

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

**UNIVERSITE "SAAD DAHLEB", BLIDA**

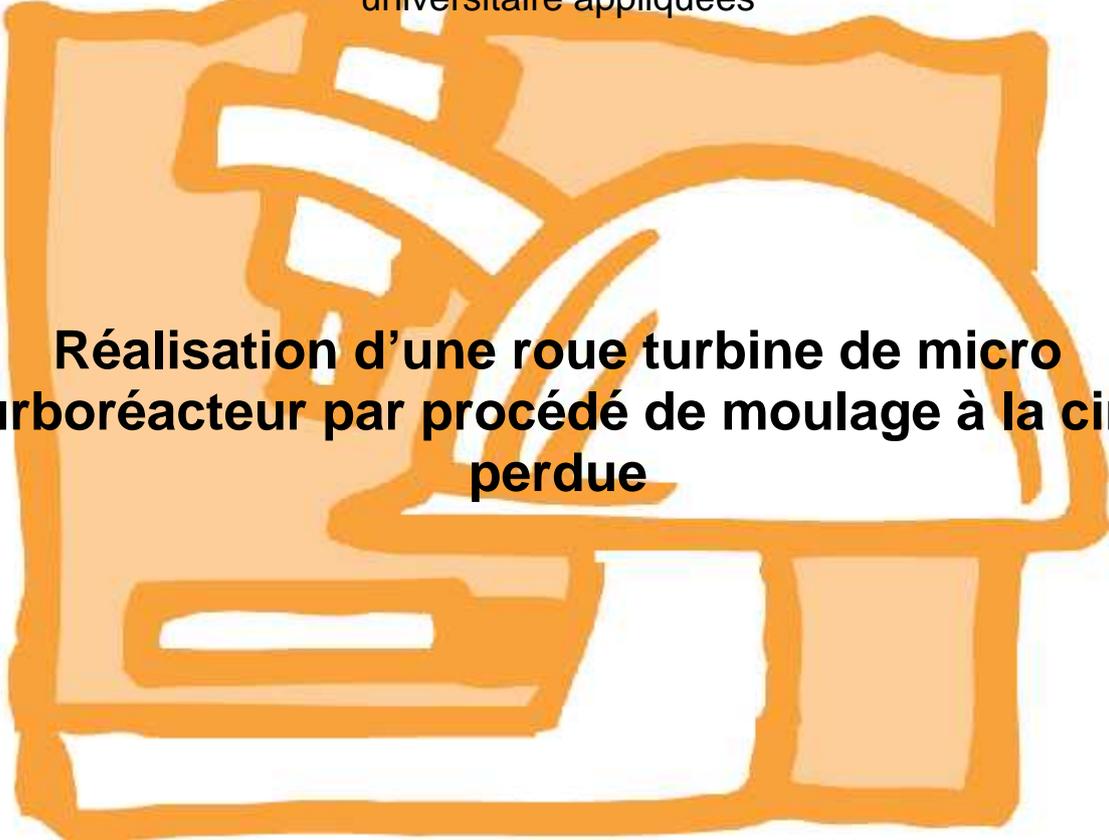
**Faculté des sciences de l'ingénieur**

**Département d'aéronautique**

**Niveau : 3<sup>ème</sup> année D.E.U.A**

**Option : propulsion**

Mémoire de fin d'études pour obtenir un diplôme d'études  
universitaire appliquées



**Réalisation d'une roue turbine de micro  
turboréacteur par procédé de moulage à la cire  
perdue**

Réalisé par:

Benyahia Adel

Ait Said Jugurtha

Encadré par:

Mr Bentrads Hocine

Année universitaire  
2006 - 2007

## **Remerciements:**

Nous remercions avant tout les gens de la section Modelage de la S.N.V.I, particulièrement Mr BENMIRA NOURDINE et Mr MUSTAPHA pour leur aide et disponibilité.

Nous remercions notre promoteur Mr BENTRADE HOCINE pour ses idées.

## **Dédicace**

Nous dédions notre travail avant tout à nos chers parents auxquelles nous exprimons notre profonde gratitude ainsi qu'à nos familles respectives.

Par Adel

A mes frères HIKMET et MEHDI.

A mes amis, KAMEL, MEROUANE et 2FIK.

Spéciale dédicace à mon parrain.

# Sommaire

Introduction générale.....	6
Chapitre 1 : Généralités sur le turboréacteur.....	7
1 Historique.....	8
2 Principe de la propulsion.....	8
3 Principe de propulsion d'un turboréacteur.....	9
4 Etude thermodynamique.....	10
4.1 Le cycle d'un turboréacteur.....	10
4.2 Les performances.....	12
5 La turbine.....	14
5.1 Rôle.....	14
5.2 Description et type de turbine.....	14
5.3 Principe de fonctionnement de la turbine.....	15
5.4 La turbine centrifuge.....	15
5.5 La turbine axiale.....	16
5.6 Etude thermodynamique de la turbine.....	19
5.7 Le vrillage.....	20
5.8 Disposition d'un étage.....	21
5.9 Les contraintes sur les turbines.....	21
5.10 Refroidissement et matériaux.....	22
6 Domaine d'application du miniturboréacteur.....	23
Chapitre 2 : Procède de moulage.....	26
1 Introduction.....	27
2 Le moulage.....	27
2.1 Le modèle.....	27
2.2 Le moule.....	28
2.2.1 Moule permanent.....	28
2.2.2 Moule non permanent.....	30
2.3 Les événements.....	30
2.3.1 Traces des événements.....	31
2.3.2 Emplacement des événements.....	32
3 Différentes parties d'une coulée.....	33
3.1 Entonnoir.....	33
3.2 Jets de coulée (descentes).....	34
3.3 Canaux de coulée.....	36
3.4 Attaques de coulée.....	37

4 Métallurgie.....	39
5 Moulage a la cire perdue.....	41
5.1 Pièces moulées par le procédé à la cire perdue.....	44
5.2 Avantages, inconvénients et résultats.....	45
Chapitre3 : Moulage de la roue turbine.....	46
1 introduction.....	47
2 Recherche des données.....	47
3 Schématisation.....	47
4 Calcul des côtes plus retrait.....	48
4.1 Définition du retrait.....	48
4.2 Exemple de calcul de côte plus retrait.....	48
5 Réalisation du moule en céramique.....	49
5.1 Réalisation de l'épure.....	49
5.2 Réalisation du support modèle.....	49
5.3 Réalisation du disque modèle.....	50
5.4 Réalisation des ailettes.....	52
5.5 Les clés.....	54
5.6 Fabrication des moules.....	54
5.7 Le modèle en cire.....	57
5.8 Le moule en céramique.....	58
6 La coulée.....	61
6.1 L'alliage de coulée.....	62
7 Le démoulage.....	64
8 Problèmes rencontrés.....	65
Conclusion.....	67
Liste des figures.....	68
Liste des tableaux.....	70

# Liste des figures

Figure (1-1) : L'expérience du ballon gonflé qui illustre le principe de la propulsion...	8
Figure (1-2) : Coupe annotée d'un turboréacteur.....	9
Figure (1-3) : Le cycle d'un turboréacteur suivant T et S.....	10
Figure (1-4) : Diagramme d'évolution des paramètres dans un turboréacteur.....	11
Figure (1-5) : Turbine centrifuge dans un miniturboréacteur.....	14
Figure (1-6) : Schéma détaillé d'une turbine axiale.....	15
Figure (1-7) : Schématisation du fonctionnement d'une turbine centrifuge.....	15
Figure (1-8) : Coupe annotée d'un turboréacteur possédant une turbine liée.....	16
Figure (1-9) : Coupe d'un turbopropulseur possédant une turbine libre.....	17
Figure (1-10-a) : Coupe d'un étage de turbine à action.....	17
Figure (1-10-b) : Les vitesses dans une turbine à action.....	17
Figure (1-11-a) : Coupe d'un étage d'une turbine à réaction.....	18
Figure (1-11-b) : Les vitesses dans une turbine à réaction.....	18
Figure (1-12) : Graphique des variations des paramètres des gaz dans un étage turbine.....	19
Figure (1-13) : Schéma d'une turbine.....	20
Figure (1-14) : Schéma illustrant la disposition d'un étage.....	21
Figure (1-15) : Aube turbine percée au laser.....	22
Figure (1-16) : Coupe annotée d'un miniturboréacteur.....	23
Figure (1-17) : Drone en vol.....	24
Figure (1-18) : différent types de miniturboréacteur avec les missiles qu'ils équipent.....	25
Figure (1-19) : Avion miniature avec son miniturboréacteur.....	25
Figure (2-1) : Moule de couteau en pierre.....	27

Figure (2-2) : Le modèle et son empreinte.....	27
Figure (2-2) : Le modèle et son empreinte.....	28
Figure (2-4) : Moule en pierre d'une serpe en bronze.....	29
Figure (2-5) : Le moulage au renversé.....	29
Figure (2-6) : Les événements.....	30
Figure (2-7) : Tracés d'événements.....	31
Figure (2-8) : Différents types d'événements.....	32
Figure (2-9): Entonnoirs de coulée.....	33
Figure (2-10-a): Evasement des entonnoirs de coulée.....	33
Figure (2-10-b): Evasement des entonnoirs de coulée.....	34
Figure (2-11) : Jets de coulée.....	34
Figure (2-12) : Le passage de crasses dans la pièce.....	35
Figure (2-13) : Type de jets.....	35
Figure (2-14) : Les canaux de coulée.....	36
Figure (2-15) : Les attaques de coulée et leurs sections.....	37
Figure (2-16) : Petites pièces en bronze : 80g.....	38
Figure (2-17) : Groupage de pièces : 260 à 1580g.....	38
Figure (2-18) : Diagramme d'équilibre Fer-Carbone pour les aciers au Carbone Ou faiblement alliés.....	39
Figure (2-19) : reproduction par cire de la pièce à fabriquer.....	40
Figure (2-20) : Montage des cires en grappes.....	41
Figure (2-21) : Enrobage des grappes.....	41
Figure (2-22) : Evacuation du modèle en cire.....	42
Figure (2-23) : Coulée du métal dans le moule.....	42
Figure (2-24) : Séparation des pièces et contrôle.....	43
Figure (2-25) : Pièces de turbine obtenues par moulage de précision à la cire perdue.....	43

Figure (2-26) : Pièces pour l'aéronautique obtenues par moulage de précision à la cire perdue.....	43
Figure (3-1) : Vue trimétrique de la roue ailette.....	46
Figure (3-2) : Vue trimétrique d'une ailette.....	46
Figure (3-3) : Support modèle après chariotage et alésage.....	48
Figure (3-4) : Disque après chariotage et avant mise en forme.....	49
Figure (3-5) : Disque modèle emboîté dans l'alésage disque support prêt à être charioté.....	49
Figure (3-6) : Disque modèle peint emboîté dans l'alésage disque support.....	50
Figure (3-7) : Disque modèle emboîté dans le disque support durant la réalisation de la pente à 7°.....	50
Figure (3-8) : Image du support avec la partie inférieure du moule fixée par une vis à bois.....	51
Figure (3-9) : Disque modèle avec axe porte disque et perçage sur sa circonférence.....	51
Figure (3-10) : Cire de démoulage.....	52
Figure (3-11) : Image d'une coulée de mastic pour réaliser une ailette.....	52
Figure (3-12) : Image d'une roue modèle avec clés.....	53
Figure (3-13) : Assemblage de la partie basse du moule et du modèle pour la réalisation de la partie haute du moule.....	54
Figure (3-14) : L'élastomère et son durcisseur dans leurs emballages d'origine.....	54
Figure (3-15) : Coulée de l'élastomère lors de la réalisation de la partie haute du moule.....	55
Figure (3-16) : Les deux parties du moule côte à côte.....	55
Figure (3-17) : Coulée de la cire dans le moule pour obtenir le modèle en cire.....	55
Figure (3-18) : Démoulage du modèle en cire.....	56
Figure (3-19) : Cire type AQUA.....	56
Figure (3-20) : Modèle en cire équipé d'épingles.....	57
Figure (3-21) : Contenant en plâtre avec de la céramique.....	57
Figure (3-22) : Modèle en cire enduit de céramique sur sa partie inférieure.....	58

Figure (3-23) : Moule en céramique prêt mais pas encore sec.....	58
Figure (3-24) : Etuve contenant un moule.....	59
Figure (3-25) : Moule en céramique a la sortie du four.....	59
Figure (3-26) : Coulée du métal dans le moule.....	60
Figure (3-27) : Moule avant coulée.....	60
<b>Figure (3-28) : Graphe représentant les variations des caractéristiques mécaniques moyennes en fonction de la température.</b>	
Figure (3-29) : Démoulage de la pièce.....	63
Figure (3-30) : Pièce dont les ailettes ne sont pas sorties lors de la coulée.....	64
Figure (3-31) : Pièce dont quelque ailettes sont sorties mais avec défauts.....	64
Figure (3-32) : Pièce dont quelque ailettes sont sorties mais avec défauts.....	65

## Liste des tableaux

Tableau (2-1) : Tableau des températures des liquidus.....	39
Tableau (3-1) : Tableau regroupant les côtes plus retraits de la turbine à réaliser.....	47

# Introduction générale

La turbine est un organe essentiel pour le turboréacteur car elle transforme l'énergie cinétique des gaz de combustion en énergie mécanique.

La réalisation de ce type d'organe se fait par usinage ou par moulage.

Le fait que la turbine travaille dans des conditions draconiennes de température et de pression exige l'utilisation de matériaux réfractaires, d'alliages spéciaux et de méthodes de réalisations spécifiques.

Dans notre mémoire nous nous sommes penchés sur l'élaboration d'une micro turbine pour miniturboréacteur d'une poussée de 100 N, par procédé de moulage à la cire perdue.

Notre travail est repartie en trois chapitres où le premier traite des généralités à propos du turboréacteur et des applications du miniturboréacteur, dans le second nous avons présenté le moulage en générale et plus particulièrement le procédé de moulage à la cire perdue, enfin dans le troisième chapitre, nous rapportons l'essentielle du travail effectué au niveau de la SNVI lors de l'application du procédé de moulage à la cire perdue à la réalisation de la mini turbine.

## 1/ Introduction

L'appellation turbine à gaz désigne en général les machines thermiques génératrices de gaz, développant un travail et permettant de produire une poussée selon le principe de **Newton** de **l'action** et de **la réaction**.

La turbine à gaz adaptée à la propulsion a été retenue dès 1930 par les suisses qui avaient amorcé la production industrielle.

En réalité, l'idée de moteur à réaction avait germé depuis fort longtemps dans différents pays, tels que le moteur développé par l'ingénieur français René Lorin qui est à l'origine du statoréacteur.

Le réacteur a occupé une place importante et a montré son efficacité dans le développement de l'aviation civile et militaire.

## 2/ Principe de la propulsion

La propulsion repose sur le deuxième principe de Newton qui n'est autre que l'action et la réaction ; toute action d'un corps sur un autre corps produit une réaction directement opposée et égale.

Le schéma ci-dessous illustre cette idée sur l'exemple du ballon gonflé qui une fois relâché va se déplacer dans le sens opposé de l'éjection des gaz.

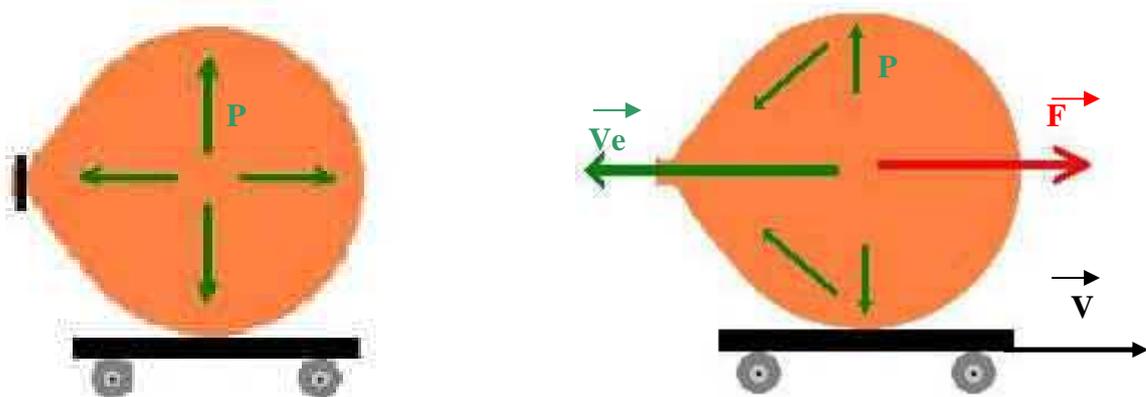


Figure (1-1) : l'expérience du ballon gonflé qui illustre le principe de la propulsion.

### 3/ Principe de propulsion d'un turboréacteur

Dés 1680, Newton a démontré que si l'on accélère l'écoulement d'un gaz par introduction d'énergie en un point donné, il se produit une force de réaction sur les parois de l'enceinte contenant ce gaz. L'idée de Whittle était que l'on devait construire un moteur comportant un compresseur à grand rendement analogue au turbocompresseur des moteurs à piston capable d'aspirer de l'air extérieur, de le comprimer (par un compresseur axial ou centrifuge) et de le refouler à grande vitesse dans une chambre de combustion.

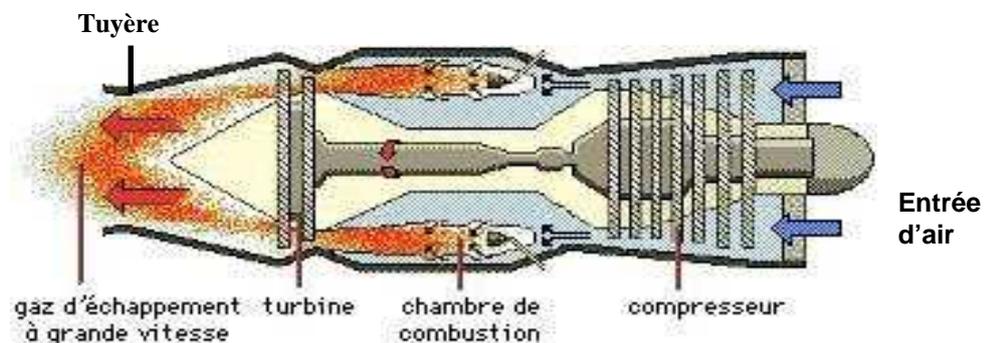


Figure (1-2) : Coupe annotée d'un turboréacteur.

Dans cette chambre, un combustible liquide serait injecté sous forme de fines gouttelettes par l'intermédiaire d'un injecteur spécial et brûlerait en convertissant l'énergie calorifique contenue dans le carburant en une énergie transmise au débit d'air, veine de gaz chauds, doués d'une énergie accrue. Cette veine gazeuse serait ensuite distribuée dans les aubes d'une turbine. Celle-ci, calée sur le même arbre que le compresseur, absorberait une grande partie de l'énergie de la veine gazeuse.

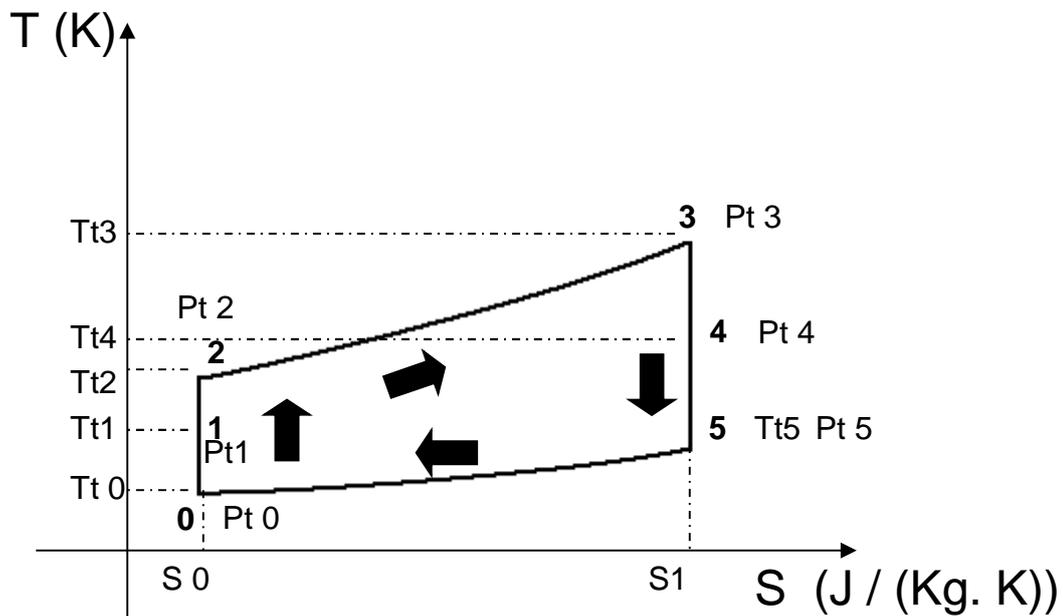
Cependant, l'énergie restante dans la veine serait suffisante pour engendrer une poussée utile en s'échappant dans l'atmosphère par un canal convergent approprié. Le résultat net de toutes les forces vers l'amont et vers l'aval s'exerçant sur les diverses sections du moteur (conduit air /gaz, compresseur, chambre de combustion, et turbine) se matérialiseraient par une réaction propulsive importante vers l'avant.

