

Table des matières

Table des matières	a
Liste des figures	d
Liste des tableaux	g
Liste des abréviations	x
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Procédés de fabrication	
I.1 Introduction.....	4
I.2 Organigramme des procédés de fabrication.....	4
I.3 Moulage.....	4
I.4 Moulage en moule non permanent	5
I.4.1 Moulage en sable	5
I.4.2 Moulage en carapace.....	6
I.4.3 Moulage à la cire perdue.....	6
I.5 Moulage en moule permanent	8
I.5.1 Moulage en coquille.....	8
I.5.1.1 Moulage par gravité.....	8
I.5.1.2 Moulage sous pression	9
I.5.2 Moulage par centrifugation.....	10
I.5.3 Coulée continue (Lingotière).....	11
Chapitre II : Moulage en coquille	
II.1 Introduction	13
II.2 Définitions	13
II.3 Principe du procédé	14
II.4 Constitution d'une coquille	15
II.5 Avantages de moulage de coquille	17
II.6 Poteyage	18
II.6.1 Différents types de poteyage.....	18

Tables des matières

II.6.2 Utilisations.....	19
II.6.3 Composition des produits de poteyage	21
II.6.4 Mise en œuvre du poteyage	23
II.6.5 Principaux types de distribution du poteyage.....	24
II.6.6 Paramètres de l'opération de poteyage	24
Chapitre III : Mesure de la température	
III.1 Introduction.....	28
III.2 Température.....	28
III.2.1 Généralités	28
III.2.2 Echelles de température.....	28
III.2.3 Méthodes de mesure de température	29
III.3 Mesure de la température	30
III.3.1 Mesure par contact physique.....	30
III.3.1.1 DéTECTEURS ou thermomètres à dilatation.....	30
III.3.1.2 Capteurs ou thermomètres électriques.....	32
III.3.1.3 Thermocouple.....	34
III.3.2 Mesure sans contact physique.....	34
III.3.2.1 Pyromètre optique.....	34
III.3.2.2 Caméra thermique	35
III.4 Modes de transfert thermique.....	36
III.4.1 Conduction	36
III.4.2 Convection	36
III.4.3 Rayonnement.....	36
III.4.4 Emissivité des matériaux	37
III.5 Domaine infrarouge et son système de mesure.....	38
III.5.1. Cible	38
III.5.1.1 Spectre électromagnétique.....	39
III.5.1.2 Corps Noir	39
III.5.2 Environnement	40
III.5.3 DÉTECTEURS.....	41
III.5.4 Affichage et interface	41
III.6 Caméra thermique.....	42
III.6.1 Principe.....	42

Tables des matières

III.6.2 Fonctionnement	42
III.6.3 Types de caméra thermique (CT).....	43
Chapitre IV : Etude expérimentale	
IV.1 Introduction	48
VI.2 Généralités.....	48
IV.3 Définition d'un four.....	48
IV.4 Fonctionnement.....	49
IV.5 Différents types de fours.....	49
IV.6 Description	53
IV.7 Matériels utilisés	53
IV.8 Expérimentation.....	57
IV.9 Préparation des pièces.....	61
IV.9.1 Opération d'usinage	61
IV.9.2 polissage.....	62
IV.9.3 Dureté	62
Chapitre VI : Résultats et discussions	
V.1 Introduction	64
V.2 Carte thermique de la coulée.....	64
V.3 Evolution de la température au cours de refroidissement	64
V.3.1 Refroidissement a l'air libre	64
V.3.2 Moule fermé avec une brique réfractaire	66
V.3.3 le moule est fermé avec une pièce cylindrique en acier.....	68
V.3.4 moule potéyé ferme avec une brique réfractaire.....	70
V.4 comparaison du refroidissement de la pièce moulée	72
V.5 Dureté	73
Conclusion Générale et perspectives.....	74
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	75
Annexe 1.....	79
Annexe 2.....	83

Chapitre IV : Etude expérimentale

Tableau IV.1 : Caractéristiques de la caméra thermique Testo 875.

Chapitre VI : Résultats et discussions

Tableau V.1 : Dimensions de cratère de la pièce pour moule à l'air libre.

Tableau V.2 : Dimensions de cratère de la pièce pour moule fermé avec une brique réfractaire.

Tableau V.3 : Dimensions de cratère de la pièce pour moule fermé avec une pièce en acier.

Tableau V.4 : Dimensions de cratère de la pièce pour moule potéyé fermé avec une brique réfractaire.

Tableau V.5 : dureté de pièces obtenues.

Liste des figures

Chapitre I

Fig.I.1 : Procédés de moulage.....	5
Fig.I.2 : Composition d'un moule en sable.....	5
Fig.I.3 : Moulage en carapace.....	6
Fig.I.4 : Moulage à la cire perdue.....	7
Fig.I.5 : Principe d'un moulage par gravité.....	8
Fig.I.6 : Principe de moulage sous pression.....	9
Fig.I.7 : Moule par centrifugation à axe vertical.....	10
Fig.I.8 : Coulée continue.....	11

Chapitre II

Fig.II.1 : Exemple de moule	13
Fig. II. 2 : Principales étapes du procédé de moulage en coquille.....	14
Fig. II.3 : Composition d'une coquille.....	16
Fig.II.4 : Poteillage de la partie mobile de moule.....	19
Fig. II.5. Comparaison du refroidissement du moule-bloc moteur Ali9Cu3 en production manuelle et automatisée	20
Fig.II.6 : Température en surface de moule lors du poteillage (0.5mm et 3mm sous la surface).....	21
Fig.II.7 : Cinétique de décomposition de trois produits de poteillage sur moule chaud en fonction du ratio silicone/cire	23
Fig. II.8 : Poteillage avec grand nombre de buses.....	23
Fig.II.9 : Cartographie infrarouge de moule-avant poteillage	25
Fig.II.10 : Efficacité thermique de deux produits de poteillage (comparée à de l'eau) en fonction de la température de moule	26

Chapitre III

Fig.III.1 : Echelles de température	29
Fig.III.2. Différentes méthodes pour la mesure de la température	29
Fig.III.3 : Thermomètre à dilatation de liquide.....	30
Fig. III.4 : Thermomètre à gaz.....	31
Fig. III.5 : Thermomètre à tension de vapeur à double remplissage.....	32
Fig. III.6 : Thermomètre à dilatation : bilame thermique.....	32
Fig. III.7 : Thermomètre à résistance : Sonde PT100	33
Fig. III.8 : Thermomètre à thermistance : Montage deux fils avec source de courant.....	33
Fig. III.9 : Thermocouple : Effet Peltier.....	34
Fig. III.10 : Pyromètre optique.....	35
Fig. III.11 : Caméra infrarouge	35
Fig. III.12 : Illustration de la conduction thermique.....	36
Fig. III.13 : Illustration de la convection	37
Fig. III.14 : Illustration du rayonnement thermique	38
Fig. III.15 : Système de mesure par infrarouge	39
Fig. III.16 : Spectre électromagnétique.....	39

Fig. III.17 : Sections de la bande spectrale infrarouge	40
Fig. III.18 : Principe d'une caméra infrarouge	43
Fig. III.19 : Filtre de la caméra	43
Fig. III.20 : Thermogramme de CT avec IR refroidi	44
Fig. III.21 : Thermogramme de CT avec IR non refroidi	45

Chapitre IV

Fig.IV.1. Schéma simplifié d'un four à bruleurs.....	48
Fig.IV.2 : Four à cubilot.....	50
Fig.IV.3 : Four à creuset.....	50
Fig.IV.4 : Exemple de four électrique.....	51
Fig.IV.5 : Exemple de four rotatif ou oscillant.....	52
Fig.IV.6 : Four à convection à chauffage indirect.....	52
Fig.IV.7 : Matériels et accessoires de l'expérimentation.....	53
Fig.IV.8 : Banc de moulage avec le creuset.....	54
Fig.IV.9 : Moule utilisé.....	54
Fig.IV.10 : Caméra thermique TESTO 875.....	56
Fig.IV.11 : La coulée de l'aluminium.....	57
Fig.IV.12 : Moule ferme avec une brique.....	57
Fig.IV.13 : Image thermique du moule.....	58
Fig.IV.14 : Refroidissement a l'air libre.....	58
Fig.IV.15: Image thermique du moule à l'air libre.....	58
Fig.IV.16 : moule ferme.....	59
Fig.V.17 : image thermique du moule ferme avec une plaque en métal.....	59
Fig.V.18: moule poteyé.....	59
Fig.V.19 : moule poteyé ferme avec une brique.....	60
Fig.V.20: image thermique du moule poteyé.....	60
Fig.V.21 : Pièces obtenues après moulage.....	60
Fig.V.22 : usinages des pièces.....	61
Fig.V.23 : polissage des pièces.....	62
Fig.V.24 : Essai de dureté des pièces finis.....	62

Chapitre VI

Fig.VI.1 : Influence de la température dans la coulée par gravité.....	64
Fig.VI.2 : Evolution de température pour moule à l'air libre.....	65
Fig.VI.3 : Evolution de température pour moule fermé avec une brique réfractaire.....	66
Fig.VI.4 : Evolution temporelle de température de la périphérie du moule fermé avec une brique.....	67
Fig.VI.5 : Evolution de température pour moule fermé avec une pièce en acier.....	68
Fig.VI.6 : Evolution temporelle de température de la périphérie du moule fermé avec une pièce en acier.....	69

Fig.VI.7 : Evolution de température pour moule potéyé fermé avec une brique réfractaire.....	70
Fig.VI.8 : Evolution temporelle de température de la périphérie du moule potéyé fermé avec une brique.....	71
Fig.VI.9 : Superposition des courbes obtenues.....	72

Liste des abréviations

Symboles Latins :

Symboles	Désignations	Unités
c_p	chaleur spécifique	$\text{J. kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$
ϕ	Flux	W
L_s	chaleur latente de fusion	J. kg^{-1}
T	température	K
t	variable du temps	s
C	vitesse de la lumière	m.s^{-1}
p	Pression	Pa
x, y	coordonnées cartésiennes	
S	Surface	m^2
k	Constante de Boltzmann	W.s.K^{-1}

Symboles Grecs :

Symboles	Désignations	Unités
ρ	masse volumique	kg.m^{-3}
μ	viscosité dynamique	$\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$
λ	conductivité thermique	$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$
h	Coefficient d'échange	$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$
Δt	Pas de temps	S
β	Coefficient de dilatation thermique	K^{-1}
ε	Emissivité	

Introduction Générale

L'opération de moulage est l'une des plus importantes du processus industriel de la fonderie. Elle détermine en effet, d'après le modèle, les formes de la pièce à couler, ses dimensions et leur précision, ses états de surface. Le refroidissement joue un rôle prépondérant sur de très nombreux paramètres influant sur la qualité de la pièce moulée.

Parmi les techniques connues dans l'industrie de moulage est le moulage par gravité. Comme tous les processus, il possède des avantages et des inconvénients. Un tel procédé fournit des pièces propres, de beaux aspects, lisses, étanches et compacts, aux cotes très proches des dimensions finales. La précision des pièces est meilleure par rapport à celle du moulage en sable, mais il y a risque d'avoir des pores d'air dans les pièces finies.

Dans le processus de moulage par gravité, il est connu que l'air emprisonné provoque un modèle d'écoulement indésirable durant le remplissage. L'écoulement du métal liquide dans le moule et les poches d'air dépend principalement à la forme de la canalisation du remplissage du moule.

Nous nous intéressons au moulage en coquille. Procédé de réalisation de pièces métalliques très ancien, le moulage en coquille consiste à obtenir une pièce à partir d'un moule métallique, appelé coquille, constitué d'éléments assemblés dans lesquels une cavité ayant la forme extérieure de la pièce a été réalisée. Dans cette cavité dénommée empreinte, l'alliage liquide est versé par l'intermédiaire d'un orifice de remplissage. Le remplissage de la coquille se fait sous la seule action du poids de l'alliage soit par coulée directe, de haut en bas, dite en chute ou par gravité, soit, suivant le principe des vases communicants, de bas en haut, dite en source.

Le présent travail consiste à faire une étude expérimentale du moulage en coquille par gravité dans le but d'observer le phénomène de refroidissement des pièces de fonderie et les paramètres influant sur ce refroidissement.

Le travail a été réalisé de la manière suivante :

Une introduction générale présente le but du travail en montrant l'intérêt de l'étude expérimentale du processus de moulage par coquille.

- Le premier chapitre concerne une recherche bibliographique présentant les différents types du moulage ainsi que leurs avantages et inconvénients.
- Le deuxième chapitre est basé sur les techniques de moulage par coquille, leur principe et en le terminant par une présentation de poteyage avec ses paramètres.
- Le troisième chapitre présente les différentes méthodes de la mesure de la température en précisant la mesure avec la caméra thermique ainsi que les différents modes de transfert de chaleur.
- Le quatrième chapitre donne quelques exemples sur les différents fours utilisés dans l'industrie.

La partie expérimentale est divisée en deux chapitres :

- Le premier décrit l'installation de notre expérience effectuée au sein de laboratoire des sciences de matériaux en détaillant les matériels et les méthodes utilisées.
- Le deuxième présente les différents résultats obtenus et leurs interprétations.

A la fin, une conclusion générale et des perspectives résument l'analyse critique des résultats obtenus.

*Chapitre I : Procédés de
fabrication*

I.1 Introduction

Le chapitre suivant présente l'ensemble de techniques visant l'obtention d'une pièce ou d'un objet par transformation de matière brute. Obtenir la pièce désirée nécessite parfois l'utilisation successive de différents procédés de fabrication. Ces procédés de fabrication font partie de la construction mécanique.

I.2 Organigramme des procédés de fabrication

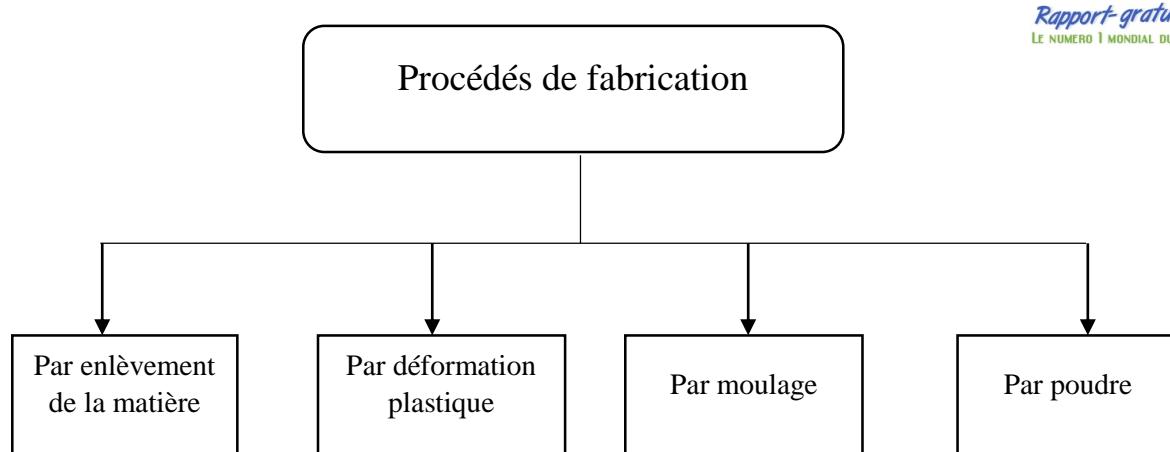


Fig.I.1 : procédés de fabrication.

- Enlèvement de la matière : tournage, fraisage, perçage, ...
- Par déformation plastique : forgeage, estampage, matriçage, emboutissage,...
- Par poudre : métallurgie des poudres, frittage....

Les procédés cités ci-dessus peuvent être trouvés facilement en littérature spécialisée. Nous allons développer, dans ce chapitre, les procédés de moulage.

I.3 Moulage

Le moulage est un ensemble de procédés qui permet de réaliser des pièces métalliques brutes. Il 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 [1].

Dans la spécialisation de la fonderie, on distingue pratiquement les moulages comme le montre la figure 2 :

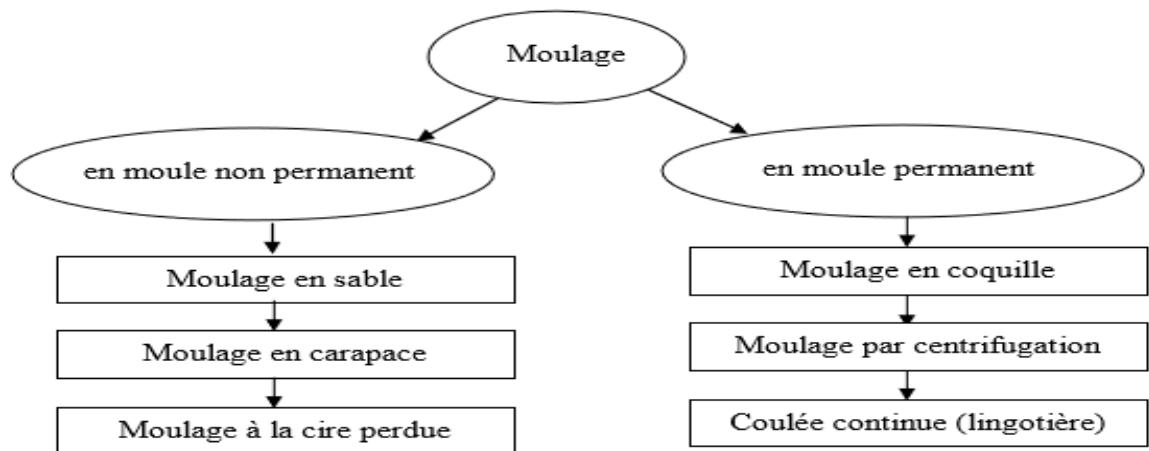


Fig.I.2: Procédés de moulage[1].

I.4 Moulage en moule non permanent

Le moule est utilisé qu'une seule fois. Pour extraire la pièce, il faut le détruire. L'empreinte est obtenue par moulage du matériau constitutif autour d'un modèle réalisé en bois ou en métal. Il existe plusieurs types (fig.I.2).

I.4.1 Moulage en sable

Le matériau est coulé dans un moule en sable (fig.I.3) qui sera détruit après l'élaboration de chaque pièce. Ce dernier est fabriqué en une ou plusieurs parties : chacune d'elles dispose d'une empreinte donnant la forme de la pièce tracée par un modèle (en bois, métallique, etc.) enfoncé dans le sable. Lorsque la pièce a des formes intérieures (trous, évidement, etc.), on insère dans (entre) la (les) partie(s) du moule un noyau en sable qui y sera maintenu (dans le moule) puis détruit après démoulage de la pièce [2].

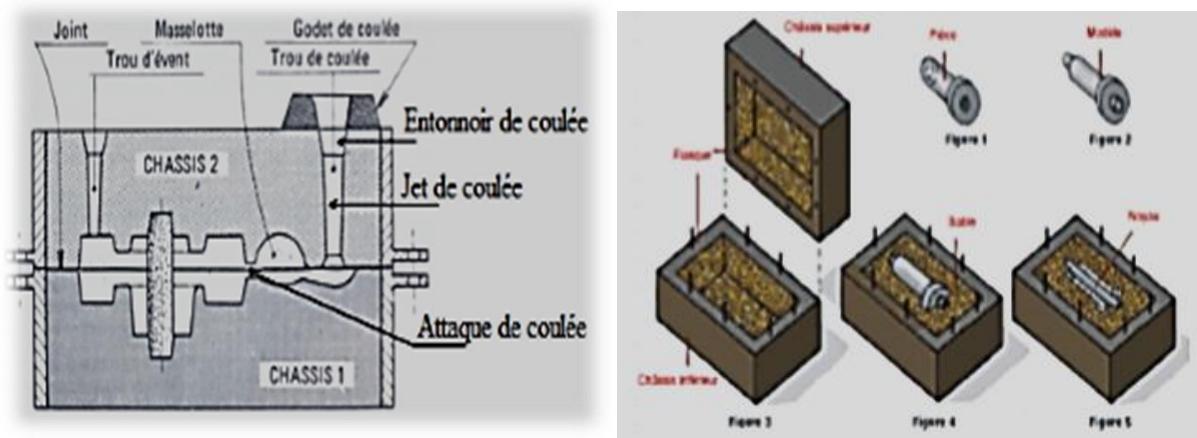


Fig.I.3 : Composition d'un moule en sable [2].

I.4.2 Moulage en carapace

Le métal en fusion, est coulé dans un moule composé de deux coquilles appelées carapaces ou masques. Le procédé est nommé moulage en carapace ou procédé CRONING. Il s'agit d'un moulage à modèle permanent. Un mélange sable-résine-catalyseur est mis au contact d'un outillage métallique chauffé à une température voisine de 300 °C. En quelques dizaines de secondes, il se forme une carapace de sable durcie par polymérisation autour du modèle. L'excédent de sable non polymérisé est éliminé par renversement de l'outillage (fig.I.4). Les noyaux pleins ou évidés sont réalisés de façon analogue. Ce procédé permet de faire des pièces d'une grande précision dimensionnelle, d'un bel état de surface comparé avec le moulage en sable, les frais d'usinage sont alors diminués. Le poids des pièces est limité à 30 kg environ. Le coût de fabrication élevé de la plaque modèle et le prix non négligeable de la résine fait que ce procédé n'est utilisé que pour mouler des pièces petites ou moyennes en grande série (plus de 500 pièces). Les plaques modèles en fonte sont meilleures que celles en aluminium vue l'usure et la dilatation thermique (imprécision dimensionnelle) de ces dernières, ce qui fait que l'aluminium est généralement recouvert d'une couche de chrome pour augmenter sa résistance à l'usure. Ce procédé favorise l'obtention des engrenages coniques [3].

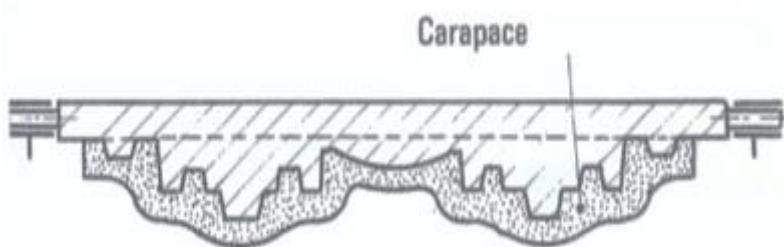


Fig.I.4 : Moulage en carapace [3].

I.4.3 Moulage à la cire perdue

Ce procédé de moulage, s'applique à tous types de pièces mécaniques, des petites aux grandes dimensions, de quelques grammes à des pièces allant jusqu'à 25 kg, de formes simples à des formes compliquées, de tolérances larges (JS 12) à des tolérances plus réduites et de rugosité Ra de 1,6 à 0,8µm. Ce procédé s'applique à la fonderie des matériaux à haut point de fusion dans des moules métalliques. Le moule, en matériau réfractaire (céramique, plâtre), est composé d'une seule pièce. En plâtre, les alliages les plus usuels sont à base d'aluminium et à base de magnésium. Outre l'obtention d'une grande précision dimensionnelle, les points forts de la

fonderie de précision à modèle perdu sont la réalisation de pièces de dessin pouvant être sophistiquée, à parois très minces, en alliages difficilement ou non usinables. La précision dimensionnelle est très bonne à excellente. En moulage céramique on coule des alliages légers et ultra légers (magnésium) ; des aciers, des superalliages à base nickel, cobalt, zirconium ; le titane (également en moules de graphite usinés) ; des alliages cuivreux [4].

- **En cire perdue**

On coule une cire spéciale qui, en se solidifiant, prend la forme exacte de la pièce à produire. Ensuite, le modèle ainsi réalisé en cire, après avoir été éventuellement monté en grappe, est trempé à plusieurs reprises dans un bain pâteux (barbotine) de matériaux réfractaires et de liants qui, en séchant, forme la « carapace » autour du modèle en cire (fig.I.5). L'ensemble est porté à une température supérieure à 100 °C : la cire fond et laisse alors une cavité dans laquelle sera coulé le métal en fusion. Après refroidissement, le moule est détruit laissant apparaître une pièce métallique identique, dans les moindres détails, au modèle initial.

- **En polystyrène expansé**

Ce procédé de moulage implique la fabrication d'autant de modèles que de pièces à réaliser. Les modèles sont obtenus par injection, dans un moule métallique, de granules de polystyrène qui se soudent sous l'action de la vapeur. Les différentes parties du modèle et les appendices de coulée sont collés de manière à former des grappes recouvertes d'un enduit réfractaire, puis placés dans un bac dans lequel on verse du sable sec sans liant qui est ensuite compacté par vibrations. Lors de la coulée, le front de métal progresse en faisant évaporer le polystyrène et prend la place de celui-ci.

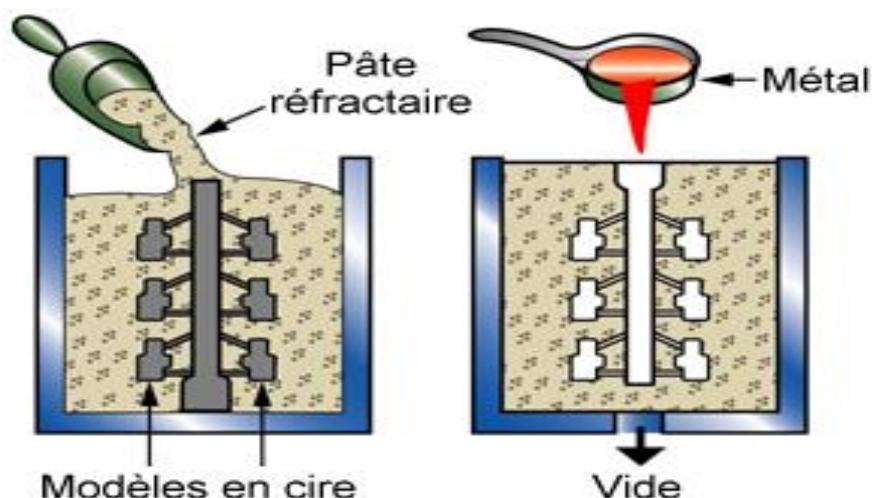


Fig.I.5 : Moulage à la cire perdue [4].

