


075718  
EX 2



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE SAAD DAHLEB BLIDA  
FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR

*Projet De Fin D'Etudes En Vue De L'Obtention Du Diplôme  
Des Etudes Universitaires Appliquées En Aéronautique*

Thème :

**CONCEPTION ET RÉALISATION DE MOULE  
EN CÉRAMIQUE POUR DEUX ROUES  
TURBINE PAR LE PROCÉDÉ DE MOULAGE À  
LA CIRE PERDUE**

**Fait par:**

Mr: Maouchi Zouheir

Mell :Meziani Ouiza

**Encadré par :**

Mr Bentrhad Hocine

**Co-promoteur:**

Mr :Settouf Mohamed

Mr: benmir Nourdine

Mr: Mustanha

**Promotion: 2008**



## *Résumé*

L'objectif de notre travail est la conception et la réalisation de deux roues turbine, une liée et l'autre libre qui seront montées sur un micro-turbopropulseur d'une puissance de 120 chevaux.

La conception de ses turbines est assistée par ordinateur en utilisant les logiciels (Turbn, Solid Works), et pour la réalisation on a choisis de procéder par la méthode de moulage à la cire perdue pour les excellents résultats qui fait ressortir.

الهدف من هذا العمل هو تصميم و صنع عجلتي توربين (مرتبطة و حرة), يتم تركيبها على  
120

عملية التصميم تمت  
من أجل انجاز ه  
عليها.  
البرامج التالية (Turbn, SolidWorks)  
طريقة القوالب بالشمع المذاب نظرا لجودة النتائج المتحصل

## *Abstract*

The object of this work is the conception and realization of two wheel harnesses which will be mounted in a turbo-propeller with a power of 120 horses.

The conception of these harnesses is assisted by computer using the Turbn and SolidWorks software, and for the realization we used the process of lost wax moulding for its excellent results.

**Résumé**

**Liste des figures**

**Liste des tableaux**

**Introduction générale**.....(1)

**CHAPITRE I : Généralité sur les turbines**

I.1/Introduction .....(3)

I.2/Description du générateur de gaz .....(5)

I.3/ La turbine .....(6)

    a- Rôle et description de la turbine .....(6)

    b-Types de turbine axiale.....(8)

        Turbine à action : .....(8)

        Turbine à réaction : .....(9)

        Turbine Liée et Libre : .....(9)

I.4 / Etude thermodynamique .....(10)

I.4.1/ Etude théorique .....(10)

I.4.2/ Evolution réelle .....(11)

I.4.3/Travail et puissance d'un étage turbine .....(12)

    - Travail de détente et puissance théorique de l'étage .....(12)

    - Travail de détente et puissance réelle de l'étage .....(13)

I.4.4/Rendementturbine .....(13)

I.4. 5 /Diagramme des vitesses dans un étage .....(14)

I.4.6/Degré de réaction .....(15)

I.5 / Profil d'aube turbine et fixation .....(16)

I.6 / Matériaux turbine .....(18)

I.6.1/Matériaux utilisés couramment.....(19)

    - Distributeur turbine.....(19)

    -Disque turbine.....(19)

---

-Ailettes de turbine.....	(20)
I.6.2/Développement actuel.....	(20)
I.6.3/Amélioration concernant l'élaboration des matériaux.....	(21)
Solidification dirigée.....	(21)
Monocristaux.....	(21)
Eutectiques orientés.....	(22)
Matériaux renforcés par fibres.....	(22)
Les céramiques.....	(22)
I.7 /Refroidissement turbine .....	(22)
a) convection interne .....	(22)
Chemisage.....	(23)
par cavité.....	(23)
Par canaux .....	(24)
b) par film protecteur et jet .....	(24)

## **CHAPITRE II : Techniques et procédés de moulage**

II.1/ Définition de la fonderie .....	(26)
II.2/ Terminologie .....	(26)
II.3/ Les alliages .....	(28)
Les fontes .....	(29)
Les aciers.....	(29)
Les alliages base cobalt ou nickel.....	(30)
Les alliages d'aluminium.....	(30)
Les alliages de magnésium.....	(30)
Les alliages de cuivre .....	(30)
Les alliages de zinc.....	(31)
II.4/Les procédés de moulage .....	(31)

---

II.4.1- Moulage en moule non permanent.....	(32)
a- Le moulage à vert.....	(32)
le moulage à plat.....	(33)
le moulage en mottes .....	(34)
b- le moulage en sable a prise chimique .....	(36)
c- le procédé sous vide .....	(36)
d-le moulage à modèle perdu .....	(38)
le moulage a la cire perdue.....	(38)
-Principe .....	(38)
- Modèles .....	(38)
- Noyautage.....	(38)
- Montage des grappes.....	(39)
- Fabrication des moules en céramique.....	(39)
- Elimination du modèle.....	(41)
- Décochage .....	(41)
Le moulage avec modèle polystyrène.....	(42)
Le procédé modèle perdu ( <i>lost foam</i> ).....	(43)
II.4.2. Moulage en moule permanent .....	(44)
a- le moulage en coquille par gravité.....	(45)
-Constitutions d'un moule.....	(45)
b - le moulage basse pression.....	(46)
c- le moulage sous pression .....	(47)
-à chambre chaude .....	(48)
-à chambre froide .....	(49)
d- Le thixomoulage.....	(50)
e- le squeeze casting.....	(50)
f- la coulée continue .....	(51)
g- la centrifugation.....	(52)

---

II.5/ conception des pièces .....(54)

**CHAPITRE III : étude de conception des turbines**

III.1/Introduction.....(58)

III.2/Description du moteur .....(58)

III.2.1-Le point de fonctionnement .....(59)

III.3/Etude et conception des turbines .....(62)

    a-Etude et conception de la turbine liée.....(62)

        Présentation du logiciel TURBN.....(63)

        Détermination des dimensions de la roue.....(65)

        Détermination de la géométrie des aubes rotor .....(66)

        Dessin des profils des aubes .....(66)

        Présentation du logiciel SOLIDWORKS .....(67)

        Dessin sur SOLIDWORKS .....(69)

            1 - Création des plans .....(69)

            2 -Traçage de la ligne moyenne de l’aube.....(69)

    b - Étude de la conception de la turbine libre .....(71)

        Détermination des dimensions de la roue .....(74)

        Détermination de la géométrie des aubes rotor .....(74)

        Dessin des profils des aubes .....(75)

III.4/ Les alliages qui doivent être utilisés pour la réalisation des aubes turbine .....(76)

III.4.1-Propriétés des aubes de turbine .....(77)

III.4.2-L’élaboration des aubes turbine .....(77)

---

**CHAPITRE IV : Réalisation pratique des roues turbine**

IV.1/Introduction .....(81)

IV.2/Réalisation des modèles .....(81)

IV.2.1-Calcul du retrait .....(81)

IV.2.2-Réalisation du modèle.....(82)

    a-Réalisation du disque intérieur.....(82)

    b-Réalisation de l’anneau.....(84)

IV.2.3-Réalisation des ailettes.....(86)

IV.2.4-Assemblage des parties du disque modèle.....(88)

IV.3/Réalisation des modèles en cire.....(89)

IV.3.1-Réalisation des disques.....(89)

    a- Le moule .....(89)

    b- la cire..... (89)

    c- la coulée.....(90)

IV.3. 2-Coulé des ailettes.....(93)

IV.4/ Réalisation du moule en céramique.....(95)

***Conclusion***.....(96)

***Bibliographie***

***Annexe01***

***Annexe02***

---

**CHAPITRE I : Généralité sur les turbines**

**CHAPITRE II : Techniques et procédés de moulage**

Tableau (II.1) : les retraits volumétrique de quelques alliages de la fonderie.....(27)

Tableau (II.1) : données relatives aux fontes .....(annexe 01)

Tableau (II.2) : données relatives aux aciers.....(annexe 01)

Tableau (II.3) : données relatives aux nickel. ....(annexe 01)

Tableau (II.4) :données relatives aux alliages d'aluminium.....(annexe 01)

Tableau (II.5) : données relatives aux alliages de magnésium. ....(annexe 01)

Tableau (II.6) : Données relatives aux alliages du cuivre.....(annexe 01)

Tableau (II.7):données relatives aux alliages de magnésium. ....(annexe 01)

Tableau (II.8) : épaisseurs et tolérances. ....(annexe 01)

Tableau (II.9 ) : comparatif des procédés de moulage des alliages d'aluminium  
.....(annexe 01)

Tableau (II.10)- caractéristiques du moulage en motte.....(34)

Tableau (II.11) – caractéristiques du moulage en sable a prise chimique.....(36)

Tableau (II.12) -caractéristiques des procédés de moulage.....(37)

Tableau (II.13) – caractéristiques du moule a la cire perdu.....(42)

Tableau(II.14) -caractéristiques du moulage avec modèle polystyrène.....(42)

Tableau (II.15)- caractéristiques du procédé lost foam.....(44)

Tableau (II.16) - caractéristiques du moule permanent.....(46)

Tableau (II.17) -caractéristiques du moulage basse pression .....(47)

Tableau (II.18) - caractéristique du moulage sous pression utilisant une chambre  
chaude.....(49)

Tableau (II.19)-caractéristiques du moulage sous pression utilisant dans la chambre  
froide.....(49)

Tableau (II.20)- caractéristiques du thixomoulage..... (50)

Tableau (II.21) - caractéristiques du squeeze casting.....(51)

Tableau (II.22) -caractéristiques de la coulée continue.....(52)

Tableau (II.23)- caractéristiques du moulage par centrifugation... .....(53)

Tableau (II. 24) : norme ISO .....(annexe 01)

---



### **CHAPITRE III : étude de conception des turbines**

Tableau (III.1) : résultats du compresseur de la série T de GARETT... ..	(61)
Tableau (III.2) : point de fonctionnement du moteur.....	(62)
Tableau (III.3) : conditions de la conception.....	(63)
Tableau (III.4): dimensions de la roue.....	(66)
Tableau (III .5): coordonnées des aubes.....	(66)
Tableau (III .6) : Le profil dans la position hub.....	(70)
Tableau (III.7) : Le profil dans la position moyenne de l'aube.....	(70)
Tableau (III.8) : Le profil dans la position tip.....	(71)
Tableau (III.9) : paramètres de sortie turbine liée.....	(71)
Tableau (II.10) : paramètres d'entrée de la turbine libre.....	(72)
Tableau (III.11) : paramètres d'entrée de la turbine libre. ....	(74)
Tableau (II.12) : dimensions des profils d'aubes.....	(75)
Tableau (III .13) : Le profil dans la position hub.....	(75)
Tableau (III.114) : Le profil dans la position moyenne de l'aube.....	(75)
Tableau (III.15) : Le profil dans la position tip.....	(75)
Tableau (III.16) : les principaux alliages des aubes turbines.....	(76)
Tableau (III.1) :Tableau des symboles –densités- points de fusion des principaux métaux et les éléments d'addition .....	(annexe 01)

### **CHAPITRE IV : Réalisation pratique des roues turbine**

Tableau (IV .1) : les dimensions utilisées dans la réalisation.....	(82)
---	------

---

## **CHAPITRE I : Généralité sur les turbines**

Figure [I.1] : Disposition schématique des principaux organes de la locomotive à turbine à gaz <i>Brown Boveri</i> .....	(3)
Figure [I.2] : Turbine à gaz pour automobile ( <i>Chrysler</i> ).....	(4)
Figure [I.3] : les trois type de moteurs à réaction.....	(5)
Figure [I.4] : un schéma montrant les principaux éléments d'une turbine à gaz.....	(5)
Figure [I. 5] : Turbine d'aviation.....	(7)
Figure [I. 6] : une grille de turbine.....	(7)
Figure [I.7] : un étage stator-rotor.....	(8)
Figure [I.8] : image réelle d'une turbine à action .....	(9)
Figure [I.9] : dessin schématique d'une turbine à action.....	(9)
Figure [I.10] : un étage de turbine à réaction .....	(9)
Figure [I.11] : dessin schématique d'une turbine à réaction.....	(9)
Figure [I.12] : turbine libre .....	(10)
Figure [I.13] : turbine liée .....	(10)
Figure [I.14] : diagramme d'évolution théorique du cycle thermodynamique.....	(11)
Figure [I.15]: diagramme d'évolution théorique et réel du cycle thermodynamique.....	(12)
Figure [I.16] : Diagramme des vitesses.....	(14)
Figure [I.17] : Représentation un profil d'aube.....	(16)
Figure [I.18] : Paramètres géométriques d'un profil d'aube.....	(16)
Figure [I.19] : représentation du vrillage turbine.....	(17)
Figure [I.20] : Ailette avec pied de sapin.....	(17)
Figure [I.21] : Ailette coulée à la cire perdue.....	(18)
Figure [I.22] : coupes faites sur un matériau.....	(21)
Figure [I.23]: refroidissement par chemisage.....	(23)
Figure [I.24] : les labyrinthes dans une aile.....	(23)
Figure [I.25] : Refroidissement par film protecteur .....	(24)

---

**CHAPITRE II : Techniques et procédés de moulage**

Figure [II.1] : Technique de fonderie.....	(26)
Figure [II.2] : diagramme d'équilibre de phases simplifiées d'un alliage binaire.....	(28)
Figure [II.3] : schéma descriptif d'un moule non permanent.....	(32)
Figure [II.4] : principe du moulage au naturel (modèle simple sans noyau.....	(33)
Figure [II.5] : principe de serrage.....	(34)
Figure [II.6] : principe du moulage en motte.....	(35)
Figure [II.7] : étapes de la fabrication.....	(37)
Figure [II.8] : montage des modèles en grappe .....	(39)
Figure [II.9] : moulage monobloc.....	(40)
Figure [II.10] : moulage à carapace.....	(40)
Figure [II.11] : coulée du métal.....	(41)
Figure [II.12] modèle polystyrène ensuite enseveli dans le sable.....	(42)
Figure [II.13] phases de fabrication depuis l'injection des modèles.....	(43)
Figure [II.14] principe du moule permanent.....	(44)
Figure [II.15] : descriptif d'un moule permanent.....	(45)
Figure [II.16] : Principe de la basse pression.....	(47)
Figure [II.17] : Schéma d'une machine d'injection sous pression.....	(48)
Figure [II.18] : Système d'injection à chambre chaude pour le moulage sous pression.....	(49)
Figure [II.19] : système d'injection à chambre froide pour moulage sous pression installé sur des presses horizontales.....	(49)
Figure [II.20] : principe du squeeze casting.....	(51)
Figure [II.21] schéma de principe de coulée continue.....	(52)
Figure [II.22] : machines de coulée sous pression centrifuge à axe vertical.....	(53)
Figure [II.23] : organigramme non exhaustif des techniques de moulage et de noyautage.....	(54)
Figure [II.24] : facteurs principaux pour la réalisation de pièces coulées.....	(55)

**CHAPITRE III : étude de conception des turbines**

Figure (III .1) : schéma du micro turbopropulseur.....	(58)
Figure (III.2) : La poussée spécifique en fonction de la consommation pour les différentes températures et différents taux de compression.....	(60)

---

Figure (III. 3 : les performances compresseur selon la série T88.....	(61)
Figure (III.3): tableau des performances moteur et les paramètres internes de chaque station....	(63)
Figure (III.4) : différentes stations de la turbine.....	(63)
Figure (III.5) : dimensions de la turbine liée .....	(64)
Figure (III.6) : dimension et angles des profils à la position hub.....	(64)
Figure (III.7) : dimensions et angles des profils à la position moyenne.....	(65)
Figure (III.8) : dimensions et profils des aubes à la position tip.....	(65)
Figure (III.9): dimensions de la gante et l'aube .....	(65)
Figure (III.10) : Profil aérodynamique T6 des turbines à gaz.....	(67)
Figure (III.11) : Interface du logiciel SOLIDWORKS.....	(68)
Figure(III.12) Traçage de la ligne moyenne de l'aube.....	(68)
Figure (III.13) : profils d'aube.....	(70)
Figure (III .14) : schématisation de la turbine liée.....	(71)
Figure (III.15) : tableau des performances moteur et les paramètres internes de chaque station....	(72)
Figure (III.16) : dimensions de la turbine libre.....	(73)
Figure (III.17) : dimension et angles des profils à la position hub.....	(73)
Figure (III.18) : dimensions et angles des profils à la position moyenne.....	(74)
Figure (III.19) : dimensions et profils des aubes à la position tip.....	(74)
Figure (III .20) : schématisation de la turbine libre.....	(76)

#### **CHAPITRE IV : Réalisation pratique des roues turbine**

Figure [IV.1] : les différentes parties du disque modèle.....	(82)
Figure [IV.2] : disque après chariotage et avant mise en forme.....	(83)
Figure [IV.3] : disque monté au mandrin du tour et peint en blanc.....	(83)
Figure [IV.4] : disque après mise en forme.....	(84)
Figure [IV.5] : anneaux en aluminium peint en bleu.....	(84)
Figure [IV.6] : anneaux devisé avec des traits inclinés.....	(85)
Figure [IV.7] : anneaux avec des clous implantés tout au tour.....	(85)
Figure [IV.8] : différentes parties du plateau deviseur.....	(86)
Figure [IV.9] : différentes parties du moule de l'ailette.....	(86)
Figure [IV.10] : cire de démoulage.....	(87)

---

Figure [IV.11] : opération de coulé de mastic pour la réalisation d'une ailette.....	(87)
Figure [IV.12]: l'anneau avec toutes les ailettes.....	(88)
Figure [IV.13] : le moule de la cire.....	(89)
Figure [IV.14] : cire AQUA.....	(90)
Figure [IV.15] : silicone SEALANT.....	(90)
Figure [IV.16] : coulée de cire.....	(91)
Figure [IV.17] : démoulage du demi-modèle en cire.....	(91)
Figure [IV.18] : traçage du corps.....	(92)
Figure [IV.19] : la coulée de la deuxième moitié du disque en cire.....	(92)
Figure [IV.20] : assemblage des deux demi-modèles en cire.....	(93)
Figure [IV.21] : la forme finale du disque modèle en cire.....	(93)
Figure [IV.22] : Opération de coulée des ailettes en cire.....	(94)
Figure [IV.23] : modèles en cire.....	(94)
Figure [IV.24] : modèle avec les cure-dents.....	(95)
Figure [IV.25] : modèles en cire avec événements et chenal de coulée.....	(95)
Figure [IV.26] : le contenant en plâtre.....	(96)
Figure [IV.27] : Le contenant avec de la céramique.....	(96)
Figure [IV.28] : modèle en cire enduit de céramique par sa partie inférieure.....	(96)
Figure [IV.29] : moule en céramique prêt à être étuvé.....	(97)
Figure [IV.31] : La mise du moule dans le four.....	(98)

---

1er chapitre :

Généralité

sur les

turbines



## I .1/Introduction

La turbine à gaz ou le générateur de gaz est une turbomachine qui permet la détente d'un fluide tout en recueillant son énergie sous forme mécanique.