## 4/ Etude thermodynamique

L'étude thermodynamique du turboréacteur nous permet de définir les états du cycle thermodynamique et de déterminer les performances du moteur.

### 4.1/ Le cycle d'un turboréacteur

Le cycle d'un turboréacteur obéit au cycle défini par la transformation thermodynamique du cycle de Brayton qui est illustré par la **Figure (1-3)** dans un diagramme (T-S) représentant l'évolution de la température (T) en fonction de l'entropie (S) et de la pression (P).



**Figure (1-3) : Le cycle d'un turboréacteur suivant T et S.**

Avec :

**T (K)** : température des gaz.

**S (J / (Kg. K))** : l'entropie des gaz.

**Pt** : pression totale aux différentes stations.

**Tt** : température totale aux différentes stations.

#### a) Explication du cycle :

En effet, la transformation de l'état (0 à 1) définit une augmentation de la pression statique suite au freinage de l'écoulement isentropique et adiabatique de l'air dans l'entrée d'air divergente, il en résulte **Pt 0 = Pt 1**.

Toute fois, le fluide de travail dans la phase (1-2) subit une transformation thermodynamique adiabatique lui permettant d'atteindre une pression finale  $P_{t2}$  et une augmentation de température totale  $T_{t2}$  à l'état 2.

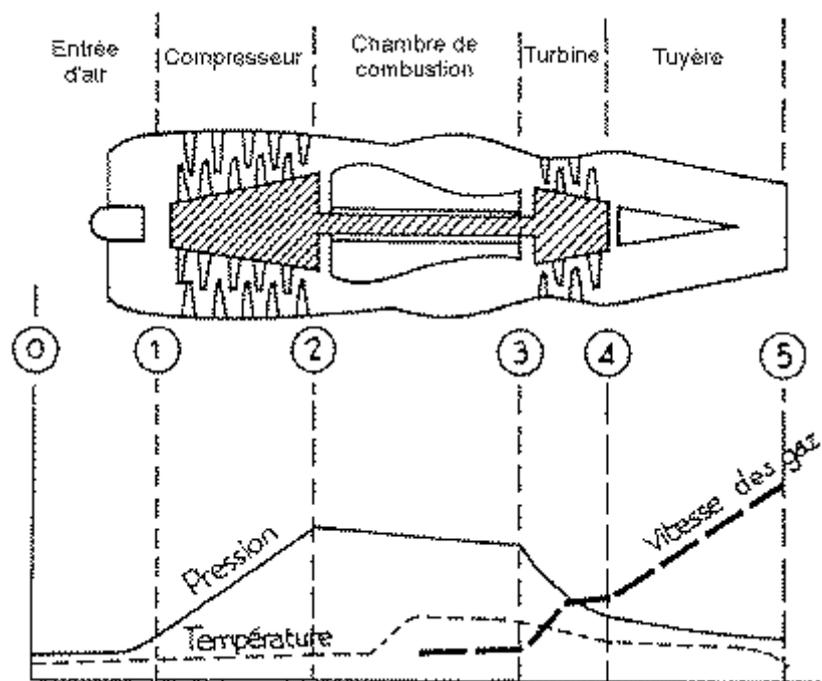
Cependant la transformation (2-3) caractérise la phase d'apport de chaleur dû à la combustion à pression constante du mélange air/ carburant ce qui nous donne une température élevée à l'état 3.

Dans la phase (3-4) on assiste à une détente adiabatique du fluide de travail qui à pour résultat  $P_{t4}$  et  $T_{t4}$  tout en produisant une énergie cinétique de rotation dans une roue mobile produisant une énergie mécanique.

La détente de l'air chaud se poursuivant dans la phase (4-5) engendre une énergie cinétique qui est à l'origine de la variation de la quantité de mouvement qui assure la propulsion.

### b) Evolution des paramètres P, T, V :

Le fonctionnement d'un turboréacteur peut être illustré par le diagramme d'écoulement des gaz **Figure (1-4)** qui montre l'évolution des paramètres physiques et thermodynamiques définissant l'écoulement dans chaque station, à savoir la pression P, la vitesse V, la température T.



**Figure (1-4) : Diagramme d'évolution des paramètres dans un turboréacteur.**

L'air ambiant est capté par l'entrée d'air qui le décélère et augmente la pression statique jusqu'à l'entrée compresseur en présentant l'air avec une vitesse modérée lui permettant d'aborder les aubages mobiles et fixes garantissant une augmentation de la pression à vitesse axiale presque constante.

Dans la chambre de combustion on assiste à une augmentation de la température au dépend d'une légère chute de pression dû aux pertes de charges de l'écoulement.

Enfin l'énergie de pression sera restituée au fluide par une détente du gaz réalisant une accélération de l'écoulement à travers la turbine et la tuyère.

## 4.2/ Les performances

Les performances de la machine se caractérisent essentiellement par la force de propulsion dite poussée, le rendement thermodynamique et la consommation spécifique.

### Ñ La poussée

La poussée (N) est produite par la tuyère lors de la détente des gaz et de leurs éjections. Elle dépend du débit d'air et de la différence entre la vitesse d'admission et la vitesse d'éjection des gaz. La poussée est exprimée par la relation ci-dessous lorsque la pression des gaz éjectés est égale à la pression environnante et en négligeant le débit carburant.

$$f_{\text{poussée}} = \dot{m} \times (V_{\text{sortie}} - V_{\text{entrée}}) \quad (1-1)$$

Avec :

$\dot{m}$  : Débit massique (Kg/s).

$V_{\text{sortie}}$  : Vitesse d'éjection des gaz (m/s).

$V_{\text{entrée}}$  : Vitesse d'admission dans le moteur (m/s).

### Ñ La puissance calorifique

C'est la puissance totale produite pendant la combustion du carburant dans la chambre de combustion, elle est sous forme de chaleur. Elle représente l'énergie dépensée, cette puissance dépend essentiellement du débit carburant et du pouvoir calorifique spécifique.

$$\dot{Q} = \dot{m}_{\text{fuel}} \times P_{\text{ci}} \quad (1-2)$$

Avec :

$\dot{m}_{\text{fuel}}$  : Débit carburant (Kg/s).

$P_{\text{ci}}$  : Le pouvoir calorifique du carburant, pour le Kérosène le  $P_{\text{ci}}$  a une valeur de  $P_{\text{ci}} = 44800$  KJ/kg.

### Ñ La puissance propulsive

C'est la puissance de propulsion autrement dit la puissance qui permet le déplacement de l'engin, elle dépend de la poussée produite et de la vitesse de déplacement de l'avion.

$$p_p = f \times v \quad (1-3)$$

Avec :

**f** : La poussée (N).

**v = Ventrée** : La vitesse de l'avion (m/s).

### Ñ La puissance utile

Cette puissance correspond à la transformation de l'énergie de chaleur disponible en travail, autrement dit elle représente l'augmentation de l'énergie cinétique du fluide.

$$\dot{W}_u = \frac{1}{2} \dot{m} (v^2_{\text{sortie}} - v^2_{\text{entrée}}) \quad (1-4)$$

Avec :

**$\dot{m}$**  : Débit massique de l'air passant dans le moteur, le débit du carburant étant négligeable (Kg/s).

### Ñ Le rendement propulsif

C'est le rapport de la puissance propulsive par la puissance utile et donc nous renseigne sur la quantité de travail récupérée qui est utilisée pour la propulsion.

$$y_p = p_p / \dot{W}_u = \frac{2V_{\text{entrée}}}{(V_{\text{entrée}} + V_{\text{sortie}})} \quad (1-5)$$

### Ñ Le rendement thermique

C'est le rapport de l'énergie propulsive par l'énergie calorifique qui exprime la quantité d'énergie utilisée pour la propulsion de l'avion par rapport à l'énergie totale produite par le turboréacteur.

$$y_{th} = \frac{\dot{W}_u}{\dot{Q}} \quad (1-6)$$

## 5/ La turbine

### 5.1/ Rôle

La turbine est un élément de la turbomachine qui a pour rôle de transformer l'énergie cinétique des gaz brûlés provenant de la combustion en énergie mécanique permettant d'entraîner le compresseur, les accessoires ainsi qu'un récepteur éventuel.

### 5.2/ Description et type de turbine

Selon que les gaz chauds s'écoulent parallèlement à l'axe de la machine ou perpendiculairement on qualifie le type de turbine d'**axiale** ou **centrifuge**.

Un étage de turbine comprend une partie fixe (redresseur ou distributeur) et une partie mobile (la roue).

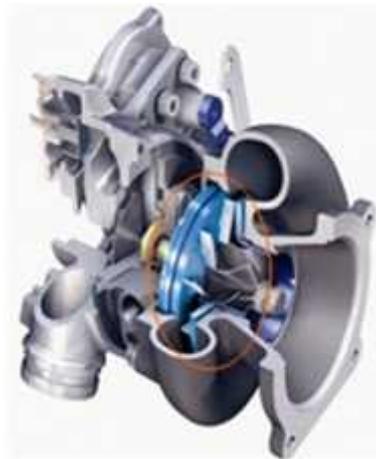


Figure (1-5) : Turbine centrifuge dans un miniturboréacteur.

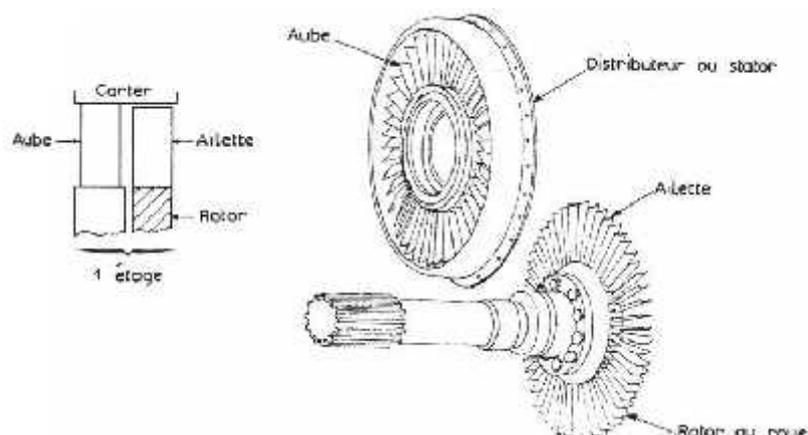


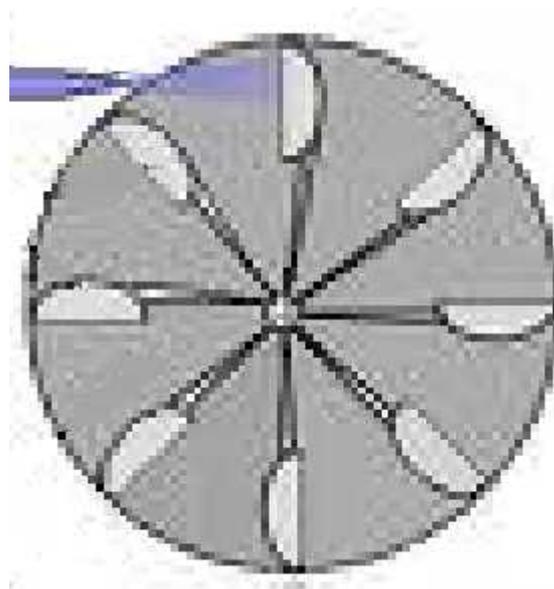
Figure (1-6) : Schéma détaillé d'une turbine axiale.

La turbine centrifuge fut la première à être utilisée du fait de sa simplicité de fabrication mais reste toutefois à faible rendement en comparaison avec la turbine

axiale qui occupe une place dominante dans les moteurs d'avion, cependant la turbine centrifuge est toujours utilisée pour actionner des équipements tel que le turbocompresseur.

### **5.3/ Principe de fonctionnement de la turbine**

En effet, les gaz issus de la combustion pénètrent d'abord la grille d'aubes fixes où la pression des gaz est transformée en vitesse du fait du passage convergent, l'écoulement est dévié dans la direction des profils d'aubes de la roue mobile sur laquelle prennent naissance les forces provoquant la rotation.



**Figure (1-7) : Schématisation du fonctionnement d'une turbine centrifuge.**

Le principe de fonctionnement de la turbine est illustré dans la figure ci-dessus où un injecteur est placé directement à l'impact d'un ensemble de pales libres en rotation qui une fois en mouvement permet de récupérer un travail.

La base d'injection occupe le rôle d'une veine de distribution qui accélère le fluide.

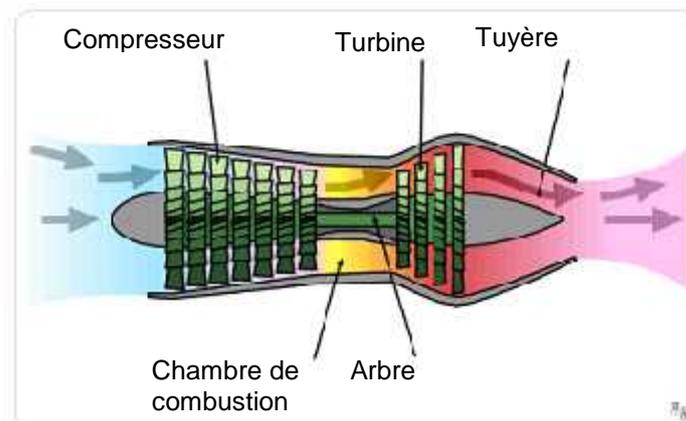
### **5.4/ La turbine centrifuge**

Ce type de turbine fut le premier à être utilisé car plus facile à fabriquer et plus résistant sauf que son rendement est plus faible. La turbine centrifuge est composée d'une roue (rotor) qui reçoit l'air radialement, cet air est guidé par un diffuseur (stator) qui le dirige. L'air s'engouffre entre les aubes de la roue qui sont convergentes et se détend permettant à la turbine de récupérer son énergie de pression mais aussi son entropie qu'elle transforme en couple puis en travail mécanique pour enfin s'échapper axialement vers la tuyère.

### 5.5/ La turbine axiale

La turbine axiale comprend une grille d'aubes fixes et une grille d'aubes mobiles. Selon qu'elle soit liée au compresseur ou non elle est dite respectivement **liée** ou **libre**.

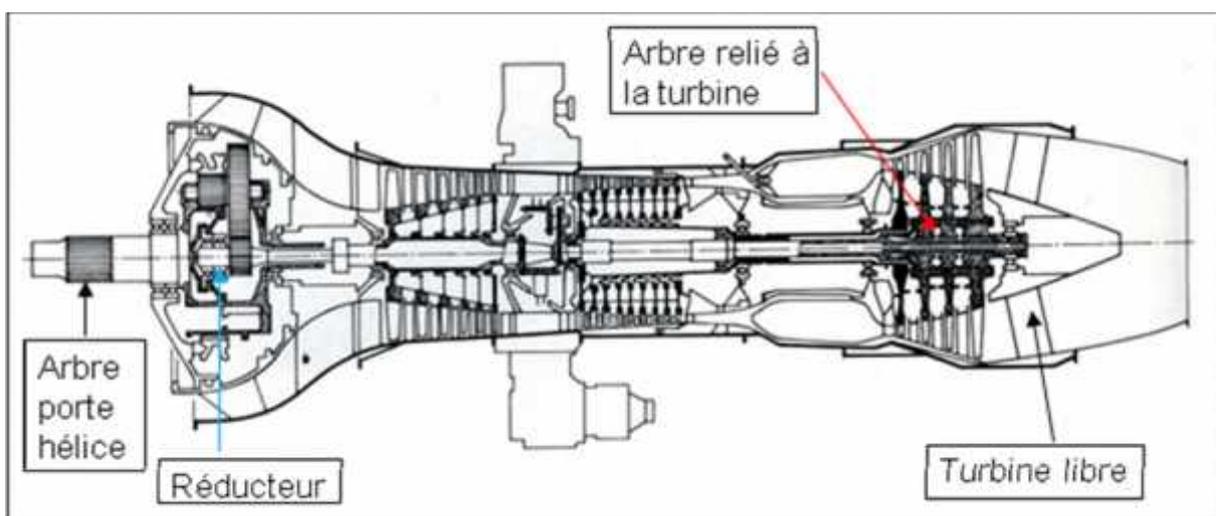
Pour entraîner le compresseur, le rotor est lié à un arbre qui le relie au compresseur, ce type de turbine est désigné par l'appellation **turbine liée** utilisée principalement sur les turboréacteurs.



**Figure (1-8) : coupe annotée d'un turboréacteur possédant une turbine liée.**

Pour les turbopropulseurs qui utilisent les hélices, le type **turbine libre** est utilisé.

La désignation turbine libre est dû au fait que l'arbre fixé sur la turbine n'est pas relié au compresseur mais à un réducteur qui transmet le mouvement à l'arbre porte hélice.

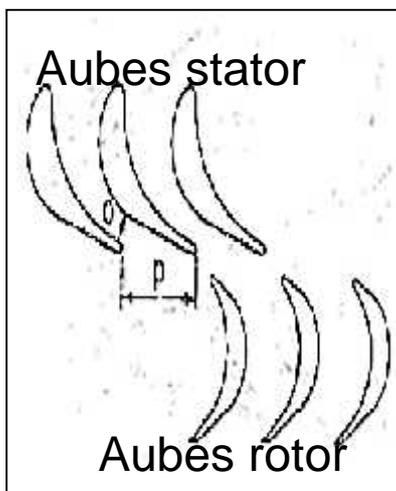


**Figure (1-9) : coupe d'un turbopropulseur possédant une turbine libre.**

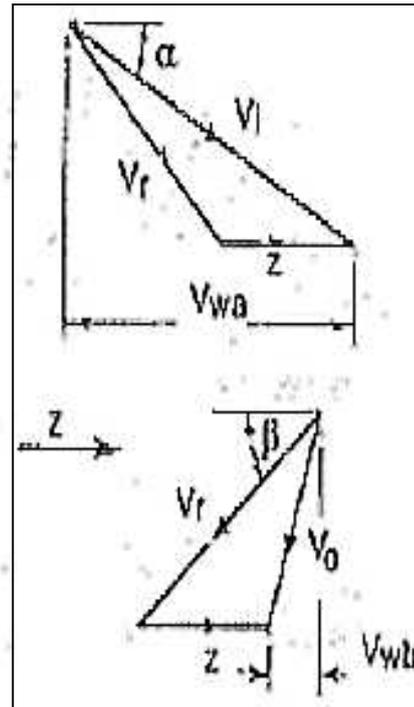
On distingue deux types de turbine axiale :

**a) La turbine à action :**

Dans ce type de turbine c'est surtout l'action des gaz sur les aubes de la roue qui provoque la rotation.



**Figure (1-10-a) : coupe d'un étage de turbine à action.**



**Figure (1-10-b) : les vitesses dans une turbine à action.**

En réalité la détente s'effectue dans le distributeur, la pression à la sortie de la roue mobile est la même qu'à l'entrée, de plus on remarque la forte convergence des sections de passage des grilles distributrices ce qui indique que toute la détente y est effectuée. Le résultat est un diagramme des vitesses similaire à celui présenté sur la **Figure (1-10-b)** et a un degré de réaction nul.

**b) turbine à réaction ou turbine de détente**

Dans ce type de turbine c'est le résultat des forces aérodynamiques sur le profil qui entraîne la rotation de l'attelage mobile. La détente s'effectue en partie dans le distributeur et en partie dans la roue mobile.

Le degré de réaction qui caractérise l'énergie perdue dans le rotor par rapport à celle de l'étage varie selon le type de turbine. Pour une valeur de réaction  $R^\circ$  donnée, le diagramme des vitesses **Figure (1-11-b)** fait apparaître la vitesse de

rotation, la vitesse absolue de l'écoulement et la vitesse relative. On note que pour  $R^\circ = 0.5$  il y a une symétrie des pôles de vitesse.