I.5 Moulage en moule permanent

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

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

I.5.1 Moulage en coquille

Le métal fondu, est coulé dans un moule métallique nommé "coquille" soit par gravité soit sous pression (fig.I.6). La température de fusion du métal coulé doit être inférieure à la température de fusion du matériau constituant le moule. Dans le moulage par gravité, le métal fondu est versé directement dans le moule par le canal de coulée et dans le moulage sous pression le métal fondu est injecté dans le moule au moyen d'une pompe qui exerce sur le métal des pressions très élevées. Le moulage sous pression nécessite des presses très puissantes [5].

I.5.1.1 Moulage par gravité

Le moule métallique est composé de parties assemblées (en fonte ou en acier mi-dur) positionnées par des goujons, un canal de coulée, des événets, des tirées d'air, des extracteurs pour l'éjection de la pièce.

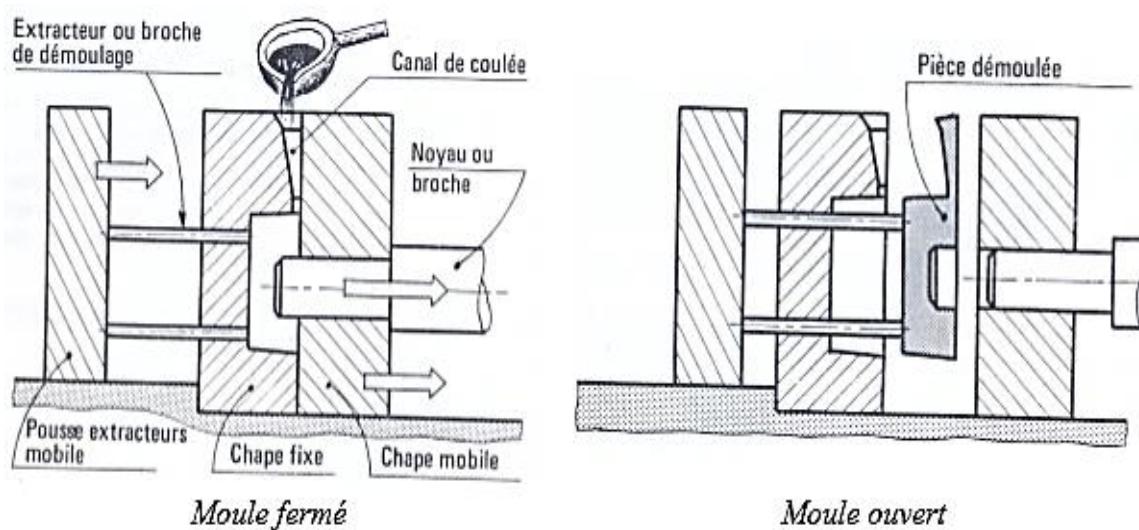


Fig.I.6 : Principe d'un moulage par gravité [5].

- **Avantages et inconvénients**

Ce type de moulage convient pour une production élevée et pour des petites pièces qui ont des épaisseurs uniformes et des trous simples. On ne peut pas concevoir des trous de diamètre inférieurs à 6mm. Par rapport au moulage en sable, ce procédé favorise l'obtention des pièces plus uniformes et des tolérances serrées, un meilleur état de surface et des coûts de fabrication moindres. Une coquille supporte de 5 000 coulées pour les métaux lourds jusqu'à 20 000 pour les métaux légers mais leur prix de revient est élevé.

5.1.1.2 Moulage sous pression

Dans ce procédé, le métal liquide est injecté dans le moule de la machine sous pression (30 à 100 N/mm²). Le moulage sous pression est utilisé pour réaliser des grandes séries de pièces ayant une configuration compliquée et des dimensions précises (fig.I.7). Il nécessite une machine comprenant une pompe à injection du métal fondu, des éléments mobiles qui assurent le moulage et le démoulage des pièces et un système de refroidissement des moules. L'état de surface obtenu avec ce type de moulage permet dans de nombreux cas, d'utiliser les pièces moulées sans usinage [5].

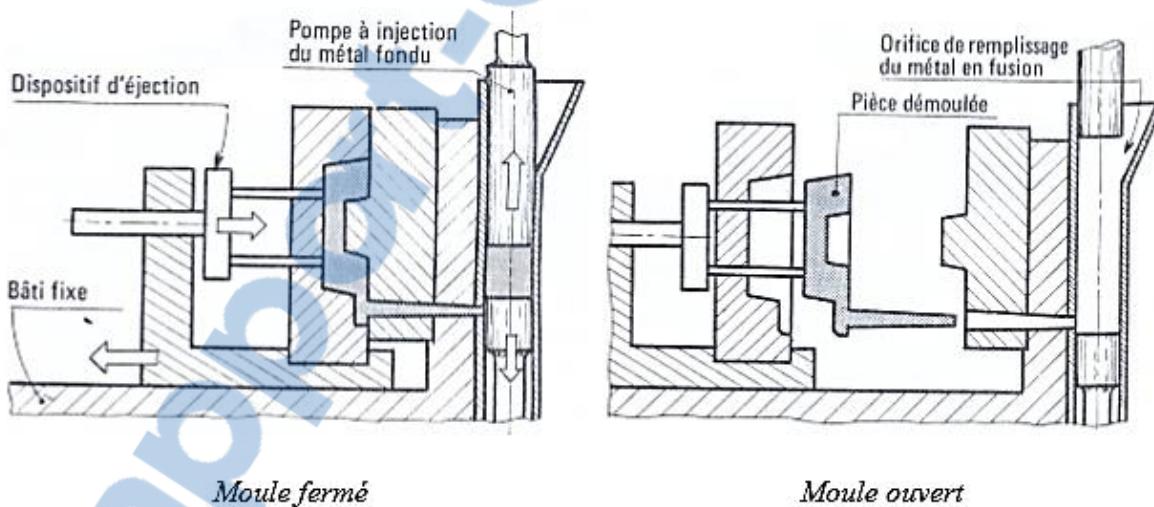


Fig.I.7 : Principe de moulage sous pression [5].

- **Avantages et inconvénients**

Ce procédé peut se faire sans dépouille. Il permet de couler des filets extérieurs ou intérieurs ainsi que des roues dentées, des cornières, des pièces d'horlogerie, des jouets, d'appareils électroménagers, etc. Il favorise la production d'un grand nombre de pièces moulées avec précision (tolérances serrées). Il permet le moulage des pièces minces et de reproduire des

détails fins. La fabrication des pièces par ce procédé, à prix concurrentiel, se limite aux métaux non ferreux.

I.5.2 Moulage par centrifugation

La centrifugation, appelée encore coulée sous-pression centrifuge, est une technique de coulée basée sur les propriétés physiques de la force centrifuge (fig.I.8). C'est un procédé utilisé pour produire des pièces de révolutions telles que les tubes, les couronnes, etc., sans usage d'un noyau. Le moule est mis en rotation pendant la coulée et la solidification de l'alliage. En général le moule est métallique, mais il peut être garni intérieurement d'un revêtement réfractaire ou en sable. Les parois du moule appliquent à l'alliage une accélération centripète de 15 à 30 fois l'accélération de la pesanteur. La centrifugation se fait sur des machines à axe vertical, horizontal ou oblique [6].

- **Avantages et inconvénients**

Une grande homogénéité du métal dans l'ensemble de la pièce, ainsi qu'une solidification plus rapide de la pièce qui est mieux texturée, notamment lorsqu'un système extérieur de refroidissement par eau est mis en place. La cristallisation est très régulière. Ce procédé ne peut être appliqué que pour des pièces de formes simples telles que galets de roulement, roues, tubes, cylindres de laminoirs, chemises de moteurs, etc... L'utilisation du procédé concerne aussi la production de tuyaux en fonte à graphite sphéroïdal ou en alliages cuivreux.

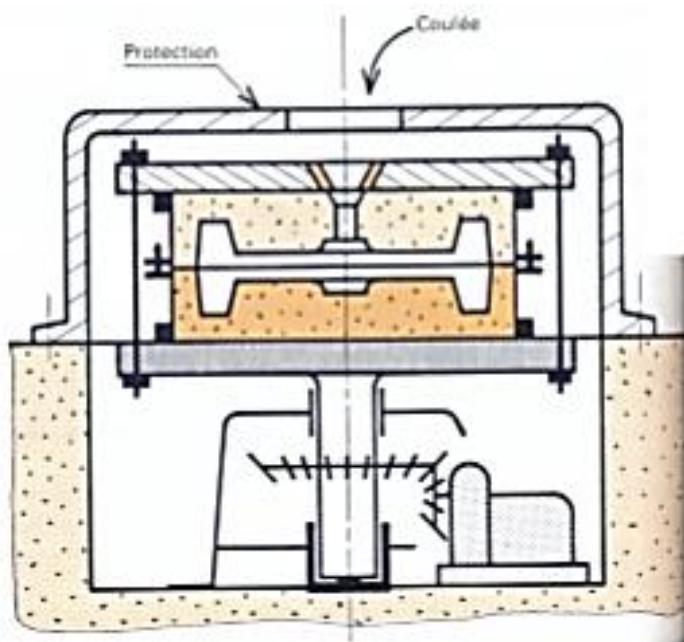


Fig.I.8 : Moule par centrifugation à axe vertical [7].

I.5.3 Coulée continue (Lingotière)

Il s'agit d'une technique, déjà utilisée en sidérurgie, pour obtenir des produits longs. Elle assure la réalisation des profilés de sections pleines ou creuses très variées par coulée de l'alliage de fonderie (fig.I.9).

Le métal en fusion se trouvant dans un four de maintien passe dans une filière en graphite refroidie. La barre profilée, totalement solidifiée, est tirée au moyen de galets qui servent également de guides, puis tronçonnée à la longueur voulue. Les installations de cette technique peuvent être verticales, courbes ou horizontales. Les deux dernières permettent de réduire la hauteur des infrastructures [8].

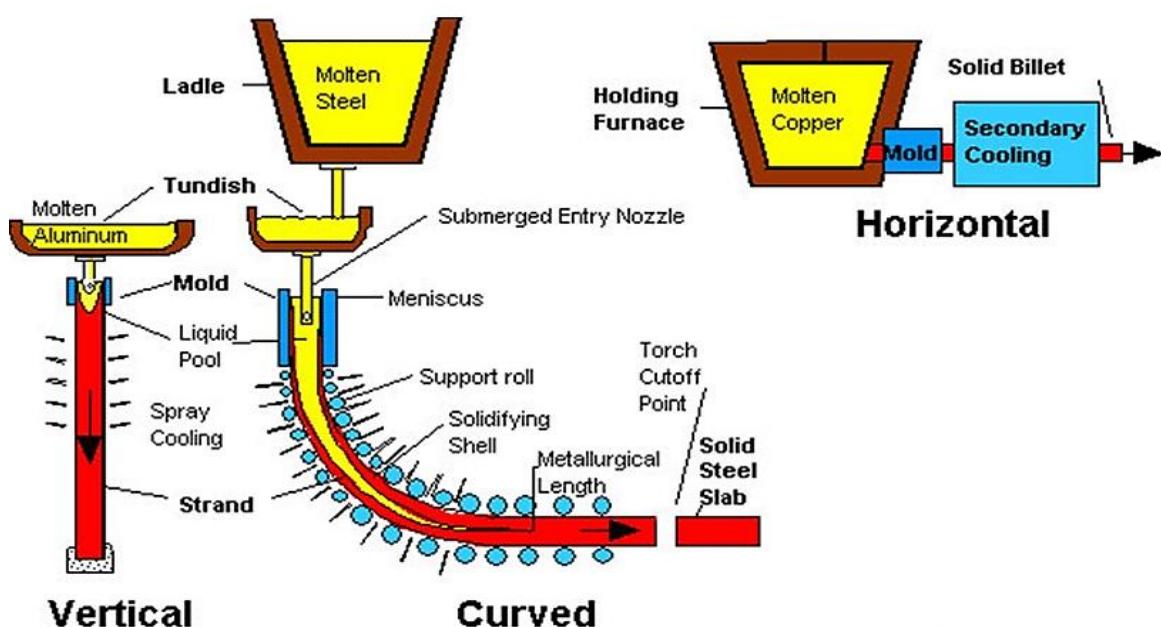


Fig.I.9 : Coulée continue [9].

▪ Conclusions

Nous avons présenté dans ce chapitre les différents types de moulage .Nous aborderons dans le chapitre suivant avec plus de détails le moulage en coquille.

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.

*Chapitre II : Moulage en
coquille*

II. 1 Introduction

Ce chapitre comporte deux parties. Dans la première partie nous allons présenter avec plus de détails le moulage en coquille. Nous traitons dans la deuxième partie le poteage et ses différentes techniques de réalisation.

II.2 Définitions

Le moulage est un procédé qui consiste à réaliser des pièces par coulée et solidification d'un matériau dans un moule présentant l'empreinte de la pièce à obtenir. Cette technique est souvent la plus économique pour l'obtention de produits finis ou semi-finis et pour des pièces de formes complexes, des séries de pièces identiques ou pour des pièces massives.

Un moule est l'ensemble des éléments appropriés, délimitant l'empreinte, et recevant le métal liquide qui après solidification donnera la pièce (fig.II.1). Un moule comprend une ou plusieurs parties qui peuvent être séparées l'une de l'autre (châssis, chapes, coquilles). La surface commune aux deux demi moules porte le nom de plan de joint même si cette surface ne forme pas un plan [10].

On distingue deux types de moules :

- les moules non permanents.
- les moules permanents.



Fig.II.1 : Exemple de moule [11].

Différents types de moulage :**✓ Moulage par coulée par gravité :**

La masse fondu est coulée par le haut dans un moule permanent métallique. La cavité de la coquille est remplie par l'effet de la pesanteur. C'est le procédé qui est utilisé en général pour les grandes séries. Il est plutôt réservé aux alliages légers à bas points de fusion (alliages d'aluminium, zinc...) car la coulée dans les moules de pièces dont la température de fusion est trop élevée provoque la dégradation rapide des éléments du moule. Du fait de sa conductivité thermique, le moule garantit un refroidissement accéléré de la masse fondu en cours de solidification.

✓ Moulage par coulée sous pression :

L'alliage liquide contenu dans un creuset étanche en graphite est refoulé dans le moule par une pression d'air comprimé ou d'azote appliquée sur la surface du métal. Le métal monte dans le tube d'injection réfractaire et pénètre dans le moule par un trou de coulée situé à la partie inférieure du moule. La pression est maintenue pendant tout le temps de la solidification de la pièce puis, au moment où l'on relâche la pression, tout le métal resté liquide dans le tube d'injection redescend dans le four [12].

Les avantages et inconvénients des 2 procédés sont cités au chapitre 1.

II.3 Principe du procédé

Le procédé se décompose comme le montre la figure II.2 :

Les matrices du moule (**a**) (usinées, moulées ou obtenues par électro érosion) sont préparées à la coulée du métal par chauffage (application d'un revêtement sur l'empreinte afin d'éviter le collage des pièces) puis assemblées (**b**).

La mise et le maintien en position sont en général assurés par des actionneurs pneumatiques.

La coulée est alors réalisée (**c**).

La conductivité et la capacité thermique du métal étant importantes, la vitesse de refroidissement de l'alliage dans le moule est très élevée, la solidification a donc lieu très rapidement et les matrices sont séparées (**d**).

La pièce avec les reliquats du système de remplissage et d'alimentation forme alors une grappe (**e**) qu'il conviendra d'extraire puis d'ébarber (**f**).

Le cycle reprend ensuite [13].

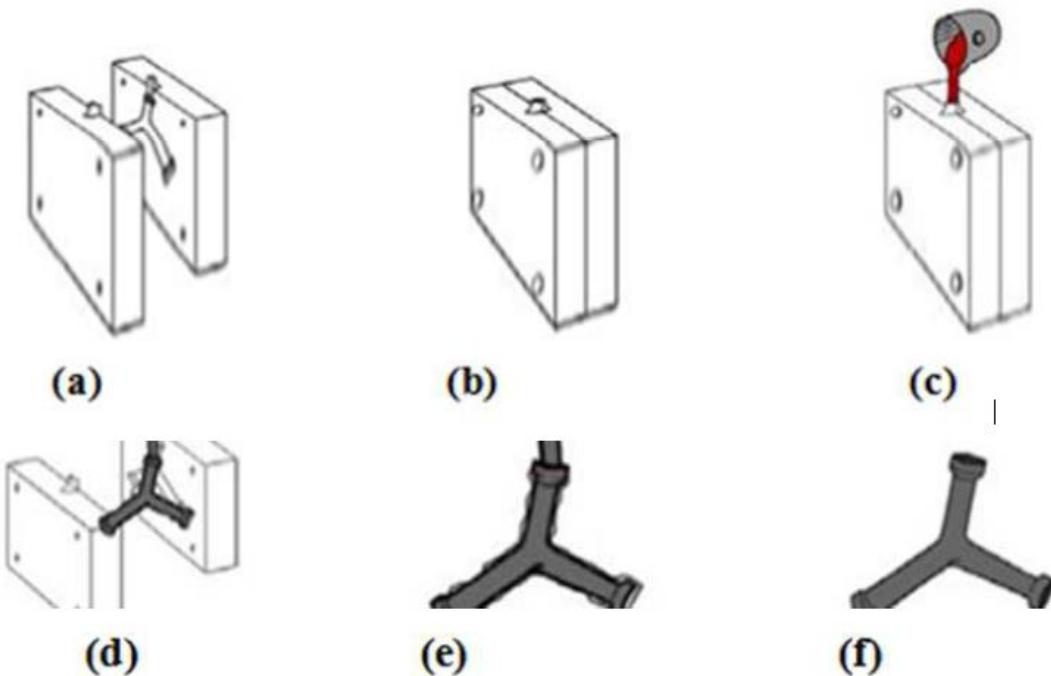


Fig. II. 2 : Principales étapes du procédé de moulage en coquille [13].

II.4 Constitution d'une coquille

Le corps : Composé le plus souvent d'une semelle portant deux chapes, séparées par des joints verticaux aux surfaces finement striées tirages d'air (événements). Il comprend, outre la forme en creux de la pièce à réaliser, les canaux de coulée et les masselottes (Fig.II.3).

Les noyaux : sont employés pour obtenir le contour intérieur de la pièce. Ils sont placés dans le moule. Le moulage avec noyau s'impose lorsque les pièces présentent des évidements qu'il serait difficile ou même impossible d'obtenir par moulage au naturel. Le noyau est réalisé en sable auto-siccatif, dans un moule appelé boite à noyau.

Préalablement chauffées à 200-350°C (selon le matériau coulé) afin d'éviter que le métal ne se fige trop rapidement, elles sont placées sur une table inclinable pour l'introduction du métal par basculement, et le redressement en fin de remplissage.

Remarque : Le chauffage doit parfois être poursuivi pendant la coulée par brûleurs ou rampe à gaz. Afin d'éviter tout choc thermique des 2 parties du moule, ce dernier est chauffé à environ 350°C [14].

Afin d'éviter l'attaque du moule par le métal en fusion, les surfaces en contact avec l'alliage coulé sont enduites d'un produit appelé "poteyage» que nous allons le détailler dans la deuxième partie du chapitre.

Ainsi les opérations à effectuer pour chaque coulée sont :

- Chauffage du moule,
- Poteyage du moule,
- Fermeture du moule et mise en place de la broche,
- Coulée du métal,
- Extraction de la broche et ouverture du moule après solidification du métal,
- Démoulage de la pièce.

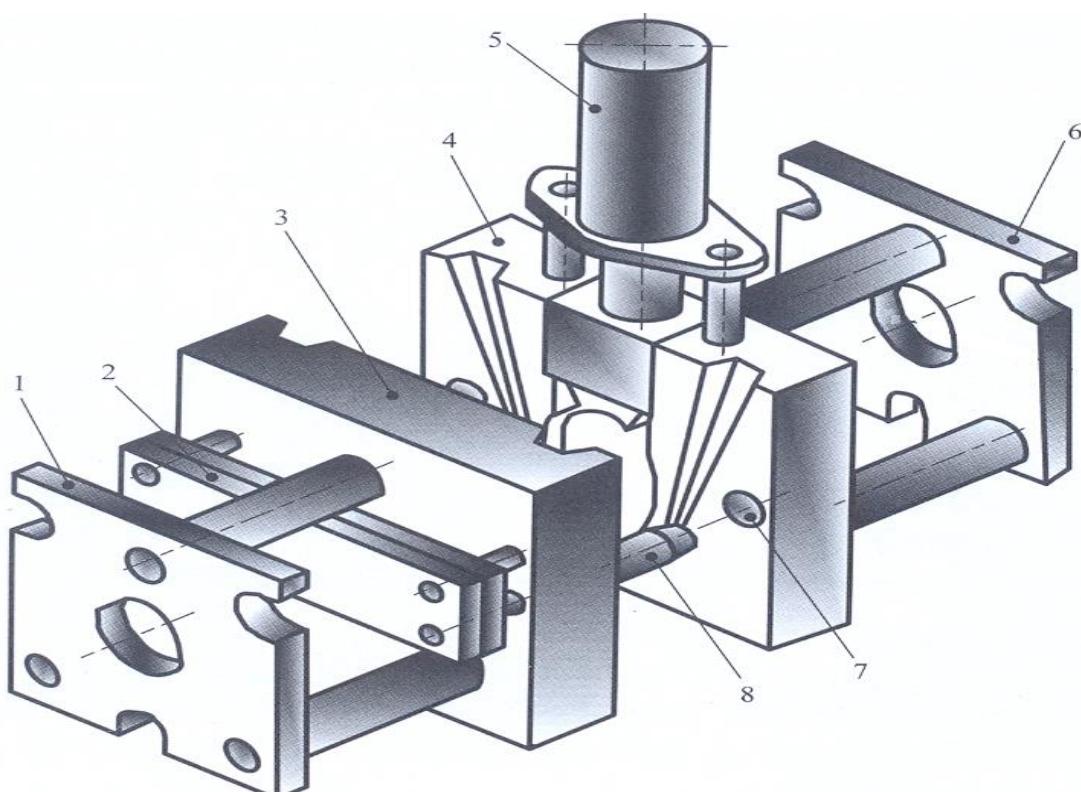


Fig. II.3 : Composition d'une coquille [15].

1	Plaque de fixation de la partie mobile	5	Vérin pour actionner du noyau
2	Plaque porteuse de l'éjecteur	6	Plaque de fixation de la chape fixe
3	Chape mobile	7	trou de centrage des deux chapes.
4	Chape fixe	8	goupille de centrage des deux chapes.

II.5 Avantages de moulage de coquille

- Rigidité de l'empreinte.
- Grande précision dimensionnelle et d'état de surface des éléments moulants.
- Conductibilité thermique élevée des mêmes éléments (l'utilisation de noyaux en sable aggloméré est possible, par contre ils ont une conductibilité thermique différente que le reste du moule).

Il en découle donc pour les pièces moulées en coquille :

- Un bon état de surface : il faut noter cependant que celui-ci n'est pas la réplique exacte de l'empreinte métallique puisque cette empreinte est recouverte d'un enduit protecteur qui affecte l'état de surface de la pièce.
- Des bonnes caractéristiques mécaniques : conséquence de la vitesse de refroidissement et de solidification plus élevée de l'alliage.
- Une génération des contraintes résiduelles à l'état brut de coulée qui demandent un traitement thermique de stabilisation de la pièce.
- Une grande précision dimensionnelle résultant de la rigidité de la coquille et les moyens d'usinage utilisés pour la fabrication de celle-ci.
- Certaines formes habituellement usinées sont obtenues brutes de moulage comme les trous de fixation et les surfaces d'appui des têtes de vis en particulier. On peut noter aussi une réduction générale des surépaisseurs d'usinage.
- Le moulage en coquille ne nécessite que peu d'espace, Il est possible de mécaniser entièrement le procédé grâce à l'utilisation de robots.

D'autres effets positifs de l'automatisation du moulage en coquille sont l'augmentation de la productivité, l'amélioration de la qualité de la coulée et une rentabilité élevée de la production [16].

▪ **Conclusion :**

Le moulage en coquille permet d'obtenir une pièce à partir d'un moule métallique, une coquille, constitué de plusieurs éléments assemblés entre eux ; la cavité intérieure ou empreinte a la forme extérieure de la pièce à réaliser. L'alliage en fusion est versé par l'intermédiaire d'un orifice et le remplissage se fait sous la seule action du poids de l'alliage.

Nous abordons maintenant la deuxième partie du chapitre concernant le poteage.

II.6 Poteage

Le poteage est un enduit dont on recouvre les surfaces des moules destinées à être en contact avec le métal liquide. En effet malgré le préchauffage des coquilles, leur température avant le remplissage est nettement inférieure à celle du métal en fusion. Lorsque ce dernier pénètre dans l'empreinte la température de celle-ci s'élève brusquement. Durant la solidification de la pièce et son éjection la température de surface baisse. Les variations thermiques sont ainsi considérables en surface, alors que les couches sous-jacentes ont des variations bien plus amorties. Les couches superficielles, bridées par les couches internes, supporte une succession de contraintes de compression et de traction pouvant être importantes. Réduire ces contraintes sera le premier rôle demandé aux poteages [17].

Son rôle se présente sous quatre aspects :

- Protection de la coquille
- Ajustement du refroidissement.
- Amélioration de l'état de surface.
- Lubrification et agent de démoulage.