On utilise les turbines à gaz pour la propulsion des navires, des automobiles et des trains. La figure ci-dessous montre un exemple de turbine à gaz utilisée pour manœuvrer une locomotive. On note la présence des éléments de turbomachine à savoir : le compresseur, la chambre de combustion, la turbine ainsi que le réducteur, élément essentiel pour la réduction de la vitesse de rotation et la transmission du couple.

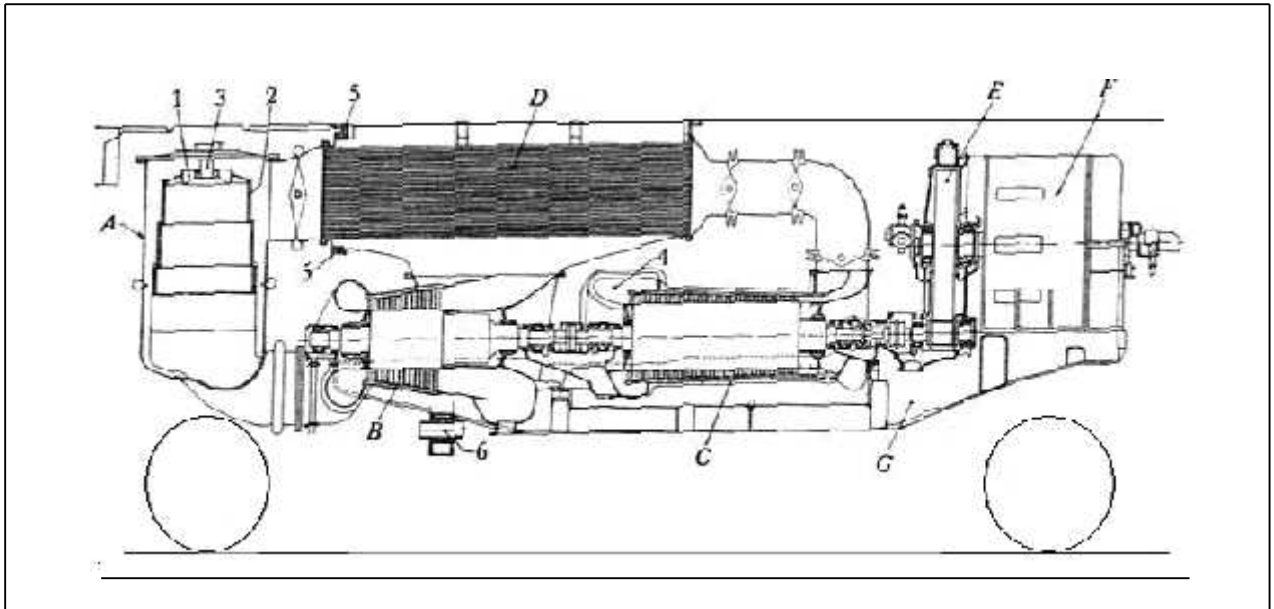


Figure [I.1] : Disposition schématique des principaux organes de la locomotive à turbine à gaz *Brown Boveri*. [2]

L'ensemble de la turbine est monté sur le châssis principal de la locomotive

- |                           |  |
|---------------------------|--|
| A, Chambre de combustion  | 1, Distributeur  |
| B, Turbine à gaz          | 2, Paroi intérieure  |
| C, Compresseur axial      | 3, brûleur à injection central                               |
| D, Réchauffeur d'air      | 4, Entrée d'air du compresseur                               |
| E, Réducteur de vitesse   | 5, Joint de dilatation                                       |
| F, Génératrice principale | 6, Suspension du châssis auxiliaire a celui de la locomotive |



Similairement l'adoption de la turbine à gaz dans le secteur de l'automobile s'est très vite rendue, la figure [I.1.2] montre un prototype proposé par *Chrysler* où l'on remarque la présence d'un turbocompresseur à turbine de puissance utile qui augmente la puissance et le rendement du moteur.

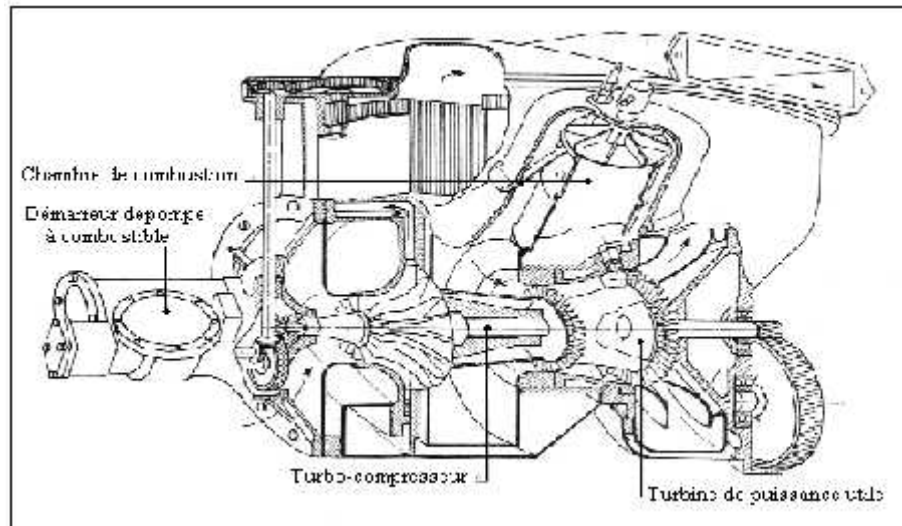


Figure [I.2] : Turbine à gaz pour automobile (*Chrysler*). [2]

Le moteur à réaction, variante de la turbine à gaz, est utilisé pour la propulsion des aéronefs et c'est dans ce domaine que la turbine a trouvé son utilisation la plus spectaculaire. Employée initialement sur les appareils militaires rapides mais à rayon d'action réduit, elle s'étend maintenant aux long-courriers de l'aviation civile.

Cependant, les moteurs employés en aéronautique utilisent une grande masse d'air selon le cycle thermodynamique de *Baryton*. ; Celui-ci est d'abord comprimé, puis oxyde le combustible puis dilaté à travers une buse (tuyère) afin d'expulser le fluide à vitesse élevée et propulser de ce fait l'engin dans le sens inverse selon la deuxième loi de *Newton* « la loi de l'action et de la réaction ».





Il existe trois types de moteurs à réaction, les turbo réacteurs, les turbopropulseurs et les turbofans, qui fonctionnent tous sensiblement selon le même principe.

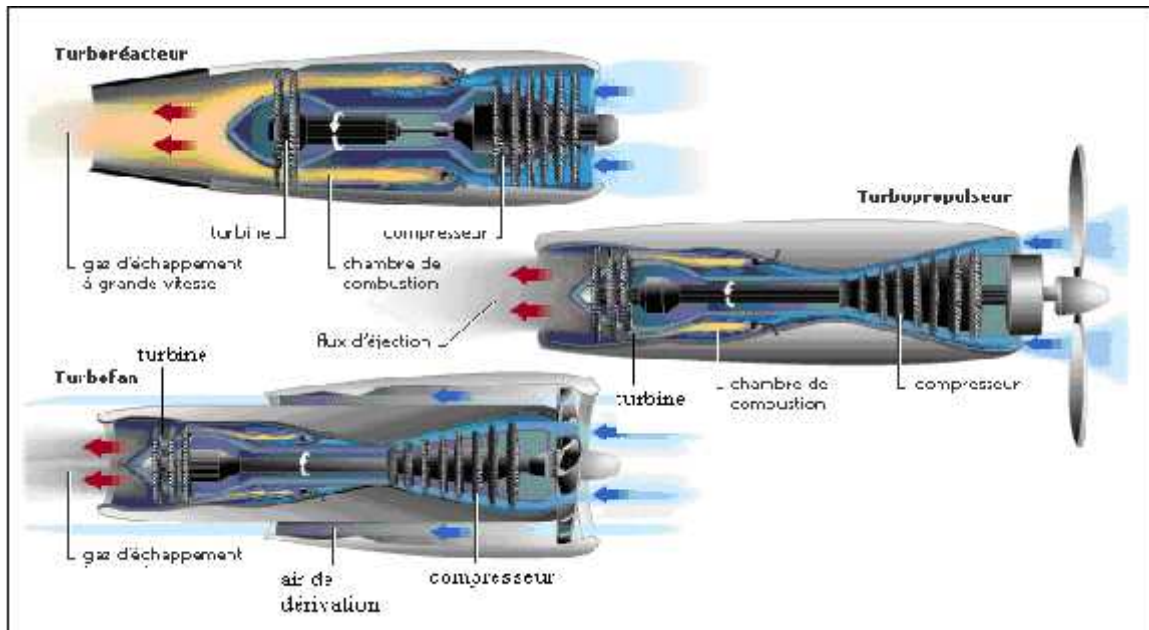


Figure [I.3] : les trois types de moteurs à réaction.[10]

## I.2/Description du générateur de gaz

La turbine comme le montre la figure ci-dessous, est composée de trois éléments principaux : le compresseur, la chambre de combustion et la turbine.

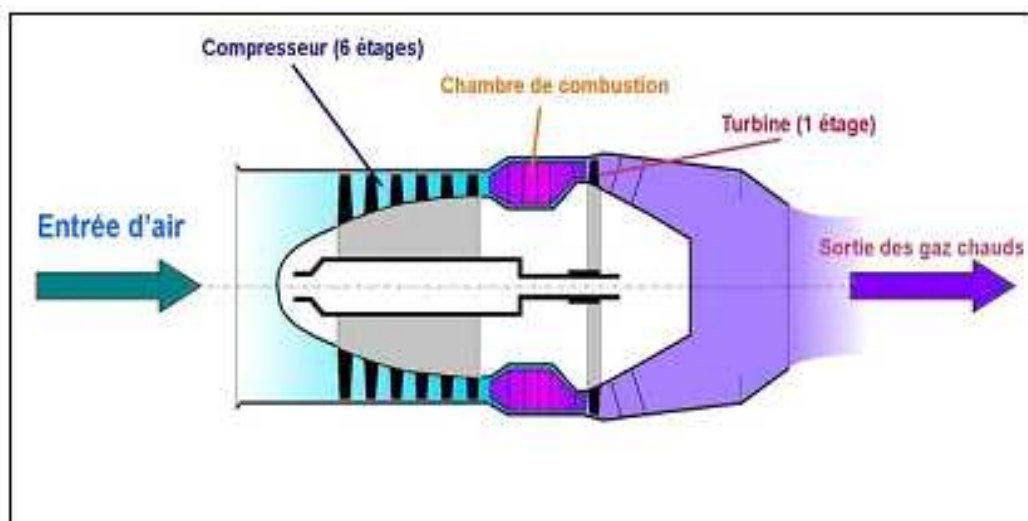


Figure [I.4] : un schéma montrant les principaux éléments d'une turbine à gaz. [10]



Le rôle de chaque élément est défini dans les paragraphes suivants :

- Le compresseur est situé directement derrière l'entrée d'air. Il aspire l'air, le comprime et l'injecte dans la chambre de combustion. On distingue deux types de compresseur: le compresseur axial et le compresseur radial (centrifuge). Pour une amélioration de la compression du rendement de la turbine à gaz et aussi pour éviter le phénomène du pompage, le compresseur est parfois équipé d'une partie Basse pression et d'une partie Haute pression, installées l'une derrière l'autre et travaillant chacune à une vitesse optimale.
- La chambre de combustion peut être annulaire ou composée d'une série de tubes en acier réfractaire disposés en anneau et dans lesquels le combustible est mélangé avec l'air et prend feu. La chambre de combustion est conçue de façon à obtenir la combustion optimale du mélange pour que le plus d'énergie possible soit produite sous forme calorifique. Cette énergie entraîne à son tour une très haute augmentation de température et, par conséquent, une très forte expansion des gaz qui se détendent ensuite à travers la turbine.
- La turbine est constituée d'un ou de plusieurs étages d'aubes successivement fixes et mobiles. Les aubes fixes, appelées aussi directrices, se trouvent dans le carter turbine. Comme dans le compresseur, les aubes mobiles sont montées sur des disques séparés qui sont reliés au compresseur en rotation par un arbre d'entraînement. Presque les deux tiers de l'énergie produite par les gaz chauds sont absorbés par la turbine du générateur (turbine HP) et entraînent le système de compression. L'énergie restante est transformée par la turbine de travail (turbine BP) et utilisée soit pour entraîner l'hélice dans le cas de turbopropulseur sinon détendue dans une tuyère dans le cas de turbojet.

## I.3 / La turbine

### a- Rôle et description de la turbine

La turbine a pour rôle d'entraîner le compresseur, les accessoires (régulateur, pompes alternateur...) et dans le cas du turbopropulseur, l'hélice en prélevant sur les gaz de combustion à très forte température une partie de leur énergie cinétique et de pression.



La figure ci-dessous montre un exemple de turbine d'aviation



Figure [I.5] : Turbine d'aviation.[10]

Comme le compresseur, il existe des turbines axiales et des turbines centrifuges. En général, les turbines rencontrées sur les turboréacteurs sont du type « axiale », l'écoulement est parallèle à l'axe du moteur.

On peut représenter d'une manière générale un étage de turbine axiale par le schéma ci-dessous :

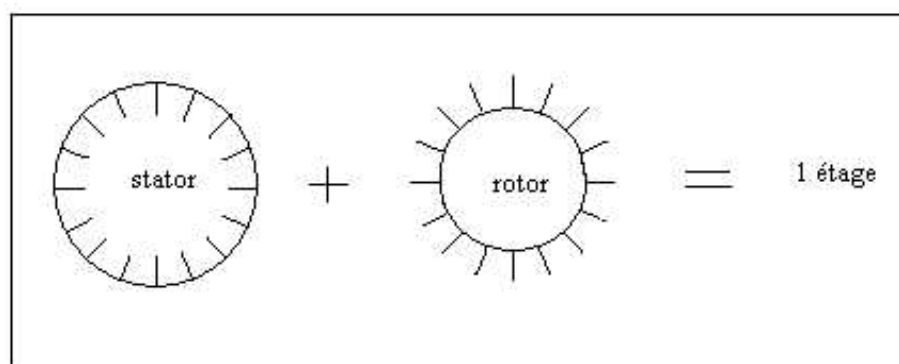


Figure [I.6] : une grille de turbine.

En effet un étage de turbine comme indiquée se compose d'une partie mobile appelée rotor (ou rouet) et d'une partie fixe appelée stator (ou selon le cas : redresseur, distributeur, diffuseur,...)