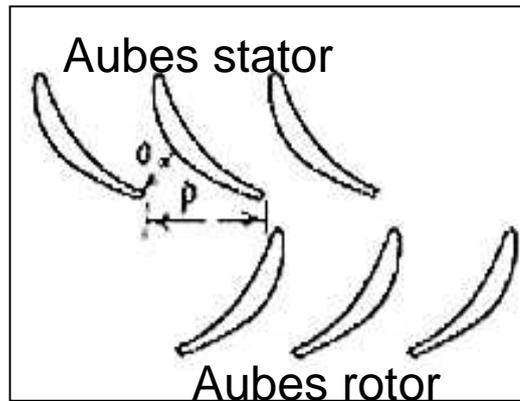


Figure (1-11-a) : coupe d'un étage d'une turbine à réaction.

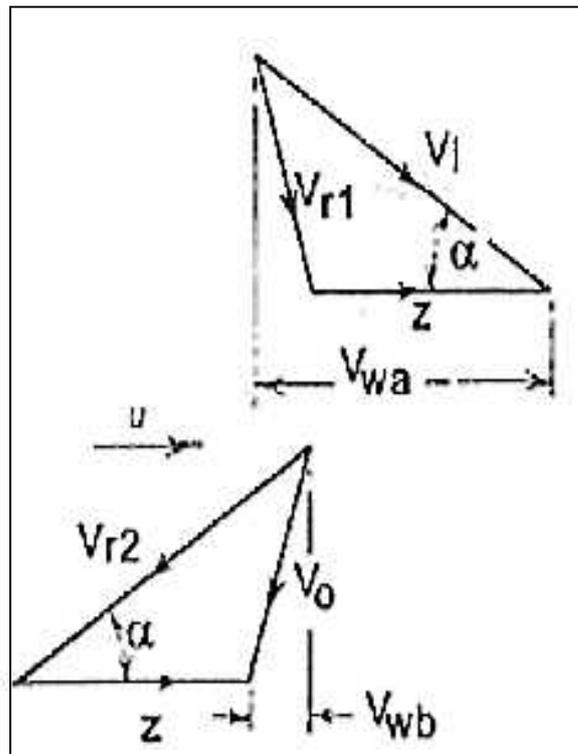


Figure (1-11-b) : les vitesses dans une turbine à réaction.

## 5.6/ Etude thermodynamique de la turbine

### a) Paramètres physiques

L'évolution des grandeurs thermodynamiques P, T et V sont illustrées dans la figure ci-dessous.

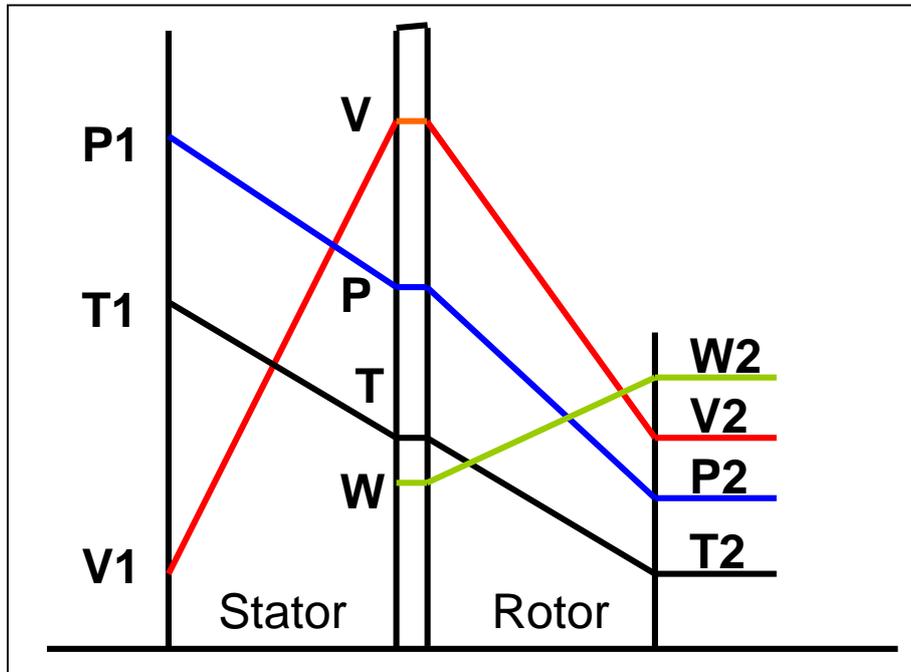


Figure (1-12) : graphique des variations des paramètres des gaz dans un étage turbine.

On constate que la pression et la température diminuent respectivement de l'entrée à la sortie, caractérisant la détente des gaz chauds dans l'étage.

Toutefois la vitesse absolue augmente dans le distributeur donnant une énergie à l'écoulement, puis diminue dans la roue mobile ce qui s'explique par l'énergie cinétique de rotation gagnée par la roue.

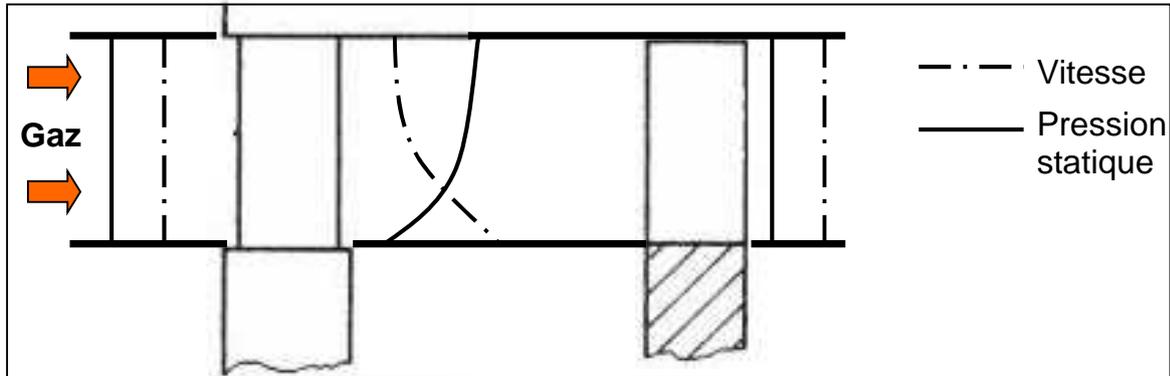
Pendant la vitesse relative quant à elle, augmente, réalisant ainsi l'équilibre des vitesses et permettant d'entraîner un autre étage turbine s'il y a lieu.

### b) Caractéristiques

La détente à travers la turbine est caractérisée par :

- Le taux de détente  $f_t$  qui ne dépasse généralement pas une valeur de par étage.
- La chute de température.

- Les vitesses.
- Le couple engendré qui dépend du débit de gaz et de la variation d'énergie dans l'étage.
- Le rendement qui est généralement de l'ordre de **92%**.



**Figure (1-13) : Schéma d'une turbine**

Pour cela on définit alors les grandeurs suivantes :

- Le taux de détente :  $f_t = \frac{p_{t2}}{p_{t1}}$ .
- La chute de température :  $\ddagger_t = \frac{T_{t2}}{T_{t1}}$ .
- Le travail théorique :  $\dot{w}_t = \dot{m}_0(1+f) c_{pt}(T_{t4}-T_{t5})$ .
- Le rendement turbine :  $y_t = \frac{h_{t4}-h_{t5'}}{h_{t4}-h_{t5}}$ .

Ou :

- $\dot{m}_0$  : Débit massique de l'air (Kg/s).
- $T_{t4}$  : La température totale entrée turbine (°K).
- $T_{t5}$  : La température théorique totale sortie turbine (°K).
- $T_{t5'}$  : La température réelle totale sortie turbine (°K).
- $f$  : Le dosage.

### 5.7/ Le vrillage

Le couple fournit par la turbine est déterminé par le débit des gaz et la variation d'énergie. Si l'énergie des gaz est suffisamment absorbée, le mouvement de rotation des gaz, donné par le distributeur est redressé pour permettre un bon écoulement à l'échappement.

Dans le distributeur la vitesse augmente et la pression diminue du pied à l'extrémité des aubes.

### 5.8/ Disposition d'un étage

La disposition ci-dessous illustre une disposition typique d'un étage de turbine distributeur-roue.

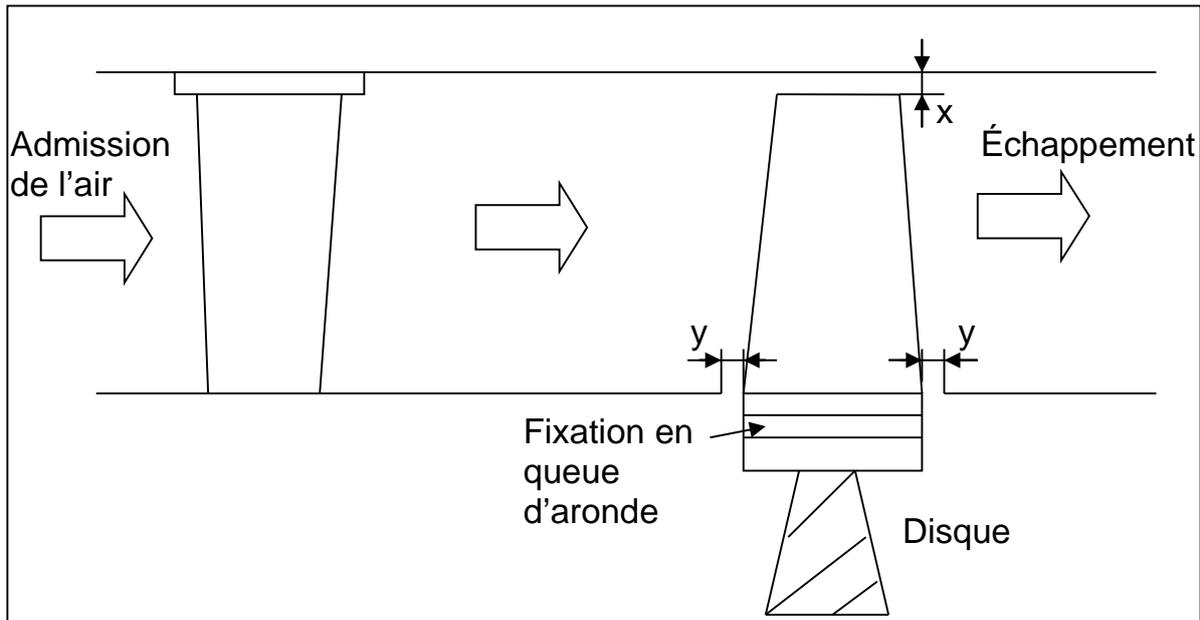


Figure (1-14) : Schéma illustrant la disposition d'un étage.

Le montage est réalisé de façon à réduire les jeux radiaux (x) et axiaux (y) et permettre le fonctionnement dans de bonnes conditions de tenue, il s'agit donc d'un compromis entre le rendement, le poids et la tenue mécanique.

La tendance est de concevoir des étages dits de frottement  $f_t \leq 0.3$  afin de réduire le nombre d'étages et ainsi le nombre de pièces moteur.

### 5.9/ Les contraintes sur les turbines

Les aubes turbines comme pour toute machine tournante travaillent dans un environnement hostile et sont soumises à des contraintes mécaniques importantes dû à la force centrifuge et à des niveaux de températures très hauts.

C'est pour quoi il est fondamental de limiter ces contraintes afin d'éviter la détérioration des aubes engendrant une fatigue désignée par l'appellation **fluage** ; il est bien entendu essentiel de le connaître et de l'éviter.

Le **fluage** se traduit dans la turbine en premier lieu par une diminution du jeu radial (x) jusqu'à ce que les aubes touchent le carter et il peut même se produire un blocage de la roue turbine, au delà il y a fusion du métal aube.

## 5.10/ Refroidissement et matériaux

Afin de garantir une bonne tenue mécanique, les matériaux de la turbine sont de types **réfractaires** (des alliages à base de **chrome**, **nickel** et **molybdène**).

D'autre part une technique de refroidissement est employée sur les aubes stator et rotor afin d'extraire la chaleur emmagasinée dans le matériau par une canalisation interne où circule de l'air.

Cette combinaison améliore la tenue mécanique et permet une longévité plus importante de l'aube et un bon potentiel

Il existe différents types de refroidissement :

### a) Par transpiration

La technique employée est le refroidissement par transpiration: l'aube est creuse et est refroidie par un flux d'air qui s'échappe à travers la paroi de celle-ci par des trous microscopiques.

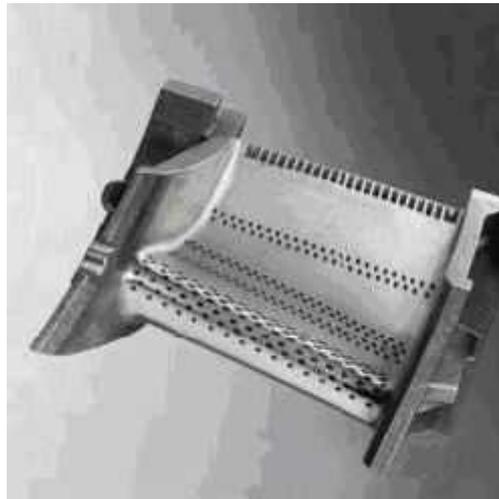


Figure (1-15) : Aube turbine percée au laser.

### b) Par convection interne

Le principe est de refroidir l'aube par de l'air circulant en son sein, il y a un échange thermique entre la paroi de l'aube et l'air qui la refroidie.

Pour cela différentes techniques sont utilisées :

### 1) Le chemisage :

Une chemise métallique est insérée dans une aube creuse, l'air circule entre la chemise et la paroi interne de l'aube puis s'échappe par le bord de fuite.

### 2) Par cavités :

Des canaux en serpentins sont logés dans l'aube et permettent la circulation d'air de refroidissement.

### 3) Par canaux :

Sur toute la hauteur de l'aube se trouvent de petits canaux qui font circuler l'air qui est admis par l'emplanture de l'aube puis évacué par le haut, cette technique est utilisée en cas de contraintes centrifuge élevées.

## 6/ Domaine d'application du miniturboréacteur

Le miniturboréacteur est un petit moteur à réaction, il a suscité un grand intérêt ces dernières années, dans les domaines civile et militaire.

Le miniturboréacteur est constitué d'éléments dévoilés par la coupe ci-dessous.

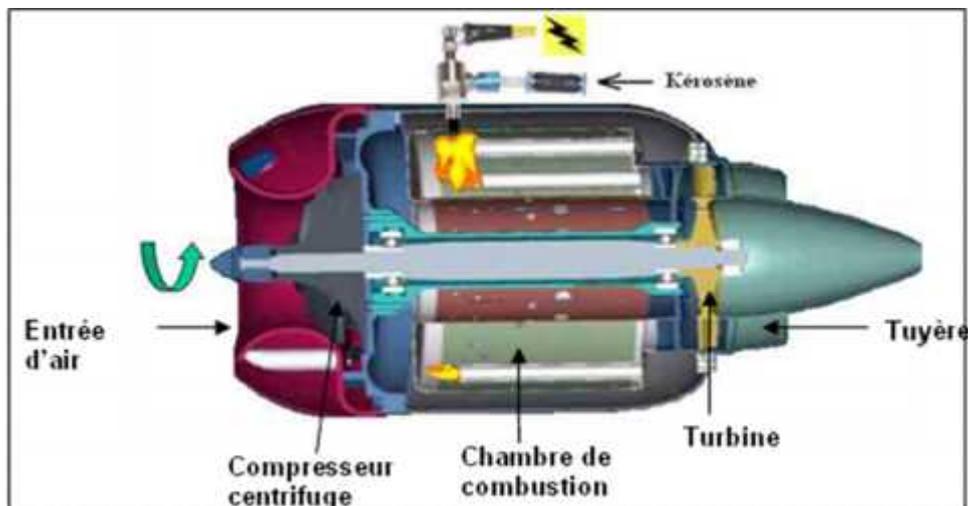


Figure (1-16) : coupe annotée d'un miniturboréacteur.

Le miniturboréacteur comporte les mêmes éléments qu'un turboréacteur conventionnel mis à part la taille réduite, il réalise le même cycle thermodynamique mais produit une poussée maximale de **600 daN** ce qui a pour conséquence une consommation réduite mais aussi un encombrement minimal.

Les utilisations les plus connues sont :

### a) le drone

Petit avion sans pilote utilisé dans le domaine militaire pour les missions de reconnaissance, principalement pour le renseignement mais il existe des versions armées de roquettes. La caractéristique du drone est sa petite taille et la disponibilité d'une autonomie importante, ce qui fait de lui un domaine idéal d'application du miniturboréacteur.



Figure (1-17) : drone en vol.

### b) Le missile

Comme le drone, le missile est petit de taille et a un besoin important d'autonomie ce qui a poussé les militaires à utiliser les miniturboréacteurs.

L'illustration qui suit expose quelques missiles avec leurs différents miniturboréacteurs.

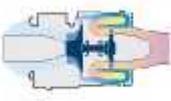
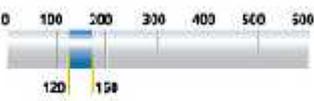
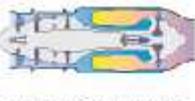
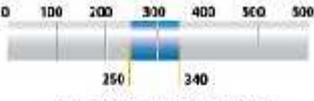
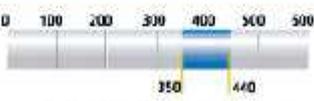
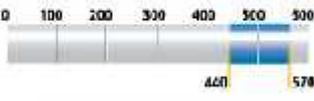
Model	Architecture	Thrust (daN)	Main Application
 TRS 18-1	 Centrifugal Compressor	 120 to 160 daN / 270 to 360 lbf	 Mirach 100-5 Target drone - Galileo Avionica
 TRI 40	 4 stage axial Compressor	 250 to 340 daN / 560 to 750 lbf	 NSM anti-ship Missile - KDA / MBDA
 TRI 60-5	 3 stage axial compressor	 350 to 440 daN / 800 to 1100 lbf	 MQM107 Target drone - Raytheon / BAE Systems / CEI
 TRI 60-20/-30	 4 stage axial compressor	 440 to 570 daN / 1000 to 1250 lbf	 Storm Shadow/Scalp EG Cruise missile - MBDA

Figure (1-18) : différent types de miniturboréacteur avec les missiles qu'ils équipent.

On remarque qu'il y a une multitude de solution motrice adaptée au missile garantissant la poussée nécessaire et une autonomie prolongée, ces solutions se présentent sous formes de compresseur centrifuge ou axial et une chambre de combustion annulaire ou inversée.

### c) Les miniatures

La principale exigence des miniatures est une exigence de volume à laquelle répond parfaitement le miniturboréacteur.



Figure (1-19) : avion miniature avec son miniturboréacteur.

**Chapitre:**

**Chapitre:**

## 1/ Introduction

La turbine dont nous allons exposer les différentes phases de réalisation est prévue pour un miniturboréacteur, ce qui implique une taille réduite et un métal de coulée réfractaire d'une importante dureté rendant ainsi l'usinage délicat. Le procédé de moulage à la cire perdue permet d'obtenir une excellente qualité de surface mais aussi de réaliser tous les détails de la pièce et donc évite l'usinage.

## 2/ Recherche des données

Vue l'objectif de ce projet, il est tout à fait normal que nous utilisions les mêmes côtes que nos prédécesseurs que nous avons résumé ci dessous, et qui seront plus claires sur les schémas qui suivent :

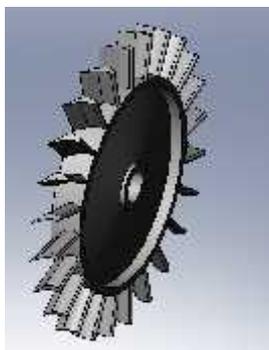
- L'angle d'attaque est de  $34^\circ$  ;
- L'angle de fuite est de  $80^\circ$  ;
- La corde est de 8,46mm ;
- L'épaisseur maximale est de 1,54mm ;
- Nombre d'ailettes 24.