II.6.1 Différents types de poteage

- Poteage manuel (historiquement le plus ancien) : il a tendance à disparaître dans le monde occidental sauf sur des petites séries (machines de 200 à 400 tonnes) car nécessite un opérateur par machine.
- Poteage par buses fixes : des buses sont fixées sur la carcasse moule (voir intégrées dans le moule) et poteent l'empreinte. Difficulté de toucher des zones profondes donc à réservé à des pièces peu profondes.
- Poteage automatique à l'huile : toujours utilisé (bien qu'en recul) sur certaines productions en moulage du zamak.
- Poteage automatique : un bras automatique descend dans le moule et assure par un masque (ou tête) le poteage. Certaines buses sont dédiées au poteage tandis que d'autres réalisent le soufflage. Nécessite un bras automatique par pièce pour être reproductible.
- Poteage par robot : Le bras automatique (très simple souvent) est monté sur un bras robot (installé au-dessus de la machine). Ce bras robot peut assurer seulement le poteage ou bien assurer la prise de pièce et poteier en même temps. Le poteage par robot est plus

pénalisant en temps de cycle, mais plus flexible et peut permettre d'avoir une tête de poteage unique pour plusieurs fabrications.

➤ Poteage sec : C'est la tendance qui s'est développée depuis une dizaine d'années (1995-2005). Le développement se fait sur des principes reposant sur la dissociation du refroidissement (par eau) et de la pulvérisation comme par exemple le poteage par poudre électrostatique ou par turbine. Le poteage sec est intéressant à condition d'avoir un refroidissement de moule interne par circuits d'eau efficace.

II.6.2 Utilisations

Le poteage est utilisé pour :

- protéger physiquement et chimiquement les moules métalliques,
- contrôler le transfert thermique pour obtenir une solidification dirigée et des pièces saines,
- contrôler le remplissage, pour assurer un bon remplissage et éviter les défauts,
- faciliter l'extraction des pièces,
- améliorer l'aspect de surface des pièces moulées.

Il est appliqué en général par pulvérisation sur les outillages préparés. Ils peuvent aussi être appliqués par trempe ou au pinceau. Des soins particuliers seront apportés à la préparation du poteage (homogénéité) et à celle des outillages (propreté et température).

En fonderie sous pression, pour atteindre une stabilité thermique régulière compatible avec des cadences de production élevées, les moules métalliques nécessitent d'être refroidis de manière interne (circuit d'eau) ou externe (poteage) (Fig.II.4).

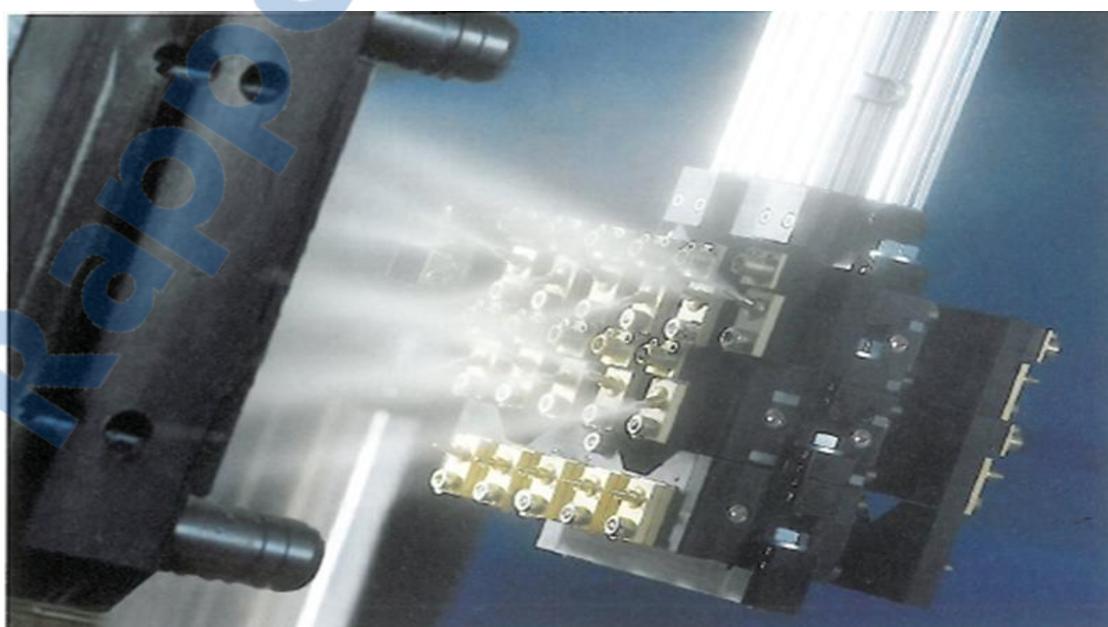


Fig.II.4 : Poteage de la partie mobile de moule [18].

Il est clair que l'évacuation de calories par des canaux de refroidissement internes doit être recherchée de manière privilégiée, car ce mode de refroidissement a l'avantage de ne solliciter que très peu en fatigue thermique les couches superficielles du moule et de limiter la consommation d'eau. Cependant, le refroidissement interne est bien souvent insuffisant (pièce massive, canaux de refroidissement difficiles à positionner et éloignés de la surface, petites broches ou zones de moule peu accessibles par des canaux). Les calories sont également évacuées par le refroidissement externe naturel par convection/rayonnement, mais l'action de ce moyen est très faible (sauf à très hautes températures 400 – 500 °C).

Le poteyage reste donc, à ce jour, et en particulier en production automatisée, le mode de refroidissement le plus efficace et de permet de moduler de manière souple la thermique du moule (Fig. II.5).

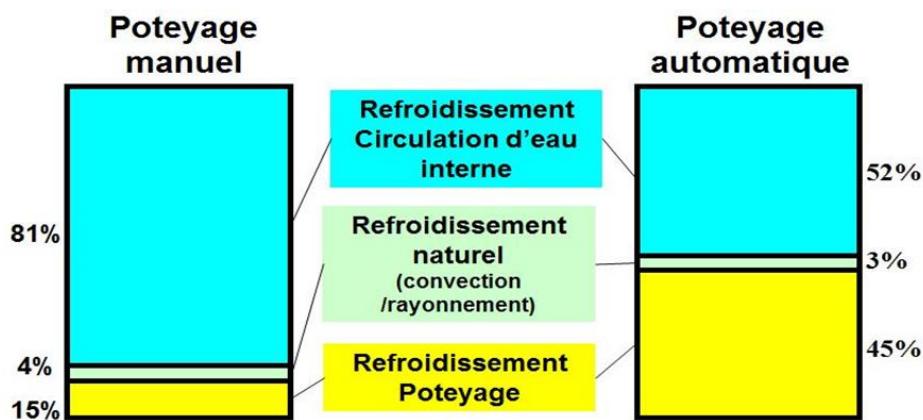


Fig. II.5. Comparaison du refroidissement du moule-bloc moteur $AL_{i9} Cu_3$ en production manuelle et automatisée [19].

Il est donc dans la plupart des cas, et en particulier pour les pièces massives en alliage d'aluminium, l'élément indispensable au bon refroidissement du moule, mais ce rôle provient davantage de l'eau de dilution que du produit de poteyage proprement dit. L'action refroidissante du poteyage tire en effet une grande partie de son efficacité de la vaporisation de l'eau. Afin d'améliorer ce processus, les poteyages contiennent des tensio-actifs, éléments toujours présents dans la composition des produits, qui permettent au liquide de mieux s'étaler sur la surface du moule et de se vaporiser ainsi plus complètement. Il est à noter qu'en fabrication automatisée, 50 à 80 % des calories est évacué par le poteyage, le reste étant évacué par les circuits de refroidissement internes et par rayonnement/convection (Fig.II.6).

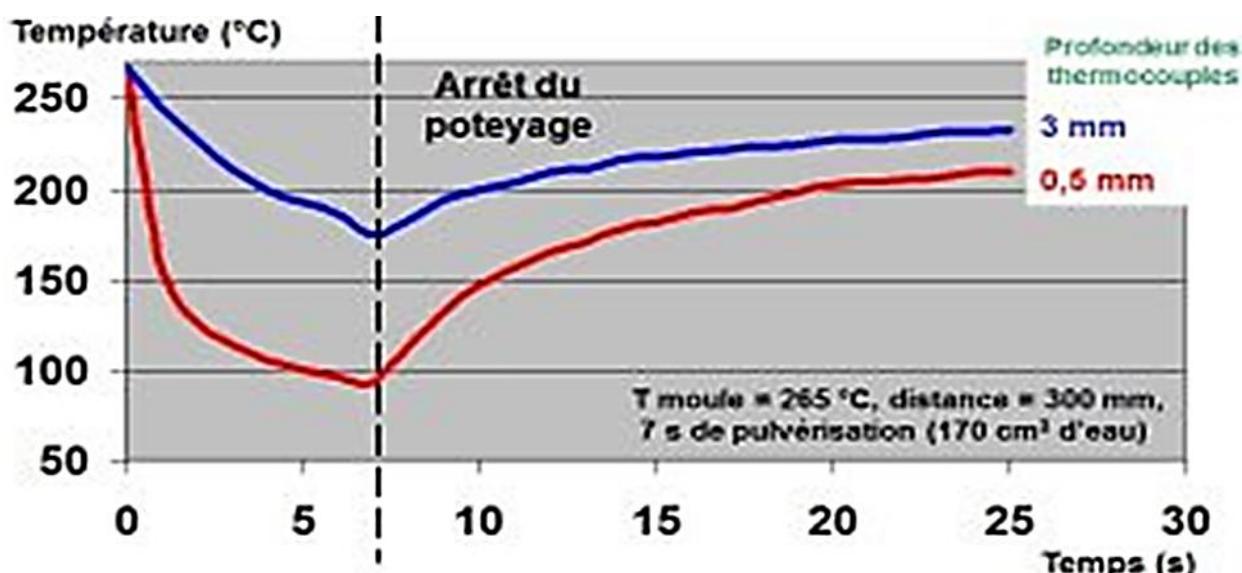


Fig.II.6 : Température en surface de moule lors du poteage

(0.5mm et 3mm sous la surface) [20].

Pour que le refroidissement ait un maximum d'efficacité, les gouttes d'eau doivent tout d'abord entrer en contact avec le moule, y rester et s'évaporer. La dynamique du refroidissement par pulvérisation sur des surfaces à hautes températures obéit à des lois complexes et est fonction de nombreux paramètres.

On peut néanmoins distinguer trois modes de refroidissement différents (convection, évaporation et caléfaction) qui dépendent avant tout de la température du moule (Fig.II.6).

En « mode convection », le moule est trop froid et les gouttelettes de poteage coulent sur le moule sans s'évaporer. Le refroidissement s'effectue alors uniquement par convection forcée et est dès lors très faible. Ensuite, en « mode évaporation », lorsque la température du moule en surface est dans une plage de température adéquate qui permet aux gouttelettes de rester sur le moule et de s'évaporer le refroidissement est alors maximum car on tire alors partie de la chaleur latente de vaporisation de l'eau. Puis, lorsque le moule est trop chaud, en « mode caléfaction », il se forme une couche de vapeur en surface qui empêche les gouttelettes d'atteindre la surface et d'y rester et le refroidissement est très faible. La température en dessous de laquelle les gouttes s'accrochent sur le moule est appelée température d'accrochage ou de mouillage.

II.6.3 Composition des produits de poteage

La composition chimique des poteyages évolue encore fortement pour s'adapter à des exigences de qualité et de productivité sans cesse accrues, mais aussi sous la pression de préoccupations environnementales.

Si les poteyages graphités ont été utilisés jusque dans les années 1970, ils présentaient de nombreux inconvénients (encrassement, dépôts, problèmes environnementaux et de conditions de travail). On leur préfère aujourd’hui des poteyages miscibles à l’eau et sans pigments qui se composent essentiellement de substances organiques et synthétiques qui sont décomposées et craquées lors du contact avec l’aluminium. Les produits de poteyage sont composés de nombreux corps que l’on peut regrouper en deux catégories :

- les éléments de bases et les additifs.

Outre les éléments de base, les produits de poteyage sont constitués de nombreux additifs, agents tensioactifs, bactéricides, produit anticorrosion, qui leur confère des propriétés particulières. Les agents mouillants sont des produits du type tensio-actifs qui améliorent la capacité du produit à s’étendre sur le moule. Ils sont à base de composés d’acides gras et favorisent la formation et la cohésion d’un film à la surface du moule, même à des températures élevées. Les émulsifiants, quant-à-eux, favorisent la formation et la conservation de l’émulsion. Ils sont à base de sulfonates, esters d’acides gras ou d’alcools. Les stabilisants évitent la flocculation et l’agglomération des particules fines dans les cuves. Les bactéricides, appelés aussi biocides, protègent les poteyages contre les micro-organismes, ou du moins retardent et limitent la prolifération bactérienne, responsable de la dégradation rapide des propriétés du poteyage. Les bactéricides sont quelquefois directement mélangés au produit de base par le fournisseur. Le plus souvent, c’est au fondeur de les rajouter au moment de la dilution ou au niveau de la centrale de poteyage, soit en action préventive et systématique (2, 3 fois/an ou plus si nécessaire), soit en curatif. Ces bactéricides sont à base de fongicides, de dérivés de triazine, d’isothiazolone ou d’imidazoline (Fig.II.7).

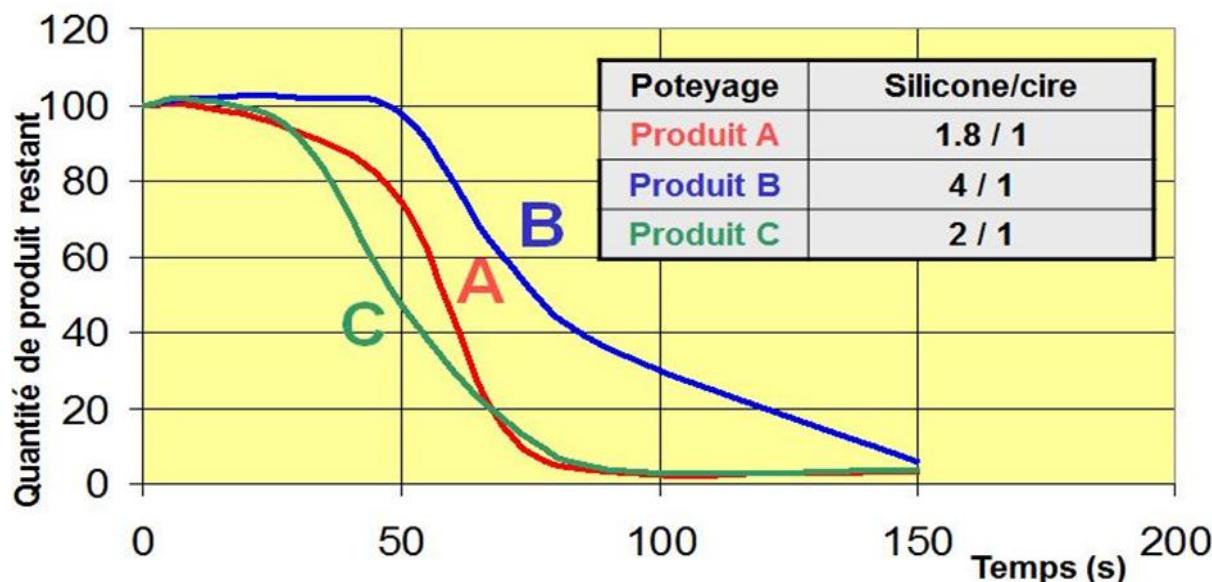


Fig.II.7 : Cinétique de décomposition de trois produits de poteyage sur moule chaud en fonction du ratio silicone/cire [20].

II.6.4 Mise en œuvre du poteyage

La mise en œuvre du poteyage recouvre l'ensemble des pratiques et dispositifs qui permettent l'application du produit sur le moule : le type de distribution du produit aux machines (individuel ou centralisé), le mode de dosage (par cuve ou pompe doseuse), le mode d'application (manuelle ou automatisée), la méthode de pulvérisation ou les différentes étapes du cycle de poteyage (fig.II.8).



Fig. II.8 : Poteyage avec grand nombre de buses [21].

II.6.5 Principaux types de distribution du poteyage

Il existe deux principaux types de distribution du poteyage en fonderie sous pression :

La distribution individuelle et la distribution centralisée.

- **Poteyage individualisé :**

Chaque machine est alimentée individuellement en poteyage par une cuve ou réservoir de produits qui jouxte la machine à couler sous pression, qui peut comporter un système de surveillance du niveau, un dispositif de mélange automatique, une mise sous pression du réservoir tout entier ou une pompe de mise en pression du produit de poteyage. On peut utiliser également une distribution par pompe doseuse dans laquelle le produit concentré n'est mélangé qu'au dernier moment à l'eau à la concentration voulue (réglable entre 0.2 et 4%), qui peut être ajustée finement lors du démarrage d'une nouvelle fabrication.

C'est historiquement la pratique la plus ancienne. Elle présente des avantages :

- produit bien adapté à chaque pièce et chaque gamme de température de moule,
- pas d'impact d'un développement de bactéries sur le reste de la production, mais a également des limites (tendance est à multiplier le nombre de produits de poteyage, suivi qualité sur chaque machine plus lourd) [22].

- **Poteyage centralisé**

La distribution centralisée en produit de poteyage est assurée depuis une centrale unique qui répartit le même produit déjà dilué à toute une ligne de presses à injecter par l'intermédiaire d'un réseau de canalisations. Il n'y a alors qu'un seul produit pour toute la fonderie qui peut être ainsi suivi et contrôlé plus aisément et peut être acquis à un tarif plus avantageux. La gestion centralisée a des contraintes (coût d'installation de la centrale et du réseau de distribution non négligeable, contamination bactérienne à l'ensemble de la production possible nécessitant des lavages réguliers des circuits et canalisations de distributions, produit non adapté à des moules trop chauds ou trop froids, ...). Du coup, la distribution centralisée est davantage adaptée aux fonderies qui réalisent des mono-produits.

II.6.6 Paramètres de l'opération de poteyage

La phase de poteyage dépend d'un certain nombre de paramètres qu'il est important de connaître pour les mettre sous contrôle et les maîtriser, qui sont :

- ✓ la température du moule,
- ✓ le débit de poteyage,
- ✓ la durée de pulvérisation,
- ✓ la nature du produit de poteyage,

- ✓ la concentration du produit,
- ✓ la distance de pulvérisation,
- ✓ la pression d'air et de produit,
- ✓ l'angle de pulvérisation,
- ✓ le programme de poteyage (mouvements de va-et-vient et position des buses).

La température du moule est sans conteste, et toutes les études réalisées sur le sujet le confirment, le principal paramètre qui contrôle l'efficacité du produit aussi bien dans son rôle d'agent refroidisseur que comme agent lubrifiant. Elle constitue, avec la durée de pulvérisation et le débit de poteyage, l'un des trois facteurs qui impactent le plus le refroidissement du moule. Elle n'est pas simple à appréhender car elle est difficile à mesurer hormis par une cartographie infra-rouge à chaque cycle (lourde et complexe) (Fig. II.10). Elle est loin d'être homogène partout dans l'empreinte (points chauds) et enfin elle varie constamment au cours d'un cycle. Il faudra donc en premier lieu choisir la nature du poteyage en fonction de la température du moule. Il est clair qu'il existe pour chaque produit de poteyage une zone de température de moule pour laquelle le refroidissement du moule est maximal.

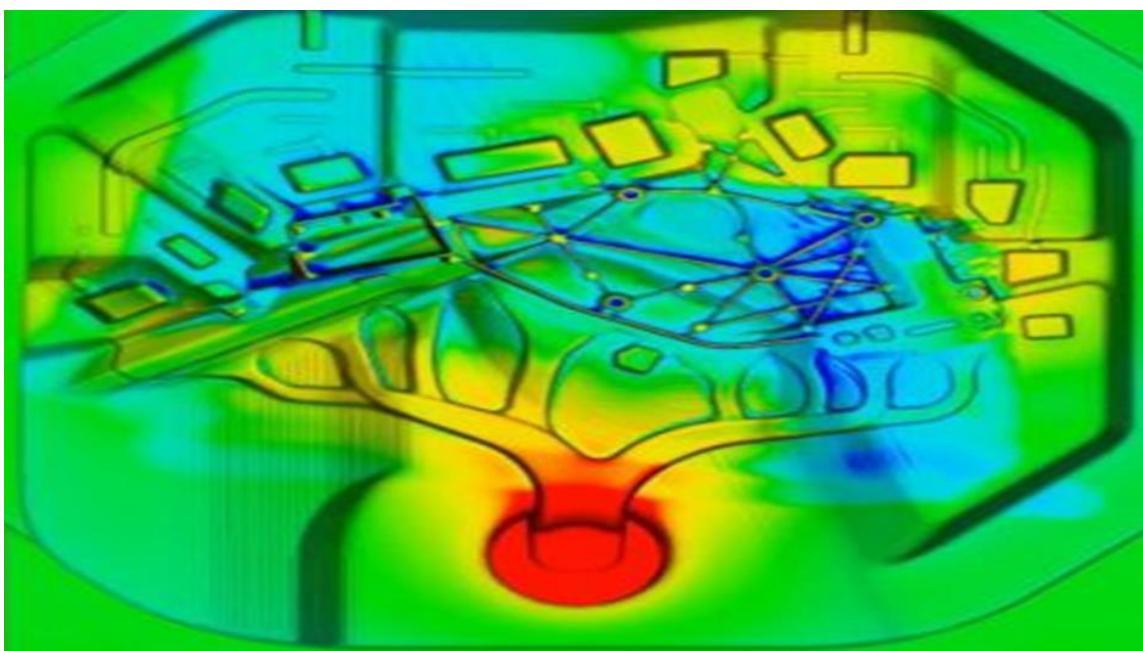


Fig.II.9 : Cartographie infrarouge de moule-avant poteyage [22].

En comparant divers poteyages entre eux, on s'aperçoit plusieurs choses :

Les poteyages sont plus efficaces que l'eau sauf à très faible température 100-150 °C.

Du fait de la présence de certains composants en particulier des tensioactifs, la largeur de la plage d'efficacité thermique maximale est différente d'un poteyage à l'autre et fonction des

éléments constitutifs du produit (cire, silicone, huiles de synthèse, ...) et de leur proportion respective.

Enfin certains produits sont plus refroidissants que d'autres et conservent leur efficacité à plus haute température. La température du moule interagit en outre très nettement avec la durée de pulvérisation et le débit de produit. Ce qui signifie en particulier que sur moule trop chaud, on peut obtenir un refroidissement correct en augmentant la durée de pulvérisation ou le débit de produit (Fig.II.11).

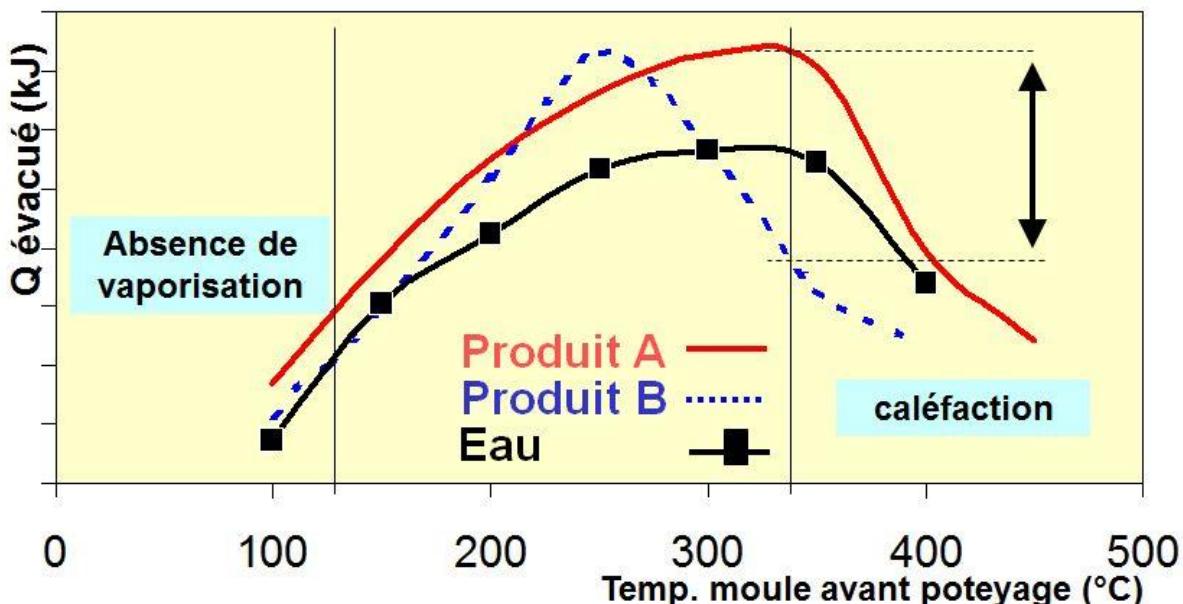


Fig.II.10 : Efficacité thermique de deux produits de poteyage (comparée à de l'eau) en fonction de la température de moule [20].

▪ Conclusion

L'application du poteyage a pour but d'une part de faciliter le remplissage et le démoulage des pièces, et d'autre part de protéger le moule contre les chocs thermiques. Le poteyage est généralement pulvérisé sur les empreintes du moule après chaque éjection de la pièce.

Le poteyage est une solution liquide composée d'eau (98%) et d'hydrocarbures (l'emploi de graphite étant aujourd'hui interdit).