La figure [I.7] représente une vue d'une coupe transversale d'un étage turbine :

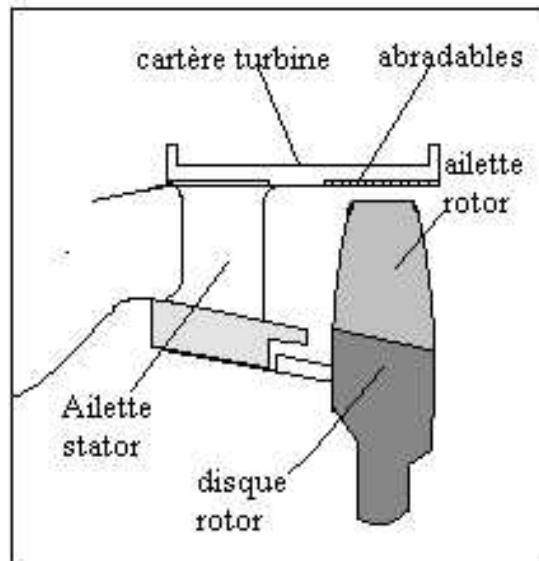


Figure [I.7] : un étage stator-rotor.

- Le stator de l'étage turbine a pour rôle de transformer une partie de l'énergie de pression délivrée par la chambre de combustion en énergie cinétique.
- Le rotor transforme cette énergie cinétique en énergie mécanique sous la forme d'un couple moteur afin d'entraîner le compresseur et les accessoires.

### b-Types de turbine axiale

Dans les turbines axiales, il existe deux sortes distinctes : la turbine à *action* et la turbine à *réaction*.

- **Turbine à action** : Dans ce type de turbine l'action des gaz sur les pales de la roue provoque la rotation et toute la détente s'effectue dans le distributeur, alors la pression à la sortie de la roue est la même qu'à l'entrée. Ce type de turbine n'est pas utilisée sur les **GTR**.



Les figures ci-dessous illustrent ce type de turbine qui représente une forme géométrique des aubes stator à forte courbure et en parenthèses pour les aubes du rotor.

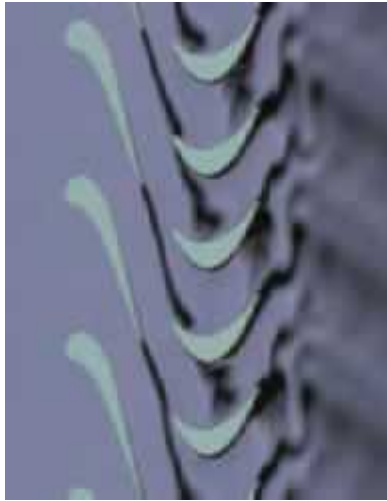


Figure [I.8] : image réelle  
d'une turbine à action.[1]

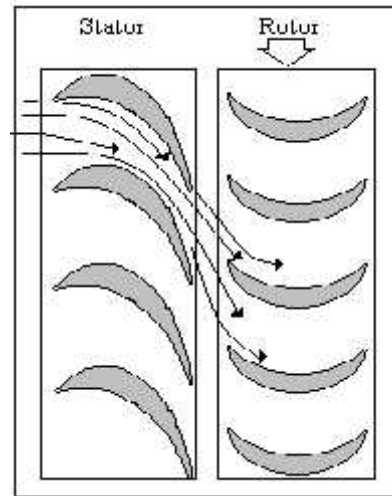


figure [I.9] : dessin schématique  
d'une turbine à action.[1]

- **Turbine à réaction** : Dans la turbine à réaction la détente des gaz chauds se réalise en partie dans l'attelage distributeur et le reste dans l'attelage rotor. La rotation de la roue est assurée par la résultante des forces aérodynamiques qui entraîne la roue. On note ici la forme des aubes rotor qui sont à moyenne courbure et de même pour les aubes de l'attelage stator.

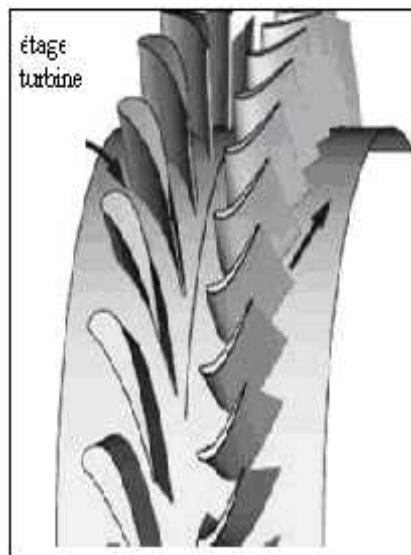


Figure [I.10] : un étage de turbine  
à réaction. [10]

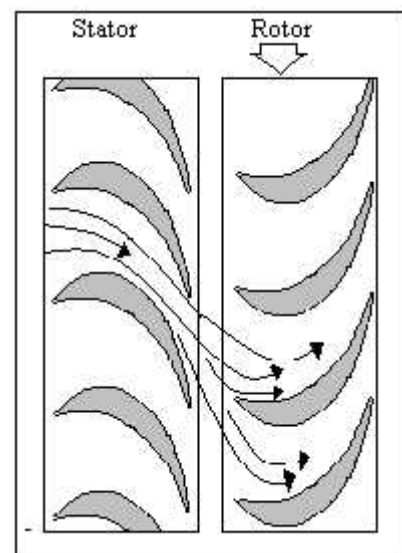


Figure [I.11] : dessin schématique  
d'une turbine à réaction. [10]



- **Turbine Liée et Libre** : la turbine est considérée comme *Liée* si le bloc correspondant est en liaison avec le compresseur avec un même arbre .Dans le cas contraire on dit que la turbine est *Libre*, c'est-à-dire qu'elle est en liaison avec un arbre servant à fournir de la puissance utile à entraîner un élément externe.

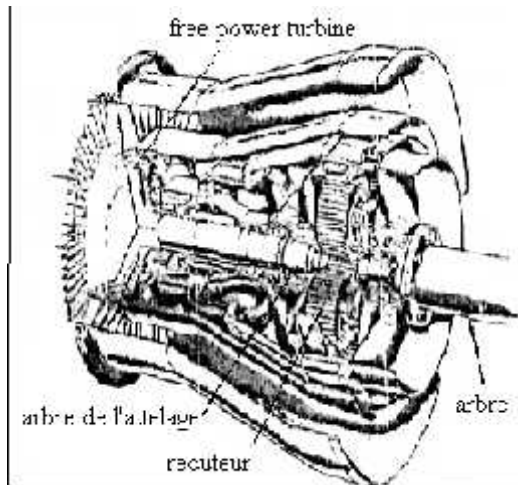


Figure [I.12] : turbine libre. [8]

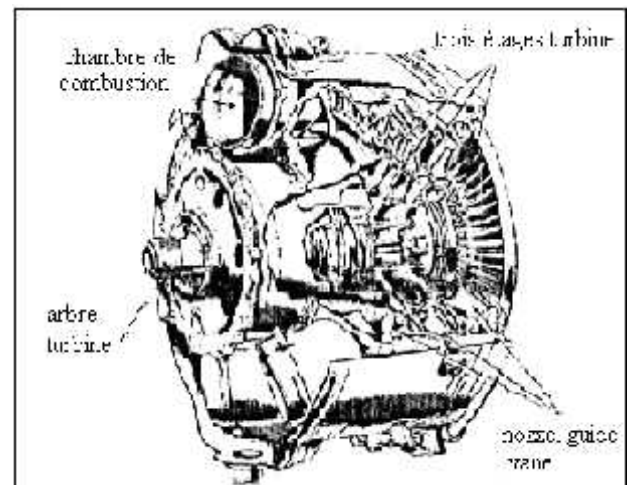


Figure [I.13] : turbine liée. [ 8]

## I.4 / Etude thermodynamique

### 1- Etude théorique

La transformation d'énergie de pression en énergie cinétique d'effectue par détente qui théoriquement est isentropique (adiabatique et réversible). Les gaz chauds étant assimilés à un gaz parfait, nous aurons entre pressions statiques et températures statiques la relation suivante [3]:

$$\frac{P}{T}^{-1} = \text{Cte} \quad (\text{I-1})$$



Dans le diagramme pression, température l'évolution thermodynamique est représentée comme suite :

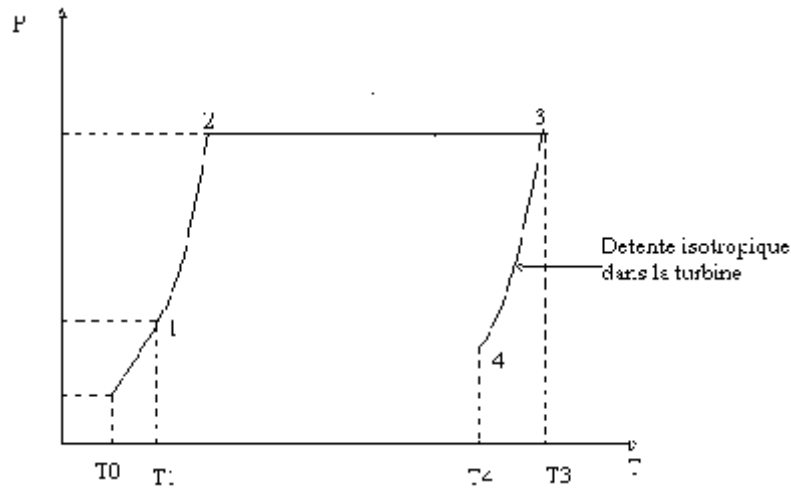


Figure [I.14] : diagramme d'évolution théorique du cycle thermodynamique.[3]

On constate alors que la détente de la pression  $P_3$  à  $P_4$  s'accompagne théoriquement d'une diminution de température de  $T_3$  à  $T_4$  suivant la relation [3]:

$$\left( \frac{P_3}{P_4} \right)^{-1} = \frac{T_3}{T_4} \quad (\text{I-2})$$

## 2- Evolution réelle

En réalité cette détente n'est pas rigoureusement isentropique, mais polytropique et nous obtenons alors en fin de détente turbine, une température réelle  $T'_4$  supérieure à  $T_4$ . La relation entre pression et température statique est alors [3]:

$$\frac{P}{T^{\frac{K-1}{K}}} = \text{Cte} \quad (\text{I-2})$$

Où  $K$  représente le coefficient polytropique et  $K >$  pour des gaz chaud.



Si l'on rapporte les deux évolutions théorique et réelle dans le même graphe (P T), on note bien la différence du cycle réel au théorique, cela est du aux pertes engendrées dans chaque élément.

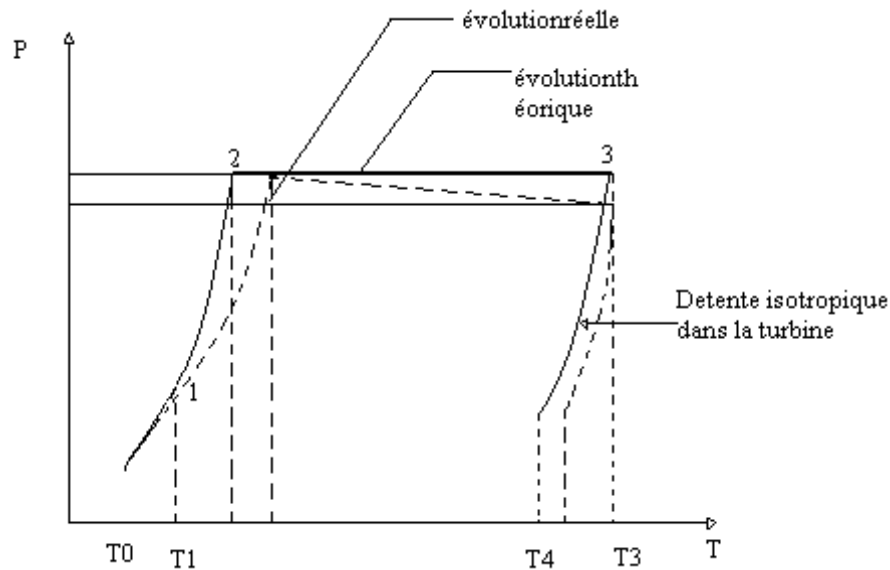


Figure [I.15] : diagramme d'évolution théorique et réel du cycle thermodynamique. [3]

### 3- Travail et puissance d'un étage turbine

#### ➤ Travail de détente et puissance théorique de l'étage

Selon le premier principe de la thermodynamique appliqué sur un système ouvert, le travail et chaleur échangée dans le transfert sera égal à la différence d'enthalpie totale. Ce travail et quantité de chaleur sont ramenés à l'unité de masse du fluide. Et en appliquant ce principe à l'évolution 3-4 décrite précédemment dans le diagramme (P,T) on aura alors :

$$\left[ \mathbf{W}_t + \mathbf{Q}_e \right]_3^4 = h \left[ + \right]_3^4 \left[ \frac{\mathbf{V}}{2} \right]_3^4 \quad (\text{I-3})$$

Sachant que c'est pour un gaz parfait et une évolution théorique on a :

-évolution isentropique  $\mathbf{Q}_{e3} = \mathbf{Q}_{e4}$

-gaz parfait  $h = C_p$





Et puisque on suppose que la vitesse axiale est constante dans l'étage :  $v_3 = v_4$ , la relation (3.1) se mettra sous la forme simplifiée suivante :

$$\left[ \mathbf{W t} \right]_3^4 = C_p (T_4 - T_3) \quad (\text{I-4})$$

On remarquant tout de suite, du faite que  $T_4$  Etant inférieur à  $T_3$  le travail sera négatif ; le fluide cède bien de l'énergie à la roue de la turbine ; celle-ci reçoit alors le travail massique équivalent à :

$$\mathbf{W t}_{th} = C_p (T_3 - T_4) \quad (\text{I-5})$$

Soit  $\dot{m}_a$  et  $\dot{m}_c$  respectivement, les débits d'air et carburant, la puissance théorique que reçoit la turbine est alors exprimée par :

$$\dot{\mathbf{P}}_{t th} = (\dot{m}_a + \dot{m}_c) C_p (T_3 - T_4) \quad (\text{I-6})$$

#### ➤ Travail de détente et puissance réelle de l'étage

Similairement à l'évolution théorique l'expression du travail réel et de la puissance s'écrit en fonction de la température réelle correspondant à la détente polytropique de la manière suivante :

$$\text{-Travail de la turbine pour l'unité de masse} = C_p (T_3 - T_4) \quad (\text{I-7})$$

$$\text{-Puissance réelle} = (\dot{m}_a + \dot{m}_c) \dot{C}_p (T_3 - T_4) \quad (\text{I-8})$$

#### 4 / Rendement turbine

Le rendement turbine peut être défini comme étant le rapport de la puissance réelle sur la puissance théorique, en d'autre terme, elle caractérise la chute d'enthalpie isentropique. On écrira alors :

$$\text{Rendement turbine} = \frac{\text{Puissance réelle}}{\text{Puissance théorique}}$$



$$\eta_{\text{turbine}} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_4} \quad (\text{I-9})$$

Le rendement de la turbine est en général compris dans une marge allant de [0,85 à 0,88]

### I.5 /Diagramme des vitesses dans un étage

En caractérisant respectivement la station entrée et sortie des éléments d'un étage de turbine avec les indices  $\alpha$  et  $\beta$ . Le diagramme de vitesse est représenté sur la figure [I.16].

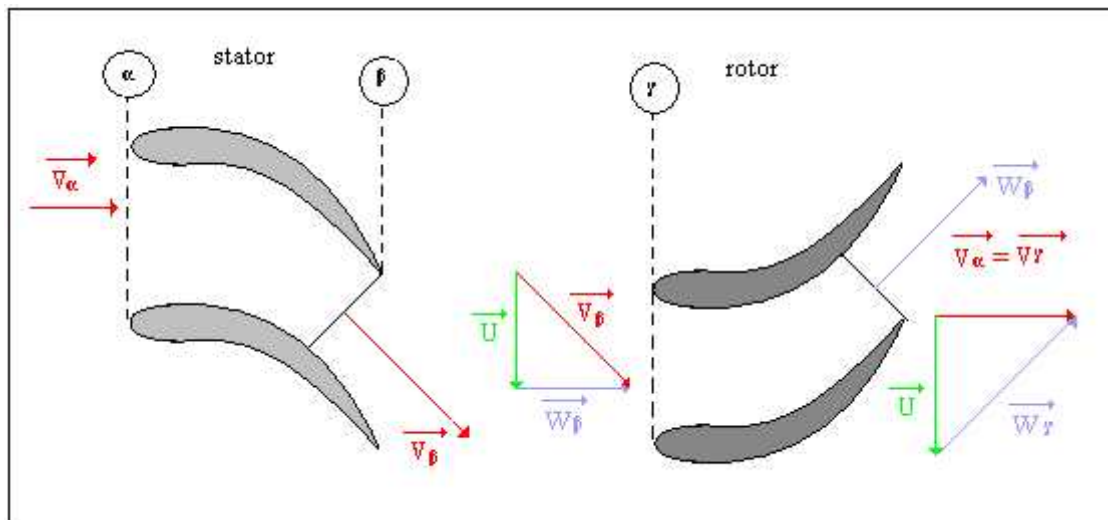


Figure [I.16] : Diagramme des vitesses.[1]

➤ *Stator* : les filets d'air sortent de la chambre de combustion et attaquent les aubes stator avec une vitesse  $\vec{V}_\alpha$  parallèle à l'axe longitudinal du moteur. Etant donné que les canaux du stator sont convergents, les filets d'air sortants se présenteront dans une direction avec une vitesse  $\vec{V}_\beta$  supérieure à celle de l'entrée  $\vec{V}_\alpha$ .

