorer la qualité des pièces et éliminer ou diminuer le plutôt possibles les défauts d'occlusions d'air lors le remplissage du métal liquide.

IV.9 Expérience 02 En présence de champ magnétique

Le remplissage de métal liquide dans le moule avec champ magnétique. Dans cette partie on choisit le remplissage par champ magnétique puis ont déterminés les paramètres liés au remplissage de les empreintes (Température, pression et le temps de remplissage).

IV.9.1 Vitesse 15m/s

IV.9.1.1 Pour B=0.096 Tesla



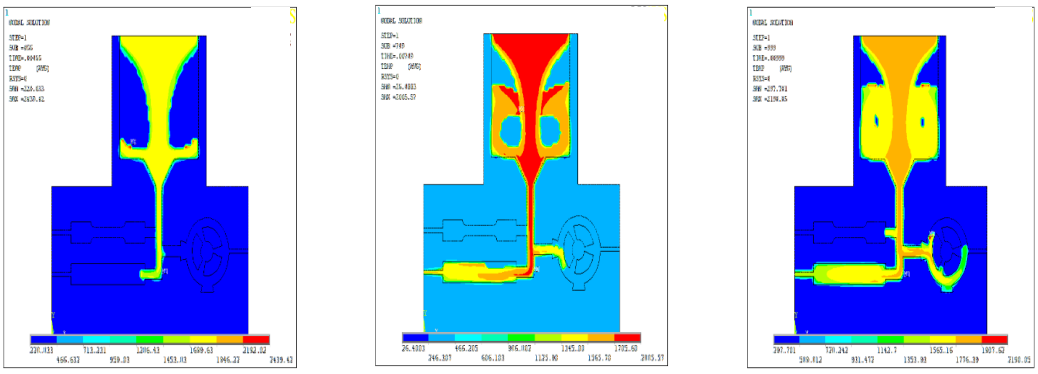
t=0.00466 s **t=0.00749 s** **t=0.00999 s**

Figure IV.17: Volume de fraction pendant le remplissage du moule

Remarque :

La figure IV.16 montre le flux de fer métallique à l'intérieur du moule à travers des tubes initialement, le flux de métal est lent, mais à mesure que le liquide avance dans les canaux on observe une augmentation progressive de la vitesse, ce qui permet le fluide de mieux remplir les zones internes.

Champ de température



t=0.00466 s **t=0.00749 s** **t=0.00999 s**

Figure IV.18: Représentation spatiale de température dans le domaine de calcul

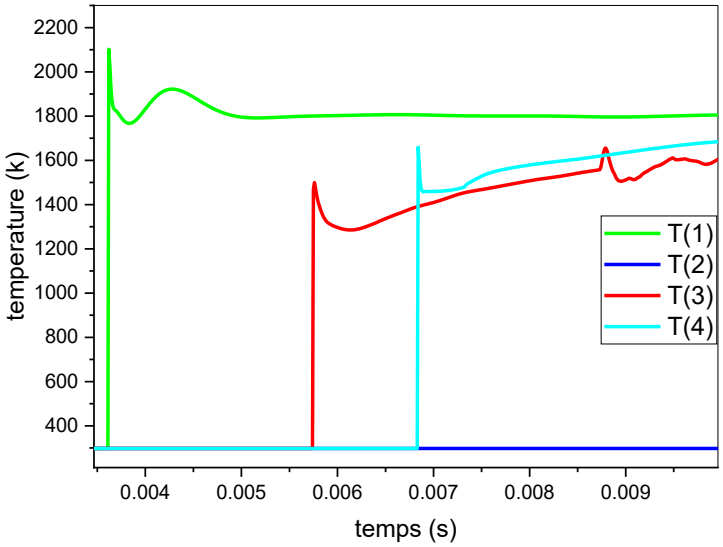
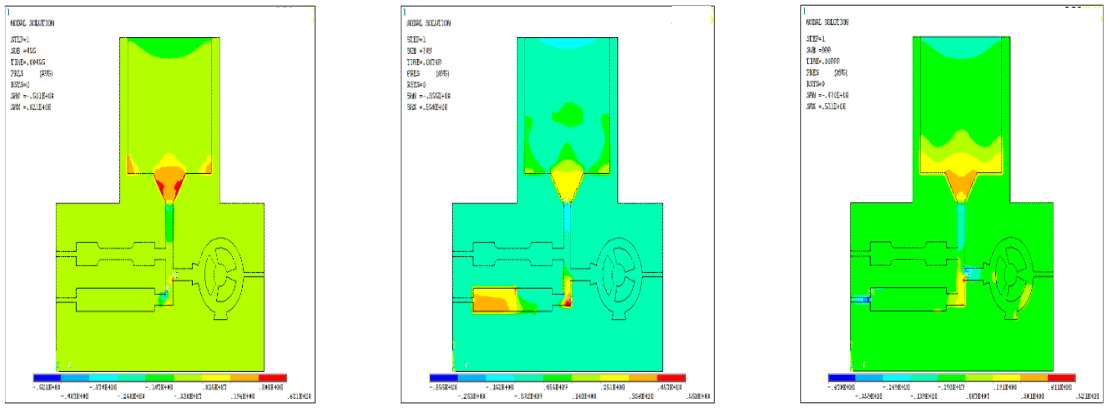


Figure IV.19:variation température dans le temps pour différentes positions

Remarque :

- **Capteur (1)** : la température constante T=300 k jusqu'à (t=0.0035s). Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=2100K puis elle chute jusqu'à T=1750K à (t=0.004s). Après elle va augmenter jusqu'à T=1900K à (t=0.0045s). Après la température va se stabilisée à t=1800K.
- **Capteur (2)** : la température constante T=300 k jusqu'à (t=0.01s) où la fin du remplissage.
- **Capteur (3)** : la température constante T=300 k jusqu'à (t=0.0057s). Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=1500k puis elle chute jusqu'à T=1350K (t=0.0061s). Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=1700k à (t=0.0086s), après elle chute jusqu'à T=1500k puis elle va augmenter jusqu'à T=1600k.
- **Capteur (4)** : la température constante T=300 k jusqu'à (t=0.0068s). Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=1650k, puis elle chute jusqu'à T=1400K (t=0.0069s). Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=1650k.

Champ de pression :



t=0.00466 s **t=0.00749 s** **t=0.00999 s**

Figure IV.20: Représentation spatiale de pression dans le domaine de calcul

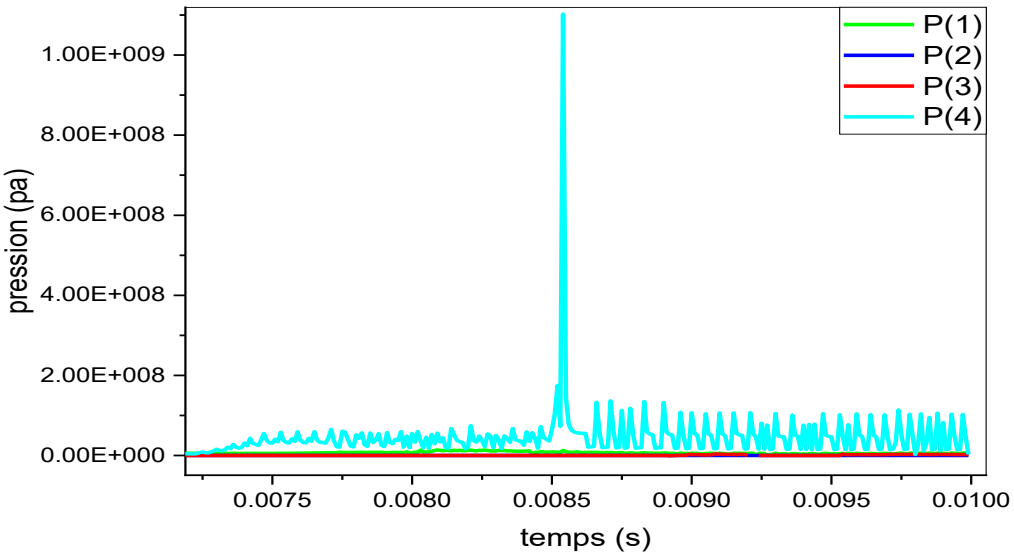
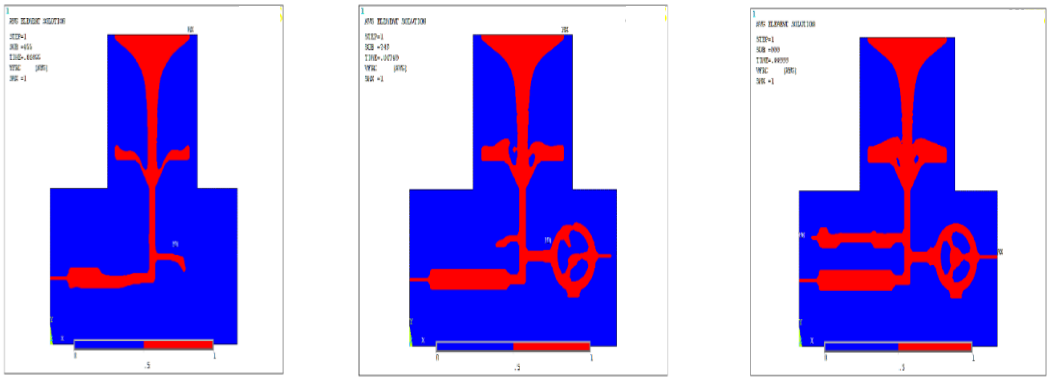