*Chapitre III : Mesure de la
température*

III.1 Introduction

Ce chapitre rappelle les éléments de théorie mis en œuvre lors des mesures de température de surface. Nous rappelons les modes de transfert de chaleur ainsi que les facteurs d'influence s'exprimant lors de cette méthode de mesures, nous le terminerons par la mesure par infrarouge. Ces quelques éléments ont pour but d'aider à la compréhension des phénomènes intervenant lors des mesures. Il s'agit ici d'éléments de base que le lecteur pourra compléter si besoin en consultant les articles donnés en bibliographie.

III.2 Température

III.2.1 Généralités

La température est une grandeur intensive, qui peut être mesurée de deux façons différentes :

- à l'échelle atomique, elle est liée à l'énergie cinétique moyenne des constituants de la matière.
- au niveau macroscopique, certaines propriétés des corps dépendant de la température (volume massique, résistivité électrique, etc...) peuvent être choisies pour construire des échelles de température.

III.2.2 Echelles de température

La plus ancienne est l'échelle centésimale (1742), attribuant arbitrairement les valeurs 0 et 100 degrés à la glace fondante et à l'eau bouillante, sous la pression atmosphérique normale. La température ainsi définie dépendant du phénomène choisi (la dilatation d'un fluide) pour constituer le thermomètre étalon, on utilise de préférence l'échelle Celsius, définie à partir de l'échelle Kelvin par :

$$T \text{ (}^{\circ}\text{C)} = T(K) - 273,15$$

1

Cette dernière échelle, qui est celle du système international, ne dépend d'aucun phénomène particulier et définit donc des températures absolues. Le zéro absolu (-273,15 °C) a pu être approché à quelques millionièmes de degrés près. Les phénomènes physiques qui se manifestent aux très basses températures connaissent d'importantes applications (supraconductivité). Dans le domaine des hautes températures, les torches à plasma permettent d'atteindre 50 000 K et les lasers de grande puissance utilisés pour les recherches sur la fusion nucléaire contrôlée donnent, pendant des temps très brefs, des températures dépassant 100 millions de degrés. La figure III.1 représente les différentes échelles [23].

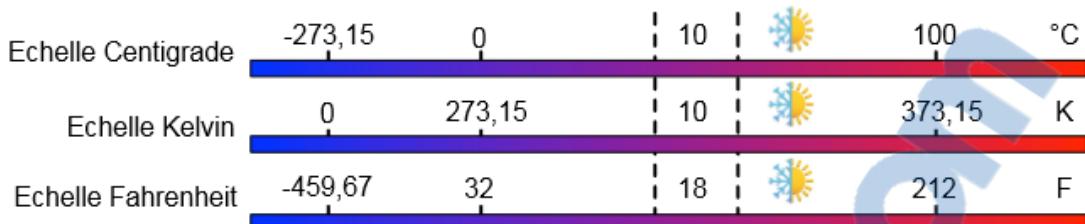


Fig.III.1 : Echelles de température [23].

III.2.3 Méthodes de mesure de température

La température est après la notion de temps, la deuxième variable physique la plus fréquemment mesurée. La connaissance de la température des produits est très importante, tant au niveau de la fabrication que pour le contrôle qualités et la maintenance .une surveillance précise de la température permet d'augmenter la qualité du produit et la productivité. Les temps d'arrêt sont réduits puisque les processus de fabrication se déroulent toujours dans des conditions optimales. L'organigramme représenté par la figure III.2 montre ces différentes méthodes utilisées pour la mesure de cette grandeur.

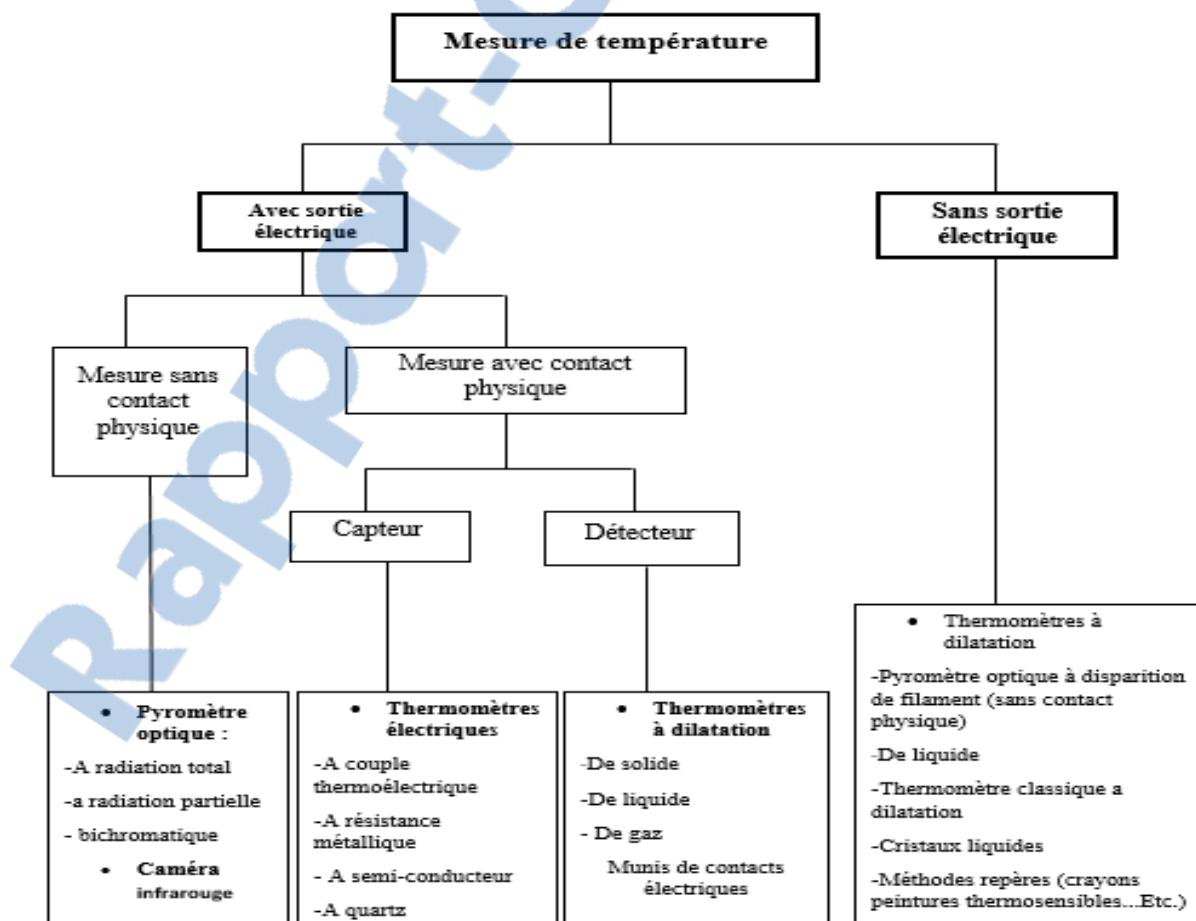


Fig.III.2. Différentes méthodes pour la mesure de la température.

III.3 Mesure de la température

Il existe deux méthodes : la mesure par contact physique et la mesure sans contact physique.

III.3.1 Mesure par contact physique

III.3.1.1 DéTECTEURS ou thermomètres à dilatation

Dans ce paragraphe, c'est la dilatation des corps qui sera le phénomène image de la grandeur thermométrique. On constate en effet que le volume d'un corps augmente en général, lorsque sa température s'élève (sans qu'il y ait de changement d'état physique). La dilatation étant réversible, elle fournit un mode pratique de repérage des températures. Ce phénomène se retrouve de façon analogue, mais avec une ampleur différente pour les liquides, les gaz et les Solides [24].

- **Thermomètre à dilatation de liquide**

Il est constitué d'un réservoir surmonté d'un capillaire de section faible et régulière (ordre de grandeur : $\emptyset = 0,2 \text{ mm}$) se terminant par une ampoule de sécurité (utile lors d'un dépassement de la température admissible). Il est réalisé en verre. Sous l'effet des variations de température, le liquide se dilate plus ou moins. Son niveau est repéré à l'aide d'une échelle thermométrique gravée sur l'enveloppe (fig.III.3) [25].

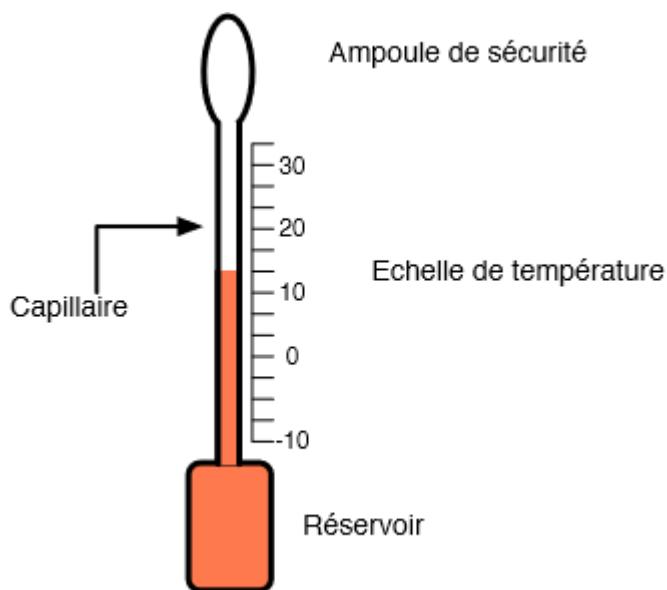


Fig.III.3 : Thermomètre à dilatation de liquide [25].

- **Thermomètre à dilatation de gaz**

Sous une forme schématisée, un thermomètre à gaz est composé d'une sonde (A), formant une enveloppe dans laquelle est enfermé le gaz thermométrique. Cette sonde est reliée par un tube capillaire de raccordement à l'extrémité (B) d'un tube de Bourdon, appelée spirale de mesure. Cette extrémité est fixe. La longueur du tube de raccordement ne doit pas excéder 100 mètres. Sous l'effet de la température du milieu dans lequel la sonde est placée, la pression du gaz va varier, ce qui modifiera l'équilibre de l'extrémité libre du tube de Bourdon. Cette variation de pression se traduira par un mouvement de rotation de l'index indicateur qui se déplacera devant un cadran portant des graduations thermométriques (fig.III.4) [26].

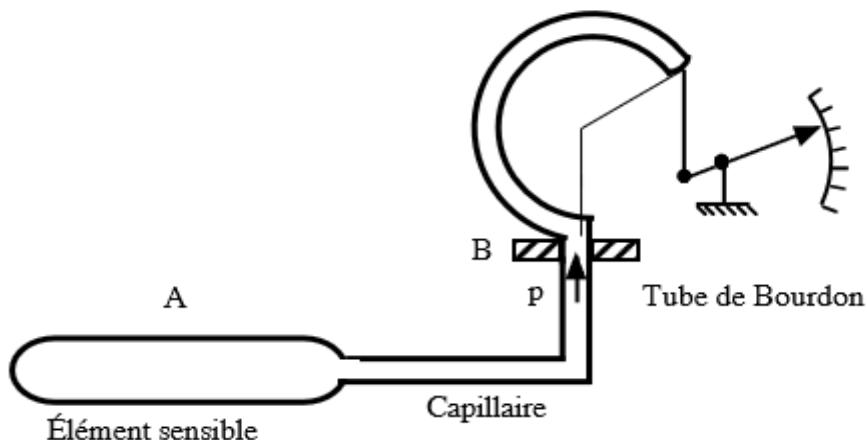


Fig. III.4 : Thermomètre à gaz [26].

- **Thermomètre à tension de vapeur**

On appelle tension de vapeur d'un liquide, la pression sous laquelle ce liquide est en équilibre thermodynamique avec sa phase vapeur. La tension de vapeur n'est fonction que de la température d'un liquide donnée. À une température correspond pour le liquide choisi une pression de vapeur fixe. La mesure thermométrique se fait par l'intermédiaire d'une mesure de la tension de vapeur d'un liquide. La réalisation la plus simple est le thermomètre à simple remplissage. Lorsque la sonde est placée dans une enceinte chaude, une partie du liquide se vaporise. Un équilibre liquide/vapeur s'établit, fonction de la température. La pression a augmenté pour se fixer à la valeur de la tension de vapeur du liquide. Cette pression est transmise par le liquide au manomètre de mesure (fig.III.5) [27].

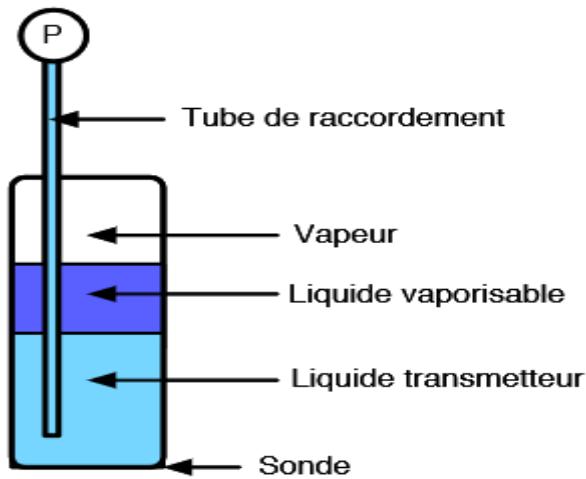


Fig. III.5 : Thermomètre à tension de vapeur à double remplissage [27].

- **Thermomètre à dilatation de solide**

Un bilame thermique est constitué de deux bandes d'alliage dont les coefficients de dilatation sont très différents, soudées à plat sur toute leur surface. Lorsqu'une telle bande est soumise à une variation de température, les dilatations différentes des deux faces provoquent des tensions, il en résulte une incurvation de l'ensemble. La soudure des deux constituants doit être suffisamment intime pour que la zone de jonction soit mécaniquement aussi résistante que chacune des deux lames (fig.III.6) [28].

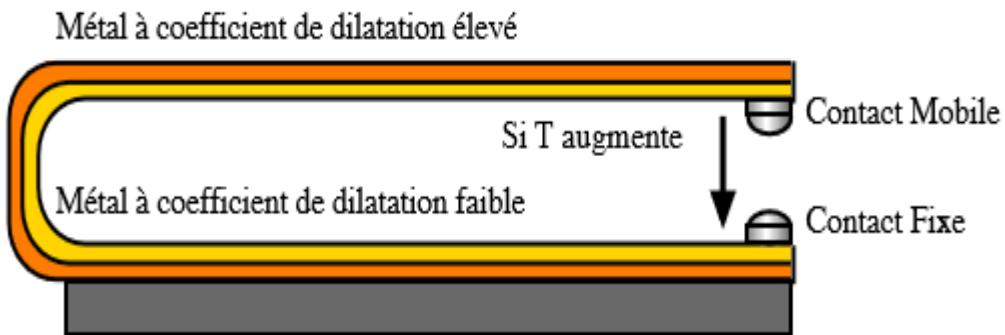


Fig. III.6 : Thermomètre à dilatation : bilame thermique [28].

III.3.1.2 Capteurs ou thermomètres électriques

- **Thermomètre à résistance**

Le conducteur est un élément métallique. On peut établir une relation bijective entre la résistance R et la température θ et ainsi mesurer θ en mesurant R . Cette relation est de la forme : $R = R_0(1 + a_\theta + b_{\theta^2} + c_{\theta^3})$

Avec θ la température en °C, R_0 la résistance à 0°C, a , b et c des coefficients positifs, spécifiques au métal (fig.III.7) [29].

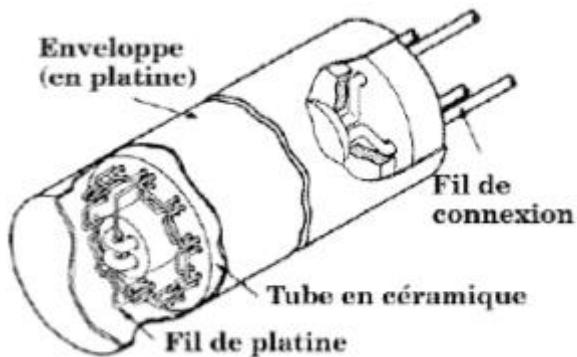


Fig. III.7 : Thermomètre à résistance : Sonde PT100 [29]

- **Thermomètre à thermistance**

Une thermistance est un agglomérat d'oxydes métalliques frittés, c'est-à-dire rendus compacts par haute pression exercée à température élevée, de l'ordre de 150 bars et 1000 °C. La composition d'une thermistance peut-être, par exemple :

- Fe₂O₃ (oxyde ferrique) ;
- MgAl₂O₄ (aluminate de magnésium) ;
- Zn₂TiO₄ (titane de zinc).

La résistance électrique d'une thermistance est très sensible à l'action de la température. Il existe deux types de thermistance, les CTN à coefficient de température négatif, et les CTP à coefficient de température positif (fig.III.8) [30].

La loi de variation est de la forme :

$$R = a \times \exp \frac{b}{\theta} \quad 3$$

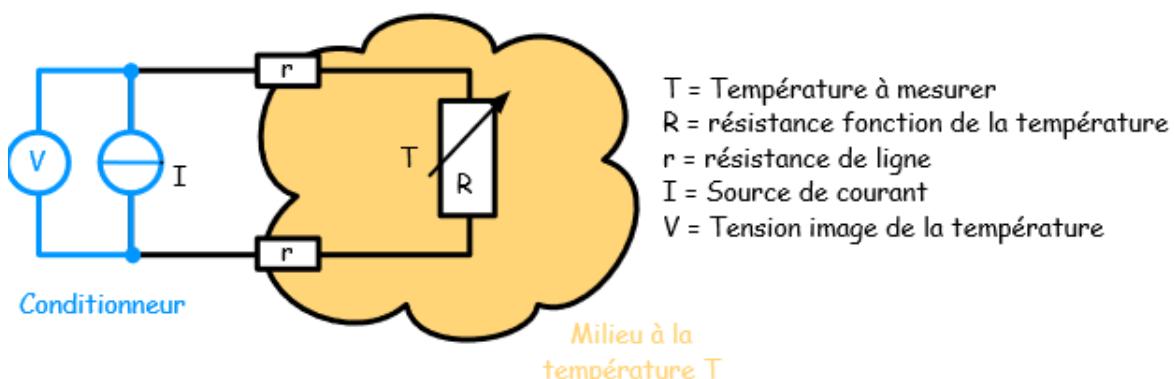


Fig. III.8 : Thermomètre à thermistance : Montage deux fils avec source de courant [30].

III.3.1.3 Thermocouple

Les phénomènes thermoélectriques dans les chaînes de conducteurs métalliques ou semi-conducteurs décrivent les conversions d'énergie qui s'opèrent en leur sein, effet Joule mis à part, entre énergie d'agitation thermique et énergie électrique des charges en mouvement. À la jonction de deux conducteurs A et B différents mais à la même température, s'établit une différence de potentiel qui ne dépend que de la nature des conducteurs et de leur température θ (effet Peltier) (fig.III.9) [31].

$$V_M - V_N = V_{AB}^\theta$$

4

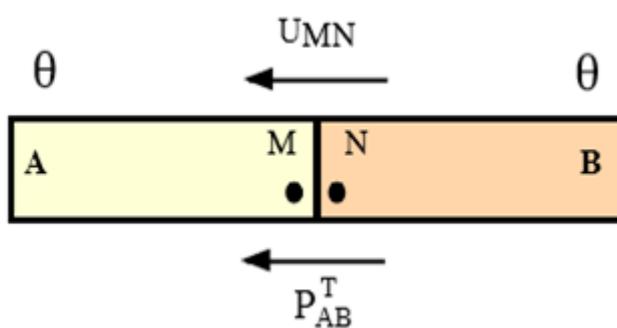


Fig. III.9 : Thermocouple : Effet Peltier [31].

III.3.2 Mesure sans contact physique

C'est l'utilisation d'une technique qui permet, à partir des rayonnements infrarouge qu'émet une scène thermique et avec des appareillages adaptés à la situation de mesure, d'obtenir la répartition spatiale et temporelle des températures de cette scène thermique observée.

III.3.2.1 Pyromètre optique

La pyrométrie optique est une méthode de mesure de la température basée sur la relation entre la température d'un corps et le rayonnement optique (infrarouge ou visible) que ce corps émet. Les capteurs utilisés sont donc des capteurs optiques, photo-électriques ou thermiques. L'intérêt de la pyrométrie optique est de permettre la détermination d'une température sans contact avec l'objet ; c'est donc une méthode appropriée quand les conditions expérimentales n'autorisent pas l'utilisation de capteurs thermométriques classiques (fig.III.10) [32] :

- Température très élevée (supérieure à 2000 °C)

- Mesures à distance.
- Environnement très agressif.
- Pièce en mouvement.
- Localisation des points chauds.



Fig. III.10 : Pyromètre optique [32].

III.3.2.2 Caméra thermique

Une caméra infrarouge (ou caméra thermique) est une caméra qui enregistre les différents rayonnements infrarouges (ondes de chaleurs) émis par le corps et qui varient en fonction de leurs température. Contrairement à ce que l'on pourrait croire, une caméra infrarouge ne permet pas de voir derrière une paroi ou un obstacle. Elle reproduit tout simplement la température emmagasinée par un corps, ou montre le flux thermique d'une paroi en raison d'un foyer se trouvant à l'arrière (fig. III.11).

C'est un procédé qui est de plus en plus utilisé dans l'industrie car ces caméras permettent d'effectuer des contrôles au niveau d'une ligne de production et ceci sans aucun contact avec le produit contrôlé [33].



Fig. III.11 : Caméra infrarouge [33].

III.4 Modes de transfert thermique

Le transfert thermique s'effectue spontanément dès qu'il existe une différence de température entre deux points d'un système ou de deux systèmes différents en absence de changement de phase. Le mécanisme de cette transmission de chaleur s'effectue suivant trois modes : conduction, convection et rayonnement.

III.4.1 Conduction

La conduction thermique correspond au transfert de chaleur au sein d'un milieu opaque, sans déplacement de matière, sous l'influence d'une différence de température. Ce mécanisme de transfert est décrit par la loi de Fourier rappelée ci-après :

$$\vec{\phi} = -\lambda \cdot S \cdot \vec{\nabla}(T) \quad 5$$

Dans le cas d'une paroi, considérée comme unidimensionnelle (1D), cette équation devient :

$$\phi = \lambda \cdot S \cdot \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} \quad 6$$

Le flux (Φ) en Watts dépend d'un paramètre caractérisant la conductivité thermique du matériau (λ), de la surface considérée (S), de l'écart de température ($T_1 - T_2$) entre les deux faces de la paroi et de son épaisseur (Δx) [34].

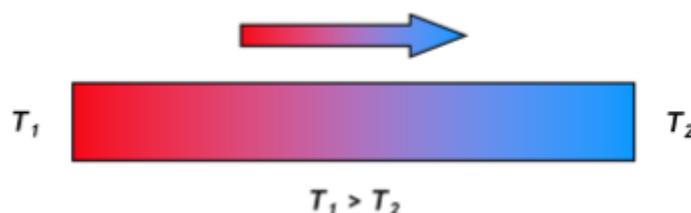


Fig. III.12 : Illustration de la conduction thermique [34].

III.4.2 Convection

La convection thermique correspond au transfert de chaleur entre un solide et un fluide en déplacement (liquide ou gaz). Ce mécanisme de transfert est décrit par la loi de Newton présentée ci-après :

$$\phi = h \cdot S \cdot (T_p - T_a) \quad 7$$

Le flux (Φ) en Watts dépend d'un paramètre de convection thermique (h) entre le fluide et la paroi, de la surface considérée (S) et de l'écart de température ($T_p - T_a$) entre la surface du solide et le fluide [34].

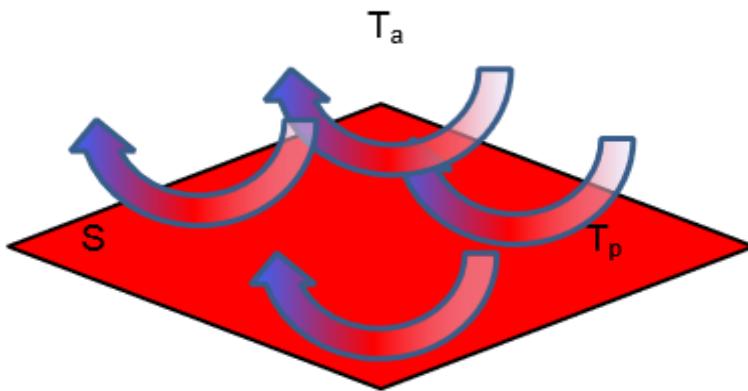


Fig. III.13 : Illustration de la convection [34].

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

- la différence de température entre la paroi et le fluide ;
- la vitesse du fluide ;
- la capacité thermique massique du fluide ;
- la surface d'échange ;
- l'état de surface du solide ;
- sa dimension, etc. . . .

Selon le mécanisme qui génère le mouvement du fluide, on distingue :

- Convection naturelle : les mouvements sont dus aux variations de masse volumique dans un fluide soumis au champ de pesanteur. Les variations de masse volumique peuvent être générées par des gradients de température (l'air chaud est plus léger que l'air froid) et/ou par des gradients de composition.
- Convection forcée : le mouvement du fluide est provoqué par des actions mécaniques extérieures (pompe, ventilateur...).

III.4.3 Rayonnement

Le rayonnement correspond au transfert de chaleur, sous la forme d'onde électromagnétique, émis par une surface. Ce mécanisme de transfert est décrit par la loi de Stefan exprimée ici sous forme de flux :

$$\phi = k \cdot S \cdot \varepsilon_p \cdot (T_p^4 - T_e^4) \quad 8$$

Le flux (Φ) en Watts dépend de la constante de Boltzmann (k), de la surface considérée (S), de l'émissivité de la surface (ε_p) et de l'écart de température ($T_p^4 - T_e^4$) entre la surface de la paroi et la température moyenne de l'environnement à la puissance quatrième [34].