## 3/ Schématisation

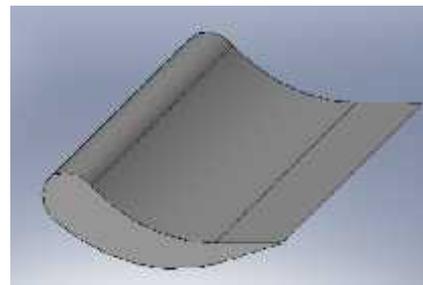
Afin que le schéma soit accepté, il doit remplir certaines conditions primordiales qui nous assurent un résultat final satisfaisant. Ces conditions sont :

- a) Le profil de l'aube doit présenter une bonne forme aérodynamique avec une arête de sortie mince et la courbure de la ligne du contour doit varier continuellement.
- b) La courbe de la ligne moyenne du profil doit être la plus élevée dans la partie initiale du profil et diminuer progressivement au fur et à mesure du rapprochement de l'arête de sortie.

Les schémas ci-dessous sont le résultat d'une schématisation sur le logiciel **SOLIDWORK** version 2007.



**Figure (3-1) : Vue trimétrique de la roue ailette.**



**Figure (3-2) : Vue trimétrique d'une ailette.**

## **4/ Calcul des côtes plus retrait**

### **4.1/ Définition du retrait**

Le retrait est la différence de dimension entre l’empreinte du moule et la pièce solidifiée. Il s’exprime en ‰ ou en mm/m.

Les facteurs intervenants sont :

- La contraction a l’état liquide de l’alliage.
- La contraction (ou l’expansion) pendant la période de solidification de l’alliage.
- La contraction a l’état solide depuis la dernière étape de solidification jusqu’à la température ordinaire.

Le retrait est, comme la coulabilité très complexe. Dépendant de la loi de refroidissement de la pièce, de la température de coulée de l’alliage, des dimensions de la pièce, de la dilatation et de la rigidité du moule.

Il faut donc faire entrer en jeu le procédé de moulage, lequel est fonction du nombre de pièces à obtenir et peut obliger à modifier le dessin de la pièce.

Lors de notre procédé nous allons utiliser plusieurs matières, mais seulement deux ont un retrait, l’acier allié qui a un retrait de 20‰ soit 2% et la céramique qui a un retrait de 12‰ soit 1.2%.

Pour le calcul nous additionnons les deux retraits, puis nous calculons.

L’addition des deux retraits nous donne 3.2%. Pour des raisons pratiques et dans le but de la certitude de l’obtention d’un bon résultat nous avons arrondi notre retrait a 3,5% sur conseil d’un modeleur expérimenté.

### **4.2/ Exemple de calcul de côte plus retrait**

Nous prenons pour exemple le diamètre extérieur du disque de la roue turbine qui est de 56mm.

$$56 \times 3,5\% = 57,96$$

Le résultat obtenu est la côte plus retrait, ce résultat sera utilisé pour la construction du modèle. Les résultats des calculs sont groupés dans le tableau suivant :

La côte initiale (mm)	La côte plus retrait (mm)
56	57.96
8	8.28
12	12.42
9	9.315
2	2.07
3	3.105
1	1.035
20	20.1
52	53.82

**Tableau (3-1) : tableau regroupant les côtes plus retrait de la turbine à réaliser.**

## 5 Réalisation du moule en céramique

### 5.1/ Réalisation de l'épure

Afin d'imaginer la pièce à réaliser, le modelleur doit passer par une étape indispensable qui est « la réalisation de l'épure », cette épure est dessinée généralement sur une plaque en aluminium enduite d'une peinture bleue qui fait ressortir les traits, cette étape est réalisée avec une pointe en métal. Les côtes utilisées lors du dessin de l'épure sont les côtes plus retrait.

### 5.2/ Réalisation du support modèle

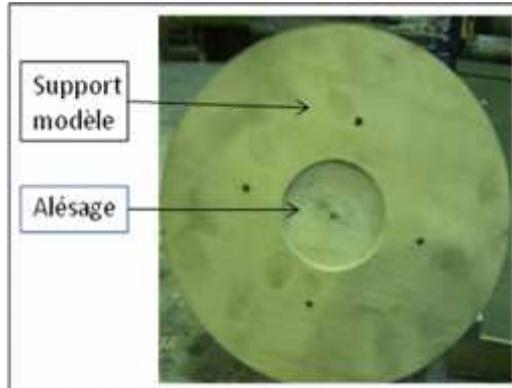
Pour la réalisation du support modèle nous avons utilisé un bois spécial modelage qui a pour référence DIN 1511-H1a + H1 de marque DELIGNIT nous sommes passés par plusieurs étapes :

Ces étapes consistent à découper un disque en bois avec un diamètre légèrement supérieur à celui du mandrin.

Ce disque sera ensuite fixé au mandrin par une face avec quatre vis à bois. Le disque fixé au mandrin sera monté sur le tour à bois et subira une opération de chariotage avec un outil à charioter. Cette opération a pour but d'atteindre un diamètre égal à celui du mandrin et obtenir un disque parfaitement rond qui nous servira de repère de forme, pour cela le tour sera réglé sur la vitesse de 1400 tr/min, l'avance de l'outil à charioter doit être lente, pour atteindre un bon état de surface nous augmentons la vitesse du tours à 2800tr/min et nous ré effectuons un dernier chariotage. L'opération de chariotage terminée, suit l'opération d'alésage qui nous permet d'avoir un alésage qui contiendra le disque modèle lorsque des opérations devront être effectuées sur ce dernier.

Pour obtenir l'alésage voulu, un outil à aléser est fixé sur le porte outil, le tour tourne à la vitesse de 1400 tr/min. L'outil est approché du centre du disque, puis enfoncé dans le disque jusqu'à atteindre la profondeur de 5mm qui est volontairement inférieure à celle du disque modèle, cette profondeur a été choisie pour permettre le retrait du disque modèle.

Après avoir atteint la profondeur voulue, l'outil dirigé vers l'extérieur du disque jusqu'à atteindre le diamètre exacte de 57.96mm afin que le disque modèle rentre avec serrage.

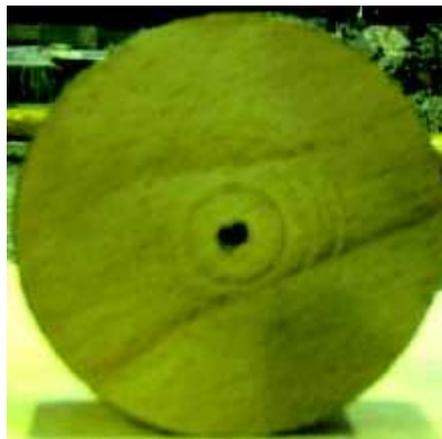


**Figure (3-3) : Support modèle après chariotage et alésage.**

### **5.3/ Réalisation du disque modèle**

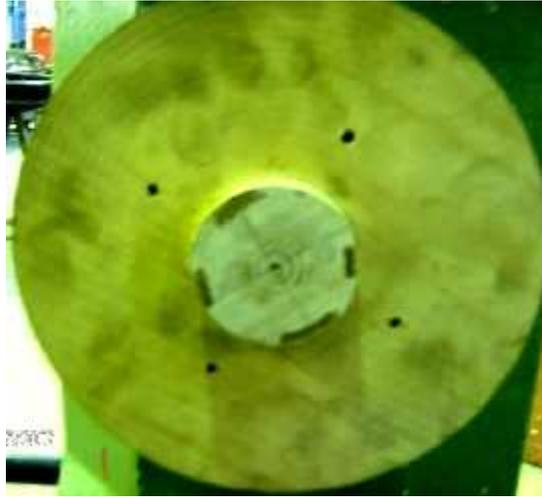
Pour réaliser le disque modèle un morceau de bois de forme à peu près ronde fut découpée puis fixée par une de ses faces au mandrin avec de la colle rapide et une vis centrale, ce qui l'immobilisa et permit d'effectuer les opérations nécessaires.

Le mandrin et le disque collé par-dessus furent montés sur le tour, nous avons fixé l'outil à charioter sur le porte outil, le tour tourne à la vitesse de 1400 tr/min et l'outil est approché lentement, lorsque le diamètre voulu est approché la vitesse du tour est augmentée à 2800 tr/min puis un dernier chariotage est effectué. Cette opération nous permet d'atteindre un diamètre de 57.96mm correspondant au modèle avec cote plus retraits et un bon état de surface.



**Figure (3-4) : disque après chariotage et avant mise en forme.**

Le disque ainsi obtenu est emboîté avec serrage dans l'alésage du support modèle, puis une opération de chariotage est effectuée sur les deux faces du disque modèle afin d'obtenir une épaisseur de 9.315mm.



**Figure (3-5) : disque modèle emboîté dans l'alésage disque support prêt à être charioté.**

Nous commençons à construire la forme du modèle sur ce disque par la première face, pour cela nous peignons la face en blanc ce qui nous permet de bien visualiser le travail que nous effectuons.



**Figure (3-6) : disque modèle peint emboîté dans l'alésage disque support.**

Nous commençons par le bossage central qui a une épaisseur de 9.315mm et un diamètre de 12.42 mm. Pour le réaliser nous utilisons l'outil à aléser, ce dernier est réglé sur le centre du disque, puis déplacé vers la circonférence de la pièce sur une distance de 6.21mm correspondante au rayon du bossage, puis l'outil est enfoncé de 1mm. Par la suite nous réalisons la pente toujours avec l'outil à aléser, par calcul de la tangente, l'angle de la pente trouvé est de  $7^\circ$  ce qui nous a mené à incliner l'outil à aléser de  $7^\circ$  puis nous avons déplacé l'outil à aléser de 20.7mm pour atteindre un diamètre de 53.82 mm et une profondeur de 3.105mm, ainsi la pente est réalisée en même temps que la gorge. Après toutes les opérations que nous avons effectués il nous restés à réduire l'épaisseur de l'anneau externe qui avais une épaisseur de 9.315mm et qui devrais être réduite à 8.28mm, cette opération a été effectuée avec l'outil à aléser. Ces opérations sont effectuées sur chaque face du disque.

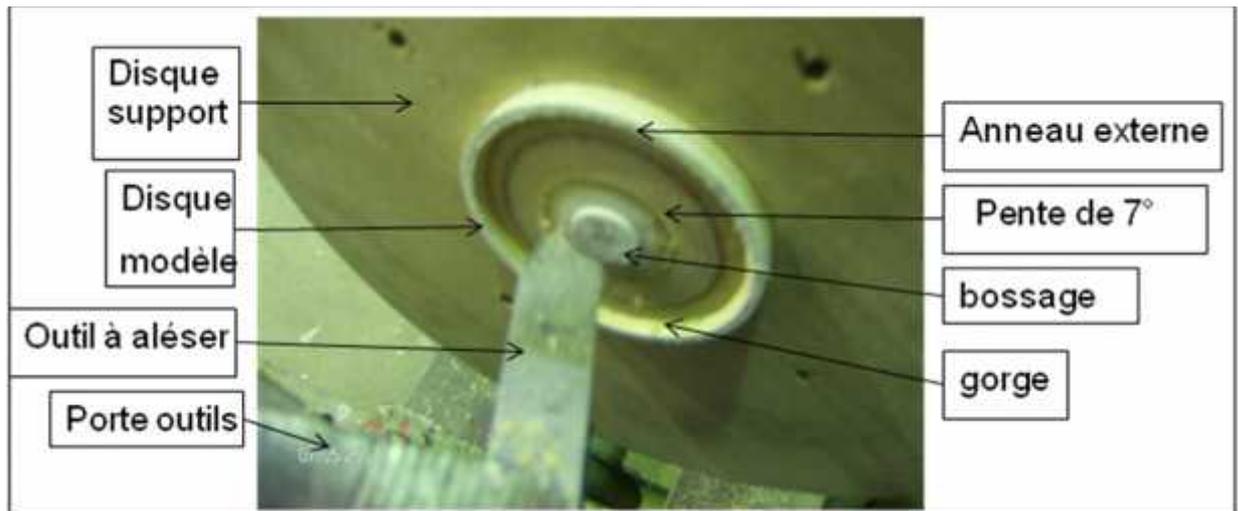


Figure (3-7) : disque modèle emboîté dans le disque support durant la réalisation de la pente à 7°.

#### 5.4/ Réalisation des ailettes

La roue fut divisée par des traits en 24 parties égales, correspondantes au nombre d'ailettes à couler.

Un support disque-moule a été fabriqué pour une plus grande précision de coulée, ce support est constitué de :

- Un morceau de bois de 58 mm de hauteur, 15mm de largeur et de 35mm de profondeur.
- Un axe porte disque.
- Et une vis à bois pour fixer une partie du moule.

La réalisation du moule consiste à fabriquer deux parties :

Une partie avec **un évidement**, et l'autre avec **un bossage**.

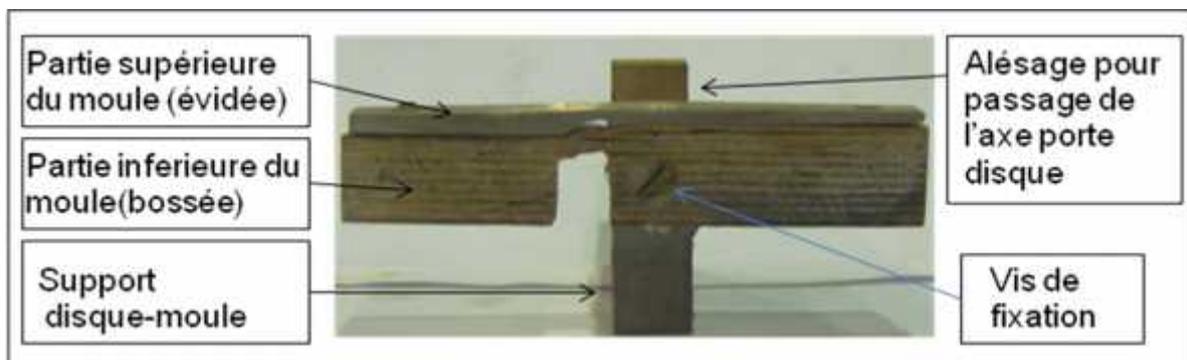
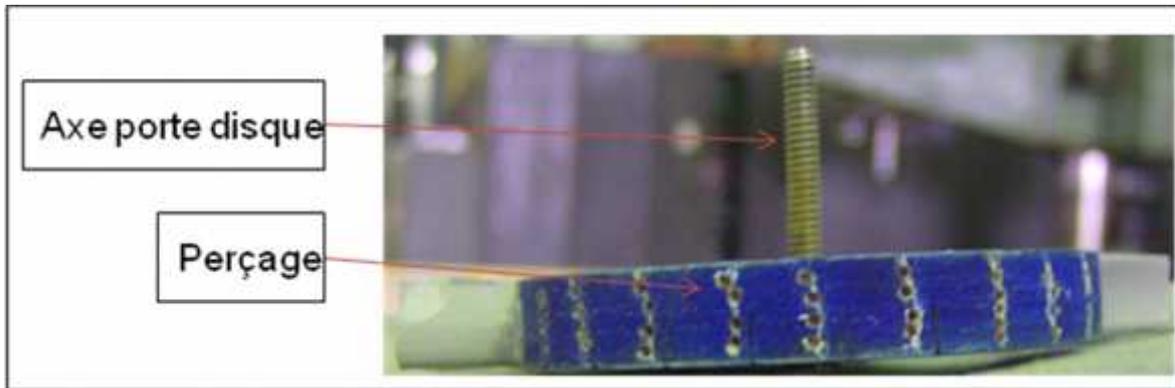


Figure (3-8) : Image du support avec la partie inférieure du moule fixée par une vis à bois.

Pour une plus grande robustesse et une meilleure adhérence des ailettes sur le disque, de petits perçages sont forés sur la circonférence du disque aux emplacements des ailettes et ce avec un foret de 1mm. De petites tiges en cuivre sont incérées dans les trous à l'emplacement du bord d'attaque car son épaisseur le permet, en ce qui concerne les autres trous le mastic y pénétrera et permettra une meilleure adhérence.



**Figure (3-9) : Disque modèle avec axe porte disque et perçage sur sa circonférence.**

La roue est fixée au support sur lequel est également fixée la partie basse du moule, un des traits divisant la roue est repéré par rapport au bord du moule de façon à ce que l'ailette soit coulée juste à ce niveau, la roue est serrée par l'axe passant par son centre et par un boulon de façon à ce qu'il n'y ait aucune possibilité de jeu. Le moule inférieur ainsi que le moule supérieur sont enduits de cire de démoulage qui empêche le mastic de coller aux moules.



**Figure (3-10) : Cire de démoulage.**

Le mastic est mélangé à un durcisseur puis coulé sur le premier moule. La fusion des deux parties du moule nous permet d'avoir la forme de l'ailette dont le mastic prend la forme, l'excès de mastic est soigneusement retiré à l'aide d'une spatule. La séparation des deux parties du moule nous laisse découvrir l'ailette, cette opération est répétée 24 fois.

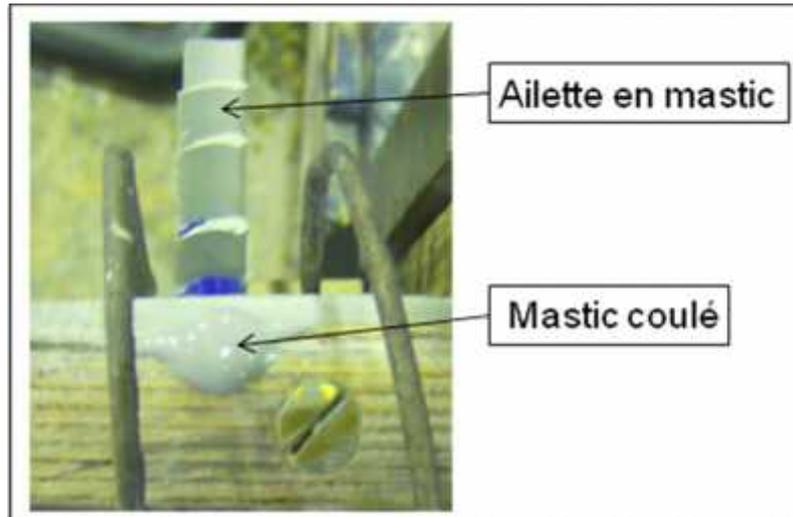


Figure (3-11) : Image d'une coulée de mastic pour réaliser une ailette.

### 5.5/ Les clés

Les ailettes ont des courbes ayant une inclinaison qui crée des contres dépouilles, ce qui empêche le démoulage, pour éviter cela des clés sont fabriquées puis placées. Ainsi l'espace séparant les ailettes est partagé en deux, permettant ainsi le démoulage.

#### - Fabrication des clés :

Les clés sont faites a partir de mastic mélangé à un durcisseur, la roue modèle avec ailettes est fixée sur un carré de bois puis dans l'intervalle séparant deux ailettes, du mastic est coulé puis fini à l'aide d'une spatule afin qu'un espace plat relie le bord de fuite de la première ailette au bord d'attaque de la deuxième ailette.

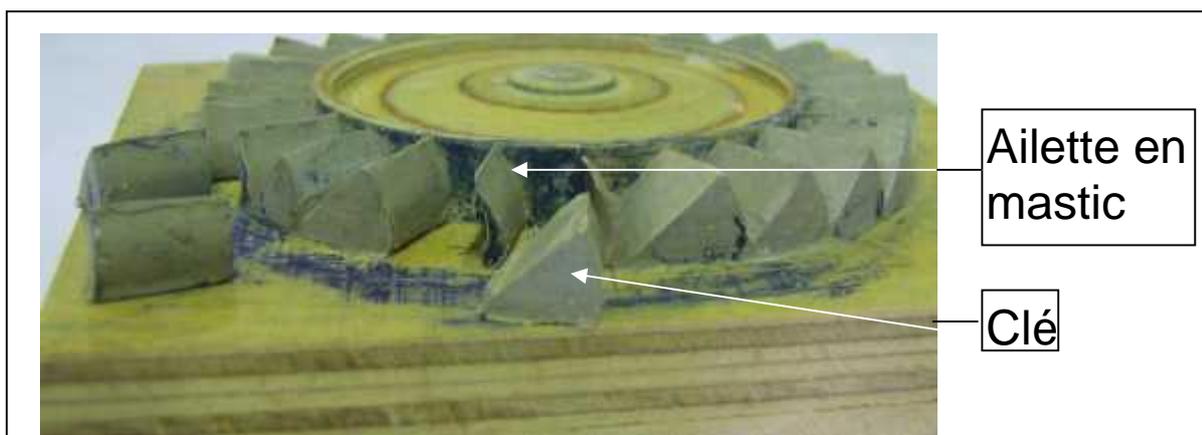


Figure (3-12) : image d'une roue modèle avec clés.