Figure IV.21:la variation de pression dans le temps pour différents capteurs

Remarque :

La pression toujours commence de la pression (Pr = 0Pa) ; les capteurs affichent des pics suivis d'une augmentation de pression progressif indiquant l'arrivé du métal, l'augmentation de pression jusqu'à une valeur maximale de150MPa favorisé par la forme géométrique convergent des sections.

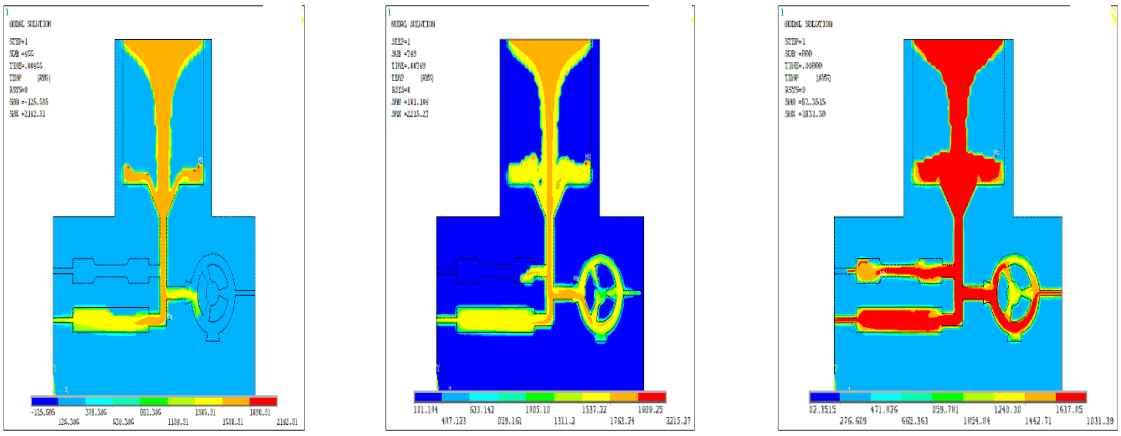
IV.9.1.2 Pour B=0.29Tesla



t=0.00466 s **t=0.00749 s** **t=0.00999 s**

Figure IV.22: Volume de fraction pendant le remplissage du moule

Champ de température :



t=0.00466 s **t=0.00749** **t=0.00999**

Figure IV.23:: Représentation spatiale de température dans le domaine de calcul

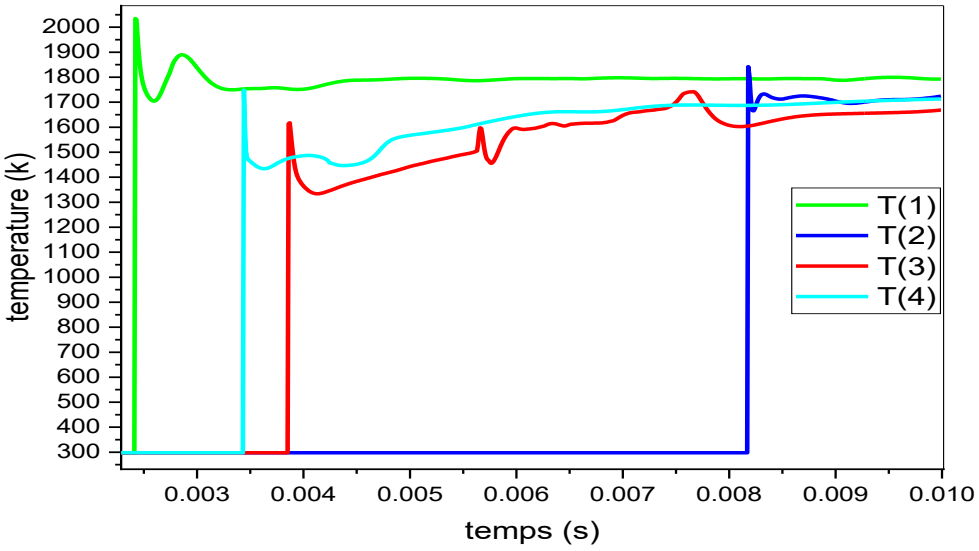
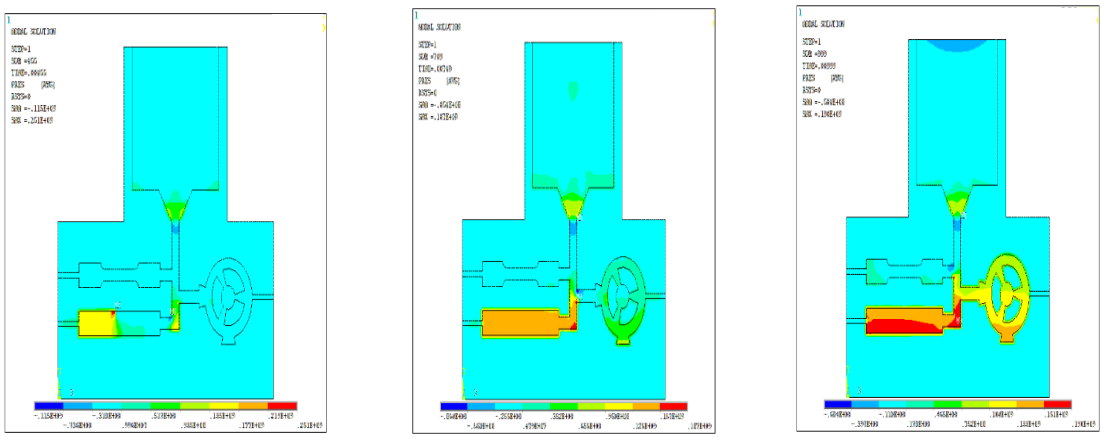


Figure IV.24:variation température dans le temps pour différentes positions

Remarque :

- **Capteur (1) :** la température constante T=300 k jusqu'à (t=0.0024s) Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=2100K puis elle chute jusqu'à T=1700K à (t=.0026s), Après elle va augmenter jusqu'à T=1900K à (t=0.003s) puis elle chute jusqu'à T=1750K à (t=0.0034s), Après la température se stabilise.
- **Capteur (2) :** la température constante T=300 k jusqu'à (t=0.0082s) Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=1850k puis elle chute jusqu'à T=1650K (t=0.00825s), Après la température se stabilise.
- **Capteur (3) :** la température constante T=300 k jusqu'à (t=0.0039s) Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=1600k puis elle chute jusqu'à T=1300K (t=0.0042s), Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=1700k à (t=0.0077s), puis elle chute jusqu'à T=1600K à (t=0.0080s).
- **Capteur (4) :** la température constante T=300 k jusqu'à (t=0.0034s) Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=1750k puis elle chute jusqu'à T=1450K (t=0.0035s), Après elle va augmenter jusqu'à T=1700k à (t=0.0027s).