Les sections à prendre en considération sont évidemment les sections perpendiculaires aux vecteurs de vitesse.

➤ *Rotor* : le rotor est animé avec une vitesse périphérique  $\vec{U}$ , les filets d'air se présenteront à l'entrée du rotor avec la vitesse relative  $\vec{W}_\beta$  telle que :

$$\vec{V}_\beta = \vec{U} + \vec{W}_\beta \quad (\text{I-10})$$



Les canaux du rotor étant à section convergente, les filets d'air sortiront avec une vitesse relative  $\vec{W}$  telle que :

$$|\vec{W}| > |\vec{W}| \quad (\text{I-11})$$

Là aussi dans le rotor il y aura transformation d'énergie de pression en énergie cinétique donc détente. Enfin attaquer l'étage suivant dans les mêmes conditions ou dans le cas où il n'y aurait qu'un seul étage afin de ramener le vecteur de vitesse absolue dirigée parallèlement à l'axe, le constructeur s'arrange en modifiant la déflexion de l'ailette de la roue pour que :

$$\vec{V} = \vec{V} \quad (\text{I-12})$$

A la sortie du rotor nous avons :

$$(\vec{W} + \vec{U}) = \vec{V} = \vec{V} \quad (\text{I-13})$$

## 6 / Degré de réaction

Le degré de réaction représente l'énergie dans le rotor sur l'énergie de pression perdue dans l'étage. Pour une turbine à action le degré de réaction est égale a zéro ce qui se traduit par une disposition de grille d'aubes dans le distributeur fortement convergent.

Le travail de détente spécifique est proportionnel à la rotation et au carré de la vitesse tangentielle qui est exprimé par :

$$P_t = C.W = 2.m \quad (\text{I-14})$$

Toute fois des degrés de réaction différents de zéro, la chute de pression est répartie entre le distributeur et le rotor. Le cas le plus intéressant est  $R^\circ = 0,5$  dans ce cas les canaux sont également convergents dans le rotor et dans le stator et la puissance est exprimé par :

$$P_t = C.W = m.U^2 \quad (\text{I-15})$$



Dans une turbine à action la détente est effectuée dans la grille d'aubes stator, ainsi les gaz pénétrant dans le rotor sont à la température minimum possible, ce qui est un avantage indiscutable aux problèmes de résistance de matériaux posés par la turbine .De plus, la vitesse circonférentielle égale à la puissance développée par une turbine à action est supérieure à celle développée par une turbine à réaction.

## I.5 / Profil d'aube turbine et fixation

Les premiers essais en soufflerie en démontrant que les bonnes qualités aérodynamiques nécessitent des formes arrondies à l'avant et effilées à l'arrière.

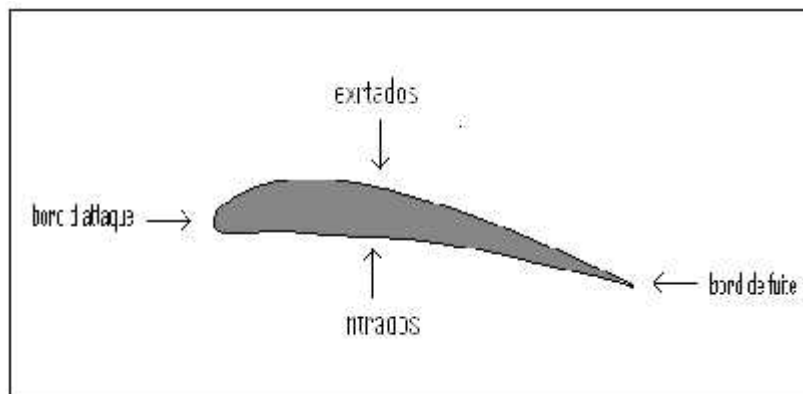


Figure [I.17] : Représentation un profil d'aube.

Les aubes turbine sont conçues de façon à obtenir une meilleure récupération de l'énergie, elles ont donc d'un profil aérodynamique, caractérisé par des paramètres géométriques comme l'angle de calage, angle d'incidence, la cambrure, la déflexion... etc.



La figure qui suit montre ces paramètres sur le profil.

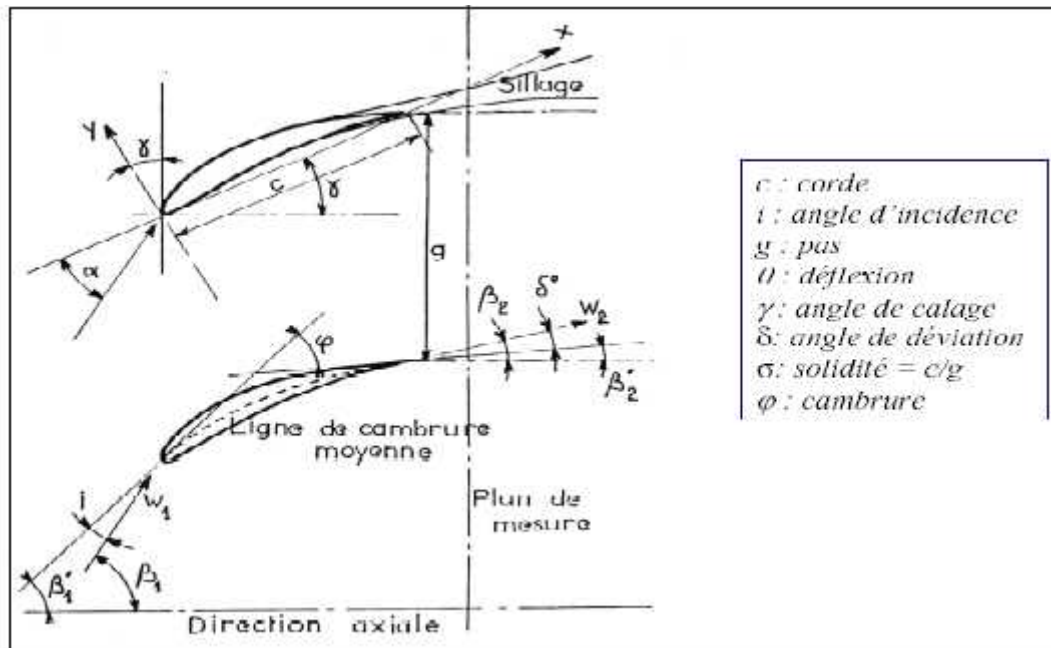


Figure [I.18] : Paramètres géométriques d'un profil d'aube. []

Pour que l'incidence sur l'aubage soit bien adaptée sur toute son envergure, il faut modifier l'angle de calage des aubages en fonction du rayon, d'où leur forme vrillée.

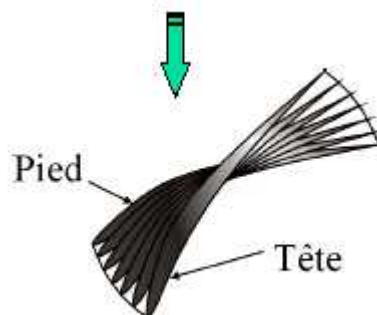


Figure [I.19] : représentation du vrillage turbine. [10]

Afin de pouvoir supporter la charge centrifuge et transmettre le couple moteur au disque, la liaison est assurée par une fixation du type *sapin*. Celle-ci permet par augmentation de la surface de contact, de transmettre une contrainte moins importante pour un matériau donné.

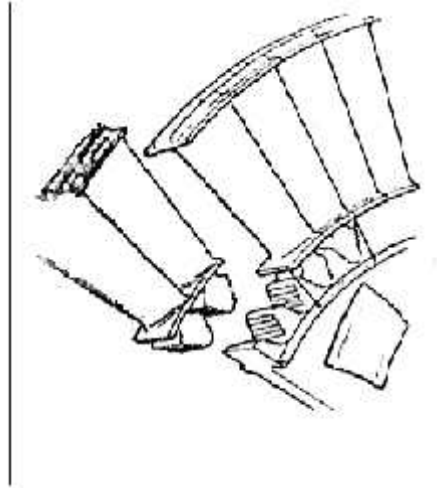


Figure [I.20] : Ailette avec pied de sapin. [10]

Alors que l'aubage est obtenu directement de fonderie, la forme de la fixation est réalisée par brochage, en général en deux passes d'outil.

La figure ci-dessous montre une ailette coulée à la cire perdue.

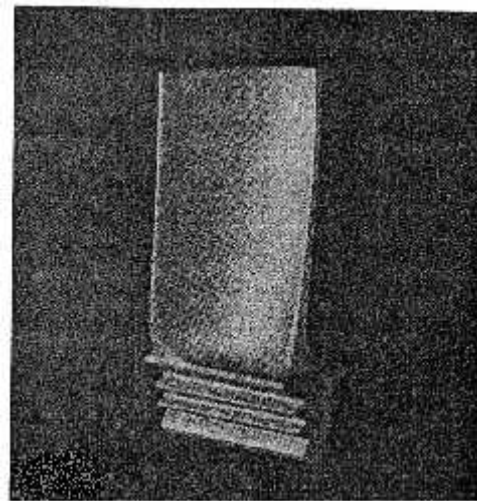


Figure [I.21] : Ailette coulée à la cire perdue. [10]

## I-6 / Matériaux turbine

La réduction de la consommation spécifique du moteur nécessite des entrées turbine élevées que possible. Ce qui permet de réduire ainsi la quantité de carburant à emporter ou d'augmenter le rayon d'action.



L'augmentation de la température entrée turbine est limitée par la tenue mécanique des aubes distributeurs et de la roue mobile. En effet quand la température augmente les matériaux sont moins résistants de plus il paraît un phénomène qui limite la durée de vie de la pièce, c'est *Le fluage thermique* (Arrangement cristallin au sien du matériau entraînant une déformation sous l'effet simultané de température, de l'effort et de leur temps d'application pouvant conduire à la rupture).

Donc la turbine est un élément qui travaille dans des conditions très sévères et qui sont :  
Efforts centrifuges, haute température, atmosphère gazeuse oxydante.

Les matériaux utilisés sont des matériaux réfractaires .Ces matériaux contiennent tous du *nickel*. En effet l'augmentation du pourcentage de Ni (en général additionner sous forme de solution solide) permet d'accroître la résistance au fluage .On trouvera aussi du *cobalt* qui améliore la tenue thermique et du *chrome* pour la résistance à la corrosion.

### 1/Matériaux utilisés couramment

➤ **Distributeur turbine** : (Peu d'effort mécanique, mais forte tenue thermique).c'est un acier au cobalt, au chrome et au nickel [1].

Exemple : K C 25 W N (alliage wirgo)

K=50 %

C=20%

W (tungstène) = 9 à 11%,

N= 14 à 16 %

➤ **Disque turbine** : (Partie massive de la roue) elle est en général en acier spécial du type austénitique ou ferritique [1].

Exemple : C DV5 (acier au chrome, molybdène)

Cr = 0,5 à 1,2%

Mo = 0,25%

Trace de vanadium.

INCONEL 718 (CF8 80 C2)



➤ **Ailettes de turbine** [1] :

Exemple : N K 18 C DAT



Nickel cobalt

C=chrome 15 à 20 %

D=molybdène

A=aluminium 3 %

T= titane 3 %

## 2 /Développement actuel

Pour améliorer le rendement thermique du moteur, on augmentera la température maximale du cycle. Carnot montre que ce rendement s'écrit :

$$= 1 - T_f / T_c$$

Où **T<sub>f</sub>** est la température d'une source froide (atmosphère) et **T<sub>c</sub>** est la température source chaude (**T<sub>3</sub>** sur le moteur). Ce rendement est d'autant plus grand que **T<sub>3</sub>** est élevée.

A titre d'exemple voici quelques valeurs :

En :

1960 : température entrée turbine = 930°C

1975 : température entrée turbine = 1230°C

1978 : température entrée turbine = 1300 à 1500

Ces progrès n'ont pu être réalisés qu'avec le développement de nouveaux matériaux, où l'amélioration dans l'élaboration des matériaux sont connus, ou par l'intermédiaire d'un refroidissement exploité ou mieux. Parmi les matériaux récents nous trouvons [1]:

N K 15 CAT (inconel) Température d'utilisation = 1100°C

KC 25 NW (Mar 509) Température d'utilisation = 1150°C

COTAC 74 (eutectique) Température d'utilisation = 1130°C

René 80 Température d'utilisation = 1377°C





D'autres matériaux, en cours de développement ne sont pas connus du public et même certains utilisateurs.

### 3/Amélioration concernant l'élaboration des matériaux

#### ➤ *Solidification dirigée :*

Afin de privilégier un axe de travail permettant une bonne tenue mécanique, au cours de la solidification, on essaye de trouver des procédés permettant de diriger les cristaux dans un sens particulier.

La figure ci-dessous montre la forme des cristaux d'un matériau à solidification dirigée

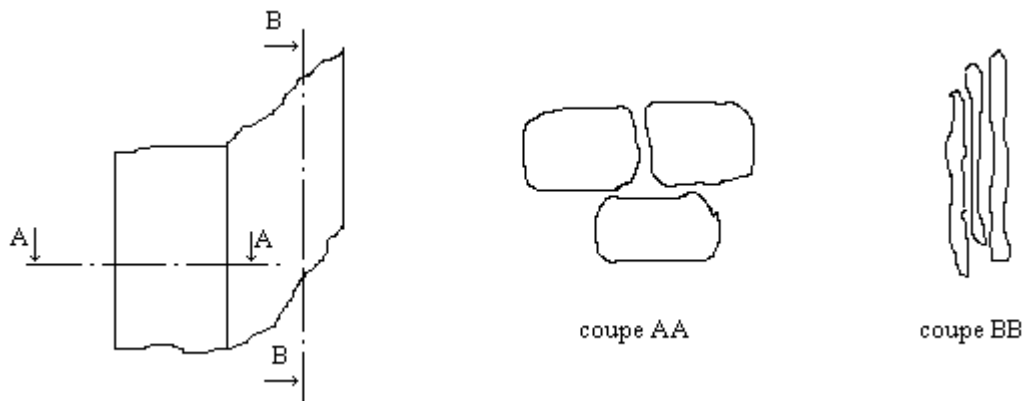


Figure (II.22) : coupes faites sur un matériau. [10]

Sur la coupe AA nous voyons des grains homogènes donnant une bonne cohésion.

Sur la coupe BB, le matériau se présente sous la forme de fibres, très résistantes à la traction et à la flexion.

#### ➤ *Monocristaux :*

La décohésion d'un matériau peut provenir soit de son hétérogénéité structurale, soit de la disposition anarchique de ses grains. Afin de remédier à cette fragilité, la fabrication de monocristaux de dimensions importantes sans impuretés.



➤ **Eutectiques orientés :**

Un eutectique en général présente l'avantage de fournir des grains fins et homogènes, donc possède une meilleure résistance ; la difficulté réside comme pour la solidification dirigée, dans l'orientation des grains.

➤ **Matériaux renforcés par fibres :**

Le procédé envisagé est le même que celui des matériaux composites, le problème supplémentaire réside dans le comportement au choc thermique de la fibre dans un milieu hétérogène

➤ **Les céramiques :**

Celles-ci font l'objet de recherches constantes ; leur comportement thermique est excellent, malheureusement ces dernières sont peu résistantes aux contraintes mécaniques.

## **I.7 /Refroidissement turbine**

Le gain de température peut se réaliser aussi en réalisant en plus de la métallurgie un refroidissement des aubes. Ce qui nous permet d'atteindre une température de travail de l'ordre de (1300 K° à 1400 K°) ou un peu plus à l'entrée turbine.

Le refroidissement turbine est obtenu par circulation d'air en provenance du compresseur. On distingue deux grands procédés :

### **a) convection interne**

Le refroidissement de la paroi de l'ailette est assuré par échange thermique entre les gaz chaud externes et le fluide circulant à l'intérieur de l'aubage à travers la paroi, on note dans ce cas alors les différents types :



➤ **Chemisage :**

Dans ce type une chemise en tôle est insérée à l'intérieur de la section de l'ailette. Cette dernière permet à l'air de circuler entre les chemises puis de s'échapper par le bord de fuite comme il est représenté sur la figure [I.23].