### 5.6/ Fabrication des moules

Tout d'abord un moule en deux parties est fabriqué, la partie haute en **Elastomère** et la partie basse en **silicone**.

- a) **La partie basse** : le modèle avec clés est fixé sur un carré en bois, par la suite de la silicone est appliquée par couches minces successives afin de permettre un séchage rapide, jusqu'à atteindre une épaisseur qui permet au moule de ne pas se déformer. Lorsque le moule est sec il est retiré avec précaution pour ne pas abîmer le modèle. La silicone utilisée est disponible dans le commerce au niveau des quincailleries.
- b) **La partie haute** : le modèle sans clés est inséré dans le moule en silicone puis un cylindre en bois est fixé en son centre, ce cylindre formera le canal de coulé. L'élastomère est mélangée à son durcisseur et coulé en un seul point du modèle et en un fin filet jusqu'à épuisement de la matière, cette méthode est intéressante car la progression de la matière sur le modèle chasse l'air et évite de l'emprisonner, donc minimise la présence de bulles d'air. L'élastomère est disponible chez les vendeurs spécialisés en matériel de bijouterie. \*

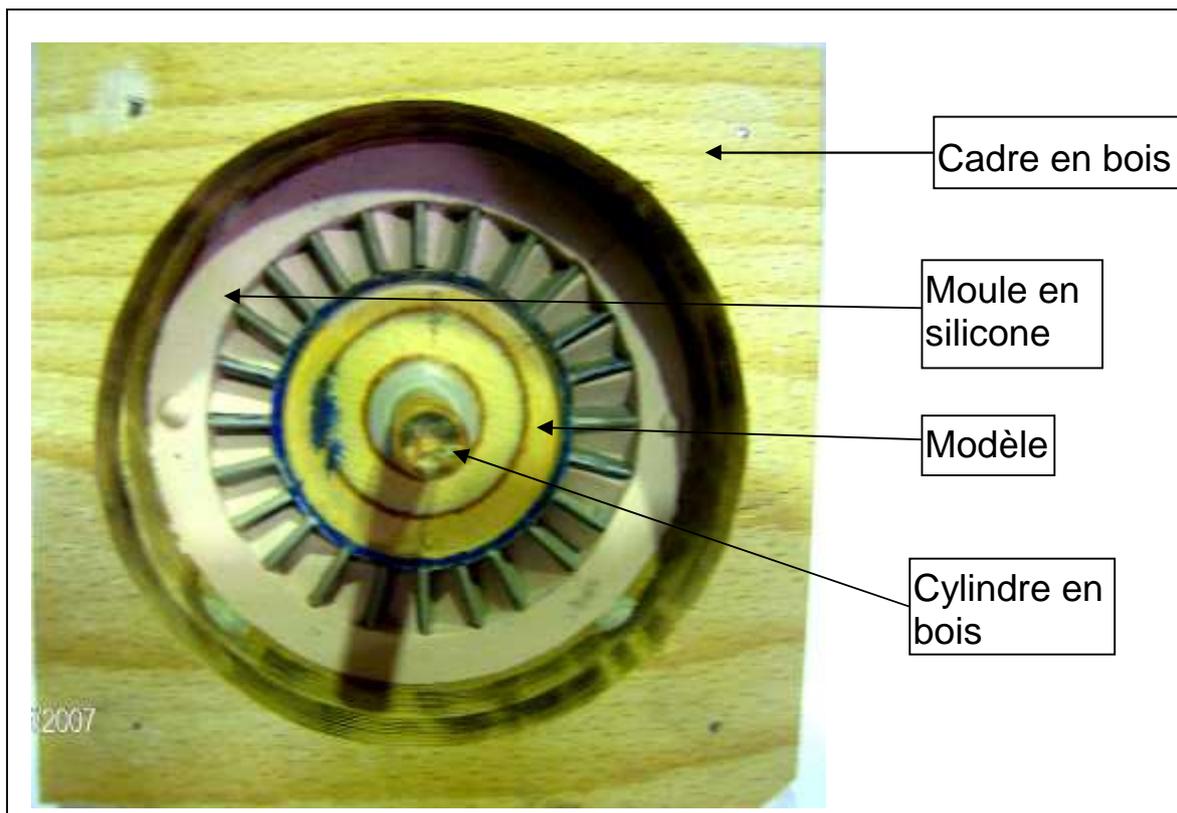


Figure (3-13) : Assemblage de la partie basse du moule et du modèle pour la réalisation de la partie haute du moule.



Figure (3-14) : L'élastomère et son durcisseur dans leurs emballages d'origine.

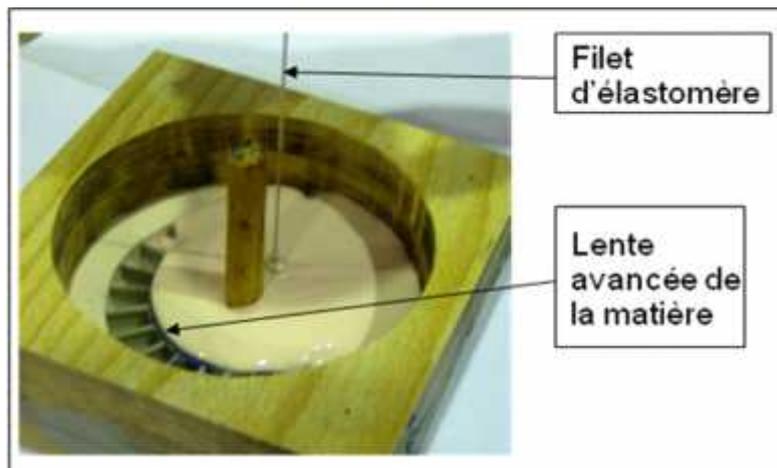


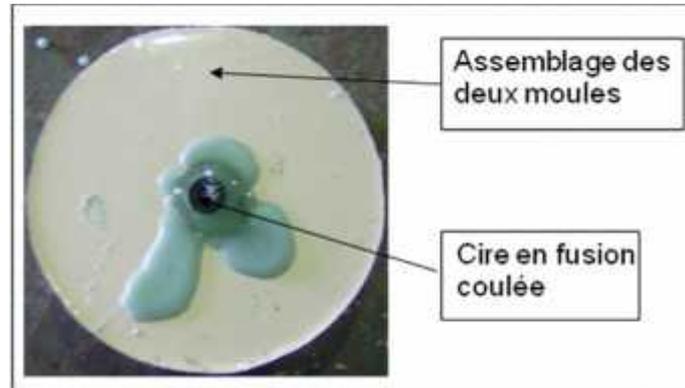
Figure (3-15) : Coulée de l'élastomère lors de la réalisation de la partie haute du moule.



Figure (3-16) : Les deux parties du moule côte à côte.

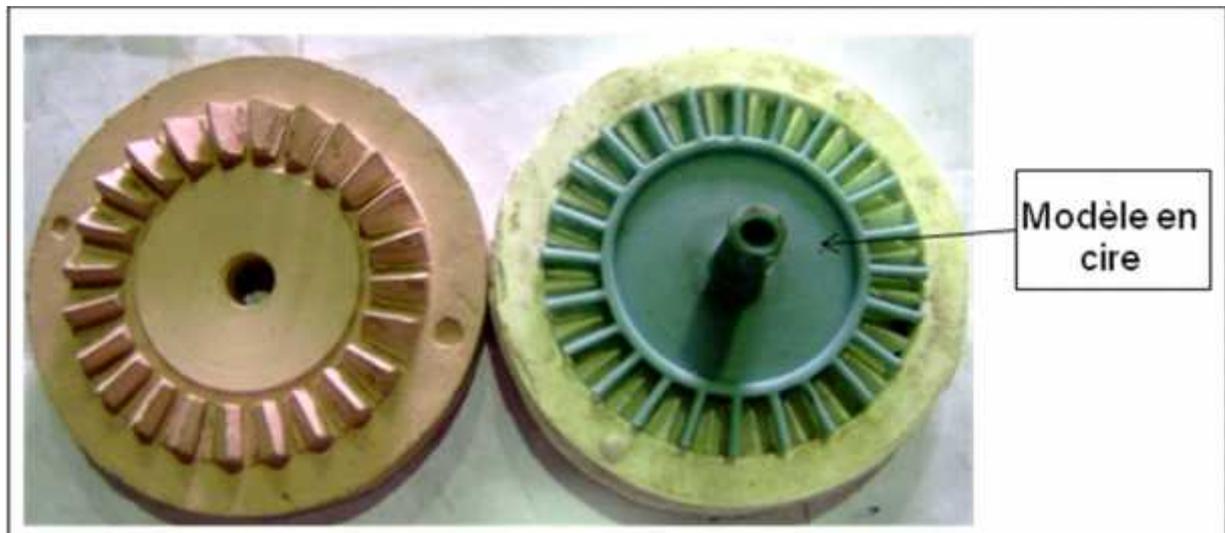
### 5.7/ Le modèle en cire

Les deux parties du moule en élastomère et silicone sont assemblées, la cire est fondue puis coulée par le canal de coulée par gravité. Vu que la cire a un retrait important, le manque de cire constaté au niveau du canal de coulée est régulièrement comblé par de la cire en fusion.



**Figure (3-17) : Coulée de la cire dans le moule pour obtenir le modèle en cire.**

Après environ 15 mn, la cire est dure et le démoulage peut être effectué. Le modèle en cire est prêt.



**Figure (3-18) : Démoulage du modèle en cire.**

- **La cire** : cire spéciale type **AQUA** de couleur verte avec les propriétés suivantes :

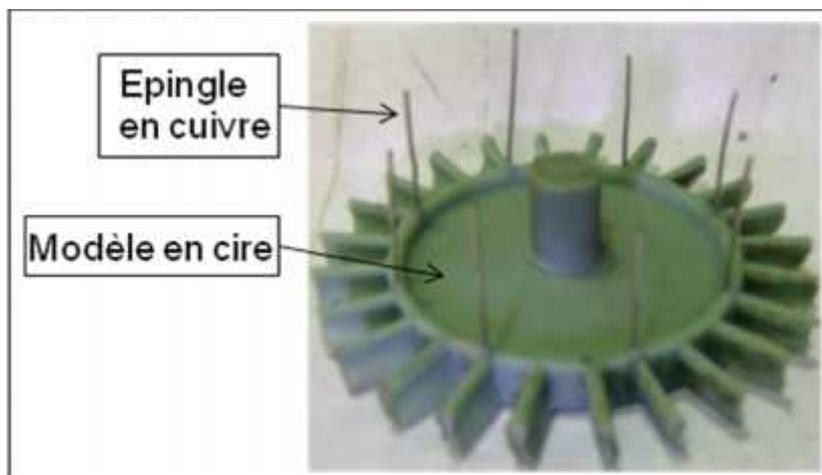
- Coulabilité importante.
- Perméabilité nulle.
- Température de fusion entre 65 et 70 °C.
- Refroidissement lent.
- Retrait important.

Cette cire est disponible dans les magasins spécialisés dans la vente de matériel de bijouterie.



**Figure (3-19) : cire type AQUA.**

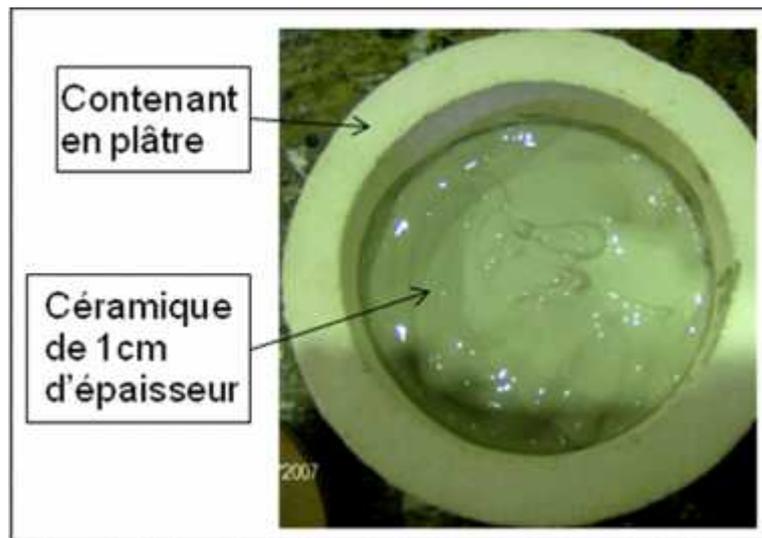
Sur le modèle en cire, des épingles en cuivre sont fixées sur la partie la plus haute précédant les ailettes, ces épingles produiront dans le moule en céramique des canaux qui représentent les événements et d'où s'échappera l'air.



**Figure (3-20) : Modèle en cire équipé d'épingles.**

### **5.8/ Le moule en céramique**

Un contenant en plâtre est fabriqué pour que la céramique y soit coulée. Le plâtre déjà sec absorbe l'humidité de la céramique permettant un séchage plus rapide. La céramique est préparée à partir d'un mélange d'argile de potier et d'eau jusqu'à obtention d'une pâte onctueuse semblable à du yogourt liquide, puis elle est coulée dans le contenant en plâtre jusqu'à atteindre une hauteur de matière d'environ 1 cm.



**Figure (3-21) : Contenant en plâtre avec de la céramique.**

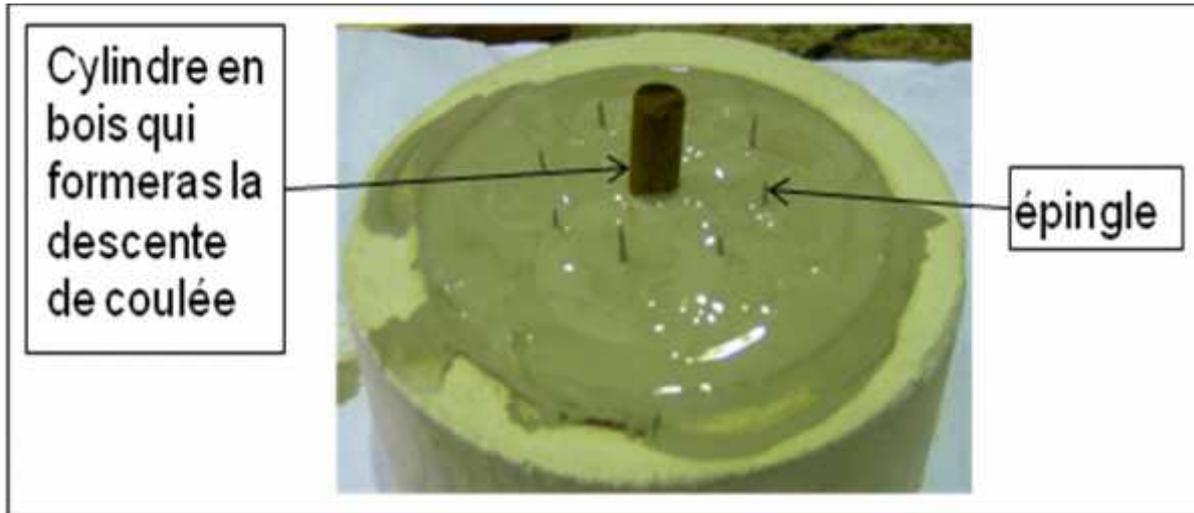
Par la suite le modèle en cire est enduit de patte sur sa partie inférieure comme le montre la **figure (3- 22)** pour éviter les bulles d'air qui engendrent des défauts puis posé dans le contenant en plâtre.



**Figure (3-22) : Modèle en cire enduit de céramique sur sa partie inférieure.**

Le contenant est remplie de patte jusqu'à recouvrement totale du modèle en cire.

Le moule doit avoir une épaisseur minimale de parois de 7 mm.



**Figure (3-23) : Moule en céramique prêt mais pas encore sec.**

La céramique est étuvée à une température de 80°C pour permettre un séchage encore plus rapide. Le séchage complet de la céramique est indispensable car si de l'humidité persiste dans la céramique le moule risque de se fendre lors de la cuisson.

\*La cire fond durant l'étuvage.



**Figure (3-24) : Etuve contenant un moule.**

Le moule est cuit dans un four à une température de 900°C durant 8H, le moule est prêt.



Figure (3-25) : Moule en céramique a la sortie du four.

## 6/ La coulée

Le métal utilisé est de l'Aluminium.

Lorsque le moule est presque cuit, l'Aluminium est transvasé d'un creuset de fusion vers un creuset de maintien qui est plus petit et plus accessible, ce qui diminue les risques d'accidents.

Le moule est sorti du four puis dirigé immédiatement à proximité du creuset de maintien afin d'éviter le refroidissement du moule où le métal sera coulé à l'aide d'une louche, l'apport de métal est continu jusqu'à remonter de ce dernier par les événements.

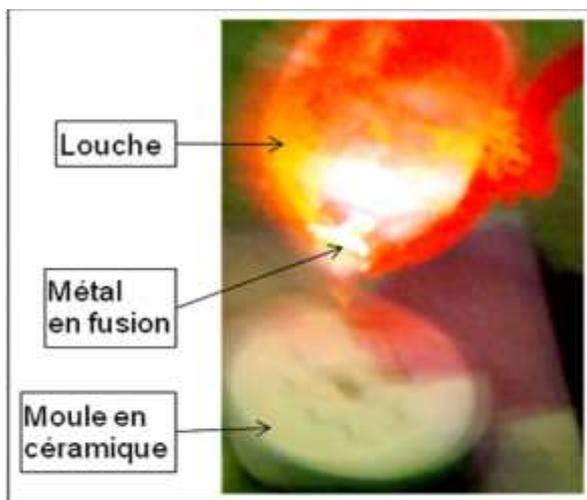


Figure (3-26) : Coulée du métal dans le moule.



Figure (3-27) : Moule avant coulée.

### 6.1/ L'alliage de coulée

Pour le choix de l'alliage à utiliser lors de la coulée, les conditions d'utilisation et les contraintes exercées sur la turbine sont présent en compte, pour cela l'alliage suivant a été choisi : **RGT 0**.

Les caractéristiques de la **RGT 0** sont :

**Composition chimique moyenne en % :**

C	Cr	Ni	Fe	Ti
0.13	19.5	Reste	Maxi. 5	0.4

**AFNOR : NC 20 T**

**Numéro Allemand : 4951**

**Numéro AIR Allemand : 2.4630**

**Norme Allemande : X 10 NiCrTi 70 20**

Alliage nickel-chrome à haute résistance à chaud et bonne résistance à la corrosion et à l'oxydation jusqu'à 1.100 °C, pour efforts moyens.

Utilisation :

Pièces pour turbine à vapeur ou à gaz.

#### • Soudage

Cet alliage est soudable en l'état mis en solution sous atmosphère protectrice ou par résistance. Aucun traitement thermique ultérieur n'est nécessaire. Les cordons de soudure ne doivent pas être exécutés aux endroits soumis à des efforts très élevés.

### Traitement thermique

Mise en solution	950 °C	1h
------------------	--------	----

Refroidissement à l'air

### Caractéristiques mécaniques moyennes à la température ambiante

Limite élastique à 0.2%	hbar	35
Résistance à la traction	hbar	85
Allongement (L = 5d)	%	35
Résilience	daj/cm <sup>2</sup>	12
Dureté	HB 30	140-230

**Caractéristiques physiques**

<b>Densité</b>	g / cm <sup>3</sup>	8,4
----------------	---------------------	-----

<b>Chaleur spécifique à 20 /900°C</b>	cal / g / °C	0,10/0,13
---------------------------------------	--------------	-----------

**Coefficient de dilatation (×10<sup>-6</sup>) à °C**

20-100 900	200	300	400	500	600	700	800
12,2 16,0	13,0	13,4	13,8	14,1	14,7	15,4	15,5

**Conductibilité thermique (cal / cm / s / °C) à °C**

20	100	200	300	400	500	600	700	800
0,032	0,035	0,037	0,042	0,046	0,050	0,054	0,058	0,062

**Module d'élasticité (hbar) à °C**

20	100	200	300	400	500	600	700	800
21.300	20.800	20.300	19.700	19.000	18.200	17.400	16.500	15.600

<b>Résistivité spécifique à 20 °C</b>	Ohm/ mm <sup>2</sup> / m	1,09
---------------------------------------	--------------------------	------

**Propriétés de fluage**

Ces valeurs ne sont pas garanties. Les chiffres sont donnés à titre indicatif.