Champs de pression :



t=0.00466 s **t=0.00749 s** **t=0.00999 s**

Figure IV.25: Représentation spatiale de pression dans le domaine de calcul

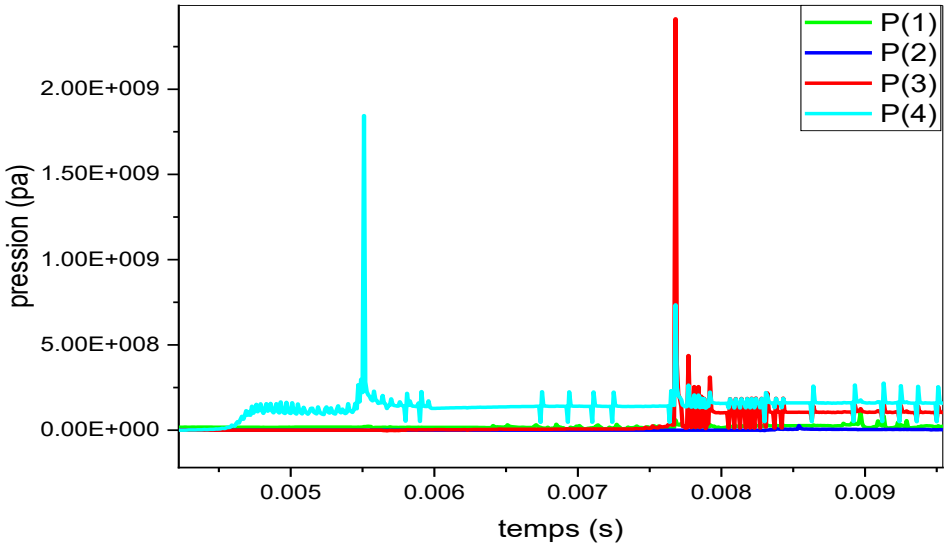
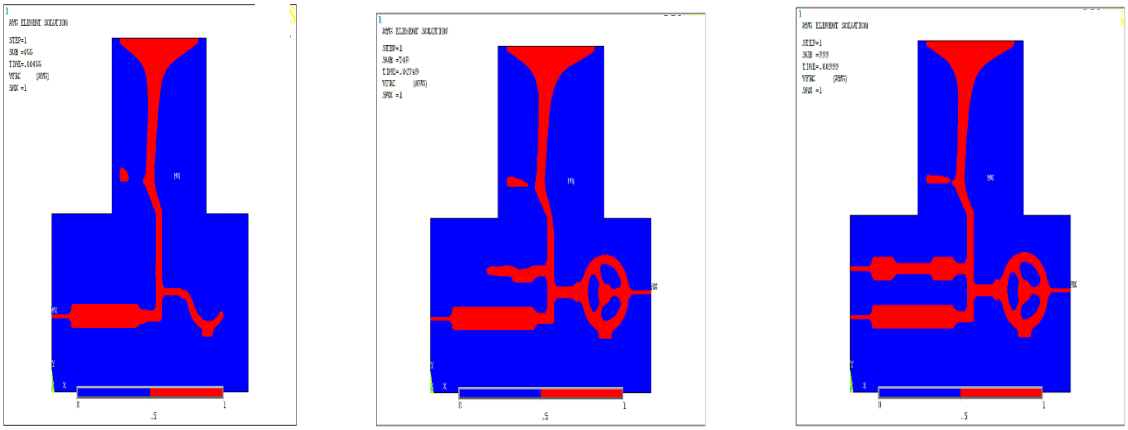


Figure IV.26:la variation de pression dans le temps pour différents capteurs

Remarque :

La pression toujours commence de la pression (Pr = 0Pa), les capteurs affichent des pics suivis d'une augmentation de pression progressif indiquant l'arrivé du métal, l'augmentation de pression jusqu'à une valeur maximale de 280 MPa favorisé par la forme géométrique convergent des sections. A noté que la diminution de pression relative au pic est due à la dépression à travers les buses d'air du refoulement d'air.

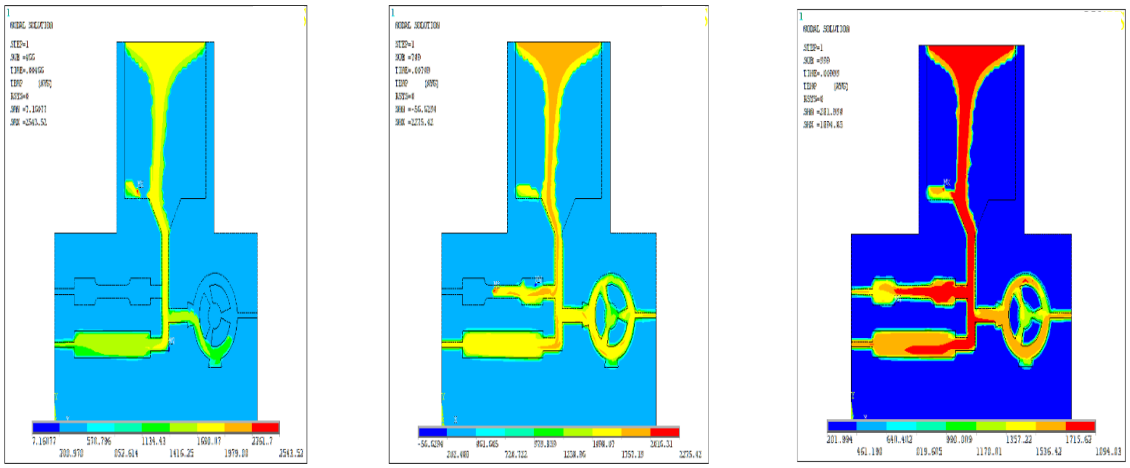
IV.9.1.3 Pour B=0.48Tesla



t=0.00466 s **t=0.00749 s** **t=0.00999 s**

Figure IV.27: Volume de fraction pendant le remplissage du moule

Champ de température :



t=0.00466 s **t=0.00749 s** **t=0.00999 s**

Figure IV.28:: Représentation spatiale de température dans le domaine de calcul

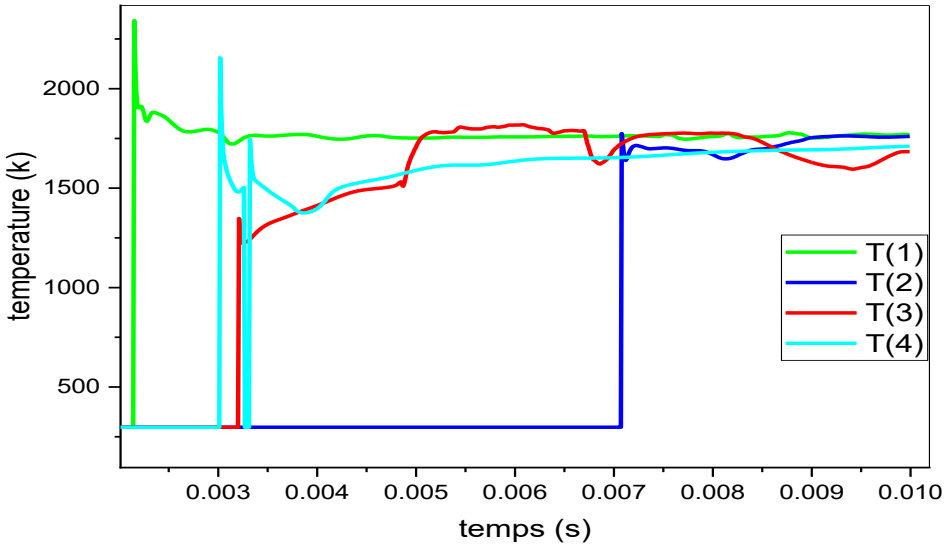
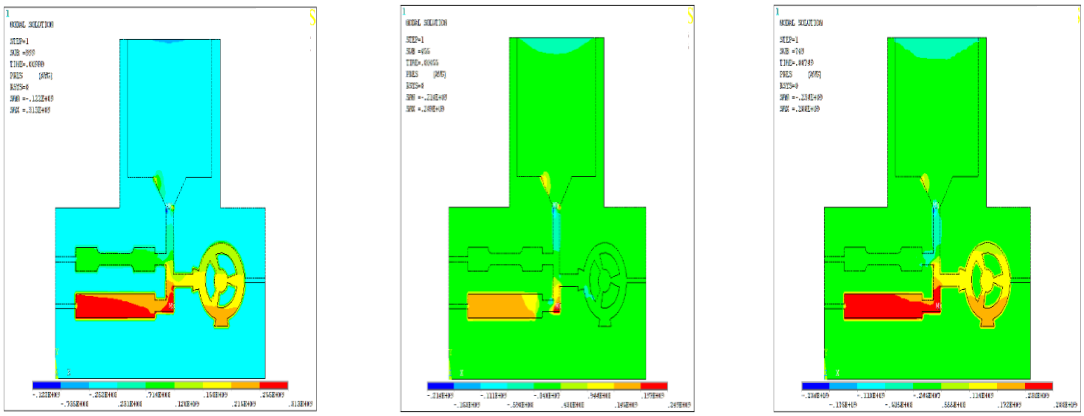


Figure IV.29:variation température dans le temps pour différentes positions

Remarque :

- **Capteur (1) :** la température constante T=300 k jusqu'à (t=0.0020s) Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=2250K Après puis elle chute jusqu'à T=1750K Après la température se stabilise.
- **Capteur (2) :** la température constante T=300 k jusqu'à (t=0.0072s) Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=1750k puis elle chute jusqu'à T=1600K (t=0.0085s), Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=1750k
- **Capteur (3) :** la température constante T=300 k jusqu'à (t=0.0052) Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=1750k puis elle chute jusqu'à T=1600K (t=0.0069s), Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=1750k
- **Capteur (4) :** la température constante T=300 k jusqu'à (t=0.003s) Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=2250k puis elle chute jusqu'à T=300K (t=0.0033s), Après elle va augmenter rapidement jusqu'à T=1750k (t=0.0035s) puis elle chute jusqu'à T=1400K (t=0.004s) Après la température se stabilise.