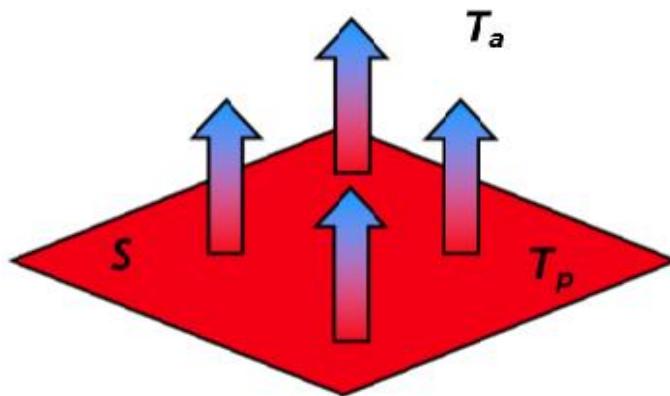


Fig. III.14 : Illustration du rayonnement thermique [34].

III.4.4 Emissivité des matériaux

Lorsqu'on parle du rayonnement on parle d'émissivité. Tout objet émet un rayonnement infrarouge invisible et permet ainsi une mesure de température sans contact.

L'émissivité est la capacité d'un matériau à émettre de la chaleur de manière radiative. Le coefficient d'émissivité varie en fonction de la longueur d'onde du signal émis. Pour une longueur d'onde donnée, le coefficient d'absorption d'un matériau est égal au coefficient d'émissivité. La quantité d'énergie émise dépend de la température et des possibilités de rayonnement des matériaux mesurés. L'émissivité est fonction du matériau et de la surface de l'objet mesuré. L'échelle normale se situe entre 0,1 et 1,00. De nombreux matériaux avec un haut degré d'émissivité se prêtent à la mesure par infrarouge (métaux peints, ternes ou oxydés, plastique, caoutchouc, papier...) [35].

En annexe 1 on trouve un tableau regroupant les émissivités des matériaux.

III.5 Domaine infrarouge et son système de mesure

Nous allons ainsi présenter dans ce qui suit qu'est vraiment une caméra infrarouge. Nous verrons tous d'abord ce qu'est l'infrarouge et quel est son système de mesure. Ensuite, nous traiterons des caméras thermiques et de ses caractéristiques. Enfin, nous verrons son application dans différents secteurs d'activités [36].

Le système de mesure par infrarouge consiste à ce que l'optique de la caméra focalise les radiations de l'objet à mesurer vers le détecteur. Ce dernier transforme alors l'information reçue en un signal qu'il transmet vers l'affichage. Ce principe peut être synthétisé par le schéma suivant (figure III.15) :

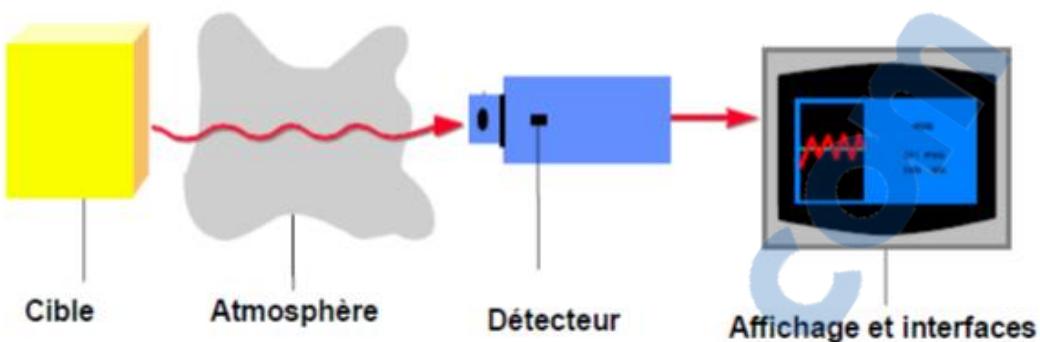


Fig. III.15 : Système de mesure par infrarouge [36].

Nous allons ainsi développer chaque partie de cette figure pour mieux comprendre le système de mesure par infrarouge.

III.5.1. Cible

III.5.1.1 Spectre électromagnétique.

Tout corps ayant une température (T) supérieur au zéro absolu (-273°C ou 0°K) émet, selon sa température, une énergie infrarouge spécifique. Cette énergie est provoquée par le mouvement mécanique au sein des molécules. L'intensité de ce mouvement dépend de la température du corps. Les mouvements des molécules étant synonyme de mouvement de charge, ils génèrent des radiations électromagnétiques. Ces radiations ont permis de mettre en place le spectre électromagnétique suivant (Fig. III.16) [36] :

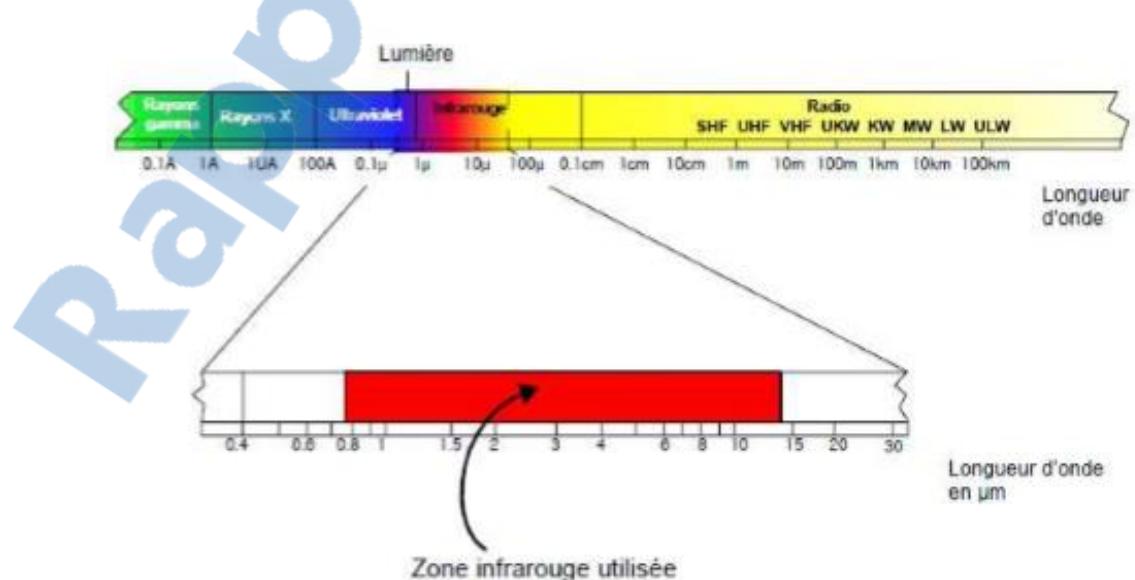


Fig. III.16 : Spectre électromagnétique [36].

Le domaine du visible s'étend des longueurs d'ondes allant de 0,4 à 0,8 μm. La bande infrarouge quant à elle s'étend de 0,8 à 15 μm. Cependant, la bande spectrale de l'infrarouge est elle aussi divisée en plusieurs parties. Ces sections de la bande infrarouge sont définies dans le schéma ci-dessous (Fig. III.17) :

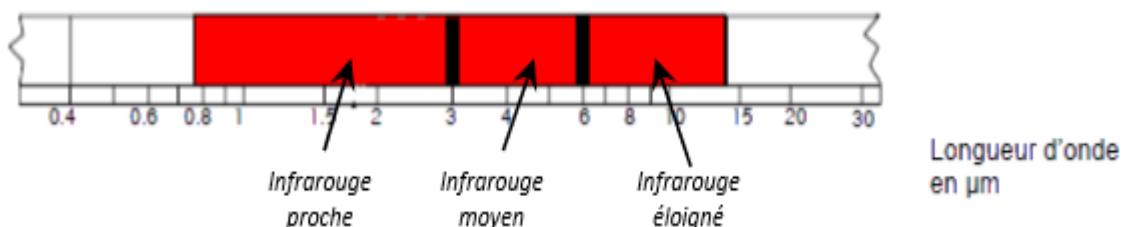


Fig. III.17 : Sections de la bande spectrale infrarouge [36].

En thermographie infrarouge, on travaille généralement dans une bande spectrale qui s'étend de 2 à 15 μm, et plus particulièrement dans les fenêtres 2-5 μm et 7-15 μm.

III.5.1.2 Corps Noir

Le corps noir est le corps de référence dans la théorie du rayonnement infrarouge : celui-ci est capable d'absorber tout rayonnement incident quel que soit sa longueur d'onde et d'émettre à son tour des radiations à toutes les longueurs d'ondes. Ce corps référentiel cède à l'environnement l'énergie captée jusqu'à l'établissement d'un équilibre thermodynamique.

Trois lois définissent le rayonnement d'un corps noir :

- **Loi de Planck** : Max Planck a calculé les flux de puissances électromagnétiques émis par un corps noir. La relation utilisée est la suivante :

$$W_\lambda = \frac{2\pi h c^2}{\lambda^5 (e^{(h c / \lambda k T)} - 1)} \quad (\text{Watts/ (cm}^2\mu\text{)}) \quad 9$$

Avec :

λ : Longueur d'onde.

$W\lambda$: Flux de puissance émis par le corps noir à la longueur d'onde.

C : Vitesse de la lumière = 3.1010 cm/s.

h : Constante de Planck = 6,6.10-34 Watt.s²

κ : Constante de Boltzmann = 1,4.10-23 Watt.s²/°K.

T: Température absolue du corps en Kelvin.

- **Loi de Wien :** Cette loi exprime le fait que la couleur d'un objet chauffé à une température élevée varie du rouge au blanc. La relation utilisée est la suivante :

$$\lambda_{max} = \frac{2898}{T} \text{ } (\mu\text{m})$$

10

Avec :

T: Température absolue du corps en Kelvin.

- **Emissivité :** La relation mathématique qui permet de calculer l'émissivité est la suivante :

$$\epsilon_\lambda = \frac{W_\lambda}{W_{\lambda_0}} \text{ (Sans unité)}$$

11

Avec :

- W_λ : Flux de puissance émis par un corps réel à une longueur d'onde.

- W_{λ_0} : Flux de puissance émis par un corps noir à une longueur d'onde.

III.5.2 Environnement

Le réglage d'une caméra infrarouge pour un certain domaine spectrale s'avère nécessaire en raison de la transmissive spécifique du parcours effectué par les radiations, c'est-à-dire de l'environnement. Certains composants de l'atmosphère, comme la vapeur d'eau et le gaz carbonique, absorbent les radiations infrarouges à une certaine longueur d'onde et provoquent des pertes de transmission. De nos jours, les fabricants ont pratiquement tous équipé leurs appareils de mesure par infrarouge de filtre de correction atmosphérique. Il faut également tenir compte des sources de rayonnements thermiques situés à proximité de la cible, mais également les poussières, les fumées et les particules en suspension qui peuvent encrasser l'optique et ainsi fausser les mesures [36].

III.5.3 DéTECTEURS

Le détecteur est la pièce maîtresse de tout thermomètre infrarouge. Il transforme l'énergie infrarouge captée en signaux électriques qui sont alors affichés en termes de température par une électronique d'interprétation. Les techniques récentes utilisées par les processeurs ont augmenté la stabilité, la fiabilité, la résolution et la vitesse de réponse des thermomètres infrarouges tout en baissant leurs coûts. On connaît deux principales catégories de détecteurs par infrarouge : les détecteurs quantiques et les détecteurs thermiques [36].

- ✓ Les détecteurs quantiques (photodiodes) entrent directement en interaction avec les photons captés créant ainsi des paires d'électrodes, puis un signal de courant électrique.
- ✓ Les détecteurs thermiques modifient leur température selon le rayonnement incident. La modification de la température génère une tension similaire à celle d'un thermocouple.

L'échauffement propre aux détecteurs thermiques fait qu'ils sont beaucoup plus lents que les détecteurs quantiques. La signification de l'expression « beaucoup plus lent » veut dire que les détecteurs thermiques exigent un temps de réponse exprimé en « ms » en comparaison au « ns » ou au « μ s » pour les détecteurs quantiques. Les détecteurs quantiques s'emploient essentiellement dans les systèmes d'imagerie et de scrutation en ligne [36].

III.5.3 Affichage et interface

Les interfaces disponibles et la nature de l'affichage des valeurs mesurées sont des éléments importants pour l'utilisateur. La combinaison d'affichages et de panneaux de commande, disponible notamment sur les appareils portables peut être considérée comme une sortie primaire de l'appareil de mesure.

Les sorties analogiques ou numériques permettent d'utiliser des affichages supplémentaires dans le poste de contrôle ou d'opérer des réglages. Le raccordement direct d'électronique d'interprétation, d'imprimante et d'ordinateur est également possible [36].

III.6 Caméra thermique

III.6.1 Principe

La caméra infrarouge capte au travers d'un milieu transmetteur (ex : l'atmosphère) les rayonnements émis par une scène thermique. Le système radiométrique convertit la puissance de rayonnement en signaux numériques ou analogiques :

Ceux-ci sont transcrits en température par le calculateur et transformés en points lumineux sur un écran. L'image ainsi obtenue s'appelle "Thermogramme" (Fig. III.18) [37].

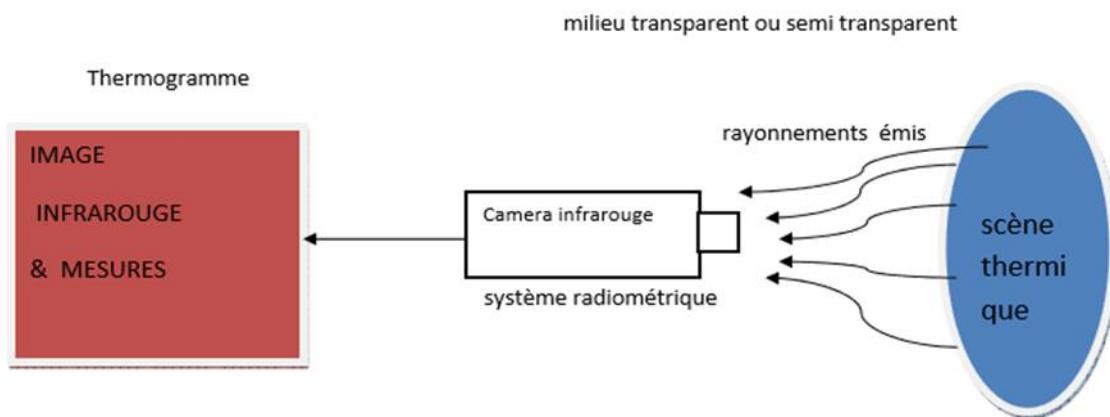


Fig. III.18 : Principe d'une caméra infrarouge [37].

III.6.2 Fonctionnement

Pour comprendre le fonctionnement, il est intéressant de savoir ce qui se passe lorsque la caméra passe en mode « infrarouge ». Tous les capteurs CCD et tri-CCD ont une couche photosensible au rayonnement infrarouge. Toutes les caméras professionnelles et grand public possèdent un filtre qui coupe l'infrarouge et restreint donc l'impact des rayonnements sur le capteur à la seule lumière visible. La grande innovation est d'avoir rendu ce filtre amovible qui est alors remplacé par un autre filtre, qui lui, inversement, supprime en majeure partie la lumière visible arrivant au capteur (fig.IV.18) [38].

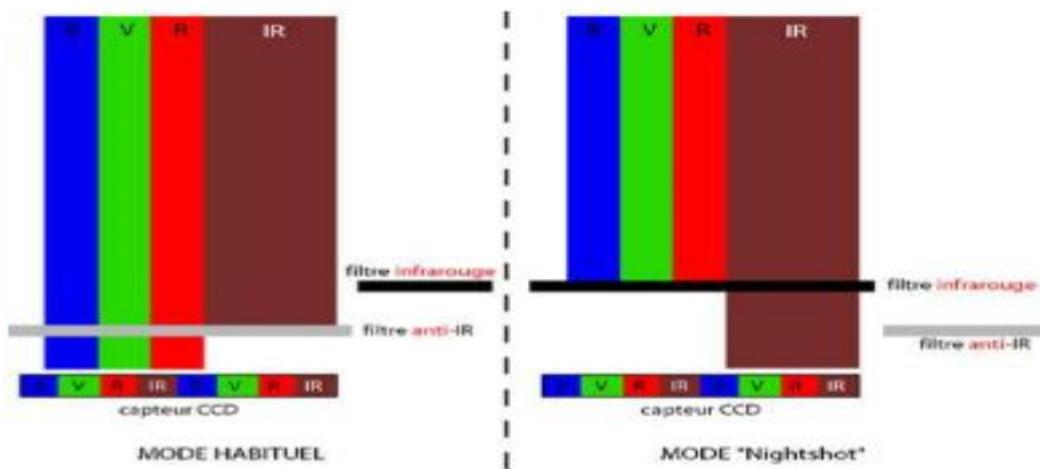


Fig. III.19 : Filtre de la caméra [38].

III.6.3 Types de caméra thermique (CT)

Il existe deux types de C.T. : avec capteur refroidi et avec capteur non refroidi.

- **CT avec capteur infrarouge (IR) refroidi**

Les CT sont capables de capter le rayonnement des températures d'objet ou de corps non détectables par l'œil humain. Elles sont converties sur un écran en une échelle de couleur, allant du bleu pour les températures froides au rouge pour les températures chaudes, afin de différencier les zones de chaleur. Les caméras peuvent également, grâce à leur mesure, faire apparaître une courbe appelée MRTD (Minimum Resolvable Température Difference) (fig.III.20).

En ce qui concerne le modèle refroidi, son capteur intégré est du domaine de la cryogénie. Grâce à ce système, la température de la CT est très basse (-200° C ou plus) pour lui permettre de déceler le bruit lié à la température élevée de la scène étudiée et ne pas refléter sa propre émission d'IR.

Ces types de CT sont les plus sensibles aux petites différences de température entre les objets. Elles servent à créer des images infrarouges de contrastes thermiques, caractérisés par la variation du signal par rapport à la variation de la température. Plus celle-ci est élevée et plus elle est décelable. Les atouts principaux de ce modèle sont la qualité de la résolution photo ou vidéo et sa capacité à être utilisé sur une grande portée. Malheureusement, ce type d'appareil est un peu plus encombrant que les modèles non refroidis et les pièces utilisées pour la cryogénération s'usent en libérant de l'hélium. Ainsi, elles doivent être changées au bout de 10 000 heures de fonctionnement environ [39].

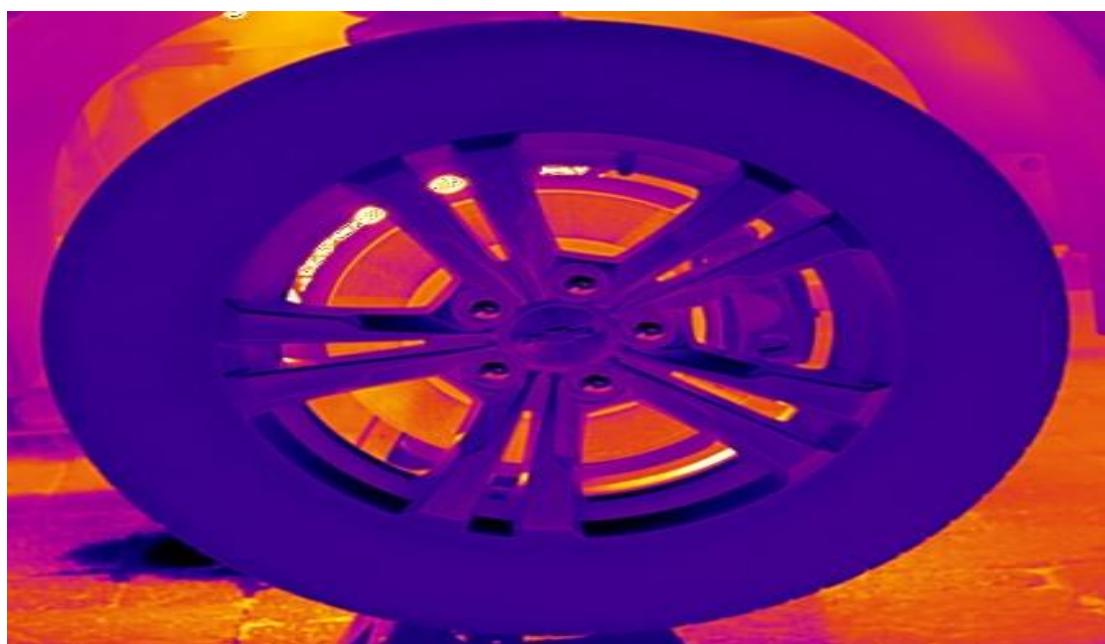


Fig. III.20 : Thermogramme de CT avec IR refroidi [39].

- **C.T avec capteur IR non refroidi**

Ce type de CT possède des capteurs qui n'ont pas besoin d'être refroidis. En revanche, ce type de modèle comporte bien souvent une résistance appelée microbolomètre. Lorsqu'elle détecte une variation de température, la température de cette résistance varie. Cette variation est alors convertie en signal électrique composant l'image (fig.III.21).

Ce type de CT est utilisé pour les mesures à longue distance et reste beaucoup moins coûteux que les CT à capteurs refroidis, car sa fabrication est beaucoup plus simple et rapide. Sa durée de vie est plus longue, car son système dispose de peu de pièces à renouveler. Enfin, son dernier avantage est que son dispositif n'est pas encombrant. Néanmoins, les CT non refroidies possèdent une moins bonne netteté que les modèles refroidis [40].

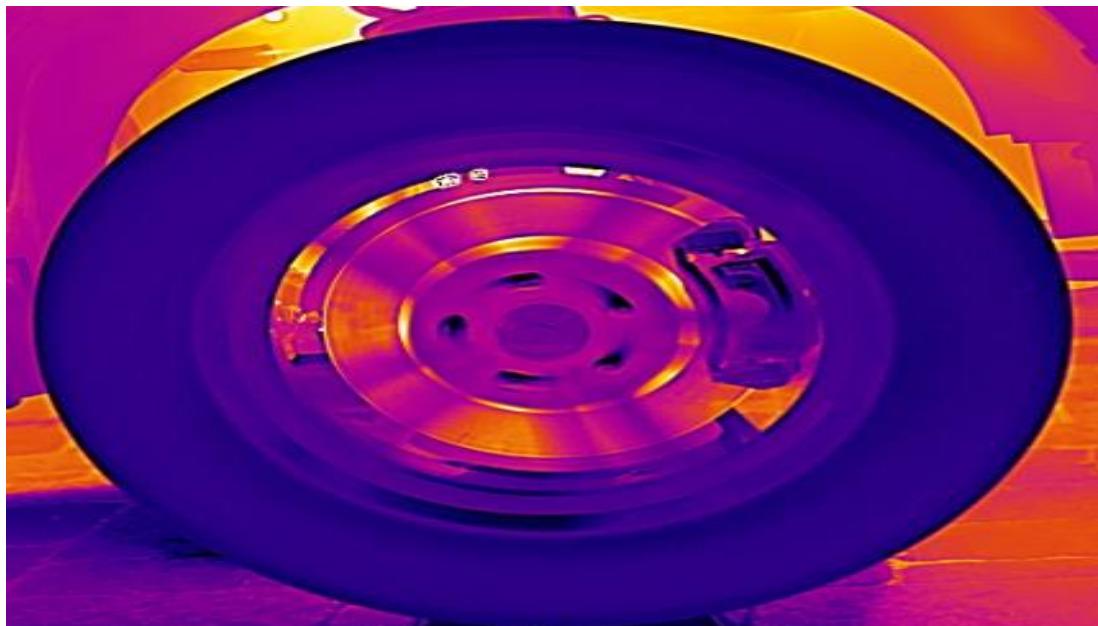


Fig. III.21 : Thermogramme de CT avec IR non refroidi [40].

Conclusion

La température est une grandeur physique caractérisant une sensation de chaleur ou de froid. Cette grandeur est proportionnelle au niveau énergétique du corps considéré, et présentative de son agitation moléculaire. Il existe deux méthodes pour déterminer la température d'un corps : le mesurage au contact de ce corps et le mesurage de son rayonnement. En fait, quel que soit le moyen utilisé, le mesurage de la température d'un corps résulte d'une action indirecte consistant à traduire l'état d'une grandeur physique intermédiaire influencée par le corps en valeur chiffré.

Ainsi, déterminer des températures par thermographie infrarouge consiste à mesurer des flux de rayonnement, puis traduire ces résultats en valeurs exploitables exprimées dans l'unité choisie par l'opérateur. Evidemment, l'environnement extérieur et les imperfections des radiomètres sur les plans optique, électrique, etc... influencent les valeurs de sortie de l'appareil utilisé : il est toujours intéressant de connaître les limites d'un système et de savoir interpréter ses résultats.

Chapitre IV
Etude expérimentale

IV.1 Introduction

Ce chapitre comporte deux parties. Dans la première partie nous allons présenter avec plus de détails les différents fours utilisés pour la fusion et le maintien de la température des métaux non ferreux à bas point de fusion.

La deuxième partie décrit les différents appareils et matériels utilisés dans notre travail. Il décrit aussi les différentes étapes de l'expérimentation. Les expériences sont menées au sein du laboratoire des « sciences des matériaux » de la Faculté de technologie.

IV.2 Généralités

Les fours de fusions de fonderie traitent des métaux déjà élaborés et provenant du traitement de minerais :

- Les métaux ferreux
- Les métaux non ferreux

Les fours de fonderie sont des fours de deuxième fusion et permettent d'élaborer différents alliages. Le souci d'obtenir ces alliages présentant des caractéristiques mécaniques optimales implique des conditions d'élaboration et de fusion rigoureuse [41].

Les appareils de fusion doivent permettre le respect de ces conditions. Leurs choix en fonctions de types d'alliage désiré, est déterminant c'est pourquoi ces appareils doivent :

- Réduire le maximum les risques d'oxydation et d'inclusion de gaz dans les alliages.
- Avoir une productivité la plus élevée possible.
- Consommation minimale d'énergie.