**Charge produisant un allongement de 2% (hbar) à °C**

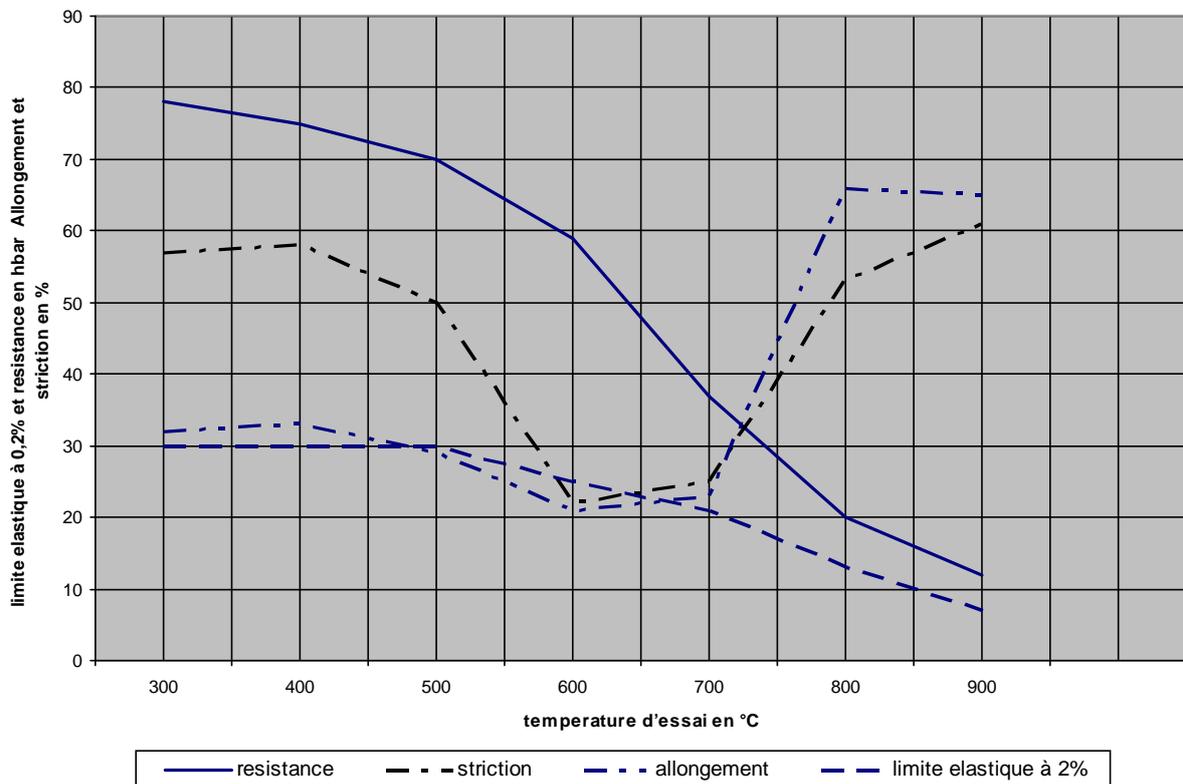
	600	650	700	750	800
100h	11,5	8	5,5	3,5	2
1.000h	8	5	3,5	2,5	

**Charge produisant un allongement de 0,5% (hbar) à °C**

	600	650	700	750	800
100h	13	9	6,5	4	2,5
1.000h	10	6,5	4	3	1,5

**Résistance à l'oxydation à l'air** jusqu'à 1.050 °C

caracteristiques mecaniques moyennes en fonction de la temperature



**Figure (3-28) : Graphe représentant les variations des caractéristiques mécaniques moyennes en fonction de la température.**

## 7/ Le démoulage

Le moule doit refroidir longtemps avant de procéder au démoulage afin que la pièce soit assez dure et résiste aux coups assenés au moule. Un marteau et un ciseau de petite taille sont utilisés, l'opération débute par la création de fissures dans

le moule à l'aide du marteau et le dégagement des morceaux de céramique qui se désolidarisent du moule jusqu'à l'apparition de la pièce, à ce moment le ciseau est utilisé pour dégager le reste de la céramique.



Figure (3-29) : Démoulage de la pièce.

## 8/ Problèmes rencontrés

1 Premier problème : le disque central de la pièce a été produit sans ailette.



Figure (3-30) : Pièce dont les ailettes ne sont pas sorties lors de la coulée.

- **Explication** : le moule a refroidi et les gaz rassemblés dans le moule à l'emplacement des ailettes ont empêchés le métal de poursuivre sa progression.
- **Solution** : sortir le moule du four au dernier moment et effectuer la coulée immédiatement, placer des évents aux niveaux hauts précédents les emplacements d'ailettes.

2 Deuxième problème : le disque central de la pièce a été produit, des ailettes sont apparues mais pas complètes.



**Figure (3-31) : Pièce dont quelque ailettes sont sorties mais avec défauts.**

- **Explication** : les événements n'ont pas permis à tous les gaz de s'échapper.
- **Solution** : augmenter le nombre d'événements en plaçant des événements aux niveaux des ailettes.

**3 Troisième problème** : le disque central de la pièce a été produit et des ailettes sont apparues non complètes.



**Figure (3-32) : Pièce dont quelque ailettes sont sorties mais avec défauts.**

- **Explication** : le diamètre des événements est insuffisant pour permettre à tous les gaz de s'échapper.
- **Solution** : augmenter le diamètre des événements.

**Chapitre:**

## 1/ Introduction

L'obtention d'une pièce par procédé de moulage est utilisé depuis l'antiquité, la civilisation égyptienne a adopté le moulage pour produire ses objets d'art en Or.

Toutefois l'idée de base n'a pas changé à ce jour, mais l'évolution technologique et les nouveaux matériaux ont amélioré le procédé pour l'obtention de pièces industrielles de bonne qualité.

## 2/ Le moulage

L'expression moulage, dans le sens qui lui est attribué en fonderie désigne la réalisation d'une pièce donnée à partir d'une empreinte aux formes de la pièce, élaborée dans un matériau (pierre, bois, sable ou métal) destiné à recevoir du métal (ou autre) à l'état liquide.



Figure (2-1) : Moule de couteau en pierre.

### 2.1/ Le modèle

Le modèle est nécessaire pour développer l'empreinte de la pièce. Il peut être la pièce elle-même ou un modèle fabriqué en matériau facile à modeler pour avoir une forme globale et réelle de la pièce. Les modèles peuvent être élaborés en bois, résine, cire, métal (aluminium), ou plâtre, cette phase demande un certain art et une technique apprise dans le milieu du modelage.

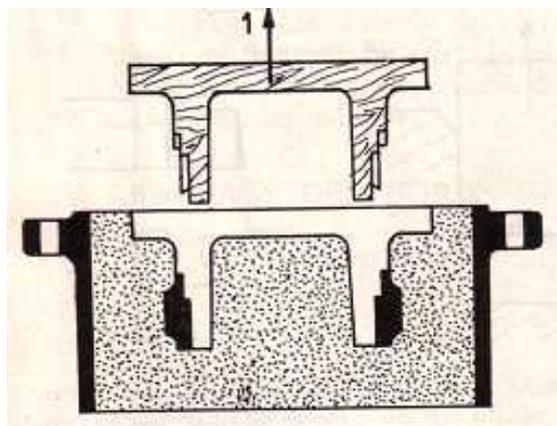


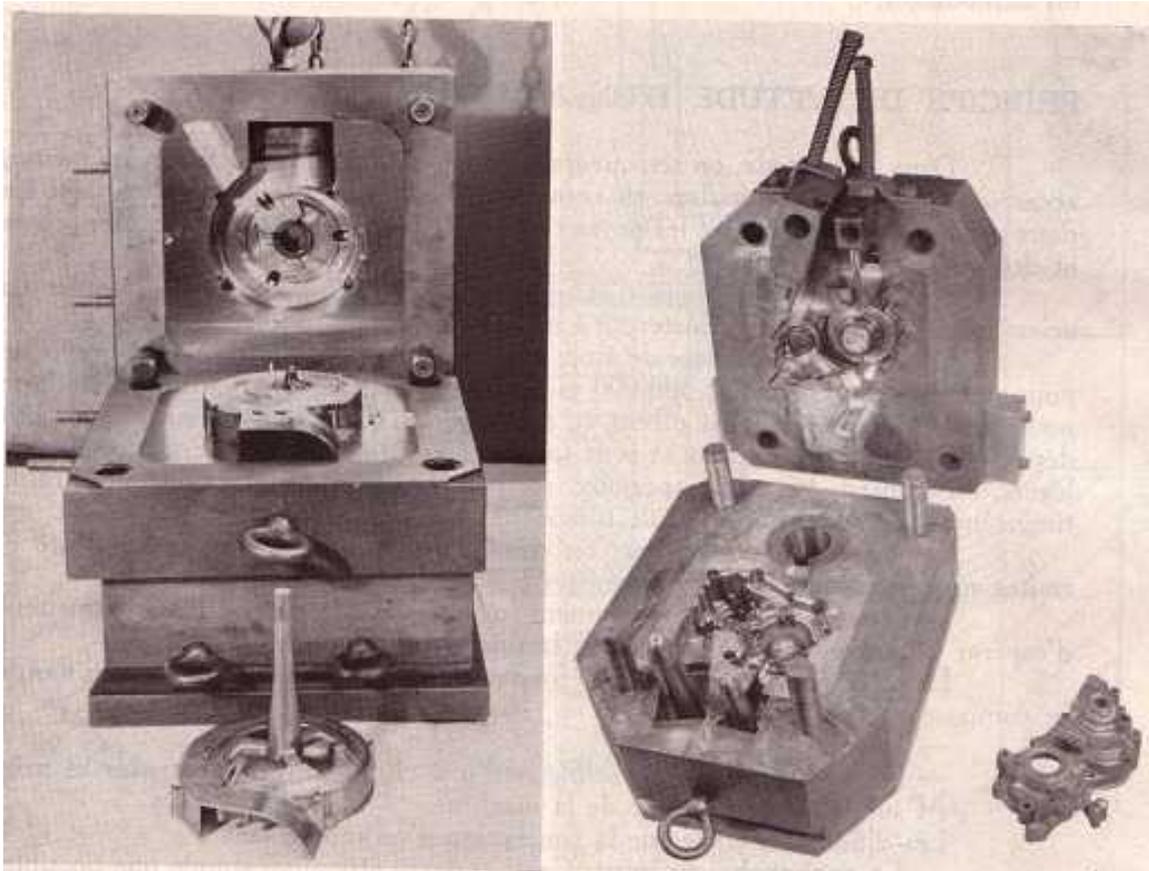
Figure (2-2) : Le modèle et son empreinte.

En principe, les pourcentages de majoration des dimensions du modèle par rapport à ceux de la pièce ont les valeurs suivantes : ( voir bibliographie 3 )

- Acier au carbone 1.8 à 2%.
- Acier inoxydable ou réfractaire 2.4 à 2.6%.
- Certains alliages spéciaux : 2.8 à 3%.

## 2.2/ Le moule

Le moule est la partie qui reçoit l'empreinte de la pièce. Le métal en fusion coulé dans le moule constituera la pièce finale.



**Figure (2-3) : Moules métalliques et pièces correspondantes.**

On peut distinguer différents types de moules qui peuvent être désignés comme moules permanents et non permanents :

### 2.2.1/ Moule permanent

Le moulage en moules permanents est d'origine très ancienne, il se présente sous formes :

- D'empreintes taillées dans la pierre qui constituent déjà des moules complets, comprenant des coulées, des évants et des repères.

- De moules en terre réutilisable après réparation ou remplacement de la couche brûlée par le métal, dans le cas de formes relativement simples.
- De moules en bois dans lesquels les pêcheurs coulaient les plombs destinés à lester leurs engins.
- De blocs de métal dans lesquels étaient creusées des empreintes plus robustes et plus stables.
- De moulage au renversé à partir de moules métalliques entièrement démontables.
- De dispositifs modernes, plus ou moins compliqués et mécanisés.

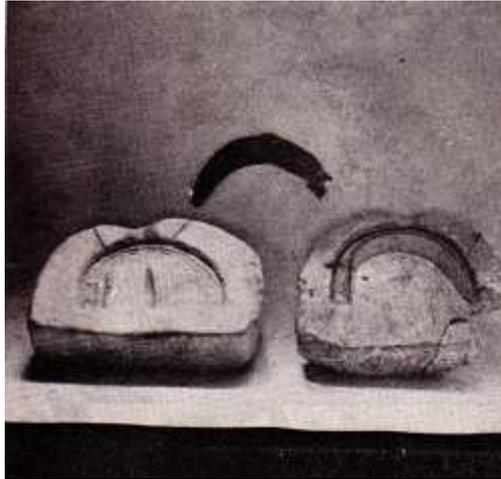


Figure (2-4) : Moule en pierre d'une serpe en bonze.

On peut distinguer différents procédés utilisés dans le moulage en moules permanents.

- 1) **Moulage au renversé** : Ce procédé pratiqué surtout à Paris consiste à remplir un moule métallique de zinc liquide très pur que l'on renverse quelques instants plus tard dans le four, une pellicule de métal adhère aux parois du moule. Nous avons ainsi la possibilité d'obtenir la forme sans employer de noyaux.



Figure (2-5) : Le moulage au renversé.

**2) Moulage Cathias:** Le moule en métal est solidement verrouillé. Il présente sur la partie supérieure une large ouverture, le plus souvent cylindrique et sans étranglement jusqu'à l'empreinte. La quantité de métal liquide nécessaire pour réaliser la pièce est versée dans le moule chaud.

Un piston, ajusté dans l'orifice supérieur et enfoncé dans le moule, chasse le métal et l'oblige à épouser la forme de l'empreinte. Ce procédé permet la fabrication de pièces saines, aux formes nettes.

### 2.2.2/ Moule non permanent

Il s'agit d'une technique de moulage récente qui n'emploie plus un modèle permanent, par exemple le modèle en mousse de plastique, généralement du polystyrène. Le modèle est emballé dans le sable et il est gazéifié par le métal liquide au moment de la coulée.

La volatilisation est d'autant meilleure que la pièce est épaisse, et s'applique donc bien au moulage des grosses pièces en fonte ou en acier. Cette propriété va dans le même sens que la nécessité de construire un modèle pour chaque pièce.

### 2.3 / Les événements

Les événements, cheminées d'aération du moule, permettent l'échappement, de l'air contenu dans l'empreinte, des gaz qui s'introduisent lors d'une mauvaise coulée, des gaz dégagés par le sable pendant le remplissage du moule et parfois, dans le cas d'une pièce assez massive, des gaz qui s'échappent du métal en cours de refroidissement.

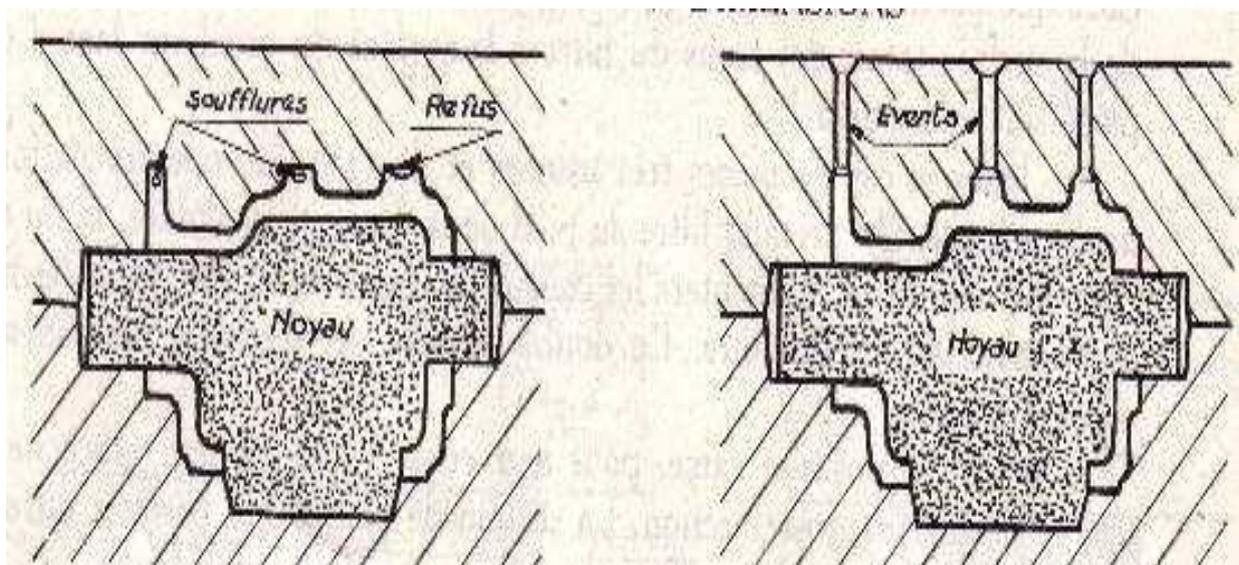


Figure (2-6) : Les événements.

Cette figure nous montre que les événements facilitent le dégagement des gaz du moule, évitant ainsi les soufflures ou les reflux dans la pièce.

### 2.3.1/ Traces des événements

Lorsque le moule est en fin de remplissage, le métal monte dans les événements, permettant ainsi de :

- Surveiller plus attentivement le remplissage du moule,
- Faire dégorger un ou plusieurs événements pour laver l'empreinte en cas de bouillonnement ou pour garantir la santé d'une pièce très délicate.

Les événements causent les plus grands déboires en fin de remplissage.

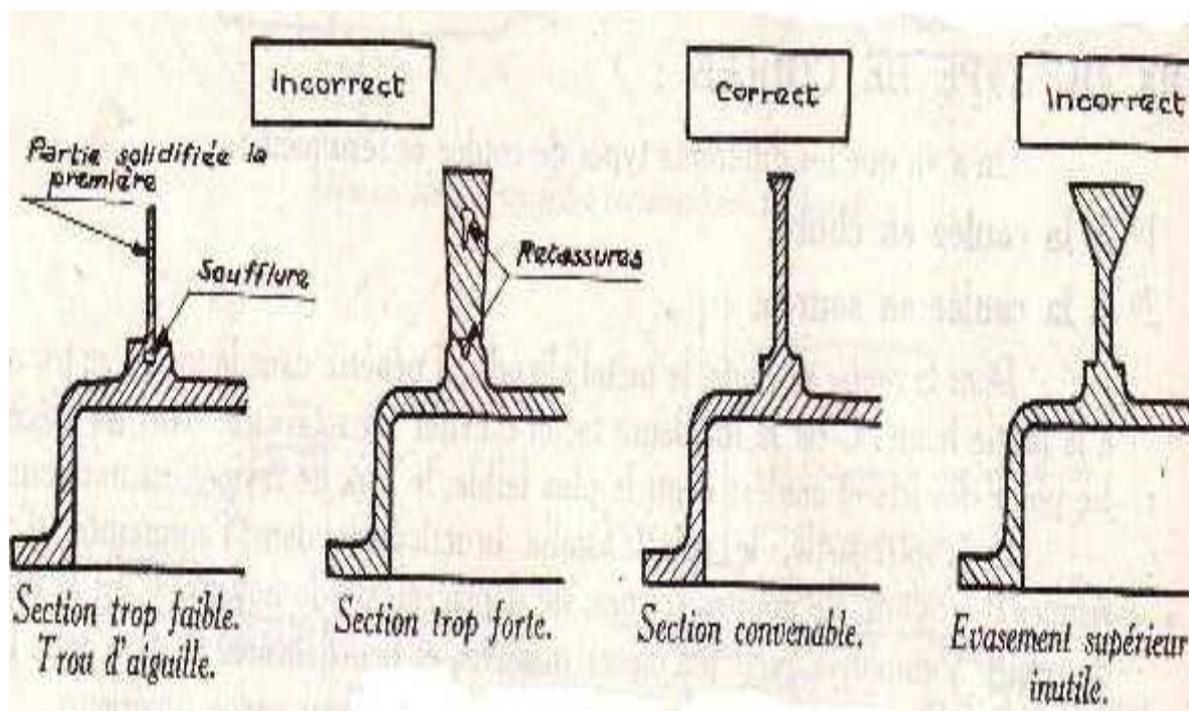


Figure (2-7) : tracés d'événements.