Champ de pression :



t=0.00466 s **t=0.00749 s** **t=0.00999 s**

Figure IV.30: Représentation spatiale de pression dans le domaine de calcul

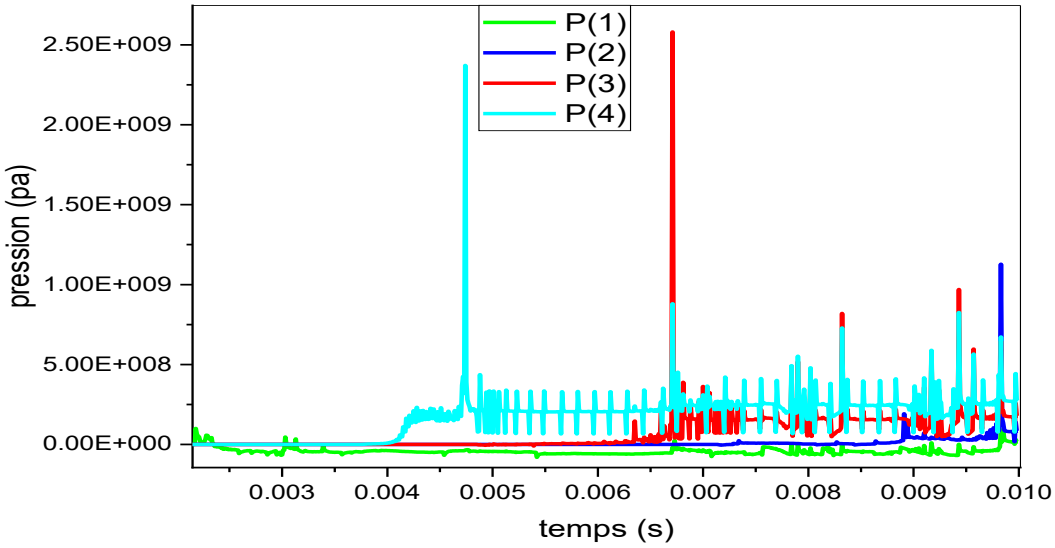


Figure IV.31:la variation de pression dans le temps pour différents capteurs

Remarque :

La pression toujours commence de la pression (Pr = 0Pa) ; les capteurs affiche des pics suivis d'une augmentation de pression progressif indiquant l'arrivé du métal, l'augmentation de pression jusqu'à une valeur maximale de250 MPa favorisé par la forme géométrique convergent des sections. A noté que la diminution de pression relative au pic est due à la dépression à travers les buses d'air du refoulement d'air.

IV.9.1.4 Défauts détectés après le remplissage avec champ magnétique :

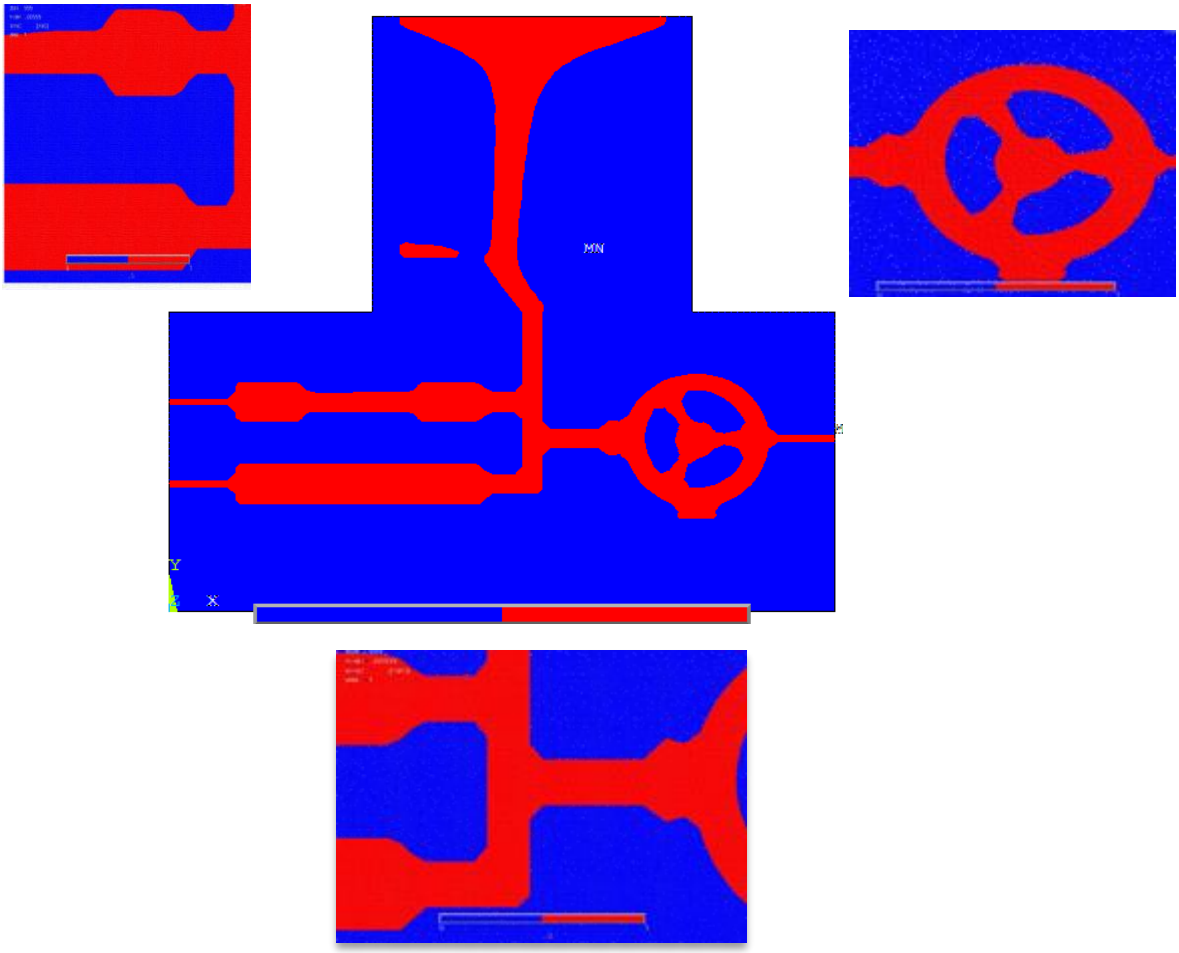


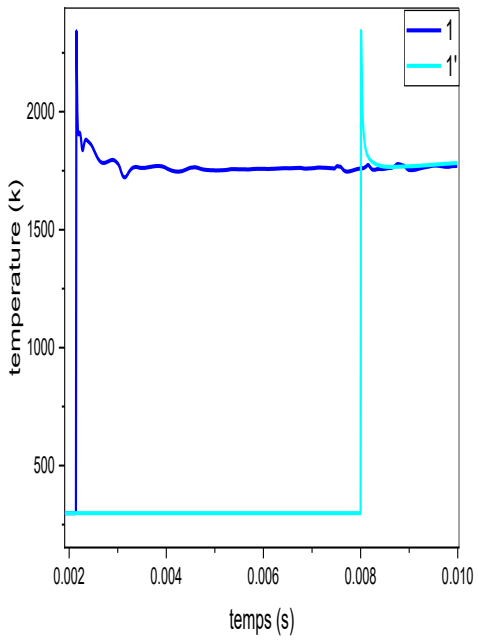
Figure IV.32:détection des défauts de remplissage dans les empreintes avec champ magnétique