IV.3 Définition d'un four

Le four est composé de matériaux réfractaires permettant de l'isoler du milieu ambiant, et contient un creuset en graphite (fig.IV.1) [42].

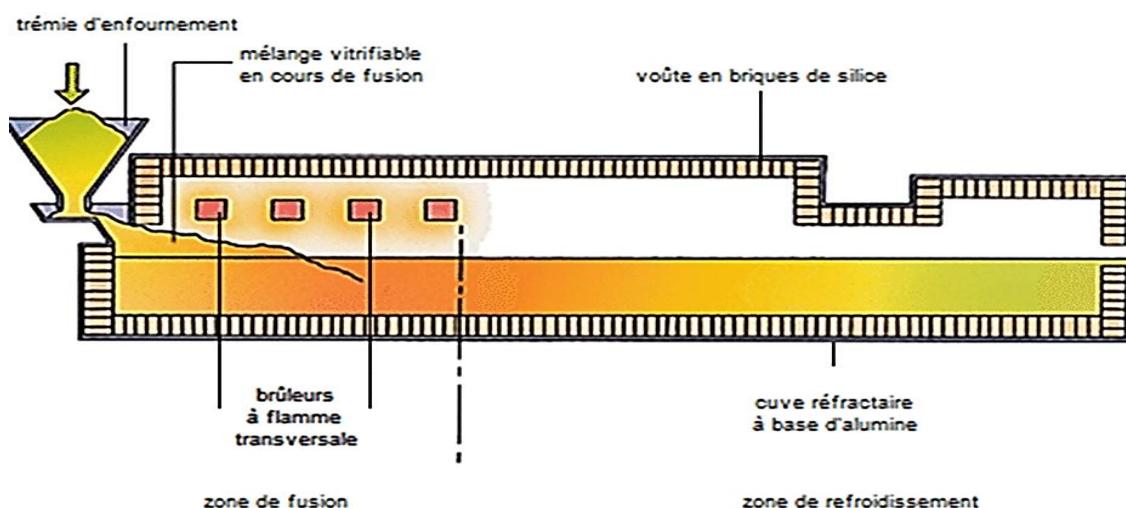


Fig.IV.1. Schéma simplifié d'un four à brûleurs [42].

Ce creuset est rempli de lingots, puis porté à une température supérieure à la température de fusion de l'alliage qu'il contient. La régulation de température est effectuée à l'aide de thermocouples placés dans la chambre de chauffe, entre les résistances (cas d'un four électrique) et le creuset. La température de cette chambre est légèrement supérieure à celle du métal contenu dans le creuset. Différents moyens de chauffage de fours de fusion sont utilisés : le gaz, le fuel, le coke et l'électricité notamment.

IV. 4 Fonctionnement

Le principe de fonctionnement du four est simple :

L'objet à traiter y est enfermé pour être soumis à une source de chaleur provenant de l'intérieur ou de l'extérieur du four. La chaleur à l'intérieur du four peut être répartie par circulation forcée d'air, par convection naturelle, par conduction thermique ou par rayonnement (infrarouge, microondes, etc.) [42].

La source d'énergie pour fournir la chaleur du four peut être :

- un combustible (bois, gaz naturel...)
- l'électricité dans des résistances
- des micro-ondes, avec l'électricité.

IV.5 Différents types de fours

Le choix d'un four de fusion est un aspect important de l'élaboration d'un procédé de fonderie. Chaque type de four possède des propriétés qui lui sont propres en ce qui concerne ses besoins en alimentation et ses possibilités d'alliage, qui auront à leur tour des répercussions sur l'ensemble du procédé de fonderie. D'un autre côté, le type de métal à fondre détermine quel four peut ou ne peut pas être utilisé. On distingue les types suivants :

- **four à cubilot**

C'est un four vertical de type à cuve, dans laquelle les matériaux à fondre sont en contact direct avec le combustible (Fig.IV.2) [43].



Fig.IV.2 : Four à cubilot [43].

- **Fours à creuset**

Le métal à fondre est contenu dans un creuset il se trouve ainsi protégé des flammes et des gaz de la combustion (Fig.IV.3). Les creusets sont :

- en fonte ou en acier moule : ils sont résistants et d'un prix peu élevé ils peuvent être suspendus dans l'enceinte de four.
- en graphite ou en carborundum : ils sont réfractaires et leur conductibilité thermique est meilleure que les autres réfractaires.
- La forme générale des creusets est cylindrique mais le rapport entre la hauteur et le diamètre est variable suivant l'utilisation et le type d'alliage fondu.



Fig.IV.3 : Four à creuset [43].

- **Fours électriques**

Les fours électriques présentent de nombreux avantages :

- pertes au feu réduites et constantes.
- obtention de hautes températures favorables pour amorcer les réactions chimiques d'affinage.
- régulation plus aisée de la température de bain.

Les fours chauffés électriquement sont divisés en :

- fours à arcs.
- fours à induction.

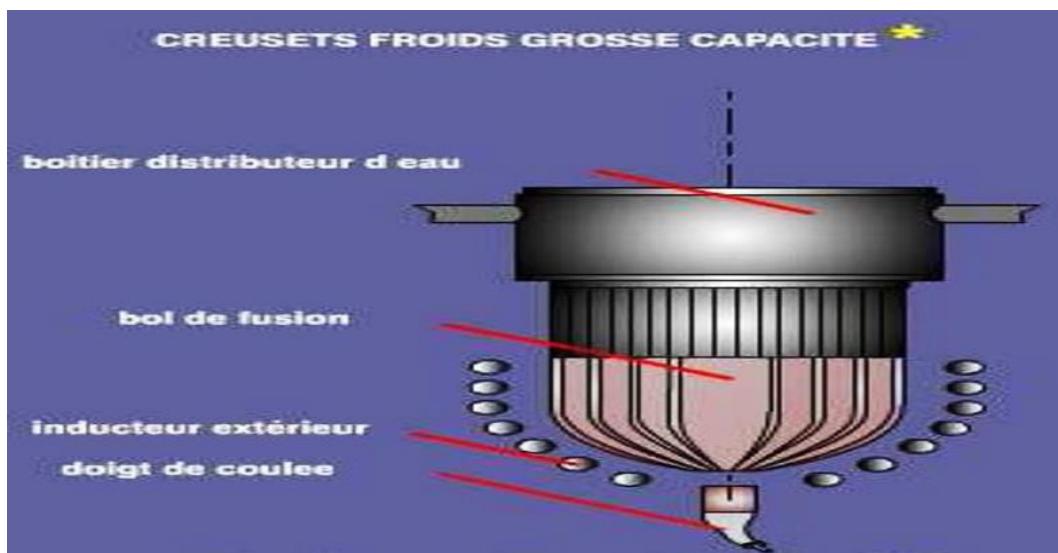


Fig.IV.4 : Exemple de four électrique [43].

- **Fours rotatifs ou oscillants**

Ces fours permettent l'élaboration d'alliages spéciaux grâce aux hautes températures atteintes et au brassage du métal. Le brassage permet l'homogénéisation du bain et favorise l'évacuation des gaz. La fusion est rapide grâce à la faible inertie thermique de ces fours et leurs rotations qui accélèrent les échanges thermiques.

On distingue :

- fours à flammes.
- fours électriques.





Fig.IV.5 : Exemple de four rotatif ou oscillant [44].

- **Les fours chauffés au gaz et au mazout**

Une enceinte métallique maintient les matériaux réfractaires qui assurent le calorifugeage et entoure le creuset. Le brûleur à gaz ou au mazout doit avoir une position bien déterminée par rapport au creuset. D'autre part le brûleur doit être incliné vers le haut pour éviter une accumulation de gaz dans le fond du four.

- la flamme du brûleur ne doit pas frapper le creuset afin d'éviter des points chauds locaux ;
- la flamme doit être tangente aux réfractaires de l'enceinte et le creuset est chauffé par convection et rayonnement de réfractaires.

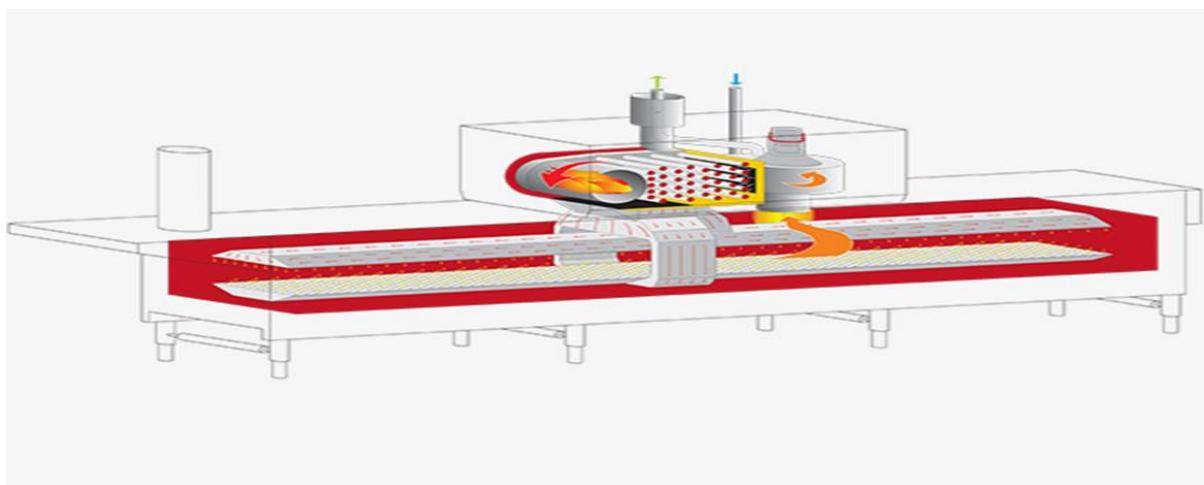


Fig.IV.6 : Four à convection à chauffage indirect [45].

Nous abordons maintenant la deuxième partie du chapitre concernant notre expérimentation.

IV.6 Description

Le travail consiste à étudier le comportement thermique de la fusion de l'aluminium. Le matériau est placé dans un creuset silico-alumineux (35 % alumine et 65 % silice). Ce creuset propre évite de polluer l'alliage au moment de la fusion (fig.IV.7). Par ailleurs, il n'est pas conducteur de l'électricité, les courants induits se développent dans l'alliage et par conséquent la fusion est plus rapide. Un moule cylindrique avec bras est utilisé. L'évolution de la température est enregistrée à l'aide de la caméra thermique de type Testo 875 et puis traité à l'aide du logiciel « Testo IR Soft » pour l'acquisition numérique des températures.

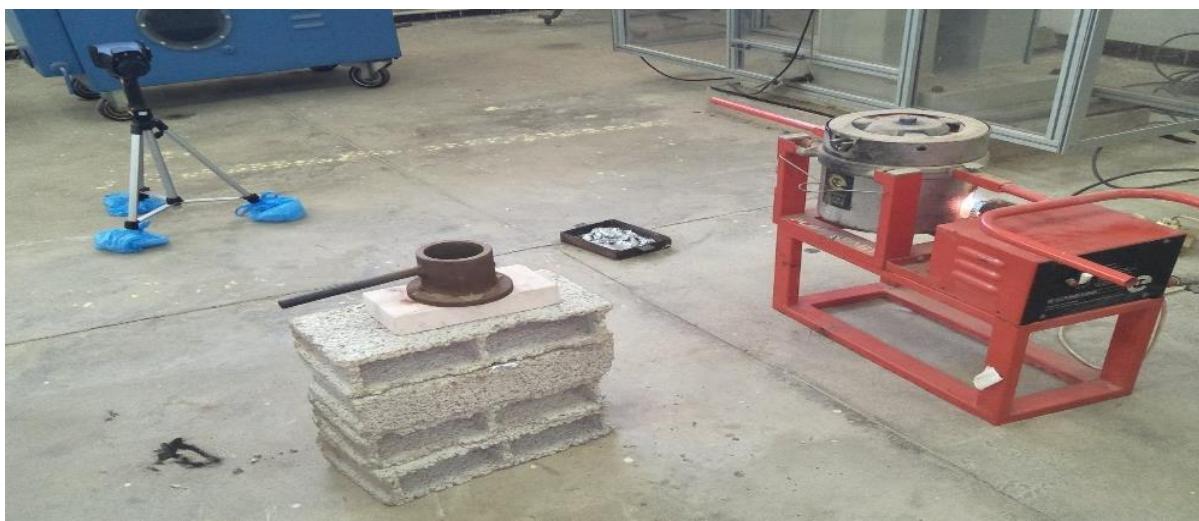


Fig.IV.7 : Matériels et accessoires de l'expérimentation.

IV.7 Matériels utilisés

Notre expérience nécessite un four pour fondre le métal qui est l'aluminium, un moule en acier creux, une caméra infrarouge pour la mesure de température et un logiciel pour traiter les résultats obtenus.

✓ Banc de moulage « flame fast moulding »

Ce banc de moulage au sable attrayant et robuste est spécialement conçu pour une utilisation dans les ateliers scolaires et collégiaux (fig.IV.8). L'unité est construite de manière rigide pour être totalement stable avec le bac à sable de 200 kg complet. Conçu esthétiquement pour s'adapter à la gamme d'équipements à gaz Flamefast, le banc de moulage limite le sable dans une zone spécifique lors du remplissage de flacons de moulage, ce qui permet de garder le sol exempt de sable et de réduire les risques d'accident. Le bac à sable est en acier galvanisé avec

une finition en émail résistant. Des glissières sont prévues pour permettre aux planches de mouler de glisser facilement de gauche à droite.

Le couvercle en deux parties a un double objectif. Il recouvre le banc de moulage lorsqu'il n'est pas utilisé et peut être ouvert indépendamment pour donner accès à tout ou partie du sable. Il stocke également tous les outils nécessaires au processus de moulage.



Fig.IV.8 : Banc de moulage avec le creuset.

✓ Moule

Le moule utilisé est en acier. C'est une pièce cylindrique de diamètre extérieur 78.25 cm et avec un perçage de diamètre 48.05 cm, muni d'un bras soudé et un base de forme cylindrique soudée aussi (fig.IV.9).



Fig.IV.9 : Moule utilisé.

✓ Caméra thermique

La caméra thermique utilisée est une **TESTO 875** (fig.IV.10). C'est une caméra robuste et facile à manier. Elle nous permet de déterminer et de représenter sans contact la répartition des températures des surfaces.

La caméra thermique **TESTO 875** se caractérise par une manipulation intuitive, une sensibilité thermique exceptionnelle et un appareil photo numérique intégré.

- ✓ Appareil photo numérique intégré : la prise d'images réelles parallèlement aux images thermographiques simplifie la documentation et l'affectation.
- ✓ Résolution et qualité d'image : détecteur de 160 x 120 pixels, soit 19 200 points de mesure. Avec la technologie Super Résolution, la qualité d'image augmente même d'une classe, pour passer à 320 x 240 pixels, une résolution géométrique améliorée d'un facteur 1,6, cela signifie encore plus de détails, plus de sécurité lors de mesures thermographiques.
- ✓ Sensibilité thermique < 50 mK : grâce à une sensibilité thermique < 50 mK, les plus petites différences de température sont visibles.
- ✓ Objectif 32° x 23° de qualité : cet objectif avec mise au point manuelle offre un champ de vision large et une vue d'ensemble idéale sur la réparation de la température, ainsi qu'une mise au point précise sur l'objet de mesure.
- ✓ Détection automatique des points chaud et froid : les températures critiques sont directement affichées lors de la thermographie.
- ✓ Mode « Solaire » : la valeur du rayonnement solaire peut être saisie dans la caméra thermique et enregistrée avec chaque image thermique.
- ✓ Logiciel professionnel compris pour l'évaluation des images sur PC. Les images thermographiques peuvent également être enregistrées au choix au format JPEG.
- ✓ Etendue de mesure : -30...+350 °C.



Fig.IV.10 : Caméra thermique TESTO 875.

Les caractéristiques de l'appareil sont regroupées sur le tableau.

Tableau IV.1 : Caractéristiques de la caméra thermique Testo 875.

Attribut	Valeur
Plage de mesure de température	-20 → +350°C
Sensibilité thermique	≤80mK
Précision optimale de mesure de température	±2 °C
Champ de vision H x V	32 x 23°
Taux de rafraîchissement	9Hz
Distance de focale minimum	0.1m
Résolution de la détection	160 x 120 pixels
Type de mise au point	Manuel
Taille de l'affichage	3.5pouce
Résolution de l'affichage	320 x 240 pixels
Poids	900g
Longueur	152mm
Largeur	108mm
Hauteur	262mm
Numéro de modèle	Testo 875

IV.8 Expérimentation

Elle consiste à étudier le comportement dynamique et thermique du refroidissement de l'aluminium. Les manipulations consistent à faire fondre aluminium et le couler dans le moule (fig.V.5) dans des situations différentes.



Fig.IV.11 : coulée de l'aluminium.

➤ Premier essai

Une fois la coulée faite on recouvre le moule rapidement d'une brique réfractaire. On suit alors l'évolution de la température sur la surface extérieure du moule (fig.IV.12).

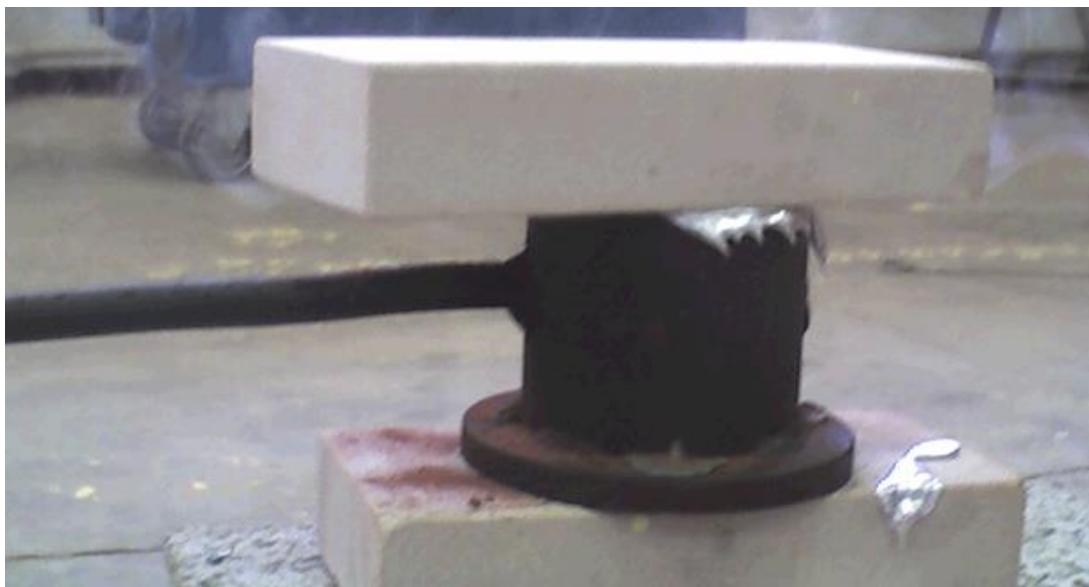


Fig.IV.12 : Moule fermé avec une brique.

La figure (fig.IV.13) représente l'image thermique du moule.

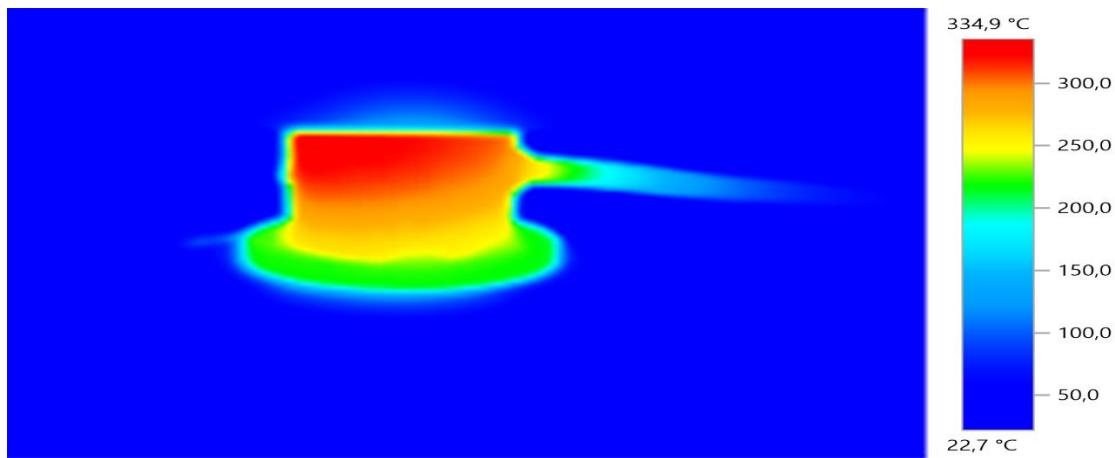


Fig.IV.13 : Image thermique du moule.

➤ **Deuxième essai**

On a suivi la même procédure que la première sauf qu'on a laissé le moule à l'air libre (fig.IV.14) ainsi que l'image thermique obtenue est représentée en (fig.IV.15).



Fig.IV.14 : Refroidissement à l'air libre.

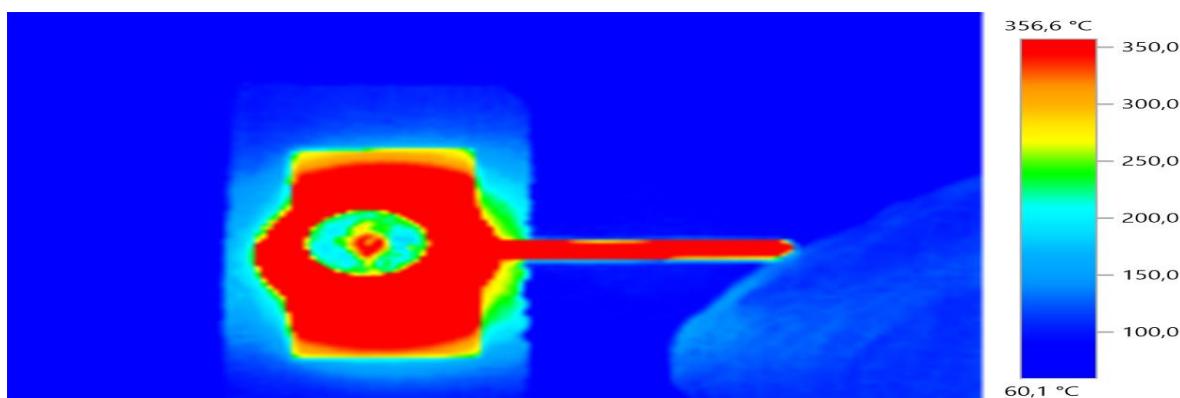


Fig.IV.15 : Image thermique du moule à l'air libre.

➤ **Troisième essai**

Après coulée, on couvre le moule avec une pièce cylindrique d'une forte épaisseur en acier (fig.IV.16). L'image thermique obtenue est représentée en (fig.IV.17).



Fig.IV.16 : Moule ferme.

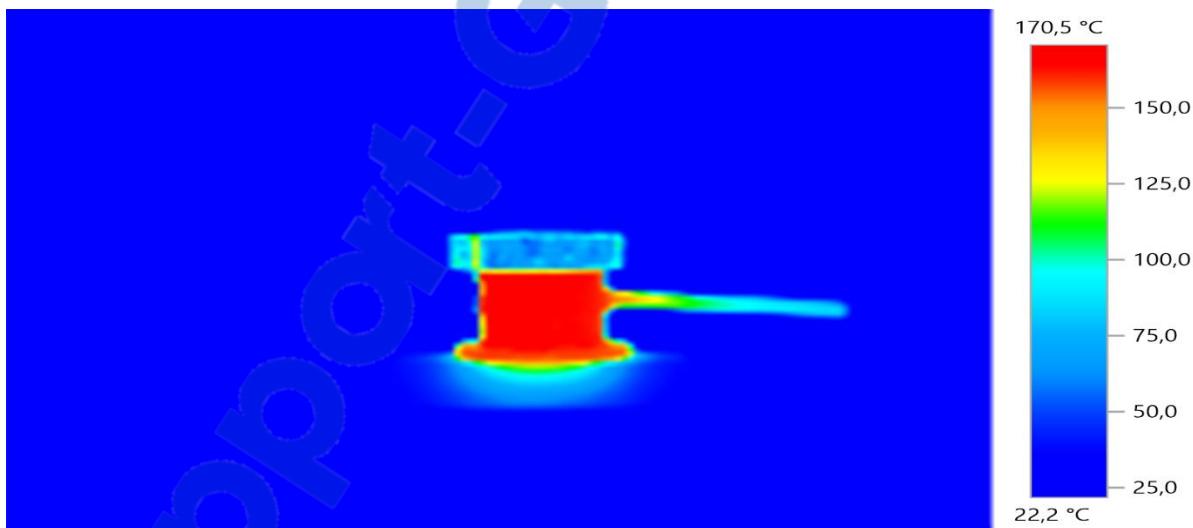


Fig.IV.17 : Image thermique du moule ferme avec une plaque en métal.

➤ **Quatrième essai**

On étudie le refroidissement du moule après poteyage de la surface intérieure avec de la chaux (fig.IV.18), recouvert de la brique réfractaire (fig.IV.19). L'image thermique obtenue est représentée en (fig.IV.20).



Fig.IV.18 : Moule poteyé.



Fig.IV.19 : Moule poteyé ferme avec une brique.