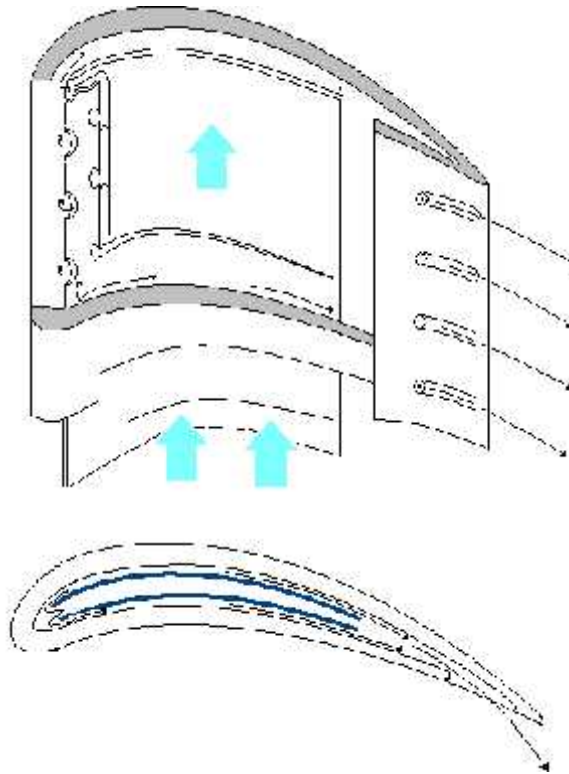


Figure [I.23] : refroidissement par chemisage. [1]

➤ **Par cavités :**

Des labyrinthes de canaux sont logés à l'intérieur de l'aube et permettent le refroidissement, elle est obtenue par moulage (en cire perdu).



Figure [I.24] les labyrinthes dans une aile. [1]



➤ **Par canaux :**

Lorsque les contraintes centrifuges sont trop importantes, les constructeurs adoptent la technique de refroidissement par canaux, en effet ces derniers sont des petites cavités cylindriques implantés sur toute la hauteur de l'ailette. L'air arrive de l'emplanture et circule dans les canaux et sera éjectée par la périphérie.

**b) par film protecteur et jet**

Tous les types de refroidissement précédents refroidissent par convection et circulation d'air frais à l'intérieur de l'ailette. Afin de protéger la paroi externe de l'ailette, on prélève sur les canaux internes (ou cavités) un débit d'air du compresseur qui sera projeté à l'extérieur du bord d'attaque

Créant ainsi un film entre la paroi externe de l'ailette et les gaz chauds. C'est le type de refroidissement qui donne actuellement des meilleurs résultats.

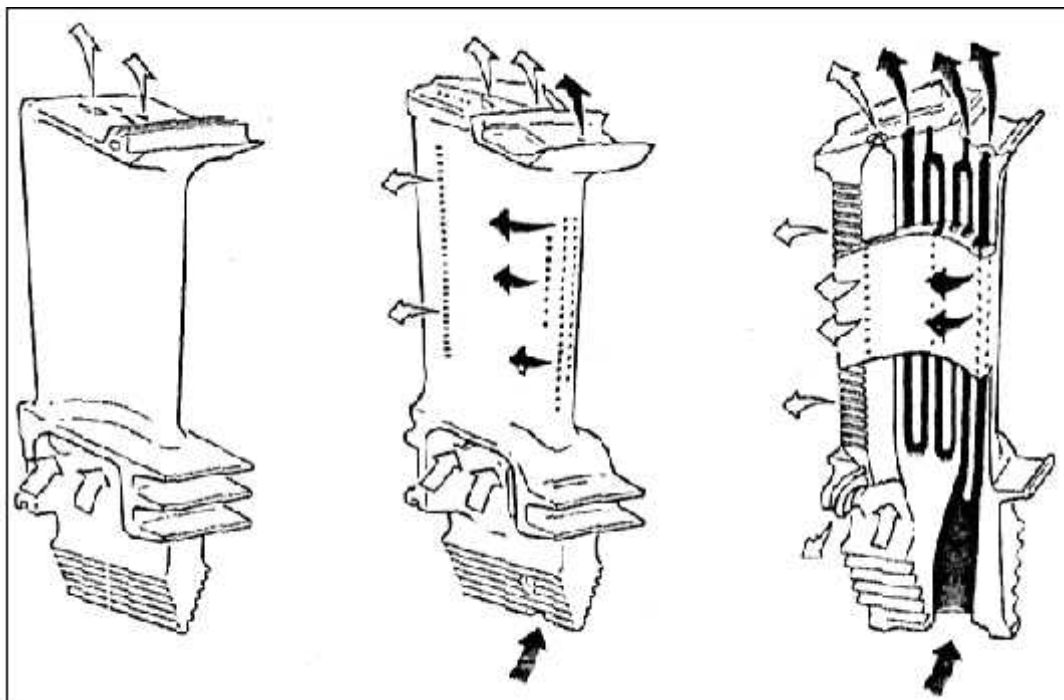


Figure [L.25] : Refroidissement par film protecteur. [1]

Leve chapitre :

Techniques

Et

Procédés

De moulage



## II.1/ Définition de la fonderie

Technique et industrie de la fabrication d'objets métalliques obtenus par fusion puis moulage du métal. La fonderie est un art ancien dont on fait encore un usage considérable, même s'il a été dans une certaine mesure supplanté par d'autres méthodes, telles que la coulée sous pression, le forgeage, l'extrusion, l'usinage et le laminage.

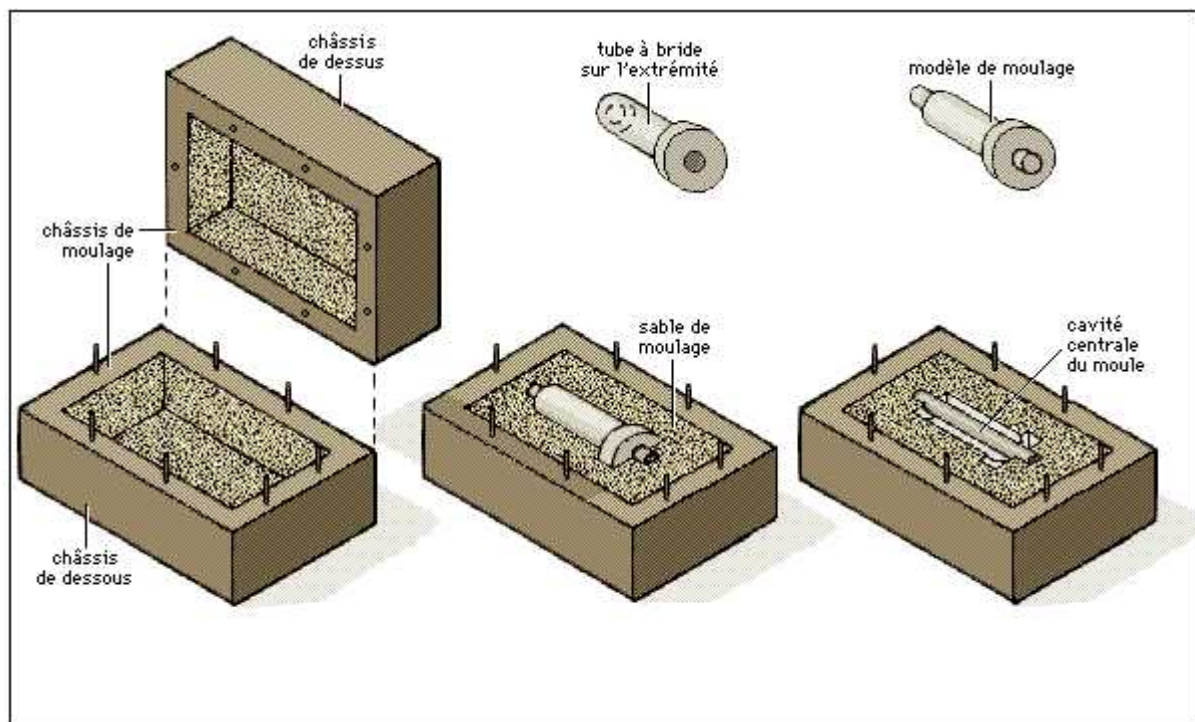


Figure [I.26] : Technique de fonderie. [10]

## II.2/ Terminologie

Il est nécessaire, pour dialoguer avec le fondeur, de connaître son langage lié aux procédés utilisés [8]:

**Moule** : c'est l'ensemble des éléments nécessaires à la définition de l'empreinte qui recevra l'alliage liquide.

**Noyau** : il représente une partie de moule séparée, nécessaire à la définition d'un évidement dans le moule.

**Joint** : c'est la surface de séparation entre deux ou plusieurs parties du moule.

**Outils** : c'est l'ensemble des éléments nécessaires à la réalisation d'une pièce : modèle + boîte à noyau en moule non permanent, moule + broche et noyaux métallique en moule permanent.



**Modèle** : c'est la représentation la plus souvent externe de la pièce en moule non permanent, l'intérieur est défini par le noyau.

**Boîte à noyau** : c'est elle qui va définir la forme du noyau et permet sa réalisation.

**Plaque modèle** : elle permet la fixation sur un même plan du ou des modèles ainsi que la mise en place des dispositifs de remplissage et d'alimentation.

**Dépouille** : c'est la pente utile et nécessaire par rapport à la verticale du joint pour favoriser le démoulage.

**Masselotte** : il s'agit d'une réserve de métal liquide, une nourrice, destinée à combler le retrait liquide de l'alliage lors de son refroidissement.

**Retrait** : il représente souvent le retrait global, c'est à dire la somme du retrait liquide, du retrait de solidification et du retrait solide.

**Retrait linière** : c'est la différence entre le modèle et la pièce coulée.

Pour cette raison il est nécessaire de connaître les contractions de solidification des quelques alliages de la fonderie (tableau II.1).

**Démoulage** : c'est l'action de démouler le modèle en moule non permanent, la pièce en moule permanent.

**Décochage** : c'est la casse du moule en moule non permanent.

Alliages		Retraits en %
Fontes	Fontes à graphite lamellaire	1 à 3
	Fontes à graphite sphéroïdal	3 à 4
	Fontes blanches	4 à 6
Aciers	Aciers non alliés	5 à 7
	Aciers alliés à 0.1 %	4 à 6
	à 0.3 %	6 à 10
Alliages cuivreux	Bronzes	4 à 5
	Cupro-aluminium	4
	Laitons	6 à 7
Alliages d'aluminium	Aluminium _ cuivre	4 à 7
	Aluminium _ magnésium	6 à 7
	Aluminium _ silicium	3.5 à 5

Tableau (II.1) : les retraits volumétrique de quelques alliages de la fonderie. [1]



### II.3/ Les alliages

Un alliage en générale est une combinaison d'un métal avec un ou plusieurs autres éléments. Le métal principale s'appelé le métal de base. Les éléments ajoutés sont appelés les éléments d'alliages ou d'addition et les éléments non désirés sont appelés les impuretés. . [10]

Puisque le métal pur a des caractéristiques mécaniques relativement faibles. Le fait d'ajouter d'autres éléments permet d'augmenter ou de modifier ses caractéristiques mécaniques et chimiques.

Pratiquement tous les alliages se coulent si le ou les éléments d'alliage sont miscibles avec le métal de base. L'alliage est alors constitué a l'ambiante de solution solide et ou de composés chimiquement définis. Donc les alliages solidifiés sont composés d'un certain nombre de phases différentes (solutions solides) qui permet de définir les constitutions physicochimique de l'alliage. Il suffit donc de définir le diagramme d'équilibre «en fonction de la température et de la concentration qui jouent un rôle fondamentale dans l'étude des alliages».

En voici un exemple d'un diagramme d'équilibre qui concerne les métaux partiellement miscible à l'état solide et qui est représenté sur la (figure [II.27]).

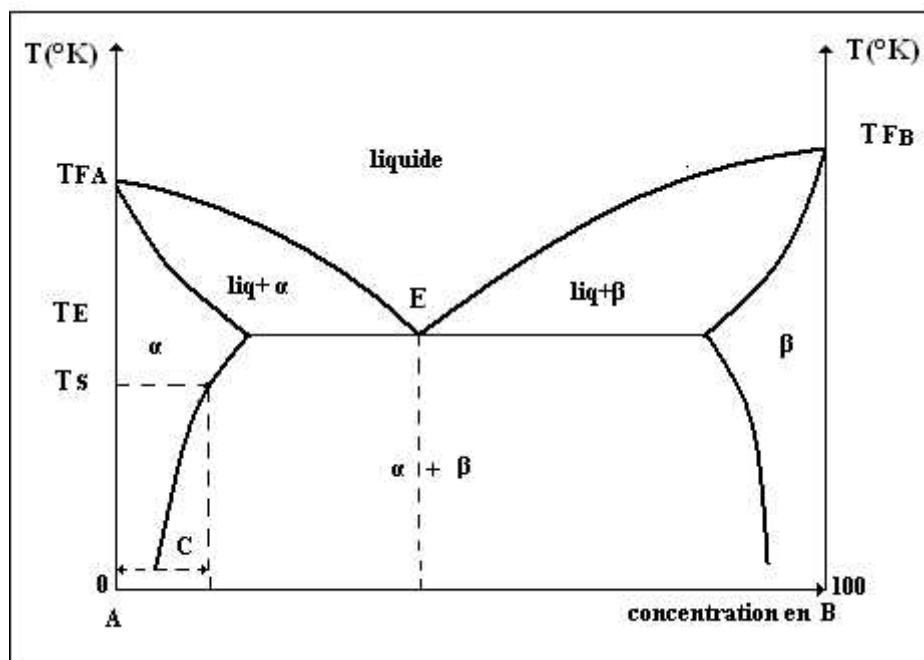


Figure [II.27] : diagramme d'équilibre de phases simplifiées d'un alliage binaire.

Ces métaux ont donné comme résultat de solidification deux solutions solides :

- : Solution solide riche en métal A et de même système cristallin que A ;
- : Solution solide riche en métal B et de même système cristallin que B ;





Apparaît aussi une zone intermédiaire entre et ; la formation de cette phase commence par le point eutectique « le point où se couple les deux courbes de liquidus » situé au dessous des points  $T_{FA}$  et  $T_{FB}$  respectivement les températures de fusion des deux métaux précédents, ce point permet de réduire la température de fusion des alliages en se rapprochant de leur point eutectique.

Alors on peut dire que l'étude des diagrammes binaires permet généralement de prévoir :

- > La température de début de solidification, donc la température de coulée ;
- > La dureté ;
- > La résistance de l'alliage ;
- > Le retrait de l'alliage ;
- > La coulabilité ;
- > L'usinabilité ;
- > L'intervalle de solidification ;

Le choix d'un alliage est souvent un compromis de caractéristiques. [4]

### Les fontes

Issues directement du traitement du minerai de fer dans le haut fourneau, les fontes présentent souvent un prix de revient relativement faible, donc très intéressant si le poids n'est pas un inconvénient (masse volumique  $7.2 \text{ Kg/dm}^3$ )

La diversité des fontes permet souvent de répondre à un nombre de sollicitations, elles sont donc très utilisées (Annexe 01, tableau II.2).

La température de fusion étant très élevée, la coulée s'effectue presque exclusivement en moule non permanent.

### Les aciers

Les aciers sont produits à partir de la fonte liquide ; contrairement aux fontes, ils sont homogènes et offrent de très bonnes caractéristiques mécaniques. Des traitements thermiques sont obligatoires, recuits d'homogénéisation et de normalisation. Ensuite des traitements durcissants peuvent favorablement être envisagés (Annexe 01, tableau II.3).

La température de fusion est encore plus élevée que celles des fontes, la coulée s'effectue uniquement en moule non permanente.

Le retrait très important entraîne des difficultés d'alimentation et un ébarbage ingrat. La masse volumique est élevée ( $7,8 \text{ Kg/dm}^3$ ).



### **Les alliages base cobalt ou nickel**

Ces alliages ont une tenue à la température exceptionnelle ainsi qu'une très bonne résistance à l'usure et à la corrosion. On les retrouve dans les applications extrêmes telles que les pièces aéronautiques fortement sollicitées (Annexe 01, tableau II.4).

Le retrait est généralement élevé s'effectue presque exclusivement en moule non permanent selon la technique de la cire perdue.

Ces alliages font souvent l'objet d'une appellation commerciale reconnue

### **Les alliages d'aluminium**

Ces alliages de plus en plus utilisés continent généralement des éléments d'addition comme le silicium. Le cuivre, le magnésium ou le zinc.