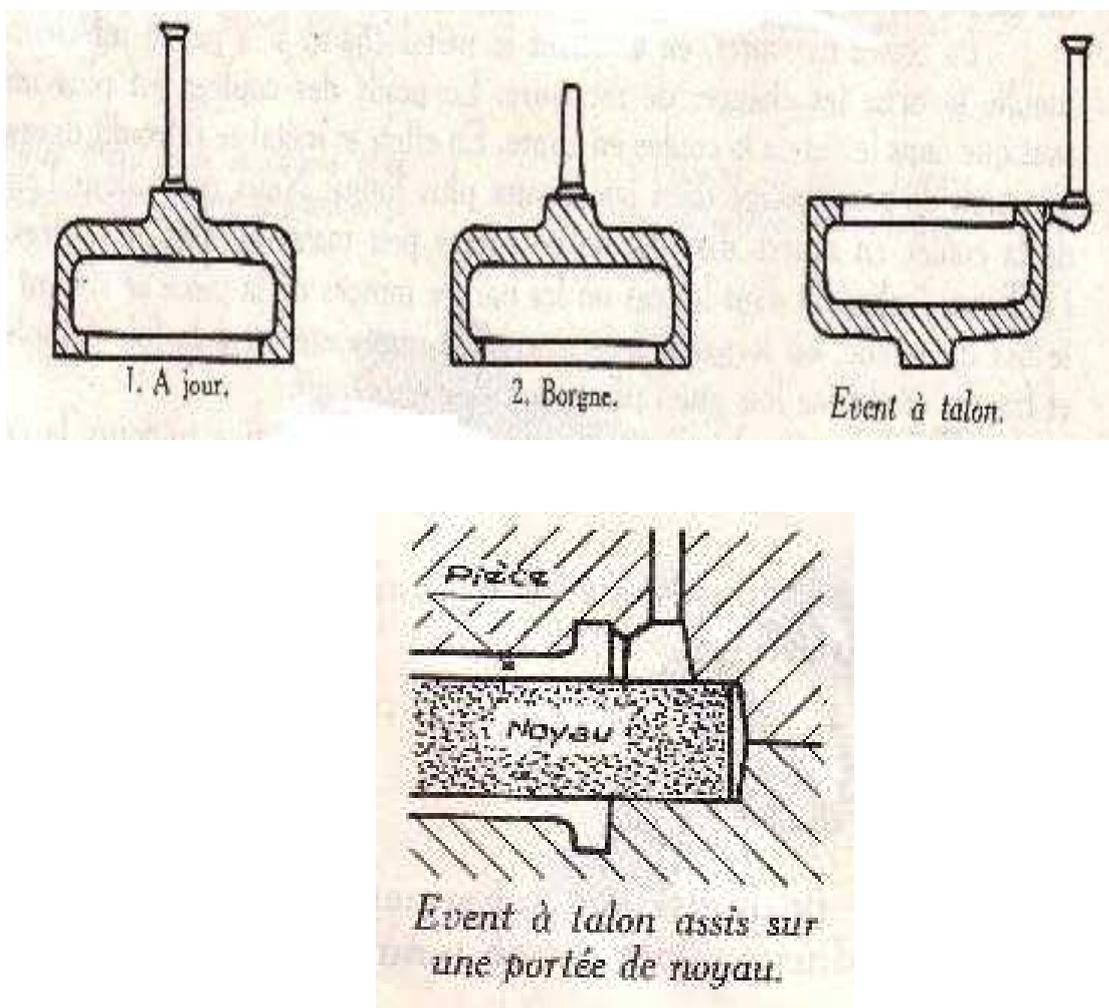
D'après la figure il faut éviter :

- Les trous trop petits (trous d'aiguille par exemple).
- Les trous trop grands dont la section est équivalente à celle de la pièce au point d'attache de l'évent.
- Evasement supérieur inutile.

### 2.3.2 / Emplacement des événements

Ce que nous venons d'étudier nous indique avec précision quel devra être l'emplacement des événements, l'air et les gaz étant plus légers que le métal coulé, les événements seront placés partout où des poches de gaz sont susceptibles de se former et de gêner le remplissage du moule. ( voir bibliographie 4 )

**1) les points hauts:** Seront tout particulièrement surveillés, brides, bossages, nervures, parties de pièces en saillie. Suivant le cas, on placera des événements directs, borgnes, à jour, à talon ou assis sur les portées de noyau. Tel qu'indiqué dans la figure ci-dessous. ( voir bibliographie 4 )



**Figure (2-8) : Différents types d'événements.**

**2) les fonds d'empreinte:** Eloignés de la coulée, dans laquelle un matelas d'air a pu se créer, ils seront ventilés au moyen d'événements plants, de tirettes ou de bavures s'il s'agit de pièce minces et de profils tourmentés. ( voir bibliographie 4 )

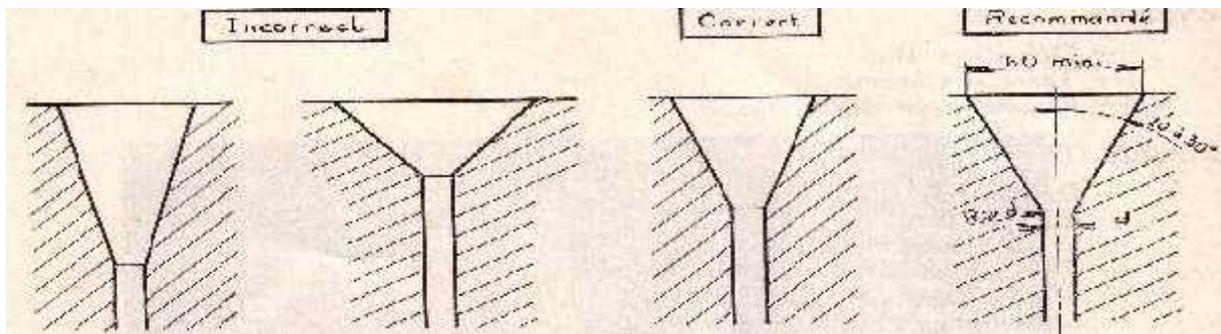
### 3/ Différentes parties d'une coulée

Le mot coulée désigne, en fonderie différents travaux qu'il convient de définir séparément. Cette expression désigne l'opération qui consiste à remplir de métal liquide les moules prêts à être coulés. Elle comprend également l'ensemble des travaux, manœuvres et opérations de transport du métal en fusion, depuis les fours jusqu'au remplissage des moules. Le transport du métal liquide s'effectue : ( voir bibliographie 4 )

- Soit dans le creuset utilisé à la fusion, dans le cas de petites quantités
- Soit dans les poches dans lesquelles le métal fondu est versé à l'intérieur des fours.

#### 3.1/ Entonnoir

L'entonnoir est en réalité un simple évasement de jet de coulée et qui se situe à la partie supérieure du moule. Il doit être préparé minutieusement pour recevoir correctement le jet de coulée.



**Figure (2-9): Entonnoirs de coulée.**

L'entonnoir est taillé comme le montre la figure (2-9) pas profond et doit reprendre à un angle pas trop aigu, car en réalité il entrainera le métal et le fera tourbillonner ce qui favorise la formation de bulle d'air par aspiration. Les dimensions sont normalisées et sont de l'ordre de 60 mm avec un angle variant de [20°-30°].

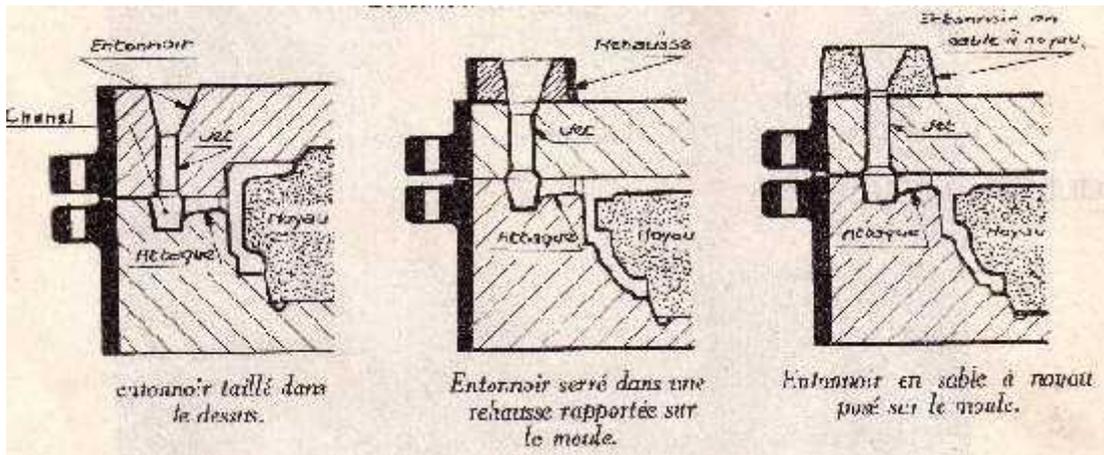


Figure (2-10-a): Evasement des entonnoirs de coulée.

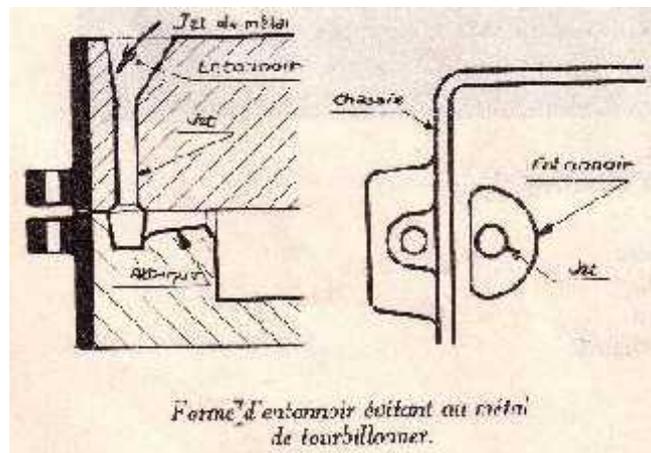


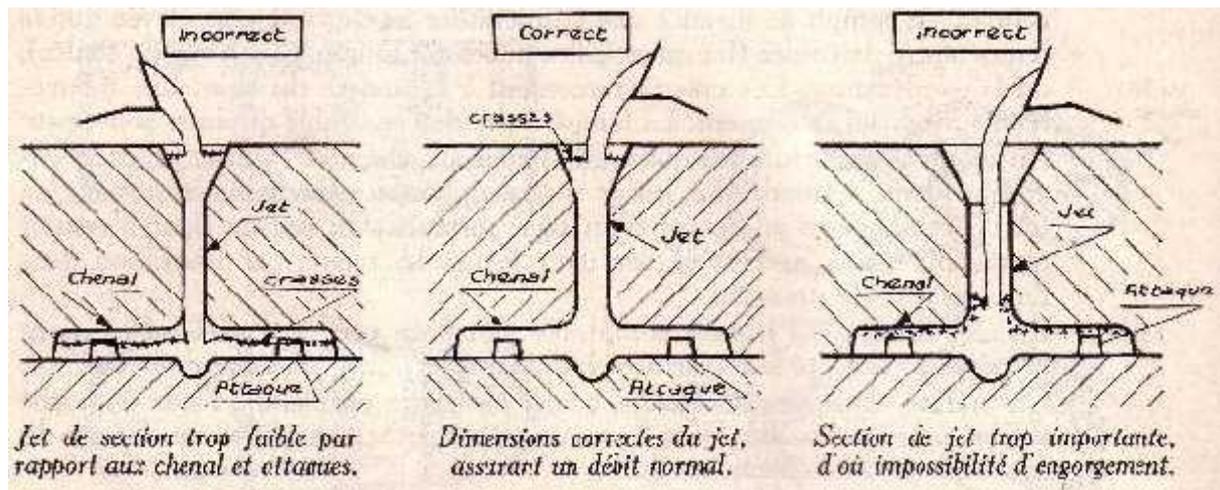
Figure (2-10-b): Evasement des entonnoirs de coulée.

La figure (2-10) nous illustre les différentes techniques d'évasement des entonnoirs de coulée qui peuvent être adaptées pour obtenir le jet de coulée.

En effet leur positionnement est soit taillé dans le dessus, soit serré dans une rehausse rapportée sur le moule, ou bien en sable à noyau posé sur le moule :

### 3.2/ Jets de coulée (descentes)

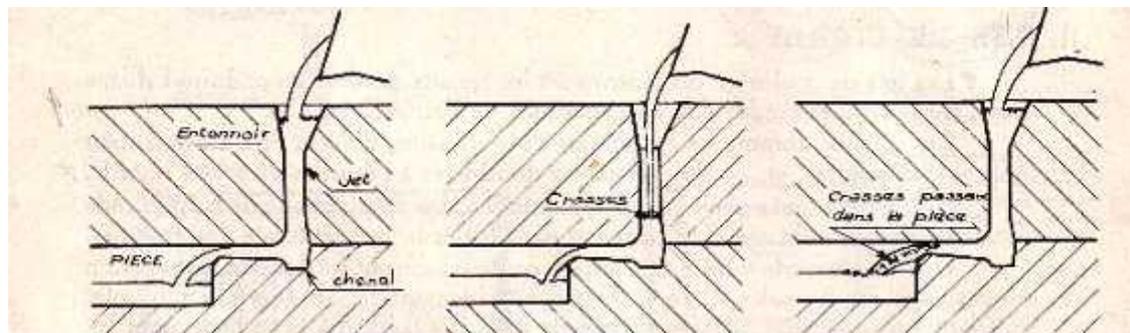
Les jets des coulées ou descentes sont les canaux destinés à conduire l'alliage de coulée du bassin de coulée aux alimentations de l'empreinte. Ces canaux comme les entonnoirs et les bassins, doivent être parfaitement propres, réfractaires et résistants.



**Figure (2-11) : jets de coulée.**

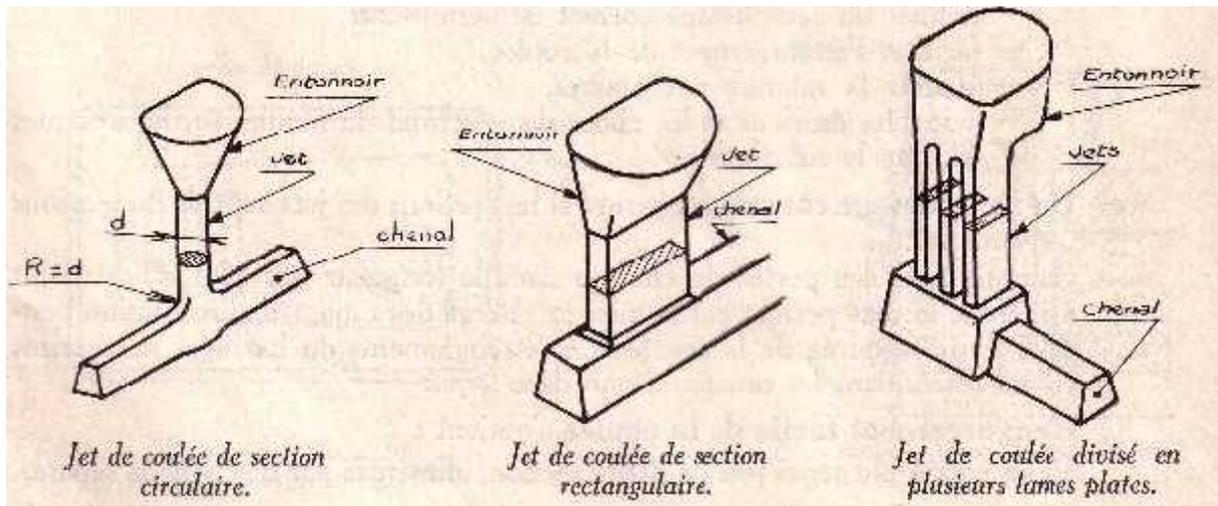
Une trop grande vitesse de l'alliage coulée produirait fatalement une érosion des parois du jet. Il faut éviter les sections de jets trop importantes ou trop faibles par rapport aux chenaux et attaques.

En fonte, les vitesses admises varient de 0.40m à 0.80m à la seconde pour les coulées en sable vert. ( voir bibliographie 4 )



**Figure (2-12) : Le passage de crasses dans la pièce.**

Il faut maintenir le jet engorgé pendant toute la durée de la coulée, une interruption provoque le passage de crasse dans la pièce que nous montre la figure ci-dessus.



**Figure (2-13) : Type de jets.**

Dans la figure (2-13) on remarque 3 différents types de jets employés dans la fonderie :

- Jet de coulée de section circulaire (le plus employé).
- Jet de coulée de section rectangulaire.
- Jet de coulée divisé en plusieurs lames plates.

Pour établir le tracé des jets de coulée il faut :

- Donner un remplissage correct de l'empreinte.
- Faciliter l'engorgement de la coulée.
- Assurer la retenue des crasses.
- Eviter les érosions et les chocs dans le fond du moule, sur les attaques ou dans le cul d'œuf.

### **3.3/ Canaux de coulée**

Pour relier les jets de descente aux attaques qui répartissent le métal dans l'empreinte, on tracera des canaux de coulée dans les plans de joint. Ces canaux pouvant également être réservés dans le sable.

Quelle que soit la méthode employée, ces canaux devront :

- Refroidir le moins possible le métal coulé.
- Résister à la température de l'alliage et à l'érosion des courants liquides.
- Créer le minimum de pertes de charge, sauf aux barrages voulus et calculés.
- Alimenter également toutes les attaques réparties autour de la pièce.
- Gêner le moins possible le retrait de la pièce.
- Arrêter les dernières crasses et mousses d'oxyde.

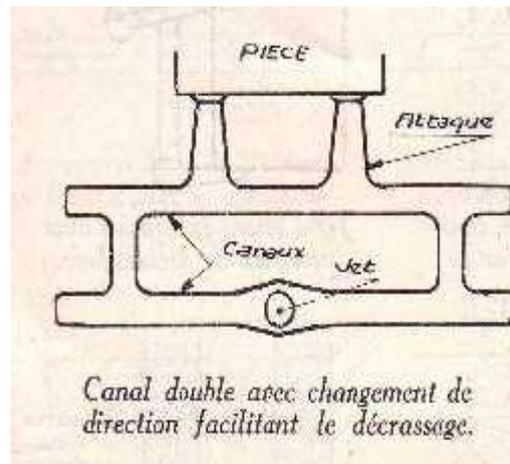
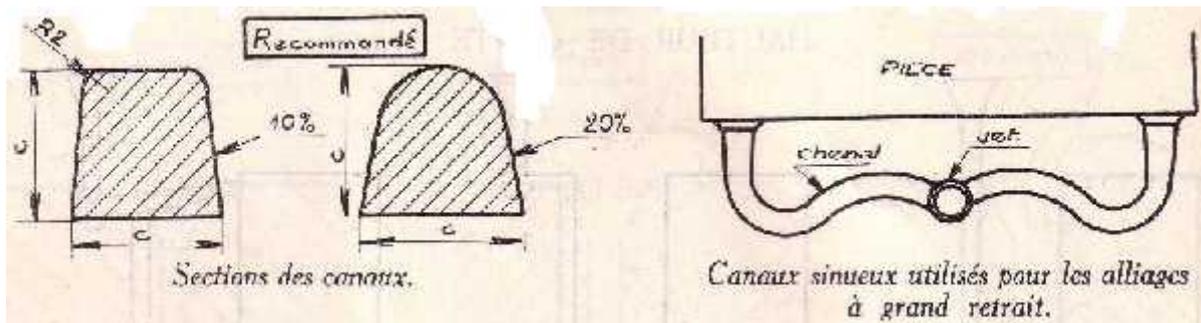


Figure (2-14) les canaux de coulée.

Les canaux de coulée, comme tout ce qui conduit le métal au moule, doivent être d'une parfaite propreté, sans fausse serre, et passés à l'enduit où à la couche, comme le reste du moule.

### 3.4/ Attaques de coulée

Les attaques de coulée font déferler le liquide métallique dans l'empreinte de la pièce. Elles doivent satisfaire à un certain nombre de conditions :

- Assurer un remplissage complet et correct de l'empreinte
- Veiller à ce qu'aucune dégradation, aucun déplacement de noyau, aucun défaut ne se produise dans le moule
- Les attaques de coulée doivent permettre l'ébarbage ou la cassure de la coulée sans risques de détérioration pour la pièce elle-même
- Veiller en outre, à ce qu'elles ne provoquent pas de point dur à l'entrée de la pièce pour les alliages susceptibles d'être trempés.