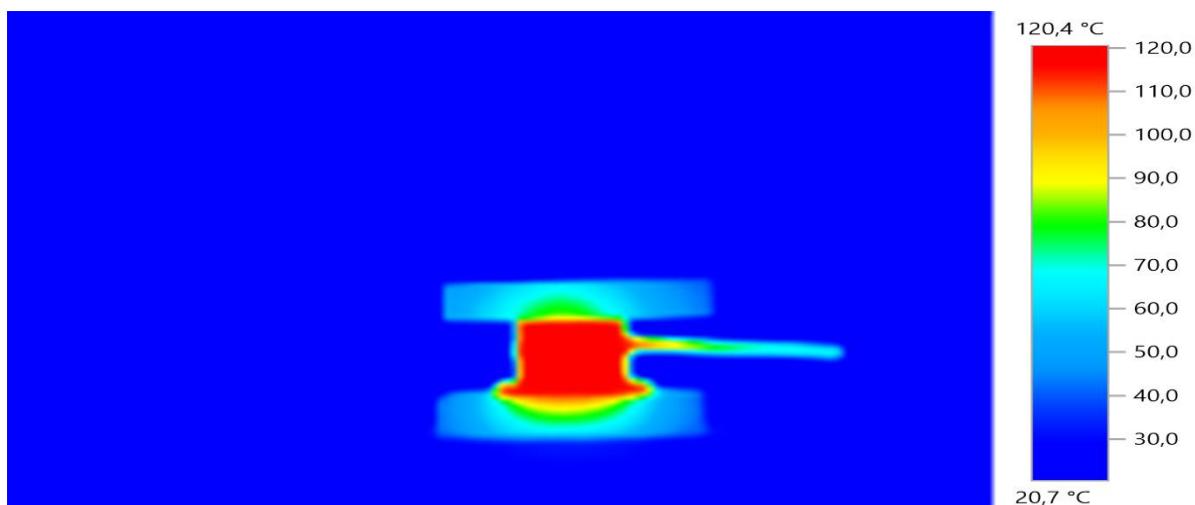


Fig.IV.20 : Image thermique du moule poteyé.

A la fin des expériences on a obtenu quatre pièces différentes



Fig.IV.21 : Pièces obtenues après moulage.

IV.9 Préparation des pièces

IV.9.1 Opérations d'usinage

Pour étudier la structure des pièces obtenues, des opérations de dressage, chariotage et tronçonnage (fig.IV.22) ont été réalisées sur un tour du Hall technologique.



Fig.IV.22 : Usinages des pièces.



IV.9.2 Polissage

Après les opérations d'usinage ; on est passé au polissage pour éliminer les impuretés et ceci pour avoir un bon état de surface des pièces (surface lisse).



Fig.IV.23 : Polissage des pièces.

IV.9.3 Dureté

La dureté peut être définie comme une mesure de la résistance à la déformation plastique localisée. Les méthodes de mesure de la dureté sont basées sur la pénétration forcée d'un indenteur à la surface d'un matériau. Une valeur de dureté est déterminée par la mesure de la dimension ou de la profondeur de l'empreinte faite par l'indenteur soumis à des charges et des vitesses d'application contrôlées.



Fig.IV.24 : Essai de dureté des pièces finis.

Chapitre V
Résultats et discussions

V.1 Introduction

Ce chapitre présente les résultats obtenus au cours des expériences effectuées, et discute les différents phénomènes de refroidissement du matériau utilisé pour mieux comprendre les paramètres qui l'influencent.

V.2 Carte thermique de la coulée

Pour donner la carte thermique de la coulée, On va analyser nos résultats suivant les trois étapes comme montre la figure V.1.

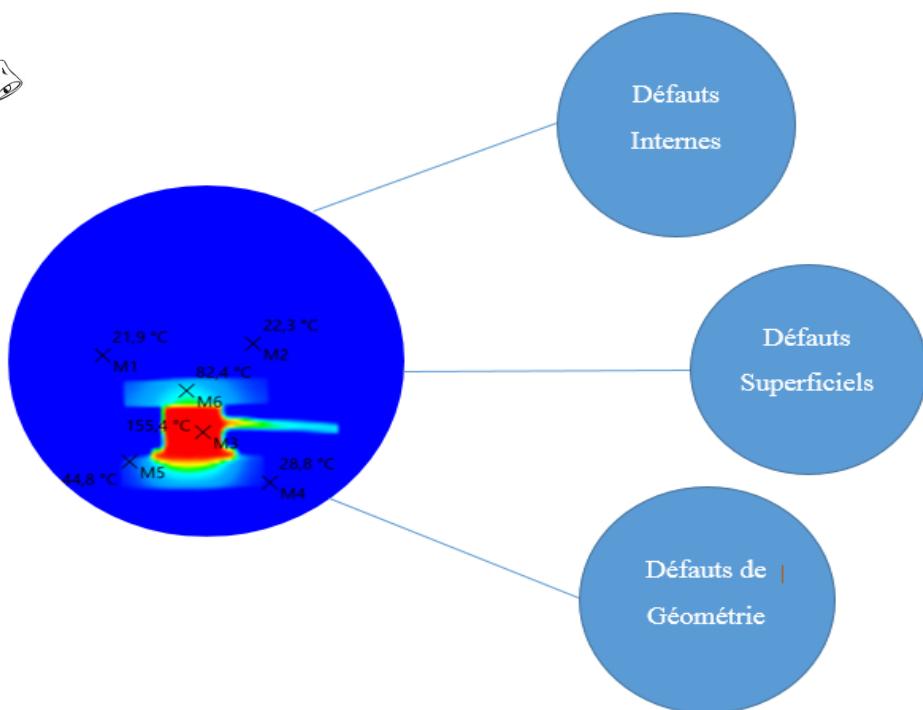


Fig.V.1 : Influence de la température dans la coulée par gravité.

V.3 Evolution de la température au cours de refroidissement

V.3.1 Refroidissement à l'air libre

Nous remplissons le moule et nous le laissons se refroidir à l'air libre. En traçant une ligne horizontale passant par le centre du moule sur les thermogrammes donnés par le logiciel « IR soft Testo 875 » de la caméra (fig.V.2), nous constatons que le transfert de chaleur vers les bords est très grand. Par contre au centre il prend plus de temps du à la nature de la matière utilisée. Donc les parois extérieures ont un rôle de refroidisseur d'où la chute de température et elle se stabilise au milieu.

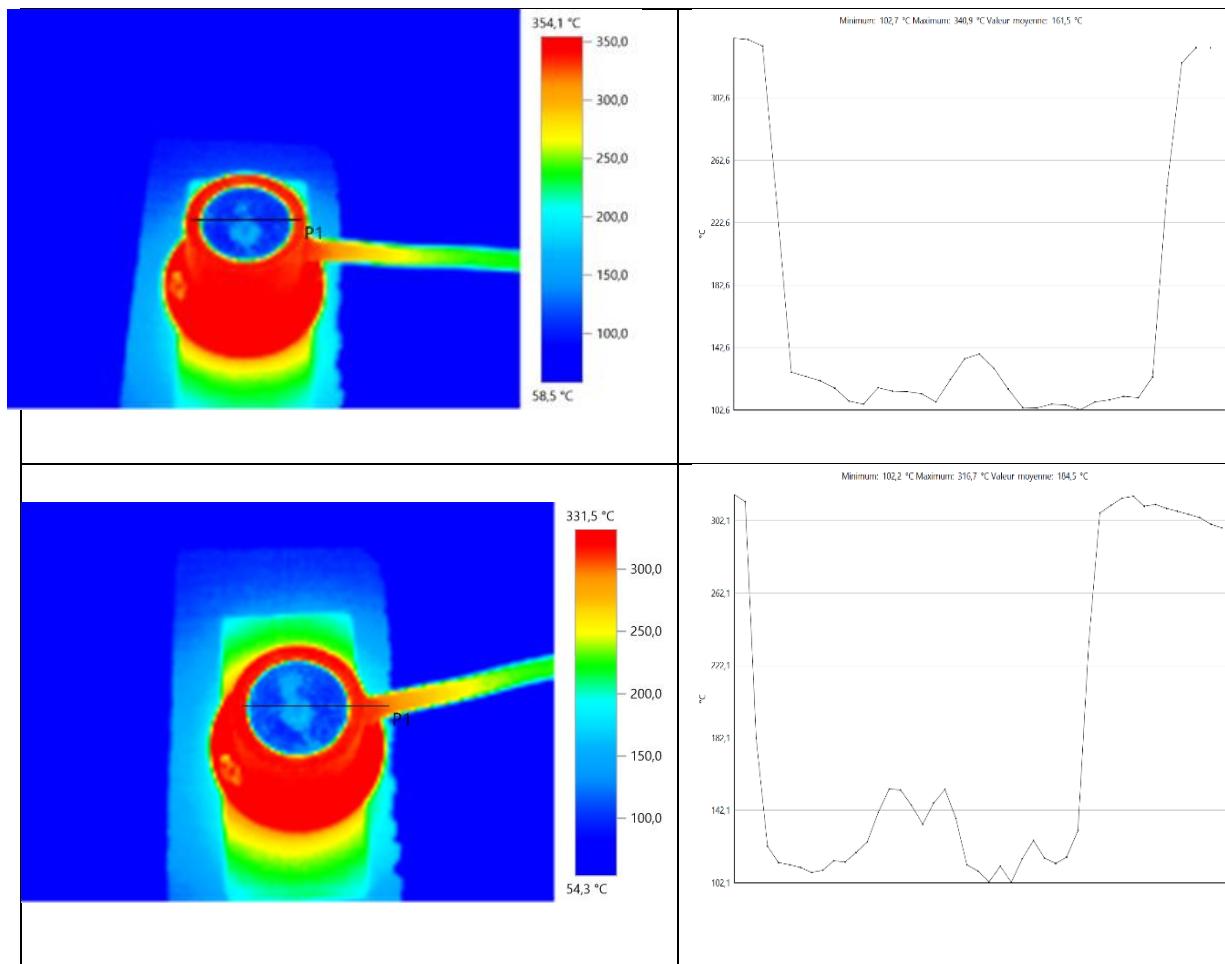


Fig.V.2 : Evolution de température pour moule à l'air libre.

En ce qui concerne les défauts superficiels de la pièce obtenue, nous constatons que son aspect externe est plus au moins lisse parce que le refroidissement est plus maîtrisé. Par contre la base met plus de temps pour se refroidir c'est pour cela on obtient une surface rugueuse.

- En ce qui concerne les défauts de géométrie, nous constatons la formation d'un cratère dont les dimensions sont regroupées sur le tableau suivant :

Tableau V.1 : Dimensions de cratère de la pièce pour moule à l'air libre.

	Diamètre moyen extérieur du cratère (cm)	Diamètre moyen intérieur du cratère (cm)	Profondeur du cratère (cm)
	35	7	23

V.3.2 Moule fermé avec une brique réfractaire

L'expérience consiste à enregistrer le phénomène de refroidissement du moule recouvert avec une brique réfractaire.

La figure V.3 montre les thermogrammes ainsi que les courbes de l'évolution des températures données par le logiciel « IR soft Testo 875 » de la caméra en fonction du temps de refroidissement.

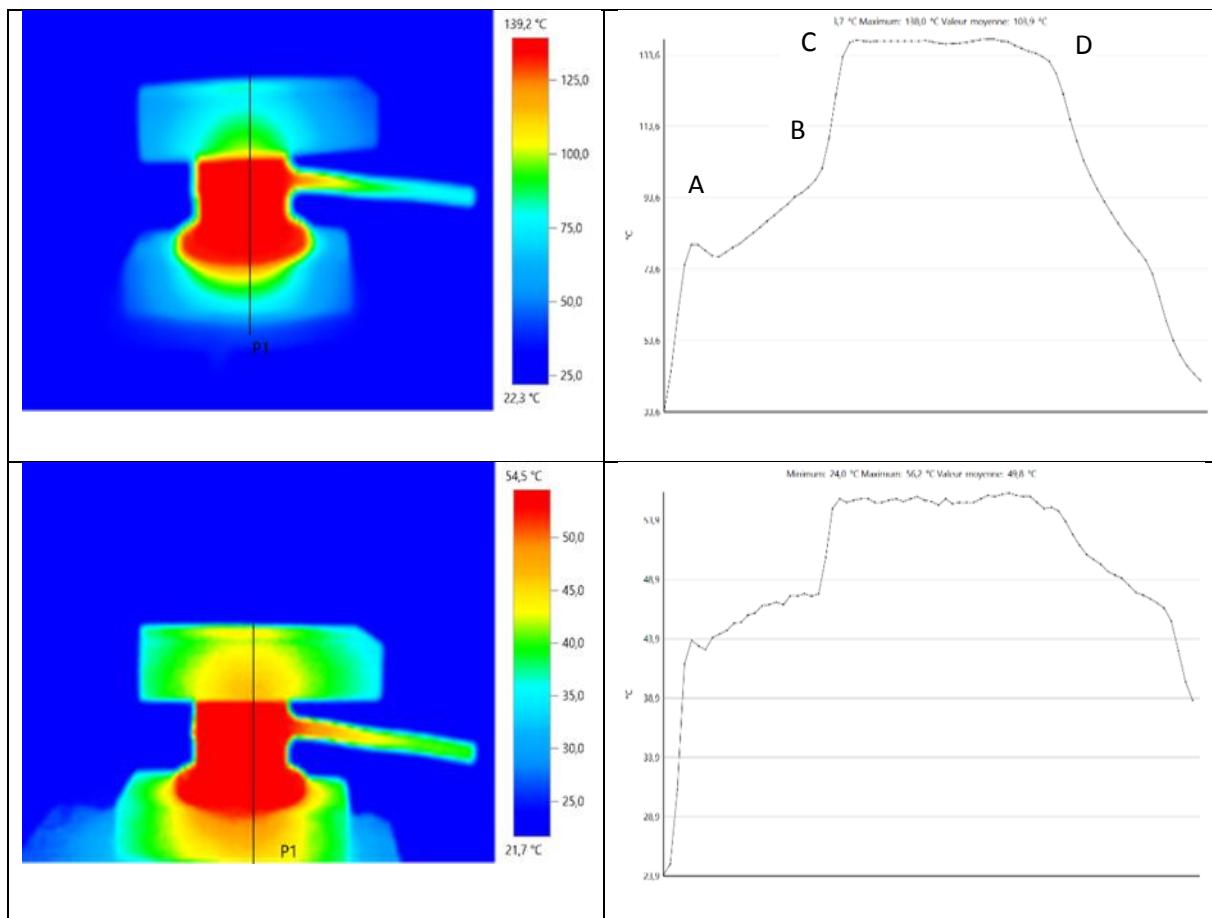


Fig.V.3 : Evolution de température pour moule fermé avec une brique réfractaire.

En traçant une ligne verticale passant par l'axe du moule, l'évolution de la température en fonction de la distance se diffère le long de la courbe, au début de l'évolution (A), il y a une perturbation c'est la partie où se trouve la brique, elle freine le transfert de chaleur.

Au point (B), on remarque que l'évolution commence à se stabiliser, c'est dû au bras qui évacue de la chaleur.

Concernant le point (C), il y'a une stabilisation de refroidissement (au milieu du moule).

La dernière partie (D) le refroidissement chute brutalement sous l'effet de la semelle ou se trouve du sable qui est mauvais conducteur de la chaleur.

En ce qui concerne les défauts superficiels de la pièce obtenue, on constate La base est lisse et le haut on trouve des imperfections (surface rugueuse), De côté radial, le bras du moule qui va évacuer une partie de la chaleur donc elle se refroidit rapidement et on obtient une surface lisse. De l'autre côté, le moule prend plus de temps pour se refroidir c'est pour cela on trouve une surface rugueuse.

- En ce qui concerne les défauts de géométrie, nous constatons la formation d'un cratère dont les dimensions sont regroupées sur le tableau suivant :

Tableau V.2 : Dimensions de cratère de la pièce pour moule fermé avec une brique réfractaire.

	Diamètre moyen extérieur du cratère (cm)	Diamètre moyen intérieur du cratère (cm)	Profondeur du cratère (cm)
	56	6	32.6

La figure V.4 montre graphiquement l'évolution temporelle du refroidissement. On observe que la température commence de 20 °C qui est la température ambiante, après juste la coulée la température augmente rapidement jusqu'à la valeur maximale. L'évolution dans cette partie est très rapide et a pris environ 10 secondes pour atteindre le pic de 360 °C. Sachant que la température de fusion de l'aluminium est de 450°C, celle-ci ne peut pas être captée par la caméra thermique vue ses limites de mesure.

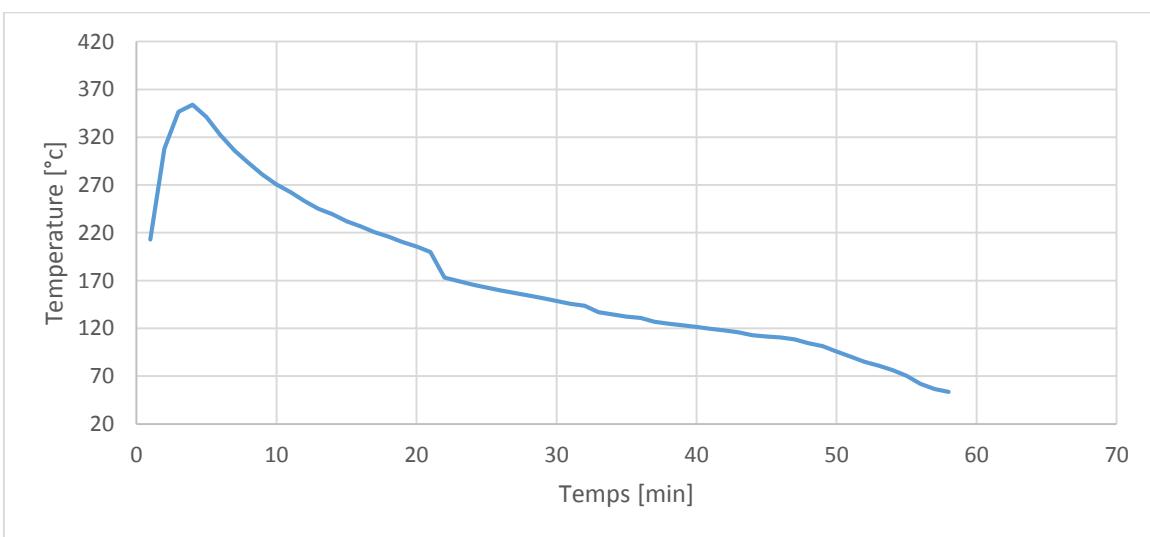


Fig.V.4 : Evolution temporelle de température de la périphérie du moule fermé avec une brique.

Cette évolution de température est une courbe décroissante en fonction du temps. Au premier lieu on a une augmentation de température. La semelle accélère le transfert donc la partie qui se refroidit en premier c'est la base. Par contre la brique ralenti le transfert donc la partie haut se refroidi en dernier.

V.3.3 Moule fermé avec une pièce cylindrique en acier

L'expérience consiste à enregistrer le phénomène de refroidissement du moule recouvert avec une pièce cylindrique en acier. La figure V.5 montre les thermogrammes ainsi que les courbes de l'évolution des températures données par le logiciel « IR soft Testo 875 » de la caméra en fonction du temps de refroidissement. En traçant une ligne verticale passant par l'axe du moule, nous constatons que l'évolution de la température change, le refroidissement est très rapide du :

- ✓ La pièce en acier utilisé comme couvert, est meilleur conducteur, donc elle évacue une grande partie de la chaleur.
- ✓ Le bras du moule permet aussi d'évacuer une partie de la chaleur. Donc ces deux facteurs permettent de refroidir la pièce en un temps le plus court.

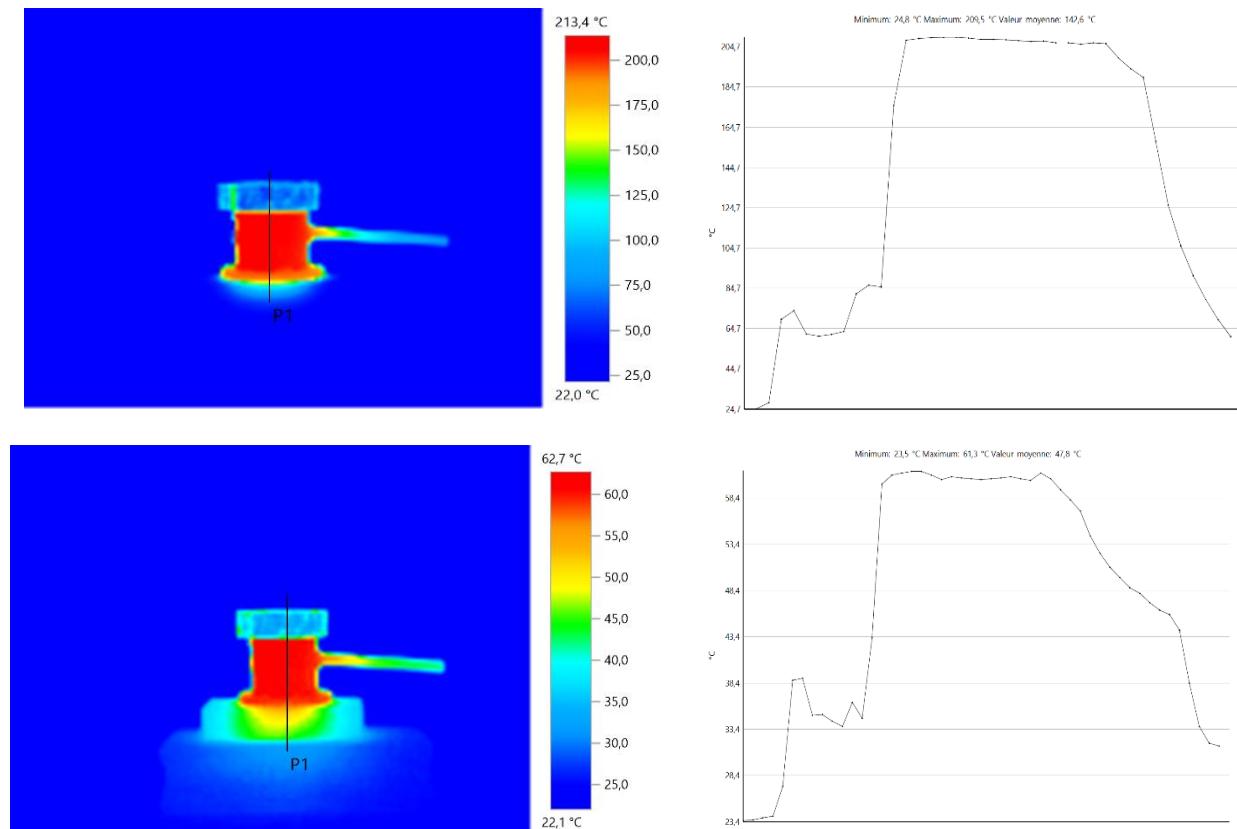


Fig.V.5 : Evolution de température pour moule fermé avec une pièce en acier.

En ce qui concerne les défauts superficiels de la pièce obtenue, on constate La base est lisse. Le haut est aussi lisse (pas d'impuretés).

- En ce qui concerne les défauts de géométrie, nous constatons la formation d'un cratère de forme rectangulaire dont les dimensions sont regroupées sur le tableau suivant :

Tableau V.3 : Dimensions de cratère de la pièce pour moule fermé avec une pièce en acier.

	Forme extérieur du cratère (cm)	Diamètre moyen intérieur du cratère (cm)	Profondeur du cratère (cm)
	L=31 l=19	6	39.1

La figure V.6 montre l'évolution de la température en fonction du temps. Le métal fondu se refroidi du côté paroi du moule vers le noyau, ainsi que la partie fermée par la pièce cylindrique en acier qui joue le rôle d'un refroidisseur.

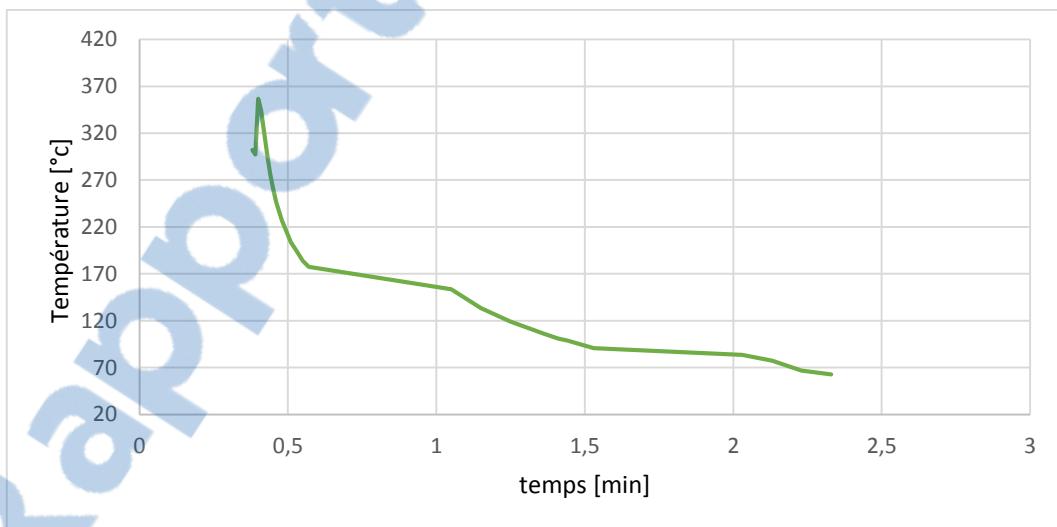


Fig.V.6 : Evolution temporelle de température de la périphérie du moule fermé avec une pièce en acier.

V.3.4 Moule potéyé fermé avec une brique réfractaire

L'expérience consiste à enregistrer le phénomène de refroidissement du moule potéyé fermé avec une brique réfractaire. La figure VI.7 montre les thermogrammes ainsi que les courbes de l'évolution des températures données par le logiciel « IRsoft Testo 875 » de la caméra en fonction du temps de refroidissement.