Leur mise en œuvre aisée permet de réaliser des pièces complexes ou parois minces. La coulée s'effectue pratiquement selon tous les procédés en privilégiant le moule permanent.

Le coût des alliages est relativement élevé mais leur faible masse volumique et leur bonne résistance à la corrosion font qu'ils sont de plus en plus utilisés.

Notons que leur résistance à chaud est faible compte tenu des températures de fusion (Annexe 01, tableau II.5)

### **Les alliages de magnésium**

Ces alliages ont connu un essor dans les années 1960 mais leur coût limitait leurs utilisations, ils sont revenus au goût du jour grâce à l'industrie automobile qui recherche toujours le gain de poids.

Leur faible masse volumique ( $1.7 \text{ Kg/dm}^3$ ) tend à favoriser l'allégement des véhicules (Annexe 01, tableau II.6).

### **Les alliages de cuivre**

Le cuivre et ses alliages sont utilisés depuis la plus haute antiquité. Il présente de nombreuses qualités :

Une coulabilité ;

Une bonne usinabilité ;

Une très belle coloration ;

Une bonne conductibilité ;

Une bonne résistance à la corrosion ;

Par contre, il présente un coût et une masse volumique élevés. (Annexe 01, tableau II.7)



### Les alliages de zinc

Le zinc n'est pas utilisé pur, on lui associe généralement de l'aluminium, du magnésium et de cuivre. Les alliages ainsi formés sont les zamaks. Les zamaks sont particulièrement adaptés à la coulé sous pression (Annexe 01, tableau II.8). Leur masse volumique est relativement élevée ( $6,6\text{Kg/dm}^3$ ).

## II.4/ Les procédés de moulage

De très nombreux procédés existent, qui impose de les classer en deux grandes catégories pour permettre leurs présentations. Nous avons choisi de les classer en fonction des modes de moulage et de durcissement des matériaux utilisés au moment de la fabrication du moules et des noyaux. [4]

**-Le moule non permanent** où le moule est détruit après la coulée ;

**-Le moule permanent** où à chaque coulée le moule est réutilisé en tout ou en partie ;

Il convient donc que le choix d'un procédé de moulage ce fait avec le maximum de précaution, ce qui nécessite au moment du choix, de bien connaitre les performances et les prix de revient de chacun des procédés possible.

Donc ce n'est pas tant le procédé qui important mais la démarche pour l'utiliser au mieux selon les critères généraux de fabrications suivantes :

- > La série de pièces à réaliser ;
- > L'alliage ;
- > La complexité des formes et des fonctions ;
- > La durée de vie ;
- > Le coût ;

À partir de ses deux familles, plusieurs techniques principales sont développées industriellement, nous en détaillerons les principes de chacune dans les paragraphes suivants.



## 1 - Moulage en moule non permanent

Un moule non permanent est une structure composée d'une ou plusieurs empreintes correspondant à la pièce brute à produire (figure [II.28]).

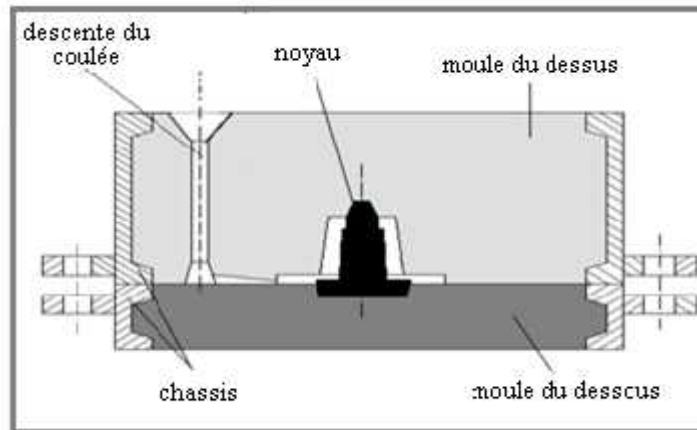


Figure [II.28] : schéma descriptif d'un moule non permanent.

Ce moule peut contenir :

- Un ou plusieurs noyaux ;
- Un système de remplissage ;
- Un système d'alimentation servant à nourrir la pièce pendant la solidification.

Généralement ses moules sont fabriqués en sable ou en céramique. Après la coulée et la solidification du métal, ils doivent être désagregés pour libérer les pièces.

### a- Le moulage à vert

C'est le procédé le plus ancien et aussi le plus répandu. Il peut être extrêmement productif puisque certaines machines produisent 10 moules par minute.

L'empreinte est réalisée en sable synthétique élaboré à partir de silice très pure et calibrée en granulométrie, d'argile de type bentonite et d'eau pour développer le pouvoir agglutinant de l'argile (8% d'argile, 3 % d'eau, 4 % du noir minéral). Quelques adjuvants peuvent être ajoutés pour améliorer l'état de surface et la cohésion.

Ces sables nécessitent une préparation soignée très sujette aux variations de température ; mais leurs taux de récupération sont très élevés,

La résistance mécanique de l'empreinte est obtenue par différentes procédés de serrage, soit à plat, soit vertical.



➤ **le moulage à plat** : Le moulage à plat se fait en châssis, ce sont des cadres métalliques qui contiennent le sable (Figure [II.29]).

Deux châssis sont nécessaires, un pour le dessous, un pour le dessus. La séparation entre les deux s'appelle le plan du joint. C'est de lui que dépendra la facilité d'exécution du moule.

Le joint étant horizontal, moule ouvert, il est facile de nombreux noyau. Les dimensions des châssis peuvent atteindre 2 m × 2 m avec une cadence de fabrication de l'ordre de 250 moules à l'heure.

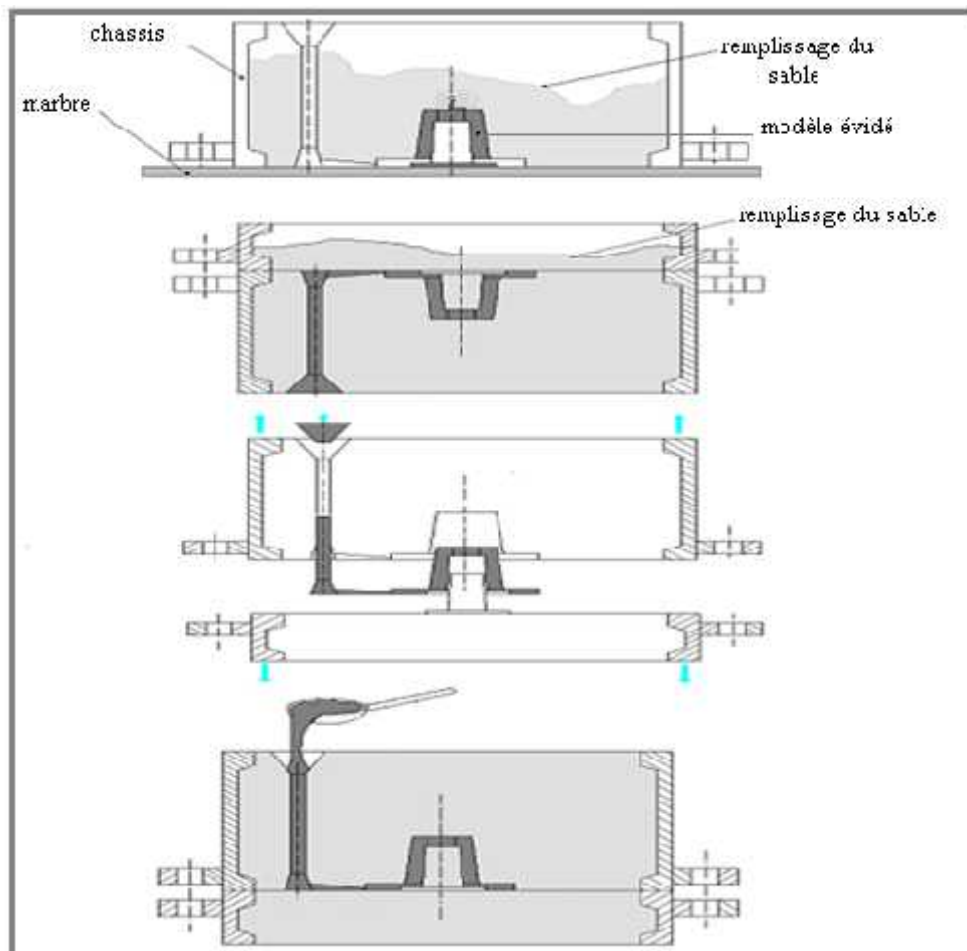


Figure [II.29] : principe du moulage au naturel (modèle simple sans noyau)

Le serrage est assuré soit manuellement, soit sur des machines par vibrations et pression ou par impacte d'air.

Le ou les modèles sont montés sur des plaques dites *ped de mouton* ; figure [II.30], Tableau (II.9).

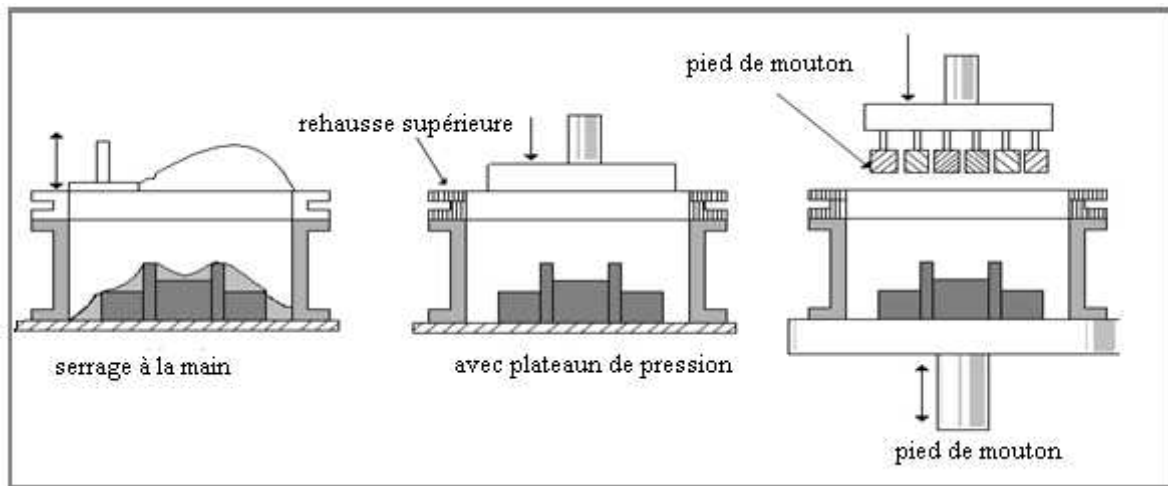


Figure [II.30] : principe de serrage. [4]

Avantages	inconvénients	Utilisation
Productivité Remoulage facile de nombreux noyau Faible coût du sable Récupération facile	Serrage manuel délicat Sablerie imposante Réfractaire limitée	Petites et grandes séries Tous alliages, même les ferreux

Tableau (II.9)- caractéristiques du moulage à plat. . [4]

➤ **le moulage en mottes** : Pour s'affranchir de l'utilisation des châssis et améliorer la productivité, le moulage en mottes a été développé. Les machines les plus rapides de type *DISAMATIC* dépassent les 600 mottes à l'heure sachant qu'une motte peut contenir plusieurs empreintes de pièces. Les dimensions n'excèdent pas les 0,9 m × 0,9 m pour des questions de pression, donc de résistance des mottes.

Cette technique très ingénieuse utilise les deux faces de la motte pour définir l'empreinte. Comme le montre la Figure [II.31], les plaques-modèles verticales constituent la chambre de moulage.

Le serrage est assuré par tir et pression. La motte obtenue est ensuite poussée sur la motte précédemment serrée la coulée est toujours automatique.

Le décochage (la casse du moules) est facilité. Ce type de machines est entièrement automatisé jusqu'au remoulage des noyaux.

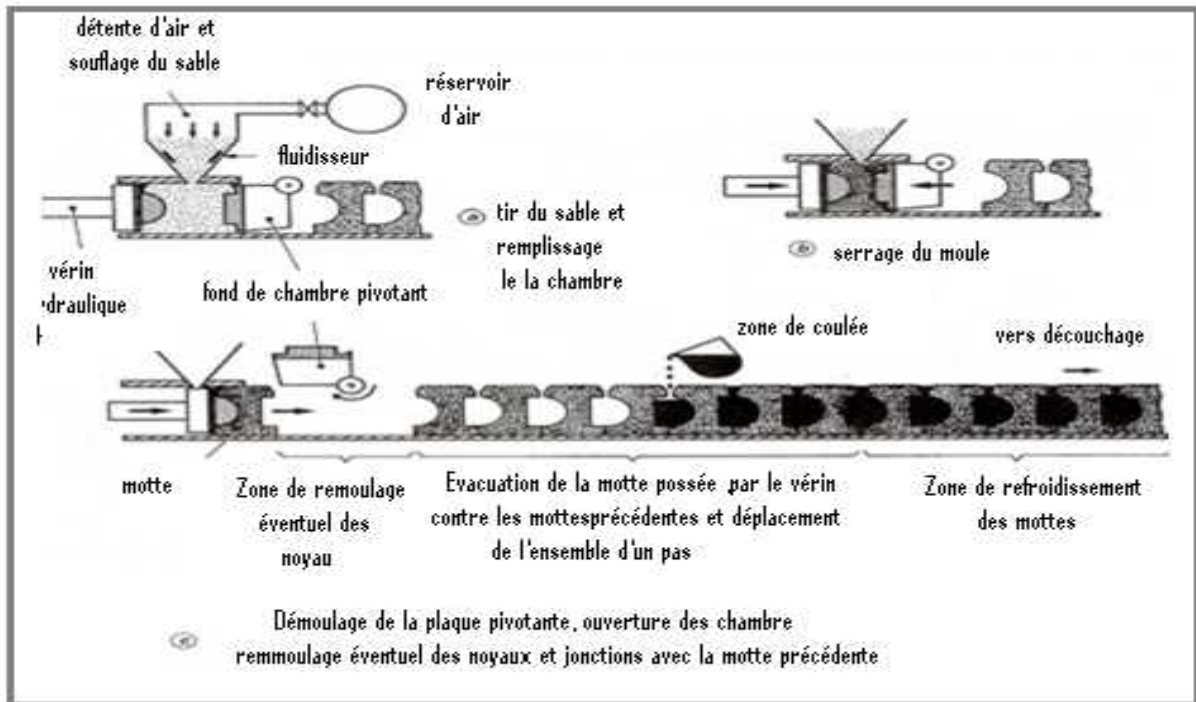


Figure [II.31] principe du moulage en motte. [1]

Notons que la coulée verticale, n'est pas adaptée aux alliages d'aluminium. En effet les oxydes risquent de se mélanger dans l'alliage et de rendre sa structure hétérogène (moins résistante). Toutefois de nouveaux développements permettent d'injecter en basse pression l'alliage par le bas de la motte afin de remplir en source; a fin d'obtenir une coulée idéale pour limiter les perturbations.

Avantage	Inconvénients	utilisation
Très grande productivité Remoulage de noyau automatisé Décochage rapide Faible coût de sable Récupération aisée	Sablerie imposante Coût élevée de la machine	Petites pièces en alliages ferreux (exemple : bloc cylindres) Possibilité de coulée des alliages d'aluminium

Tableau (II.10)- caractéristiques du moulage en motte. [4]



## b- le moulage en sable a prise chimique

Devant les problèmes liés à la préparation et l'utilisation d'un sable silico-argileux (séchage, casse, réfractarité insuffisante), le fondeur élabore des sables liés par une ou plusieurs résines, ces dernières leur confèrent de nombreuses qualités qui ont grandement facilité le travail du fondeur : facilité de préparation, fluidité, résistance et réfractarité. [1]

Aujourd'hui faire un moule n'est plus un problème avec ces types de sable. Dans le cas du moulage et du gros noyautage, un malaxeur continu mélange le plus souvent à la silice une résine et un catalyseur. Le mélange est ensuite versé pratiquement sans serrage sur le modèle. Le durcissement s'effectue au bout de plusieurs minutes pour former un moule rigide très résistant et réfractaire. Les noyaux sont fabriqués avec les mêmes types de sable mais le durcissement est obtenu par l'adjonction d'un catalyseur gazeux dans les boîtes à noyaux. Le durcissement est pratiquement instantané et permet un déboîtement rapide. [1]

Les états de surfaces des pièces obtenues avec ces sables sont très satisfaisants par contre leur régénération est plus complexe et nécessite un cycle thermique à environ 1 000 °C

<b>Avantages</b>	<b>inconvénients</b>	<b>utilisations</b>
Mise oeuvre facile	Mise en œuvre de résines	Moulage unitaire,
Pas de sablerie imposante	Cadence limitée	prototype, noyautage
Pas de bruit	Régénération onéreuse	Moulage de grosses
Réfractarité importante	Prix du sable élevé	pièces
Bonne précision	Gaz lors de la coulée	Moulage en motte
dimensionnelle	Possibilité de phénol	
Tous les alliages	dans les sables	

Tableau (II.11) – caractéristiques du moulage en sable a prise chimique. [4]

## c- le procédé sous vide

Le principe est celui du paquet de café sous vide. Un film plastique très fin chauffé est positionné et aspiré par toute la surface d'une plaque modèle reliée à une pompe a vide. Toutes les formes sont épousées. Un châssis, positionné sur une plaque modèle, est rempli de silice.