On a vu que les défauts de remplissage avec champ magnétique sont les même comme la 1ere expérience sans champ magnétique**.**

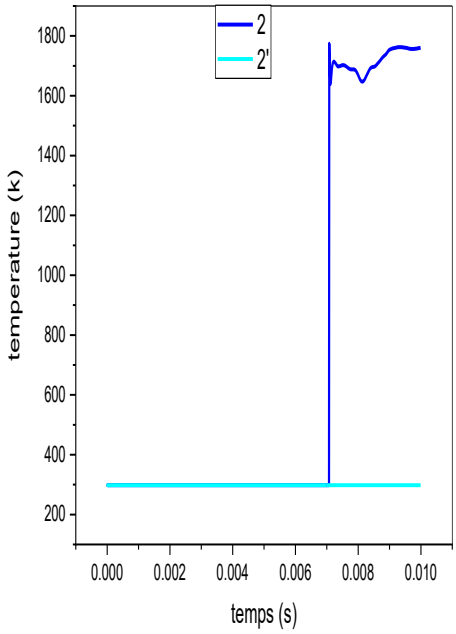
IV.10 Comparaison entre la première et la deuxième expérience (v=15m/s)

On fait une comparaison entre les deux expériences (la première et la deuxième simulation v=15m/s) c'est à dire on compare par le suivie de trajectoire de remplissage, par les capteurs installer. La couleur bleu Spectacle expérience 02 (le champ magnétique pour B=0.48Tesla). La couleur cyan spectacle expérience 01(sans champ magnétique).

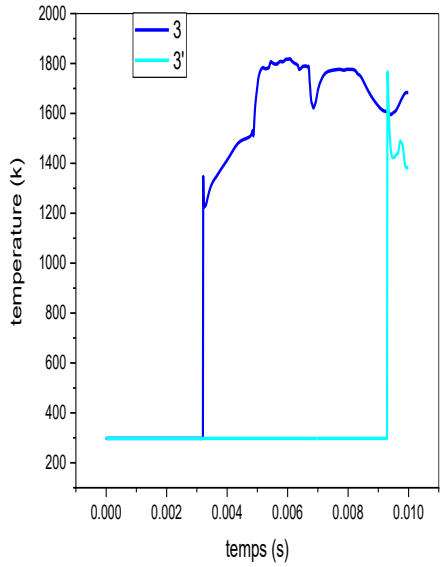
Champ de Température

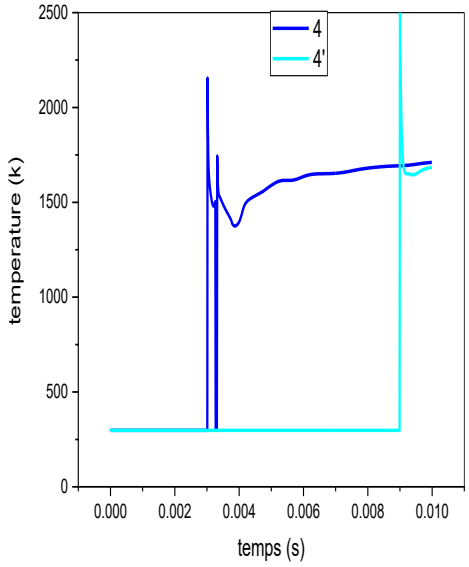


1



2





3 **4**

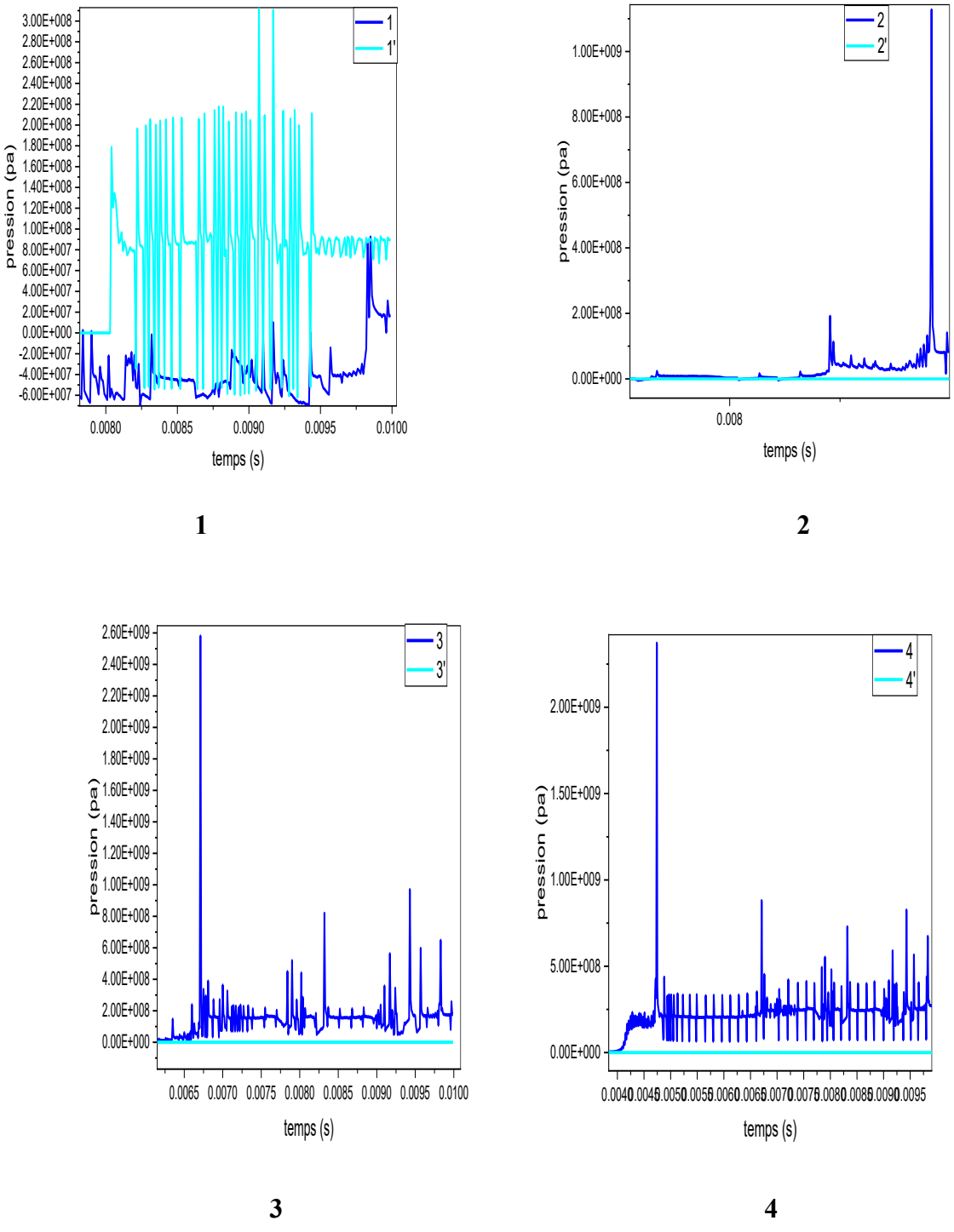
Figure IV.33: Comparaison entre les Champs des températures dans chaque point pour les deux simulations

Nous comparons la variation de champ des températures dans chaque point pour les deux simulations.

- **Point (1) :** Dans le point 1 la température maximale est augmenté rapidement par rapport le point 1'après la température constante a même valeur de 1750 k citons que le liquide en deuxième simulation le même point et le même temps, se refroidi avant ceux qui de première simulation.
- **Point2 :** Dans le point 2 la température maximale est augmenté par rapport le point 2' la température constante, citons que le liquide en première simulation, se refroidi avant ceux qui de deuxième simulation.
- **Point (3) :** Dans le point 3 la température augmente rapidement par rapport le point 3' la température est déférente entre les deux pointes citons que le liquide en première simulation le même point et le même temps se refroidi avant ceux qui de deuxième simulation.
- **Point (4) :** La température maximale dans le graphe (4) avec un écart de 250 K est après, dans le point 4 la température augmente rapidement par rapport le point 4' citons

que le liquide en première simulation se refroidi avant ceux qui de deuxième simulation.