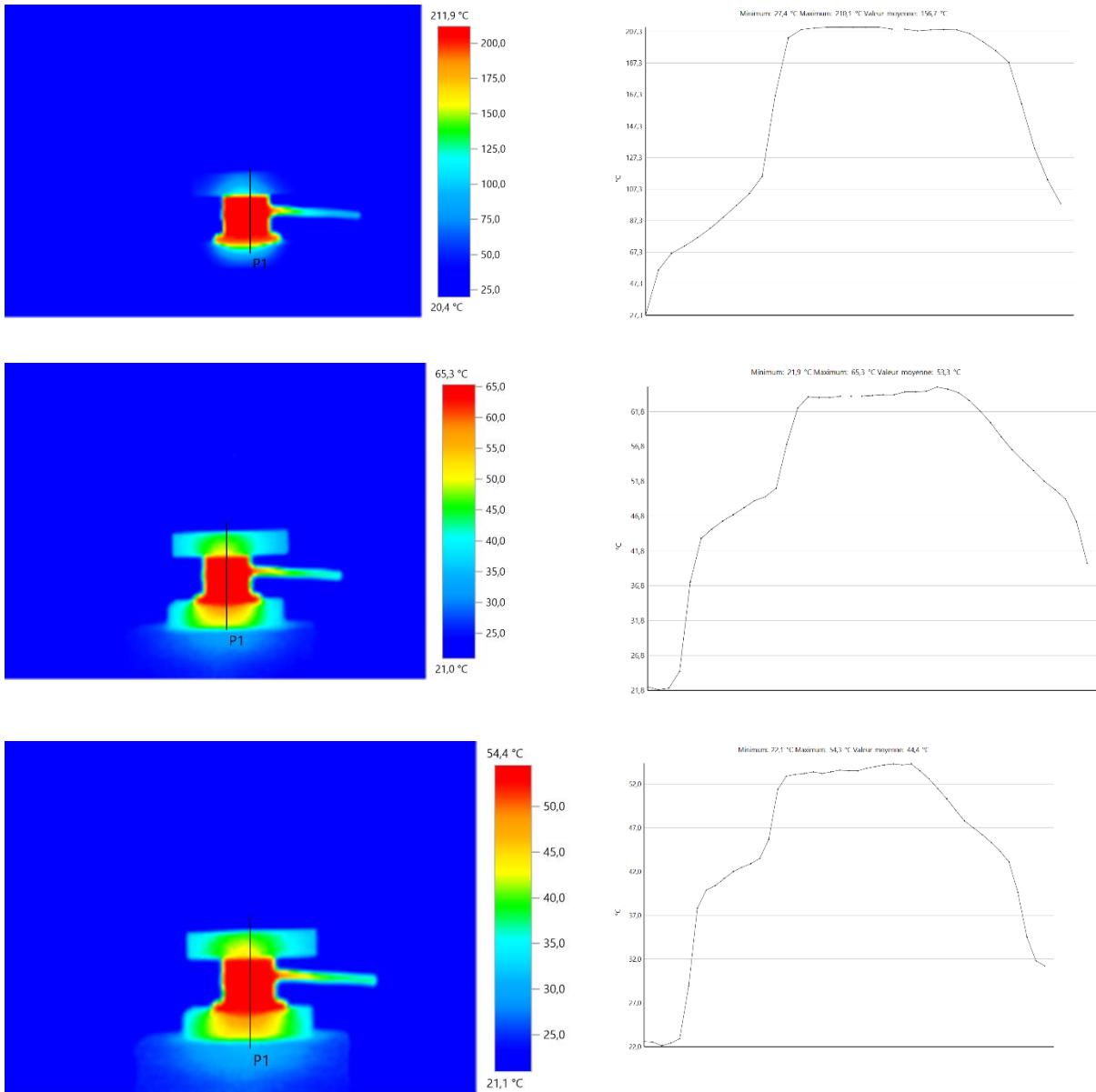


Fig.V.7 : Evolution de température pour moule potéyé fermé avec une brique réfractaire.

Dans cette partie, on ajoute un nouveau facteur qui est le potage. Nous avons peint l'intérieur du moule avec de la chaux liquide en plusieurs couches.

Les thermogrammes montrent que la température monte progressivement, elle est plus au moins stable (pas de perturbation), jusqu'à où elle atteint le pic, puis elle descend.

Le poteyage freine le refroidissement, en plus la présence de la brique qui a aussi ralenti le transfert de la chaleur. Le refroidissement est maîtrisé (identique le long de la pièce).

En ce qui concerne les défauts superficiels de la pièce obtenue, on constate que la base est lisse et le haut on trouve des imperfections , sur le peripherie ,il est rugeux un petit peu.

- En ce qui concerne les défauts de géométrie, nous constatons la formation d'un cratère dont les dimensions sont regroupées sur le tableau suivant :

Tableau V.4 : Dimensions de cratère de la pièce pour moule potéyé fermé avec une brique réfractaire.

	Diamètre moyen extérieur du cratère (cm)	Diamètre moyen intérieur du cratère (cm)	Profondeur du cratère (cm)
	27	5	27.9

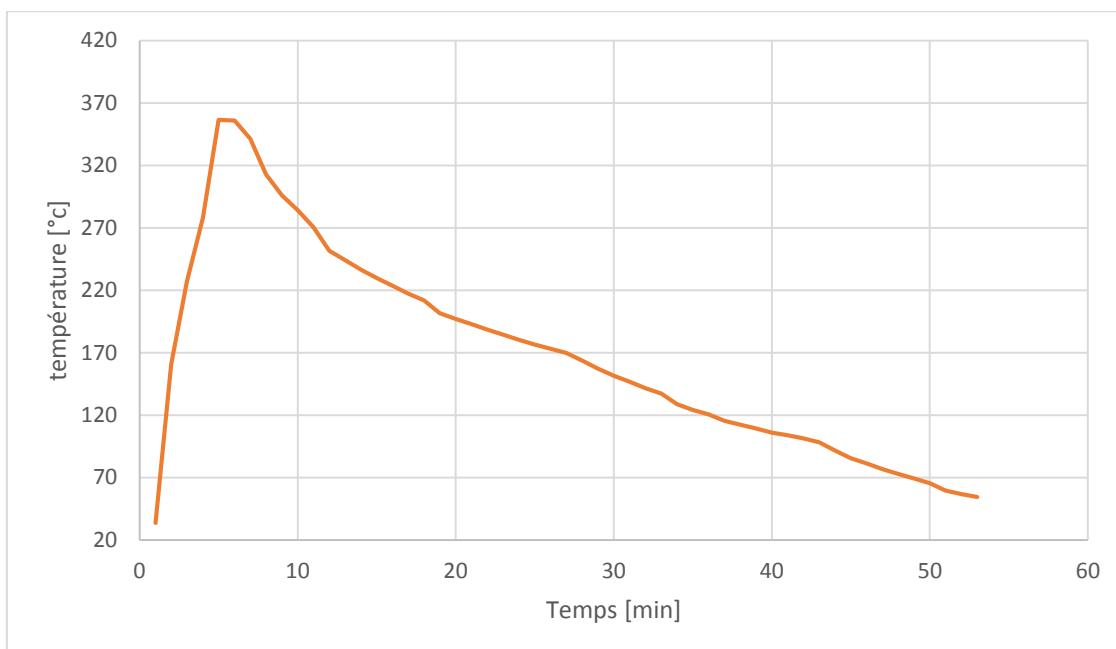


Fig.V.8 : Evolution temporelle de température de la périphérie du moule potéyé fermé avec une brique.

La même interprétation que la première expérience sauf que dans cette dernière. On a potéyé le moule avec la chaux, cette couche a une mauvaise conductivité thermique qui freine l'évolution de température et minimiser la dissipation de la chaleur. Donc dans ce cas le refroidissement est plus long (fig.V.8).

V.4 comparaison du refroidissement de la pièce moulée

La superposition des courbes obtenues nous permet de donner les conclusions suivantes :

Le flux de chaleur lors de refroidissement est distribué en fonction de temps, les courbes n'ont pas de pointe marquée

Dans le cas de l'expérience avec moule potéyé, on trouve la température la plus haute. Vient ensuite les autres expériences respectivement avec moule non potéyé recouvert de la brique et de l'acier.

En ce qui concerne la deuxième expérience, on constate que la température monte rapidement à son maximum puis diminue dans un temps plus au moins lent.

La même chose pour la troisième expérience, on constate une diminution rapide à cause de la présence de l'acier, il permet d'accélérer le transfert de chaleur.

Lors des expériences, la caméra n'a pas pu capter la température de fusion, car elle dépasse l'étendue de mesure de celle-ci.

Pour Le moulage avec poteyage, la courbe a un pic moins prononcé et on remarque que le refroidissement prend plus de temps car le poteyage freine le transfert de chaleur. Il joue un rôle très important dans le refroidissement et il permet d'obtenir un refroidissement identique, donc son choix est très important.

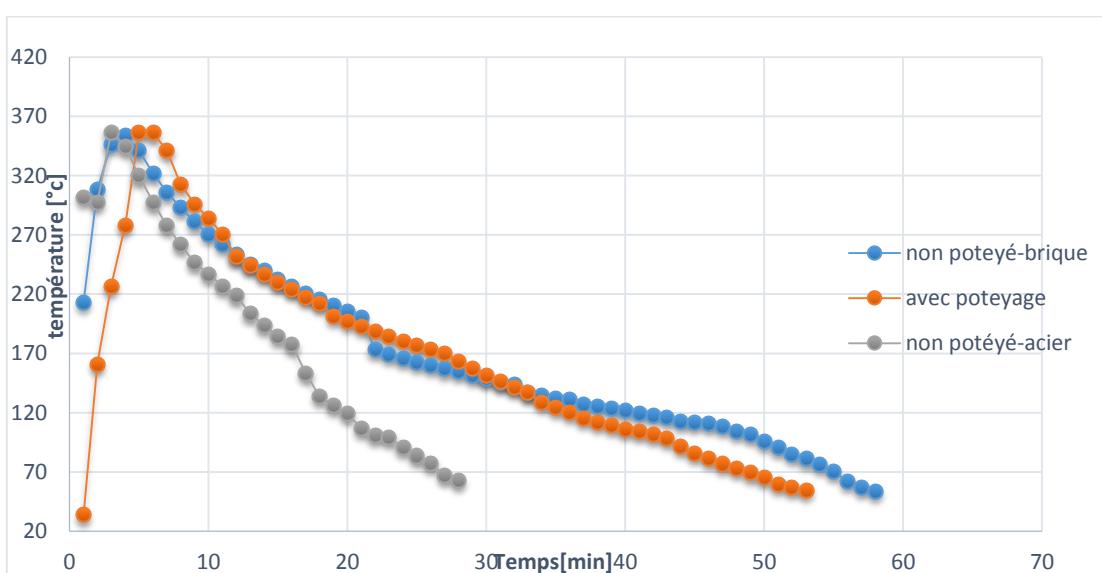


Fig.V.9 : Superposition des courbes obtenues.

V.5 Dureté

Pour les essais de dureté on a utilisé l'appareil du laboratoire des « sciences des matériaux » de la Faculté de technologie. On a obtenus des pièces avec des duretés différentes de l'une à l'autre. L'unité de mesure est en [HRC] (Rockwell de type C).

Tableau V.5 : dureté de pièces obtenues.

Type \ Mesure	En périphérie	Centre
Moulage à l'aire libre	7.8	8
Moule recouvert de la brique réfractaire	12.75	11
Moule recouvert de la pièce en acier	15	12.8
Moulage avec poteyage	11.66	12

- La pièce obtenue par le moulage à l'air libre à une dureté pratiquement la même au centre comme sur la périphérie.
- La pièce obtenue par le moulage recouvert de la brique réfractaire qui a ralenti le refroidissement en haut, a une dureté supérieure sur le périphérique par rapport au centre.
- La pièce obtenue par le moulage recouvert de la pièce en acier qui accélère le refroidissement Le matériau se refroidi rapidement, il subit une trempe donc sa dureté augmente.
- La pièce obtenue après poteyage a une dureté sur la périphérie très proche de la valeur au centre. Le poteyage nous a permis d'avoir un équilibre des caractéristiques mécaniques.

Conclusions Générales et perspectives

Ce travail porte sur l'étude expérimentale de refroidissement des pièces de fonderie et changeant les conditions de solidification pour contrôler au moins dans une certaine mesure les propriétés de la pièce obtenue (caractéristiques mécaniques, comportement thermique ...).

L'aluminium a une température de fusion relativement basse ce qui résulte une facilité de fusion qui présente un avantage certain pour les opérations de fonderie. Son emploi est lié à sa légèreté, sa conductibilité et sa résistance à la corrosion. Les fours à flamme (gaz ou propane) sont répandus pour les fonderies d'alliages d'aluminium.

Le moulage en coquille permet une production rapide et constante dans le temps de pièces aux formes complexes, et au plus près de la pièce finie. Il est nécessaire, afin de concevoir le moule pour obtenir la pièce refroidie souhaitée, de prévoir l'évolution spatiale et temporelle du refroidissement de la pièce. Selon les dimensions, le refroidissement n'est pas uniforme. Les parties minces refroidissent plus rapidement que les parties épaisses. L'alliage chauffé se dilate, il est coulé dans le moule où lors de son refroidissement il se contracte : le retrait apparaît. Les cotes du moule doivent donc tenir compte du retrait, même si en pratique sur des pièces de formes compliquées le retrait n'est pas uniforme. La vitesse de refroidissement dépend de la température ambiante et de l'isolation thermique représentée par le moule (épaisseur, nature du matériau).

Lors de l'examen macrographique de pièces obtenues, on constate que la partie la plus sensible à la vitesse de refroidissement est le bord. Pour une expérience avec un moule sans revêtement, la périphérie de la pièce comporte des défauts causés par un refroidissement très rapide. Pour une expérience avec une interface avec un revêtement, le refroidissement est donc rapide au début de l'expérience (le bord se solidifie) puis ralenti, la dernière partie solidifiée étant le centre, caractérisé par sa structure plus grossière.

L'étude de poteyage permet d'affirmer que le préchauffage du moule n'a pas d'influence sur la morphologie du revêtement. Il est aussi bon de rappeler que l'épaisseur de revêtement joue peu ou pas sur l'état de surface.

En perspective, il est nécessaire de caractériser les matériaux à changement de phase ($\lambda, \rho, \sigma \dots$ etc), pour mieux comprendre leurs comportements thermiques. En plus il est intéressant d'enrichir le travail par une simulation numérique pour un gain en cout et en temps.

ANNEXE 1

Tables des émissivités des matériaux [35].

1 : Matériaux **2** : Caractéristiques **3** : Température de base en °C

4 : Spectre **5** : Emissivité **6** : Référence

T : Spectre total SW = 2-5 µm LW= 8-14 µm LLW= 6,5-20 µm

1	2	3	4	5	6
Acier inoxydable	feuille non traitée, légèrement grattée	70	SW	0.30	9
Acier inoxydable	laminé	700	T	0.45	1
Acier inoxydable	sablé	700	T	0.70	1
Acier inoxydable	type 18 - 8, oxydé à 800 °C	60	T	0.85	2
Acier inoxydable	type 18 - 8, poncé	20	T	0.16	2
Aluminium	anodisé, gris clair, mat	70	LW	0.97	9
Aluminium	anodisé, gris clair, mat	70	SW	0.61	9
Aluminium	anodisé, noir, mat	70	LW	0.95	9
Aluminium	anodisé, noir, mat	70	SW	0.67	9
Aluminium	déposé sous vide	20	T	0.04	2
Aluminium	feuille	27	3 µm	0.09	3
Aluminium	feuille	27	10 µm	0.04	3
Aluminium	feuille, 4 échantillons grattés de façons différentes	70	LW	0,03 0,06	9
Aluminium	feuille, 4 échantillons grattés de façons différentes	70	SW	0,05 0,08	9

Aluminium	feuille anodisée	100	T	0.55	2
Aluminium	fonte, nettoyée sous pression	70	LW	0.46	9
Aluminium	fonte, nettoyée sous pression	70	SW	0.47	9
Aluminium	fortement patiné	17	SW	0,83 0,94	5
Aluminium	oxydé, fortement	50	T	0,2	1
		500		0,3	
Aluminium	plaque polie	100	T	0.05	4
Aluminium	poli	50	T	0,04	1
		100		0,06	
Aluminium	poli, feuille	100	T	0.05	2
Aluminium	rugosifié	27	3 µm	0.28	3
Aluminium	rugosifié	27	10 µm	0.18	3
Aluminium	surface brute	20	T	0,06	1
		50		0,07	
Aluminium	tel quel, feuille	100	T	0.09	2
Aluminium	tel quel, plaque	100	T	0.09	4
Aluminium	trempé dans du HNO ₃ , plaque	100	T	0.05	4
Amiante	ardoise	20	T	0.96	1
Amiante	Carrelage pour sol	35	SW	0.94	7
Amiante	panneau	20	T	0.96	1
Amiante	papier	40	T	0,93 0,95	1
		400			
Amiante	poudre		T	0,40 0,60	1

Amiante	toile		T	0.78	1
Argent	poli	100	T	0.03	2
Argent	pur, poli	200	T	0,02	1
		600		0,03	
Argile	cuite	70	T	0.91	1
Asphalte routier		4	LLW	0.967	8
Béton		20	T	0.92	2
Béton	allée	5	LLW	0.974	8
Béton	brut	17	SW	0.97	5
Béton	sec	36	SW	0.95	7
Bois		17	SW	0.98	5
Bois		19	LLW	0.962	8
Bois	blanc, humide	20	T	0,7 0,8	1
Bois	chêne raboté	20	T	0.90	2
Bois	chêne raboté	70	LW	0.88	9
Bois	chêne raboté	70	SW	0.77	9
Bois	contreplaqué, finition lisse, sec	36	SW	0.82	7
Brique	silice de dinas, non émaillée, brute	1000	T	0.80	1
Brique	silice de dinas, réfractaire	1000	T	0.66	1
Brique	Sillimanite, 33 % SiO ₂ , 64 % Al ₂ O ₃	1500	T	0.29	1
Bronze	bronze de phosphore	70	LW	0.06	9

Références et tables

1	Mikaél A.Bramson : <i>Infrared Radiation,A Handbook for Applications</i> .Plenum press,N.Y.
2	William L.Wolfe, George J. Zissis : <i>The Infrared Handbook</i> , Office of Naval Research, Department of Navy. Washington, D.C.
3	Madding,R.P.: <i>Thermographic Instruments and systems</i> .Madison,Wisconsin :University of Wisconsin - Extension, Department of Engineering and Applied Science.
4	William L.Wolfe : <i>Handbook of Military Infrared Technology</i> , Office of Naval Research, Department of Navy. Washington, D.C.
5	Jones, Smith, Probert : <i>External thermography of buildings...</i> Proc. of the Society of Photo - Optical Instrumentation Engineers, vol. 110, Industrial and Civil Applications of Infrared Technology. London, June 1977.
6	Paljak, Pettersson : <i>Thermography of Buildings</i> .Swedish Building Research Institute. Stockholm, 1972.
7	Vlcek, J : <i>Determination of emissivity with imaging radiometers and some emissivities at $\lambda = 5 \mu\text{m}$</i> . Photogrammetric Engineering and Remote Sensing.
8	Kern : <i>Evaluation of infrared emission of clouds and ground as measured by weather satellites</i> . Defence Documentation Center, AD 617 417.
9	Öhman, Claes : <i>Emittansmätningar med AGEMA E - Box</i> .Teknisk rapport, AGEMA 1999. (Emittance measurements using AGEMA E - Box.Techical report,AGEMA 1999.)

ANNEXE 2

1. Généralités sur l'aluminium

L'aluminium est l'élément chimique de numéro atomique 13, de symbole Al. Il appartient au groupe 13 du tableau périodique ainsi qu'à la famille des métaux pauvres. Le corps simple aluminium est un métal malléable, de couleur argent, remarquable pour son inaltérabilité et sa faible densité [48].

Symbole : Al

Point de fusion : 660,3 °C

Masse atomique : 26,981539 u

Densité : 2,7 g/cm³

Numéro atomique : 13

Configuration électronique : [Ne] 3s²3p¹



Fig.1 : Les lingots d'aluminium utilisés dans les fonderies [49].

2. Historique

La première apparition de l'aluminium était en 1854 lors d'une présentation à l'académie des sciences par le chimiste français Sainte-Claire Deville, sous la forme d'un lingot. Cette pièce

avait été obtenue par voie chimique. En 1886 il y'a eu l'invention du procédé d'électrolyse l'aluminium par Paul Héroult (France) et Charles Martin Hall (USA).

Depuis, l'aluminium a connu un développement très important grâce notamment à son utilisation dans les industries ayant attrait au transport : aviation, automobile, marine .Il est aussi employée dans l'emballage, le bâtiment, l'électricité, la mécanique... [48].

3. Fabrication d'aluminium

L'aluminium est un métal très répandu sur la terre, c'est le troisième élément après l'oxygène et le silicium. Les bauxites qui sont des roches riches en aluminium.

4. Production d'alumine

La bauxite est le minerai le plus utilisé pour obtenir de l'alumine, matière intermédiaire nécessaire à la fabrication de l'aluminium. La bauxite contient de 40 à 60% d'oxyde d'aluminium hydraté mélangé à de la silice et à de l'oxyde de fer.

5. Principales caractéristiques d'aluminium

En tonnage, la production d'aluminium ne représente que 2% environ de celle des aciers Cependant, ce métal et ses alliages arrivent en seconde position dans l'utilisation des matériaux métalliques. L'aluminium doit cette place à un ensemble de propriétés qui en font un matériau remarquable. L'aluminium et ses alliages prennent encore aujourd'hui une place importante dans les différents domaines de l'industrie. Son utilisation s'accroît de jour en jour grâce à ses propriétés particulières.

6. Types d'alliages d'aluminium utilisés dans la fonderie

L'aluminium pur ne présente que peu d'intérêt, car ses propriétés physico-chimiques sont médiocres. Ses alliages, eux, sont des matériaux de choix dans des secteurs comme l'aéronautique et l'automobile [50].

On distingue deux grandes classes d'alliages d'aluminium :

a) les alliages corroyés : produits obtenus par des procédés de déformation plastique à chaud ou à froid tels que le filage, le laminage

b) les alliages de moulage : obtenus par fonderie seulement, on trouve :

- ✓ **Les alliages Al-Si :** Ce sont numériquement et industriellement les plus importants parmi les alliages moulés.

Exemple : Al-Si 13 : alpax : bonne coulabilité, utilisé pour la fabrication de blocs et carters de moteur et de boîte de vitesse, appareillage électrique, cycle, bâtiment.

- ✓ **Alliages Al-Cu :** Ces alliages présentent :

- une aptitude au moulage variable mais assez médiocre
- une résistance à la corrosion insuffisante en milieu agressif marin
- une bonne usinabilité

Exemple : Al-Cu5MgTi : caractéristiques mécaniques les plus élevées (statique, endurance, fatigue).

Utilisation : aéronautique, armement, véhicules divers

- ✓ **Alliages Al-Zn**

Alliages autotrempants

- ✓ **Alliages Al-Mg :**

- usinage facile
- bonne aptitude à l'anodisation
- bel aspect après polissage
- excellente tenue à la corrosion atmosphérique ou marine

- ✓ **Alliages Al-Mn :**

Température de début de fusion élevée

- ✓ **Alliages Al-Sn :**

Utilisé pour les coussinets et pièces de frottements

- ✓ **Autres éléments d'alliage :**

Aluminium Titane, Lithium : permet d'alléger les structures à résistance égale.

Résumé

Dans l'industrie, le moulage par gravité prend une place très importante, il est l'un des techniques de fabrication utilisées dans la plupart des processus industriels. L'objectif de cette étude est l'analyse du rôle des facteurs sur le refroidissement à l'interface moule/métal pour un alliage d'aluminium. Des expériences de solidification radiale sont réalisées. Les courbes de refroidissement du métal et du moule sont traitées à l'aide du logiciel de la caméra thermique afin de déterminer l'évolution de la température en fonction de temps. Les différents revêtements sont étudiés, conducteur et isolant à différents cas. Les résultats obtenus permettent de caractériser les conditions de refroidissement à l'interface suivant les conditions expérimentales retenues.

Mots clés : moulage en coquille, fonderie, refroidissement, caméra thermique.

Abstract

In the industry, gravity casting is very important; it is one of the manufacturing used in most industrial processes. This work consists in carrying out an experimental study based on cooling at the mold / metal interface for pure aluminum. Radial solidification experiments are carried out. The cooling curves of the metal and the mold are processed using the thermal camera software to determine the evolution of the temperature as a function of time. The different coatings are studied, conductive and insulating in different cases. The results obtained make it possible to characterize the cooling conditions at the interface according to the experimental conditions chosen.

Key words: shell molding, foundry, and cooling, thermal camera.

ملخص

في الصناعة تعد القولبة بالجاذبية أمراً مهماً للغاية، فهو أحد أساليب التصنيع المستخدمة في معظم العمليات الصناعية. الهدف من هذه الدراسة هو تحليل دور العوامل في التبريد لواجهة (القالب / المعادن) للألومنيوم النقفي. تتم معالجة منحنيات التبريد للمعادن والقالب باستخدام برنامج الكاميرا الحرارية لتحديد تطور درجة الحرارة كدالة للوقت. تتم دراسة الطلاءات المختلفة والموصلة والعزل في حالات مختلفة. تتيح النتائج التي تم الحصول عليها وصف ظروف التبريد في الواجهة وفقاً للظروف التجريبية التي تم اختيارها.

الكلمات المفتاحية: شل صب، مسبك، التبريد، القولبة وآلية تصوير حرارية.