Un deuxième film plastique est posé sur le dessus du moule. Le vide est fait dans le châssis creux prévu pour cette dépression. Le vide est coupé sur la plaque modèle. A ce moment, le châssis toujours relié à la pompe a vide est démoulé pour obtenir l’empreinte du dessous de moule.

La même opération est faite pour le dessus. Des noyaux en sable a prise chimique peuvent être remoulés. La coulée s’effectue toujours sous vide et ce jusqu’à la solidification et le refroidissement suffisant de la pièce. Quand le vide est coupé, la pièce est récupérée facilement puisque la silice s’écoule naturellement (Figure [II.32] et tableau II.12).

Avantages	Inconvénients	utilisations
Procédé écologique Pas de bruit Dépouille très faible sur les modèles Bel état de surface	Faible productivité Pompe a vide puissantes	Pièces moyennes en fonte GL, GS et acier baignoires

Tableau (II.12) -caractéristiques des procédés de moulage. [4]

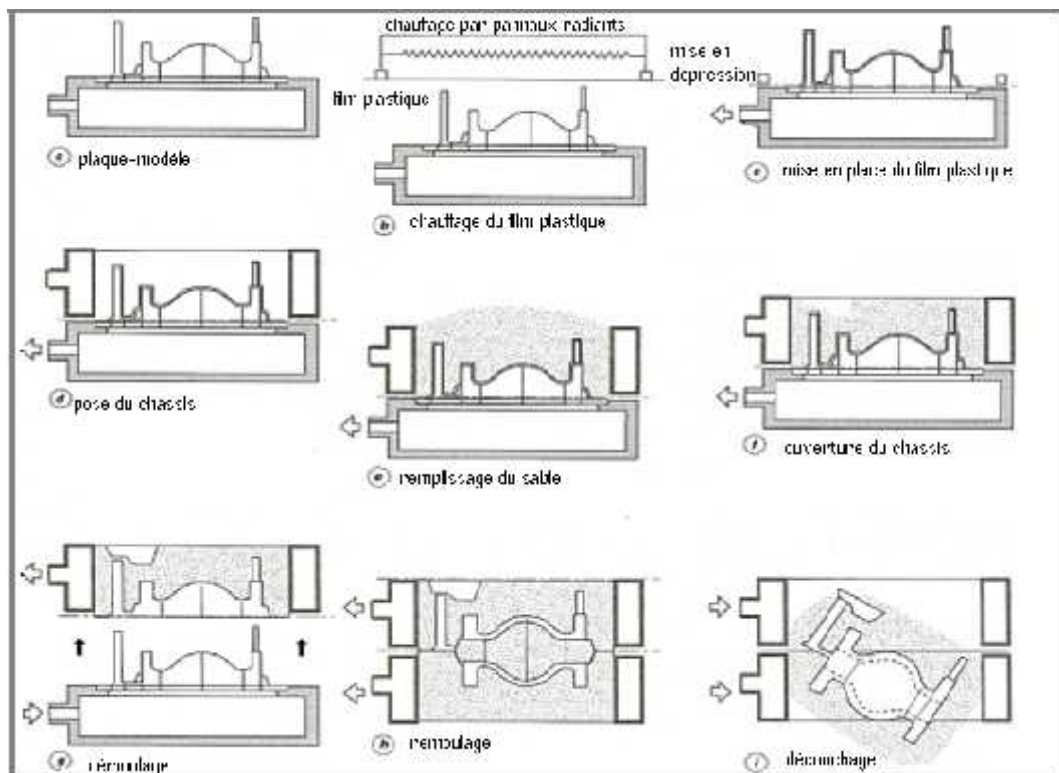


Figure [II.32] : étapes de la fabrication. [1]



## **d-le moulage à modèle perdu**

Nous avons regroupé dans ce paragraphe les procédés de moulage qui utilisent des modèles en matière fusible (polystyrène cire, etc.), [5]

### ➤ **le moulage a la cire perdue**

Ce procédé, dit aussi moulage de précision, était déjà connu dans les temps très anciens pour la coulée des métaux non ferreux (statues, objets religieux, bijoux).

**Principe :** Les modèles sont réalisés en matières fusibles (cire.), assemblés en grappes, recouverts de couches réfractaires et éliminés ensuite par dissolution ou par voie thermique.

Les moules réfractaires sont frittés à haute température (1 000 °C) pour obtenir des céramiques présentant la solidité et la perméabilité nécessaires pour la coulée du métal. Celle-ci peut se faire à haute température pour obtenir des parois de faibles épaisseurs et les détails les plus fins des modèles.

**Modèles :** On obtient généralement les modèles par injection de la matière fusible (cire, urée ou autre matière injectable comme le polystyrène) dans des outillages métalliques manuels ou montés sur des machines à injection automatiques ou semi-automatiques suivant les cadences à réaliser.

**Noyautage :** Pour certaines parties de la pièce qui ne se démoulent pas, il peut être nécessaire de les faire venir en utilisant des noyaux. Ceux-ci peuvent être réalisés séparément en matière soluble, surmoulés ensuite dans l’outillage principal de fabrication des modèles et éliminés avant montage des modèles.

Pour d’autres pièces creuses, plus sophistiquées, comme par exemple les ailettes de turbines de turboréacteurs, travaillant à très hautes températures et refroidies par circulation d’air, les techniques de noyautage ne conviennent pas à cause de la complexité des noyaux. Dans ce cas, ceux-ci sont réalisés en céramique fine, capable de garantir des précisions dimensionnelles de l’ordre du dixième de millimètre, surmoulés dans l’outillage principal et éliminés par dissolution seulement après la coulée de la pièce.



**Montage des grappes :** Les modèles sont ensuite assemblés par collage ou soudure, sur une descente centrale avec entonnoir de coulée, réalisée également comme les modèles en matière fusible.

L'ensemble des modèles ainsi assemblés forme une grappe qui est ensuite utilisée pour préparer les moules (Figure [II.33]).

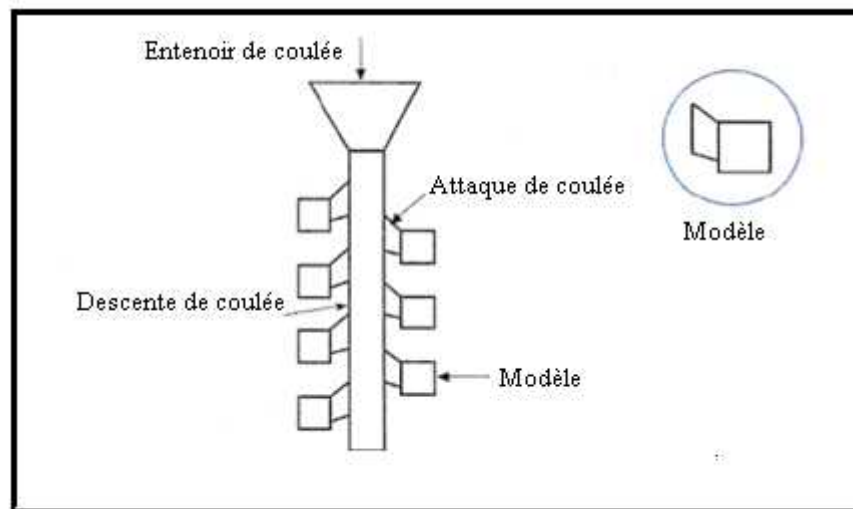


Figure [II.33] montage des modèles en grappe. [1]

**Fabrication des moules en céramique :** Ces moules peuvent être fabriqués suivant deux procédés moulage monobloc et moulage en carapace.

Dans le moulage monobloc (Figure [II.34]), la grappe est disposée dans un châssis que l'on remplit avec une barbotine réfractaire à base de gypse et de silice avec un liant (en général de l'eau) constituant un plâtre particulier (d'où l'appellation : moulage au plâtre).

Dont la réfractivité suffit à la coulée des alliages légers. Ce moule peut être soumis à des vibrations pendant le remplissage pour permettre à la barbotine de bien remplir tous les détails des modèles. Il y a ensuite solidification du moule par gélification de la barbotine.

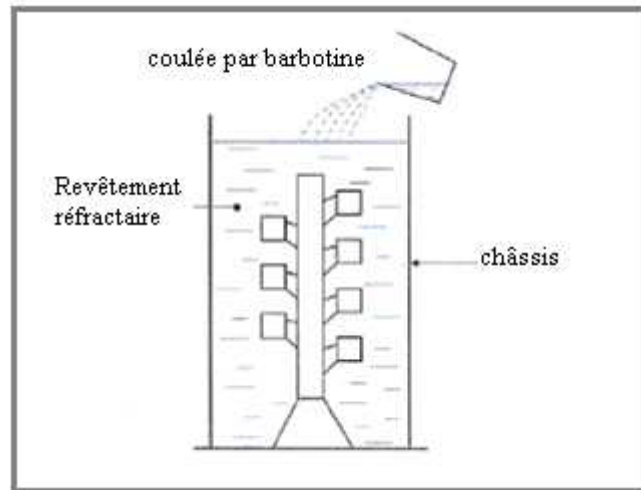


Figure [II.34] : moulage monobloc. [1]

Dans le moulage en carapace (Figure [II.35]), on dépose sur la grappe une première couche de contact en la trempant dans une barbotine liquide à base de silice (liant) (silicate d'éthyle, de sodium...) et d'une fine farine de matériau réfractaire : zircon, alumine, silice, magnésie... (appelé charge) maintenue en suspension dans le liant par une agitation permanente.

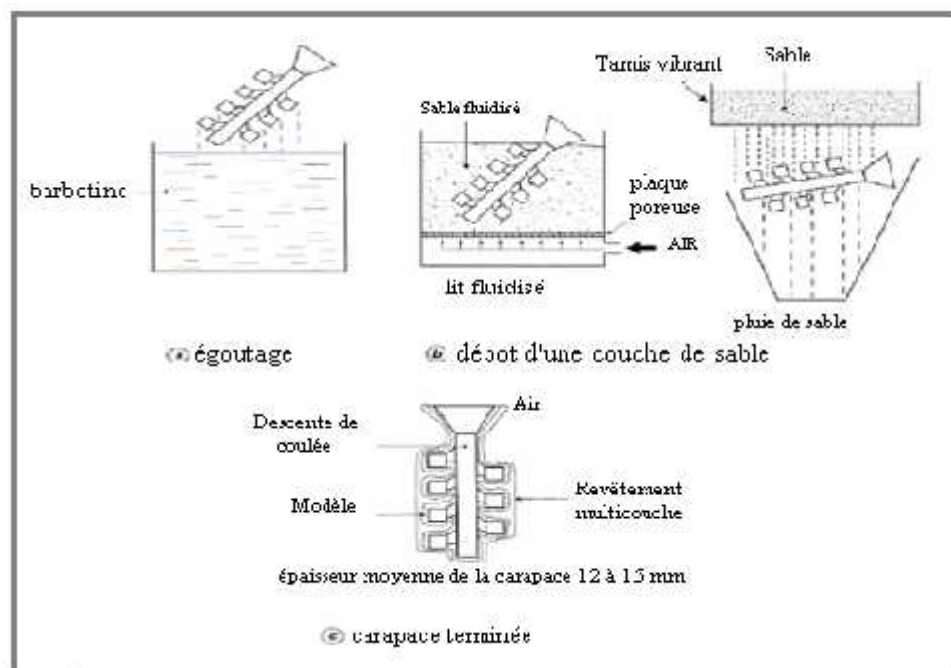


Figure [II.35] : moulage à carapace. [1]

Après égouttage de la barbotine, la grappe est recouverte par une couche de sable fin (généralement de dimension moyenne de grains de 0,10 à 0,25 mm) déposée par trempage dans un lit fluidisé ou saupoudrée au passage sous une pluie de sable.



Après séchage de cette couche de contact, on dépose d'autres couches réfractaires par le même procédé, le nombre de couches étant fonction de la résistance nécessaire de la grappe pour supporter la pression métallo statique à la coulée.

**Élimination du modèle :** Les modèles, descentes de coulée, etc. sont éliminés suivant leur matière par dissolution, en autoclave, par chauffage ou par choc thermique (cas de la cire). Ces matières peuvent être récupérées et réemployées, la cire notamment. Après la cuisson des carapaces, les moules sont portés à haute température (par exemple 1 000 °C pour la coulée de l'acier) et la coulée peut se faire par gravité, par retournement (Figure [II.36]), ou par centrifugation. La coulée peut également se faire sous vide pour des pièces de haute technologie et de coût unitaire élevé (ailettes de turboréacteur par exemple).

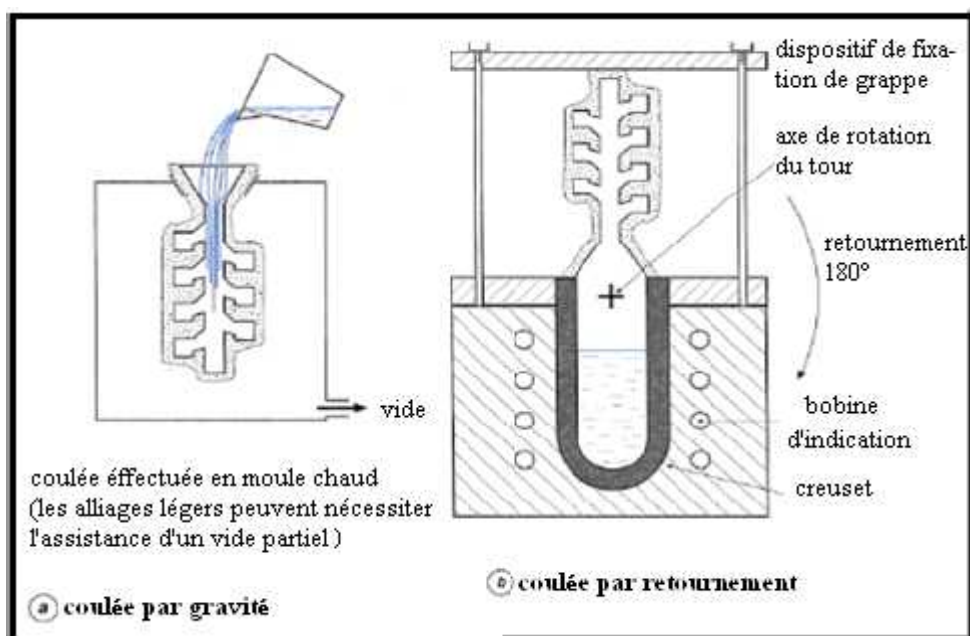


Figure [II.36] : coulée du métal. [1]

**Décochage :** Après refroidissement, la céramique est cassée par vibration et la grappe de métal récupérée passe ensuite au nettoyage par sablage ou grenailage fin. Les pièces séparées de la grappe par tronçonnage ou sciage subissent ensuite diverses opérations de contrôle, de finition et de traitement thermique éventuel



Avantages	Inconvénients	utilisations
Complexité des pièces	Robotique conseillée	Petites pièces
Etat de surface excellent	Produits onéreux	aéronautiques, médicales
Précision dimensionnelle	Débouillage délicat	Alliages a haut point de fusion
Tous les alliages	Limite de dimensions	fusion

Tableau (III.13) – caractéristiques du moule a la cire perdu. [4]

➤ le moulage avec modèle polystyrène

Le modèle «léger», représente l’image de la pièce découpée ou usinée dans du polystyrène. Ensuite, un système de remplissage et d’alimentation est positionné avant l’emballage dans du sable à prise chimique. Apres durcissement, le moule est prêt à la coulée (Figure [II.37] et tableau. II.14)

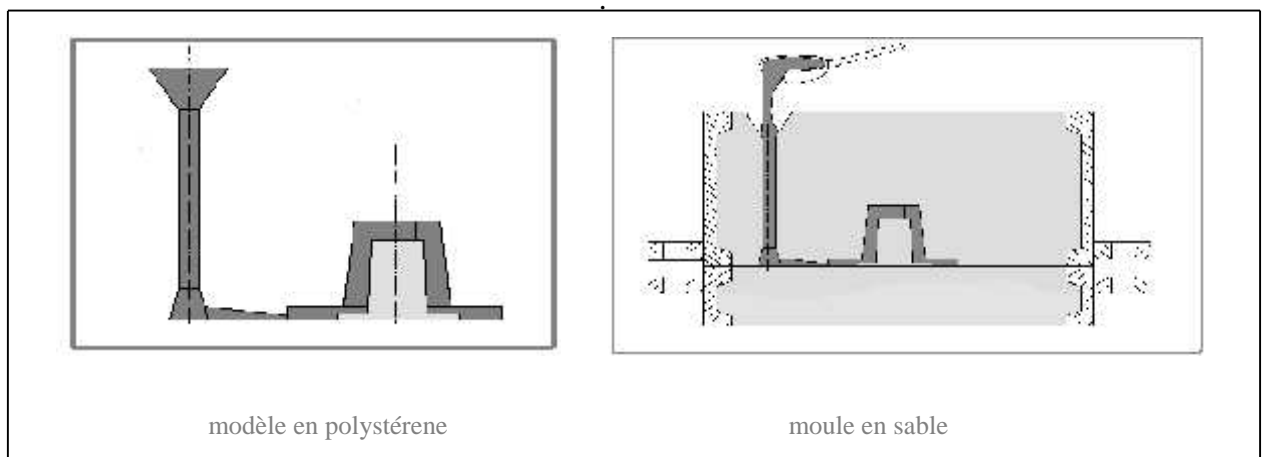


Figure [II.37] modèle polystyrène ensuite enseveli dans le sable.