Champ de Pression :



1 **2**

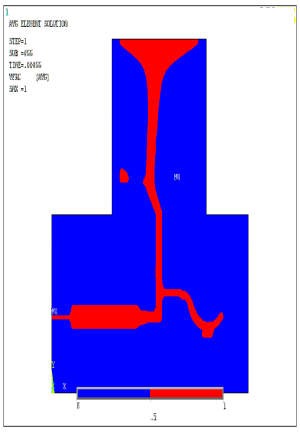
3 **4**

Figure IV.34: Comparaison entre les Champs des Pression dans chaque point pour les deux simulations.

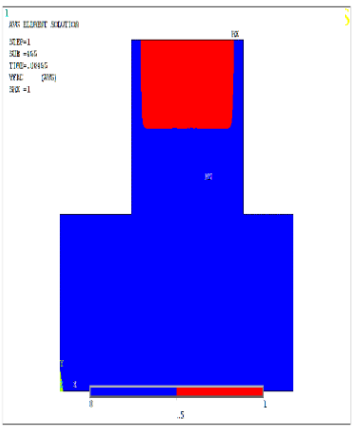
Nous comparons la variation de champ des pressions dans chaque point pour les deux simulations.

- **Point (1)** : le champ de pression (la valeur maximale) dans le graphe (1) dans le point (1) est P=8.5 Mpa. Plus la pression est élevée, plus le fluide est chaud. La pressions de liquide en deuxième simulation se haut avant ceux qui de première simulation.
- **Point2** : le champ de pression (la valeur maximale) dans le graphe (2), à point (2) est P=100Mpa. Plus la pression est élevée, plus le fluide est chaud. La pressions de liquide en première simulation augmente contrairement à la pression en deuxième simulation elle reste stable à 0 Mpa.
- **Point3** : le champ de pression (la valeur maximale) dans le graphe (3), à point (3) est P=260MPa. Plus la pression est élevée, plus le fluide est chaud. La pressions de liquide en première simulation augmente contrairement à la pression en deuxième simulation elle reste stable à 0 Mpa.
- **Point4** : le champ des pression (la valeur maximale) dans le graphe (4), à un point (4) est P=250 MPa, mais la pression à la point (4') est constante en tout temps. Plus la pression est élevée, plus le fluide est chaud.

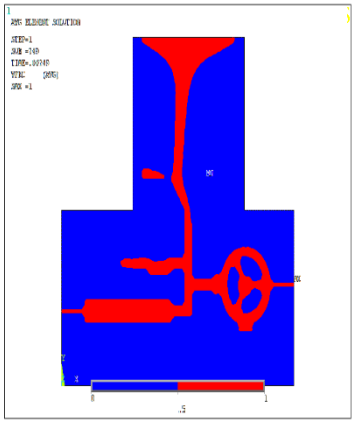
Avec champ Magnétique B=0.48Tesla **Sans champ Magnétique**



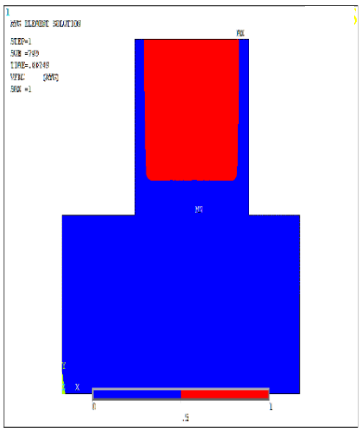
t=0.00466 s



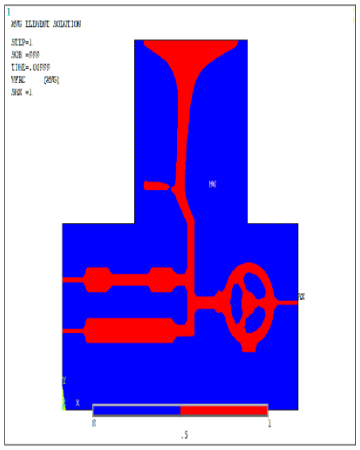
t=0.00466 s



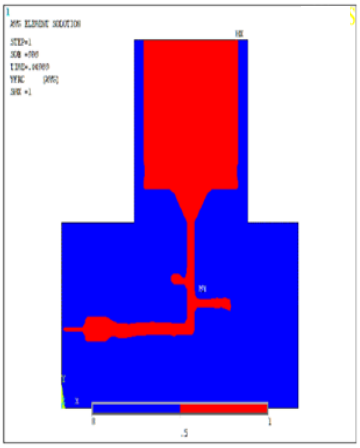
t=0.00749 s



t=0.00749 s



t=0.00999 s



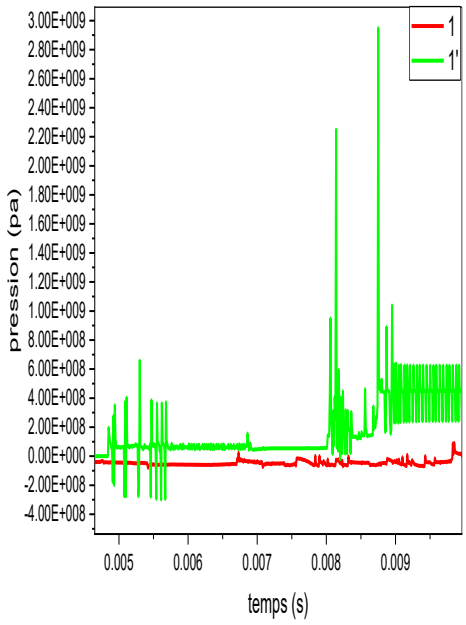
t=0.00999 s

Figure IV.35: Volume de fraction pendant le remplissage du moule

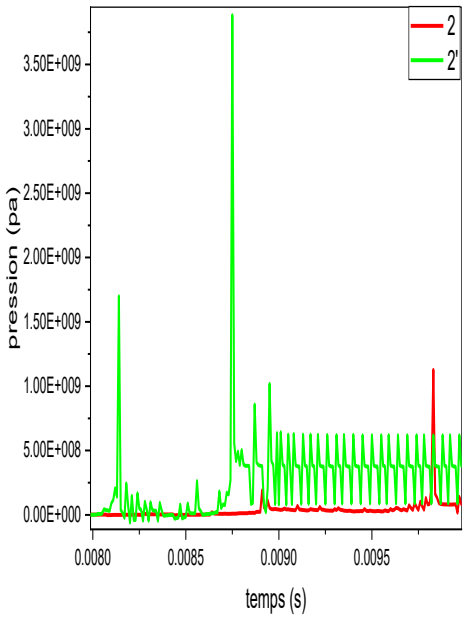
IV.11 Comparaison entre la première expérience (v=25 m/s) et la deuxième expérience (v=15m/s) pour B=0.48Tesla

Dans cette partie on a comparé entre les deux expériences (la première simulation v=25m/s et la deuxième simulation v=15m/s pour B=0.48Tesla) c'est à dire on compare par le suivie de trajectoire de remplissage, par les capteurs installer. La couleur rouge Spectacle expérience 02 (le champ magnétique pour B=0.48Tesla). La couleur vert spectacle expérience 01(sans champ magnétique).