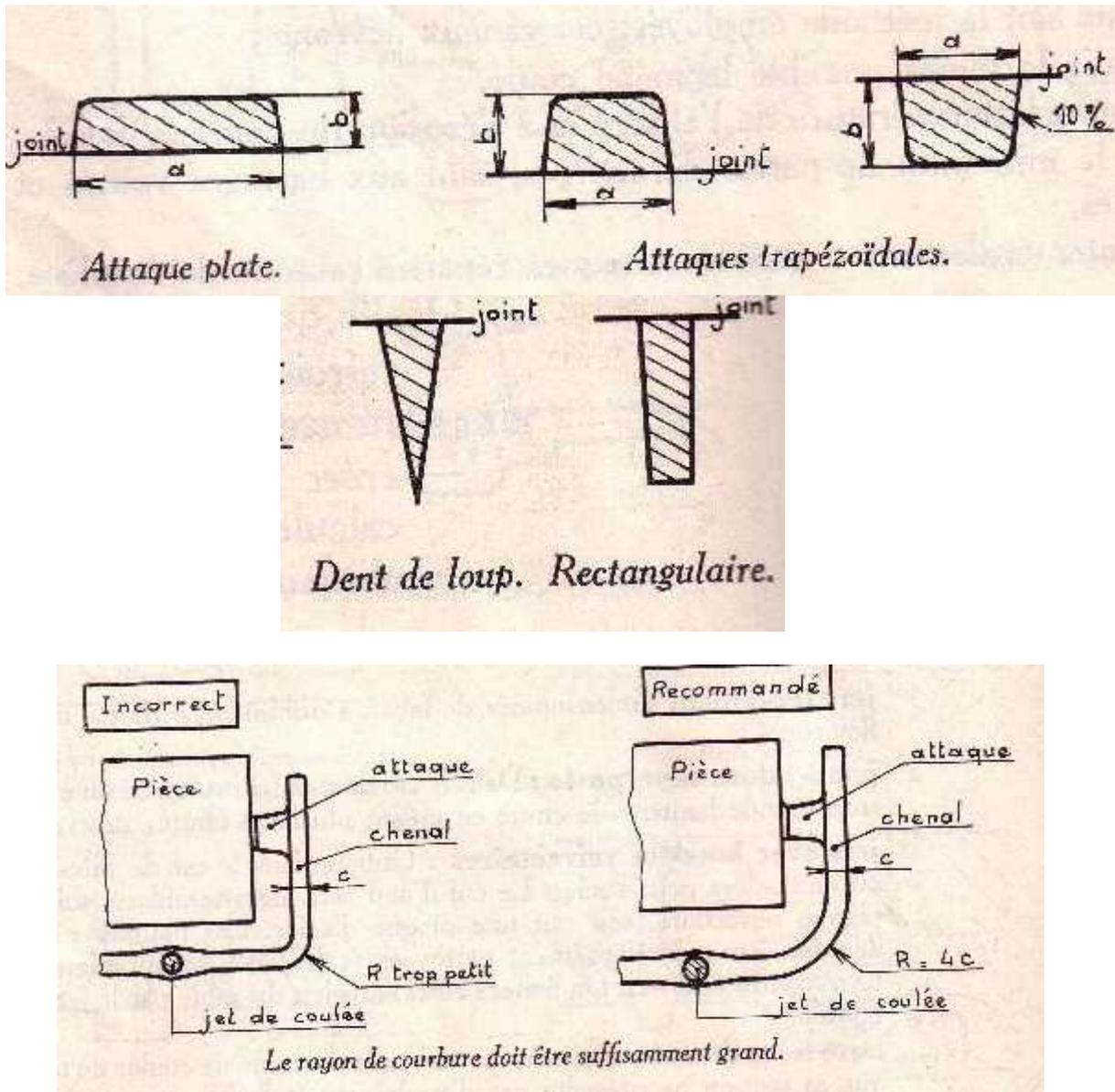
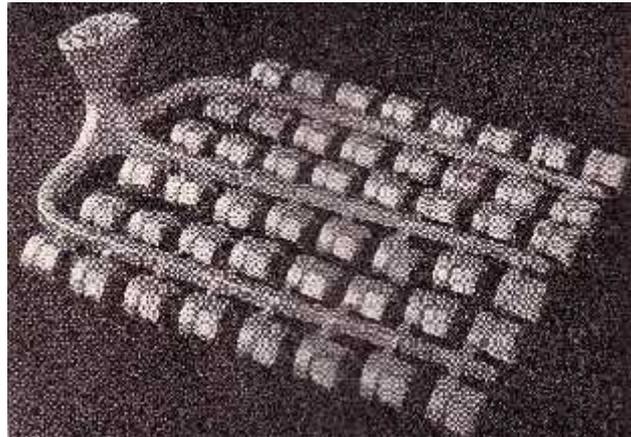


Figure (2-15) : les attaques de coulée et leurs sections.

Dans la figure ci-dessus nous montrons que le rayon de courbure doit être suffisamment grand, ce qui veut dire que le rayon doit être équivalent à 4 fois l'épaisseur du chenal, afin de faciliter l'écoulement du métal dans le chenal.

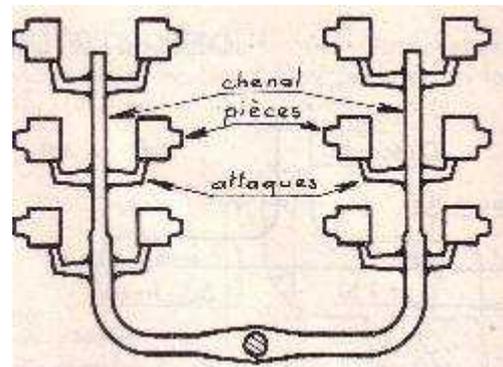
**Exemples de dispositifs de coulée:**



**Figure (2-16) : Petites pièces en bronze : 80g**

Cette photo nous montre le dispositif d'une coulée comportant un entonnoir, un jet de coulée, trois canaux de coulée et 48 pièces avec leurs attaques.

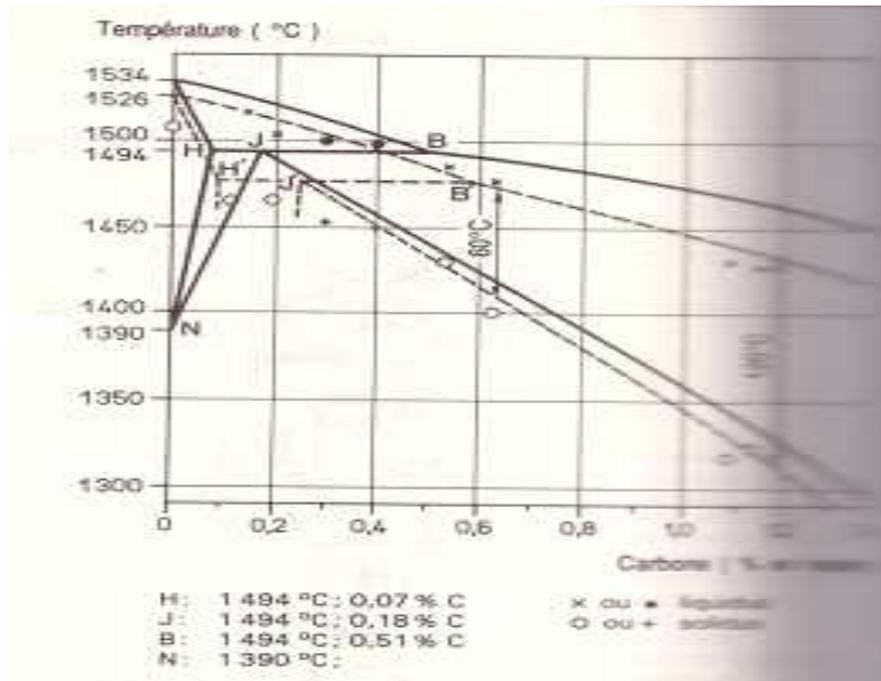
La figure ci-dessous nous donne un autre dispositif de coulée comprenant des pièces de plomberie.



**Figure (2-17) : Groupage de pièces : 260 à 1580g**

**4/ Métallurgie**

La métallurgie étudie la structure physique des matériaux dans les différentes phases. L'étude métallurgique nous permet d'élaborer un diagramme très utile lors de la réalisation des pièces par moulage. Un tel diagramme donne les valeurs de la température du liquide pour différents taux de carbone. Mais dans le cas des aciers industriels, il faut tenir compte des autres éléments d'alliages entrant dans la composition des aciers.



**Figure (2-18) : Diagramme d'équilibre Fer-Carbone pour les aciers au Carbone Ou faiblement alliés. ( voir bibliographie 3 )**

L'ensemble des résultats obtenus dans la figure ci-dessus permettent d'apprécier le liquidus et le solidus des aciers industriels. Ce qui a conduit les auteurs à proposer un diagramme indicatif fer-carbone.

Par ailleurs, le tableau suivant présente des valeurs expérimentales pour des aciers faiblement et fortement alliés, ainsi que pour les aciers austénitiques à 12% de manganèse .

Le fondeur peut ainsi calculer avec plus de précision  $T_c$  et éviter des surchaufes excessives.

AFNOR	SAE (Society Of Automotive Engineers) n°	Selon Notre étude °C
XC20	1020	1510
XC 50	1045	1489
30 CD 4-M	4130	1499
40 CD4-M	4140	1497
.Z 6 C13 -M		1499
Z 12 C13 -M	410	
Z 12 CN 17 08 -M	302	1452
Z 30 CN 2520-M		1377

**Tableau (2-1) :Tableau des températures des liquidus. ( voir bibliographie 3 )**

## 5/ Moulage a la cire perdue

Le moulage a la cire perdue est un procédé ancien qui remonte à l'âge de bronze. Il était utilisé pour la réalisation de statues et des objets religieux en bronze.

En effet, vue sa simplicité et sa capacité a reproduire des formes complexes et des états de surface très finis, l'industrie l'a adopté pour la réalisation des pieces mécaniques en alliages.

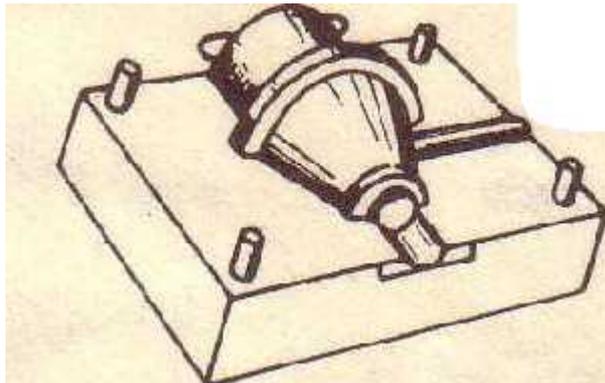
Le chemin classique de l'opération débute par une coquille ou le modèle en cire est coulé ,puis l'empreinte laissée par le modèle en cire et en fin la coulée, ont obtient la pièce finale.

**a) Elaboration de la coquille:** On prépare un modèle – maitre avec une cire spéciale ou une matière plastique (par exemple) avec retrait ce qui permet de réaliser une coquille a retrait nul.

Cette coquille est destinée a recevoir de la cire sous pression a partir d'une machine a couler sous pression.

La « cire » perdue, portée a une température précise, est injectée sous une pression de 30 kg/cm<sup>2</sup> dans la coquille légèrement passée au savon. Une de ces « cires » est un mélange complexe composé de : ( voir bibliographie 4 )

- 60 % de paraffine,
- 25 % de cire de carnoba,
- 10 % de cirésine,
- 5 % de cire d'abeille raffinée.



**Figure (2-19) : reproduction par cire de la pièce a fabriquer.**

On extrait le modèle en cire de la coquille. Cette coquille permet d'obtenir des modèles en série.

**b) Préparation des modèles:** Les modèles sont ébavurés, puis montés au fer chaud sur une grappe en cire qui servira de grappe de coulée. On dispose, si cela est nécessaire, des évents et des tirants d'air.

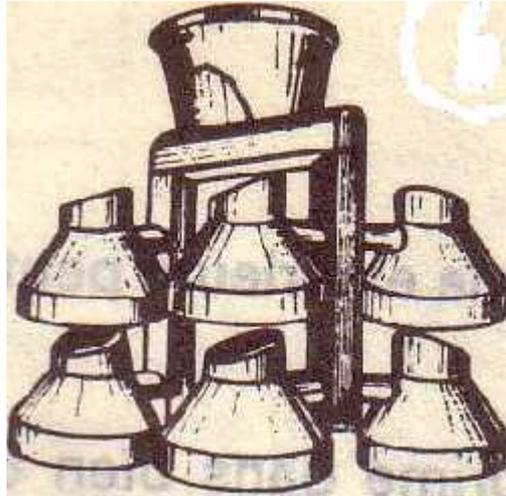


Figure (2-20) : Montage des cires en grappes.

Ce travail peut être effectué à la chaîne, les modèles étant amenés devant les ouvriers sur de petits tapis roulants, les grappes peuvent être suspendues à une petite chaîne aérienne.

**c) Préparation des moules:** Les modèles, disposés en grappes, sont enrobés dans la « potée » qu'on applique, soit au pistolet, soit par trempage. Dans les deux cas, on évitera soigneusement la production de bulles d'air qui peuvent s'emprisonner dans la potée ou le liant. Lorsque l'épaisseur de potée est suffisante, on réalise le moule complet.

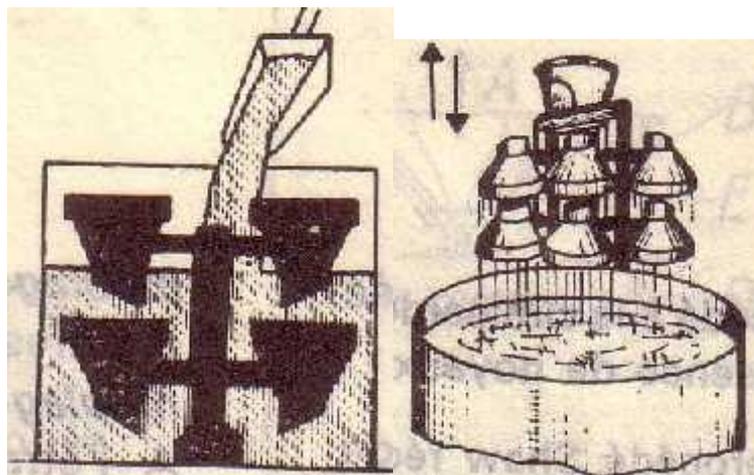


Figure (2-21) : Enrobage des grappes.

Ce liant est ensuite traité au bain-marie jusqu'à ce qu'il prenne une consistance convenable. Un exemple de composition : ( voir bibliographie 4 )

- 8 volumes de silicate d'éthyle.w
- 1 volume d'eau.
- 1 à 2 volumes d'alcool éthylique.
- Traces d'acide chlorhydrique.

L'élimination du modèle se fait par chauffage du moule dans un four pour fondre le modèle (30 puis 80°C ) suivi d'une déshydratation du moule à 130°C. ( voir bibliographie 4 )

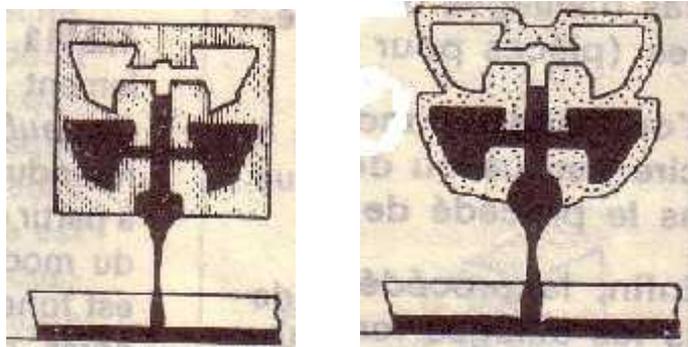


Figure (2-22): Evacuation du modèle en cire.

La cuisson du moule est opérée avec précaution (12 à 48 h vers 950 à 1050°C) dans un four pour préparer le moule à la coulée de l'alliage. ( voir bibliographie 4 )

**d) Coulée des moules:** Les moules, encore chauds, peuvent être, soit coulés directement, soit retournés et clavetés sur un four à creuset basculant. On retourne le tout ; creuset en haut, moule en bas. Une pression gazeuse, appliquée au fond de creuset, chasse le métal dans les moindres détails de l'empreinte.

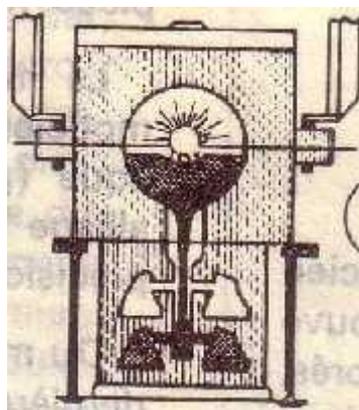
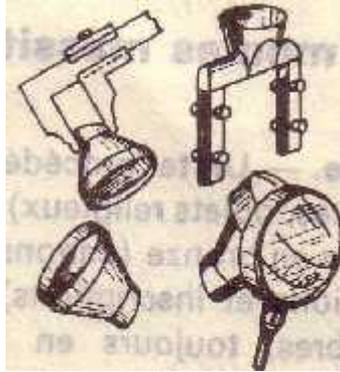


Figure (2-23): Coulée du métal dans le moule.

Dans la figure ci-dessus le métal est aspiré dans l'empreinte. On brise alors délicatement la matière des moules et on récupère les pièces.

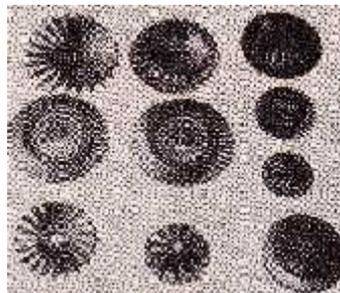
La technique des fondeurs d'art et des mécaniciens – dentistes est maintenant industrialisée.



**Figure (2-24) : Séparation des pièces et contrôle.**

Après avoir coulé le métal et après refroidissement, on sépare la pièce des produits réfractaires constituant le moule soit par décochage mécanique, soit par désagrégation du moule au moyen de produits chimiques. Les pièces peuvent enfin subir un traitement thermique.

### **5.1/ Pièces moulées par le procédé à la cire perdue**



**Figure (2-25) : Pièces de turbine obtenues par moulage de précision à la cire perdue.**



**Figure (2-26) : Pièces pour l'aéronautique obtenues par moulage de précision à la cire perdue.**

Ce procédé trouve maintenant un domaine d'application très vaste pour la réalisation :

- Soit de pièces de différents alliages dont les formes ne sont pas usinables.
- Soit de pièces en alliages très durs et par suite inusinables ou difficilement usinables.
- Soit de pièces en alliages pouvant être usinées mais que le moulage à la cire perdue permet d'obtenir à meilleur compte (gain de masse, suppression de l'usinage, meilleur aspect superficiel...)

## **5.2/ Avantages, inconvénients et résultats**

Il permet d'obtenir des pièces à surfaces très lisses, sans couture de moulage, avec le minimum ou pas d'usinage car il est très précis, avec reproduction fidèle des détails d'une pièce. Les rugosités superficielles sont, suivant les alliages, de 1,5 à 3 µm. on peut obtenir par ce procédé, à l'état brut de coulée : ( voir bibliographie 3 )

- Des filetages de toutes dimensions.
- Des taraudages de 2 mm de diamètre.
- Des trous de 5/10 de mm de diamètre et de 1 cm de longueur.
- Les trous chambrés dont la chambre est de section carrée ou rectangulaire.

L'outillage et les matériels nécessaires, comme les contrôles obligatoires, réclament un nombre élevé de pièce identiques à produire. Deux catégories de pièces sont intéressantes à produire par ce procédé :

a/ Pièces ne pouvant être produites autrement pour les raisons suivantes :

- Forme ne pouvant être obtenue par usinage.
- Alliage mis en œuvre extrêmement dur.

b/ Pièces pour la fabrication desquelles le procédé offre les avantages suivants :

- **Techniques** : substitution, par une pièce unique, de plusieurs pièces assemblées.
- **Temps** : rapidité de production (usinage très réduit ou supprimé).
- **Prix** : prix de revient moins élevé.

Les pièces ne subissent pas ou très peu d'opérations de parachevement (ébarbage, usinage).

## Bibliographie

- 1) Technique de l'ingénieur M3 Métallurgie Fonderie et Moulage  
Ed : technique de l'ingénieur 1989.
- 2) TRE TRYCKARE CAGNER ET CO Encyclopédie de l'aviation Ed : HETIER  
1973.
- 3) H. Coste cours élémentaires de fonderie Tome 2 Ed :
- 4) H. Coste cours élémentaires de fonderie Tome 6 Ed :
- 5) BENTRAD HOCINE Cours de propulsion 2006-2007
- 6) [www.wikipedia.com](http://www.wikipedia.com)
- 7) [http://museedelta.free.fr/images/shema\\_reacteur.gif](http://museedelta.free.fr/images/shema_reacteur.gif)