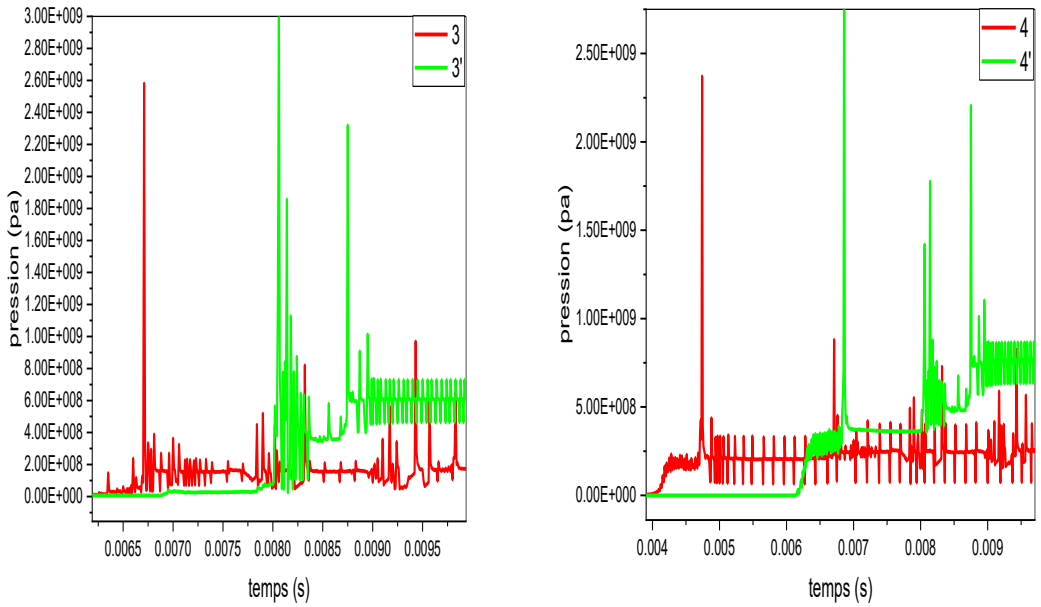
Champ de pression :



1



2



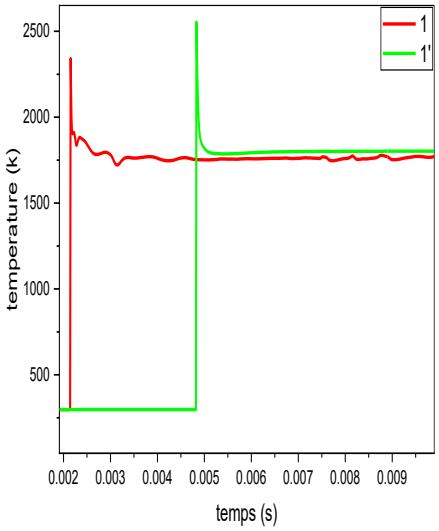
3 **4**

Figure IV.36: Comparaison entre les Champs des Pression dans chaque point pour les deux simulations

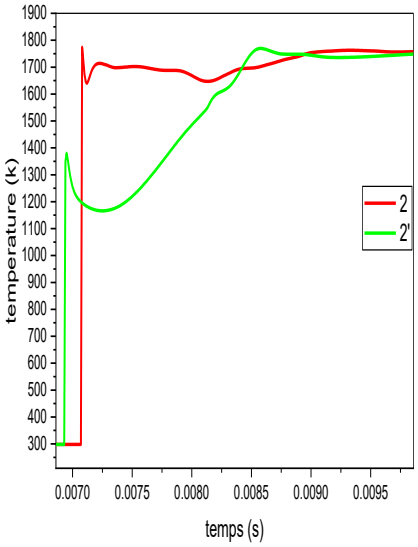
Nous comparons la variation de champ des pressions dans chaque point pour les deux simulations.

- **Point 1** : le champ de pression (la valeur maximale) dans le graphe (1) dans le point (1) est P=8.5 Mpa. Plus la pression est élevée, plus le fluide est chaud. La pressions de liquide en première simulation (v=25m/s) se haut avant ceux qui de deuxième simulation.
- **Point2** : le champ de pression (la valeur maximale) dans le graphe (2), à point (2) est P=100Mpa. Plus la pression est élevée, plus le fluide est chaud. La pressions de liquide en première simulation (v=25m/s) se haut avant ceux qui de deuxième simulation.
- **Point3** : le champ de pression (la valeur maximale) dans le graphe (3), à point (3) est P=260MPa. Plus la pression est élevée, plus le fluide est chaud. La pressions de liquide en première simulation (v=25m/s) se haut avant ceux qui de deuxième simulation.
- **Point4** : le champ des pression (la valeur maximale) dans le graphe (4), à un point (4) est P=250 MPa, Plus la pression est élevée, plus le fluide est chaud. La pressions de liquide en première simulation (v=25m/s) se haut avant ceux qui de deuxième simulation.

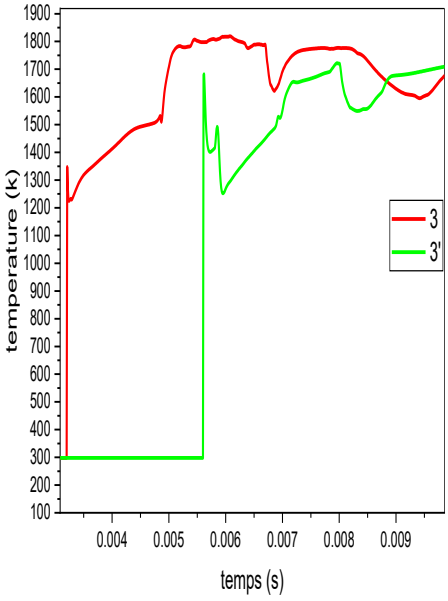
Champ de température :



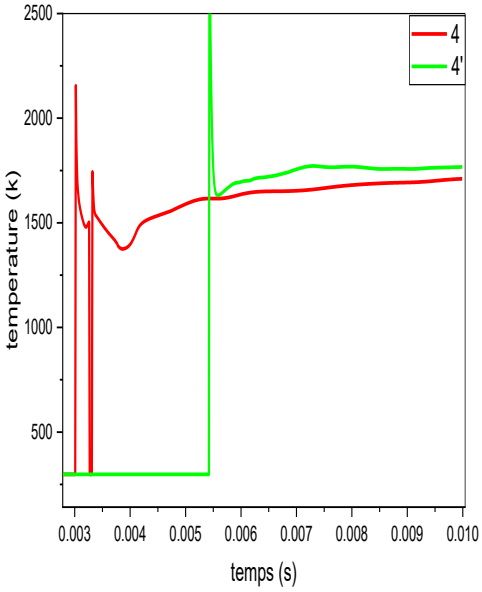
1



2



3



4

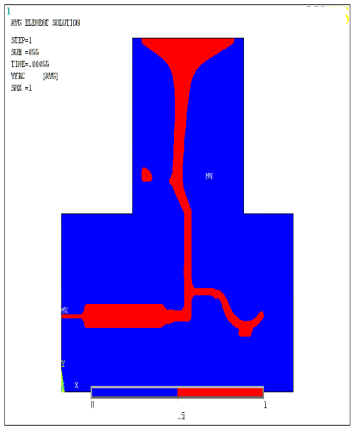
Figure IV.37: Comparaison entre les Champs des températures dans chaque point pour les deux simulations.

Nous comparons la variation de champ des températures dans chaque point pour les deux simulations.

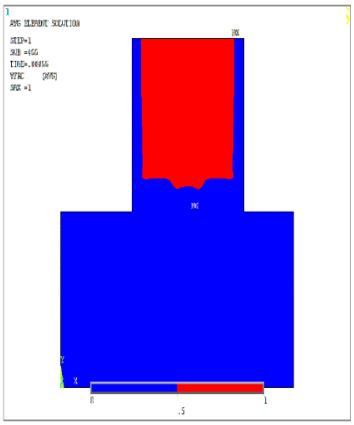
- **Point 1** : La variation de la température maximale dans le graphe (1), dans le point 1' la température est élevée par rapport le point 1. Après la température constante avec un écart de 50 K Citons que le liquide en deuxième simulation le même point et le même temps, se refroidi avant ceux qui de première simulation(25m/s).
- **Point 2** : La variation de la température maximale dans le graphe (2), dans le point 2 et 2' et la même cela indique que le liquide reste chaud.
- **Point 3** : La variation de la température maximale dans le graphe (3), dans le point 3 la température augment rapidement par rapport le point 3' la température est déférente entre les deux pointes Citons que le liquide en première simulation(v=25m/s) le même point et le même temps se refroidi avant ceux qui de deuxième simulation.
- **Point 4** : La variation de la température maximale dans le graphe (4) dans le point 4' la température est élevée par rapport le point 4. Citons que le liquide en deuxième simulation le même point et le même temps, se refroidi avant ceux qui de première simulation (v=25m/s).

V=15m/s Avec champ Magnétique B=0.48Tesla

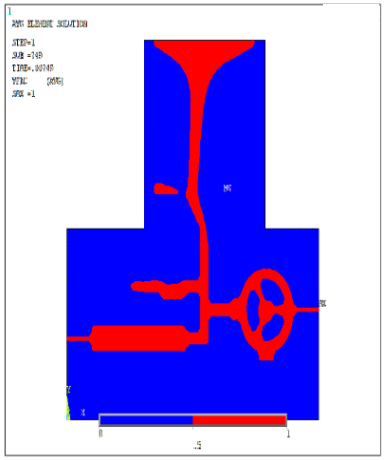
v=25m/s Sans champ Magnétique



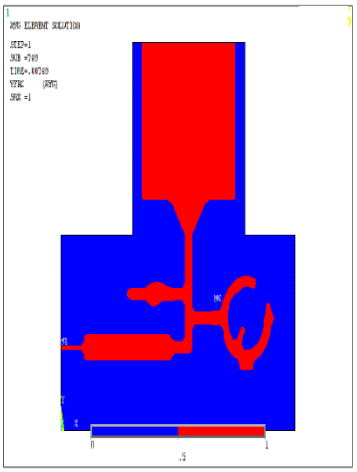
t=0.00466 s



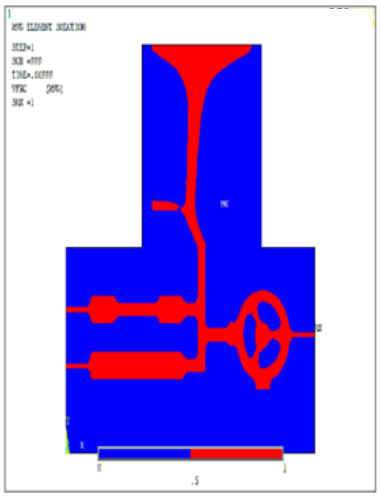
t=0.00466 s



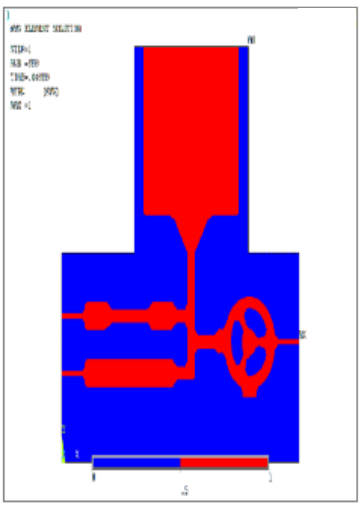
t=0.00749 s



t=0.00749 s



t=0.00999 s



t=0.00999 s

Figure IV.38: Volume de fraction pendant le remplissage du moule

IV.12 Conclusion

Nous avons cité dans ce chapitre trois simulations indiquant la même zone (la première et la deuxième simulation sans champ magnétique et la troisième simulation avec champ magnétique), pour vérifier le remplissage des moules; En utilisant trois valeurs de gravité différentes, en plus de cela, la simulation nous a permis de mieux comprendre la distribution de tous les paramètres: (pression, température et temps pour le remplissage du moule) et de comparer la référence de température et la pression de chaque point pour indiquer la simulation après avoir trouvé quelques observations:

- Temps de remplissage est moins avec le champ magnétique que sans champ magnétique
- La température et la pression (vitesse) à la fin du remplissage dans le champ magnétique sont supérieures au champ magnétique
- Plus la pression est élevée, plus le fluide est chauffé.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

L'analyse numérique réalisée dans cette étude a permis de dégager plusieurs conclusions importantes. La méthode VOF (Volume of Fluid) s'est montrée particulièrement adaptée pour modéliser et surveiller le processus de remplissage des moules. Elle a permis de mise en place d'un modèle simple, intuitif et facile à utiliser, tout en offrant une capacité de simulation efficace.

Les résultats obtenus grâce à ce modèle ont amélioré la compréhension de l'évolution thermique durant le remplissage. Le procédé repose sur la résolution des équations de Navier-Stokes couplées à celles de la méthode VOF. Il est désormais établi que la qualité du remplissage influence directement la phase de solidification, pouvant entraîner des défauts à différentes échelles, qui affectent inévitablement les caractéristiques finales de la pièce coulée.

L'utilisation du champ magnétique dans l'opération du remplissage permet d'accélérer l'opération de remplissage mais les défauts restent les mêmes et ce résultat de point de vue économique est très important dans le domaine d'industrie.

On peut dire que l'utilisation du champ magnétique dans le processus de moulage contribue à accélérer le processus de remplissage sans aucun effet significatif sur les défauts et ça nécessite des recherches et des expérimentations supplémentaires.

En complément, la méthode des éléments finis s'est révélée être un outil pertinent pour étudier des phénomènes difficilement observables en conditions réelles, comme le comportement du métal liquide dans le moule et sa solidification progressive. La simulation numérique permet ainsi de représenter les écoulements, de suivre le refroidissement et d'agir sur les paramètres du procédé en vue d'en améliorer le contrôle.

Dans une optique de performance industrielle et de compétitivité à l'échelle mondiale, l'usage de la simulation et de la modélisation dans le domaine de la fonderie offre de nombreux bénéfices : optimisation des processus, réduction des pertes de matière, gain de temps, et amélioration constante de la qualité des pièces produites.

References bibliographies

[1]. J.C Gelin1, T Barriere and B Liu ‘’Improved mould design in metal injection moulding by combination of numerical simulations and experiments’’(2001)

[2]: O’Hara, J. F., & MacDonald, A. P. Magnetic Processing of Liquid Metals. Materials Science and Engineering, 84(2), 217-226. (1986).

[3]. Barriere, T., Renault, D., Dutilly, M. and Gelin, J. C. ‘’Moulage par injection de poudres métalliques. Expérimentation, modélisation et simulation’’(2000).

[4] T. P. K. T. S. Jha et M. B. Ghosh. "Electro-magnetic Control of Metal Flow in Casting" (1977)

[5]. - R. E. Miller et C. H. Robles"The Use of Magnetic Fields for Controlling Flow Patterns in Casting Processes"**.**(1980)

[6]. Daoudi Moussa et Dhaoui Lahcen ″ Simulation Numérique Du Remplissage Sous Pression Des Moules Par La Méthode EF/VOF ″(promotion2013-2014)

[7]. - F. B. E. Yates "Advanced Techniques for Modeling Metal Casting». (1992)

[8]. S. G. Wang et al."A Study of the Numerical Simulation of Molten Metal Flow in Casting" (1991)

[9]. - J. A. M. Wiebenga et al. "Numerical Simulation of Metal Casting Processes" (1985)

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

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

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

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

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

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

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

[17] Article in Materials Science Forum, 2018.

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

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

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

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

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

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

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

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

[26] MAKHLOUFI Med Amine, 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.

[27] Auteurs multiples, *Les alliages d' aluminium moulés*, [CD-ROM], Paris, Centre technique des industries de la fonderie et Centre québécois de la recherche et du développement de L'aluminium, 2002.

[28] Article_Bagheri_Venturini_Lefevre

[29] P. Rabiller, Electromagnétisme, université de Rennes 1, 2005, *https://perso.univrennes1.fr/philippe.rabiller/electromag_pcgi2_ch4.ppt*

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

[31]. Jha, T. P. K. T. S., & Ghosh, M. B. (1977). Electro-magnetic Control of Metal Flow in Casting. Metallurgical Transactions B, 8(5), 935-945.

[32]. Miller, R. E., & Robles, C. H. (1980). The Use of Magnetic Fields for Controlling Flow Patterns in Casting Processes. Journal of Materials Science, 15(9), 2281-2290.

[33]. Suhas V. Patankar, « Numerical heat transfer and fluid flow » Edition series in computational methods in mechanics and thermal sciences, 1980

[34]. J.-B. SAULNIER, A. ALEXANDRE, La modélisation thermique par la méthode nodale, *Revue. Générale de Thermique*, N° 280, pp. 363-371, 1985.

[35]. Transfert de chaleur par conduction, Chevrier J- C Ecole des Mines, Nancy, 1979

[36]. Cours de transferts thermiques, Yves Jannot, 2005

[37]. Transfert de chaleur par rayonnement, Chevrier J- C. Ecole des Mines, Nancy, 1979

[38]. L. Isoardi, G. Chiavassa, G. Ciraolo, P. Haldenwang, E. Serre, Ph. Ghendrih, Y. Sarazin, F. Schwander, P. Tamain, Penalization modeling of a limiter in the tokamak edge plasma, J. Comp. Phys., Vol. 229, 2010.

[39]. Sercan Dogan, SercanYagmur, IlkerGoktepeli, et MuammerOzgoren, Assessment of turbulence models for flow around a surface-mounted cube, International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research Vol. 6, No. 3, 2017.

[40]. Marion Capuano « Simulations numériques d'écoulements diphasiques compressibles, visqueux et conductifs à l'aide de schémas aux différences finies centrées d'ordre élevé » 2018 De [41] [50]. Les cites WEB.