Avantages	Inconvénients	utilisations
Faible coût de l’outillage	Modèle détruit pendant la coulée, gaz important	Moulage grosses pièces
Pas de démoulage	Etat de surface moyen	
Possibilité de réaliser des pièces complexes	Moulage unitaire	
Moulage de grosses pièces	Faible productivité	

Tableau (II.14) -caractéristiques du moulage avec modèle polystyrène. [4]



➤ **le procédé modèle perdu (*lost foam*)**

Ce procédé récent est réservé aux petites pièces de forme complexes moulées en grande série. Un modèle en polystyrène à haute densité est fabriqué en plusieurs parties simples par injection dans un moule en alliages d'aluminium. Ensuite, les éléments de modèles sont assemblés et collés pour former le modèle complexe. [4]

Une série de modèles est collée sur un système d'alimentation polystyrène lui aussi pour former une grappe. La grappe est ensuite prise par un robot pour être enduite par trempage d'une couche réfractaire à base de zircon. Après séchage, la grappe est positionnée dans un châssis qui est rempli de silice grossière sans aucun liant. Une légère vibration tasse le sable et l'alliage est coulé. Le polystyrène est sublimé par l'alliage, la couche réfractaire tient la silice pour garder la forme de la pièce jusqu'à la solidification. Il n'y a plus qu'à retirer la grappe du sable (figure [II.38] et tableau II.15). [1]

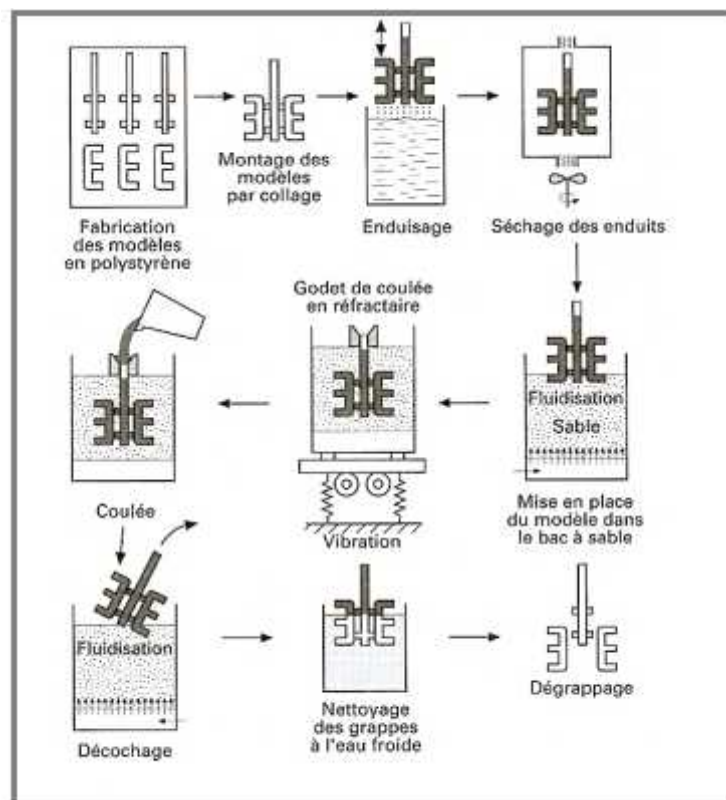


Figure [II.38] phases de fabrication depuis l'injection des modèles. [1]



Avantages	inconvénients	utilisations
Magie du procédé sans liant organique, donc moins polluant Pièces de formes complexes Pas de découchage Pas de noyaux Pas de sablerie	Difficile à mettre au point limité en dimensions de pièces Nombreuses manipulations, productivité limitée	Petites pièces en grande série fonte ou alliages d'aluminium

Tableau (II.15)- caractéristiques du procédé lost foam. [4]

## 2. Moulage en moule permanent

Afin d'améliorer la qualité des pièces en minimisant les paramètres de fabrication, le fondeur a développé la notion de moule réutilisable en «métal», d'où la notion de moule métallique.

Notons que celui-ci est presque exclusivement réservé à la coulée des alliages d'aluminium, de zinc, de cuivre et de magnésium, les alliages ferreux présentent un problème de tenue thermique des moules.

Les moules sont généralement en acier allié comportant le plus souvent un joint vertical, situation favorisée pour la mécanisation et production robotisée à grand échelle.

Il est essentiel, ici aussi, de penser au procédé lors de la conception des pièces. Les formes extérieures pourront être complexes, aucune difficulté à l'intérieure. Toutefois en gravité et en basse pression, la mise en place de noyaux sable est possible et souvent utilisée. La productivité sera améliorée en évitant les noyaux sable dans la mesure du possible de la conception. (Figure [II.39])

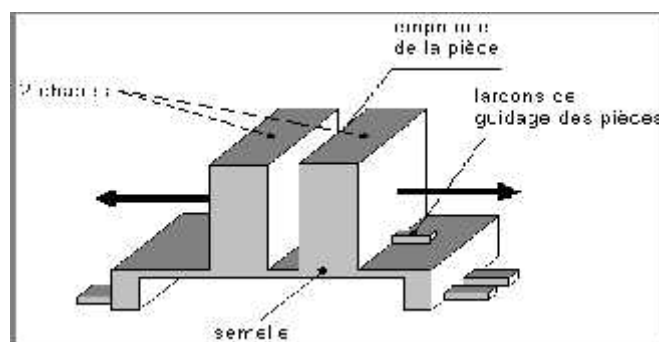


Figure [II.39] principe du moule permanent.





Sept procédés principaux seront étudiés ci-après : le moulage par gravité, le moulage basse pression, le moulage sous pression, le thixomoulage, le squeeze casting, la coulée continue et la centrifugation.

### a- le moulage en coquille par gravité

Comme son nom l'indique, le remplissage de l'empreinte métallique est assuré par la seule force gravitaire du métal. Le moule métallique est aussi appelé coquille. Il est généralement en acier faiblement allié et son coût élevé nécessite la réalisation de plusieurs milliers de pièces pour son amortissement.

Ces moules sont généralement montés sur des bâtis appelés coqueuses. Le joint est le plus souvent vertical pour une automatisation facilitée ; par exemple, un robot vient récupérer la pièce éjectée du moule.

#### ➤ constitution d'un moule

L'empreinte est formée de deux parties de moules appelés chapes, monté ou non sur une semelle, le dispositif d'alimentation est le plus souvent latéral.

Les noyaux sont généralement métalliques, les noyaux longs s'appellent des broches. Un système d'éjection peut être associé pour améliorer le démoulage.

Les moules sont systématiquement potelés, c'est-à-dire recouverts d'un enduit assurant plusieurs fonctions : protection du moule, amélioration de l'état de surface et régulation de refroidissement (Figure [II.40]) et tableau II.16).

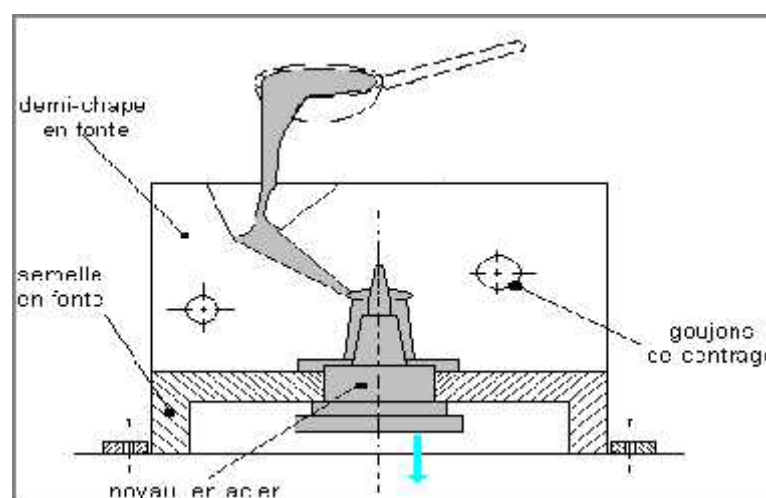


Figure [II.40] : descriptif d'un moule permanent.



Avantages	inconvénients	Utilisations
Productivité de système Amélioration des caractéristiques mécaniques Bel état de surface Possibilité de remouler des noyaux en sable	Coût de l'outillage Chauffage de la coquille Thermique délicat Masse limitée des pièces	Pièces diverses en alliages de cuivre, d'aluminium

Tableau (II.16) : caractéristiques du moule permanent. [4]

### b- le moulage basse pression

Ce type de moulage se veut une amélioration du procédé gravitaire. Il consiste à injecter dans le moule permanent, généralement par le dessous, essentiellement un alliage d'aluminium liquide. Comme le montre la Figure [II.41], le four se situe sous le moule métallique qui est préalablement thermo régulé. L'injection se fait à l'aide d'une pression faible, de l'ordre de 0.2 bar. La mise en place du noyau en sable est toute à fait possible (tableau II.17). [1]

Se procédé présente deux intérêts principaux :

- la coulée réelle en source, qui permet de minimiser les problèmes liés aux oxydes pourrait être incluse dans la matrice :

- la possibilité d'alimenter la pièce sans masselotte. En effet en fin de remplissage qui correspond au début de la solidification, une sous pression de l'ordre de 1.5 bar est adapté pour «nourrir» la pièce entrain de se solidifier ici, les masselottes sont donc remplacées par un flux d'alliage liquide tout au long de la solidification lorsque la solidification est terminer, la pression est supprimer, l'alliage liquide restant dans le canal d'alimentation redescend dans le four. La mise en mille est donc proche de 1 (masse de métal pièce / masse de métal coulée), ce qui tend à minimiser les coûts.

**Remarque :** Ce procédé très intéressant tend à se développer pour la coulée des alliages d'aluminium en moule en sable à prise chimique et en sable silico-argileux.



Avantages	Inconvénients	utilisations
Coulée en source Mise au mille faible Productivité améliorée Caractéristiques mécaniques améliorées Possibilité de traitement thermique	Mise au point très délicate Machine spéciale très sophistiquée Coût de l'installation	Fabrication de roues, de culasses automobiles

Tableau (II.17) -caractéristiques du moulage basse pression. [4]

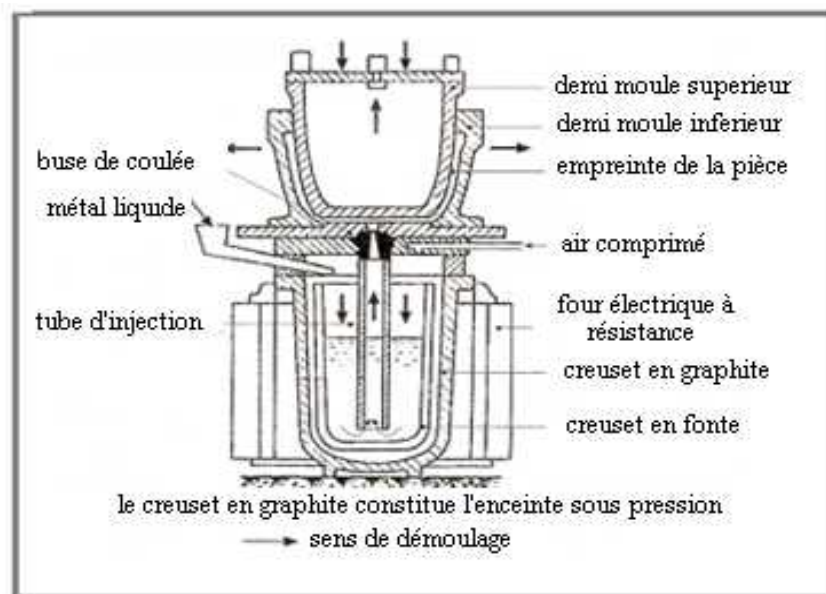


Figure [II.41] : Principe de la basse pression. [1]

### c- le moulage sous pression

L'alliage est injecté sous très forte pression, pouvant atteindre 1 000 bars en fin de cycle. Le moule est en acier fortement allié réfractaire. Les moules subissant des efforts mécaniques et chimique élevés, alors ses derniers sont montés sur des machines puissantes entièrement automatiques. Elles sont choisies suivant leur force de fermeture, c'est-à-dire leur résistance à l'ouverture pendant l'injection de l'alliage.

Le moule est constitué de deux parties principales, le bloc fixe et le bloc mobile. Le joint est vertical comme en coquille gravitée.



Des broches peuvent être positionnées pour le moulage de petits alésages. Des noyaux latéraux sont également positionnés sous forme de tiroirs pour éliminer les contre-dépouilles éventuelles. Une plaque d'éjection est nécessaire pour extraire la pièce. (Figure [II.42]).

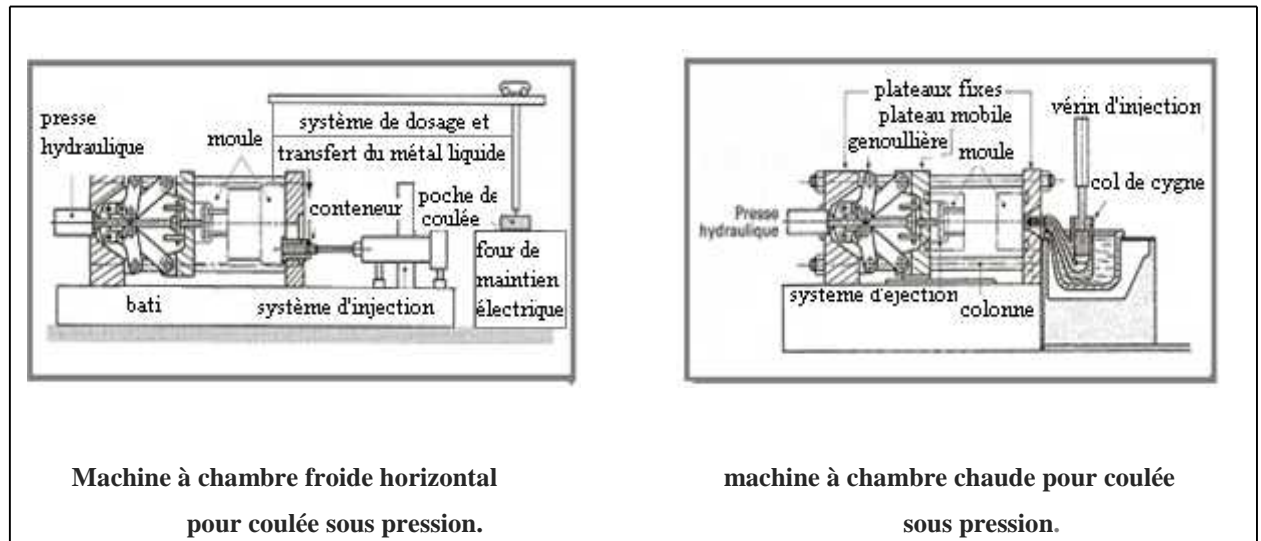


Figure [II.42] : Schéma d'une machine d'injection sous pression. [1]

Deux types de machines sont utilisés : [1]

**à chambre chaude** : Le dispositif d'injection en forme de cygne (*gooseneck*), la chambre est immergée dans l'alliage liquide. Seuls les alliages de zinc, à bas point de fusion (température de coulée de 420 °C) et non corrosifs sont injectés dans ces types de machines (Figure [II.43]) et tableau (II.18).

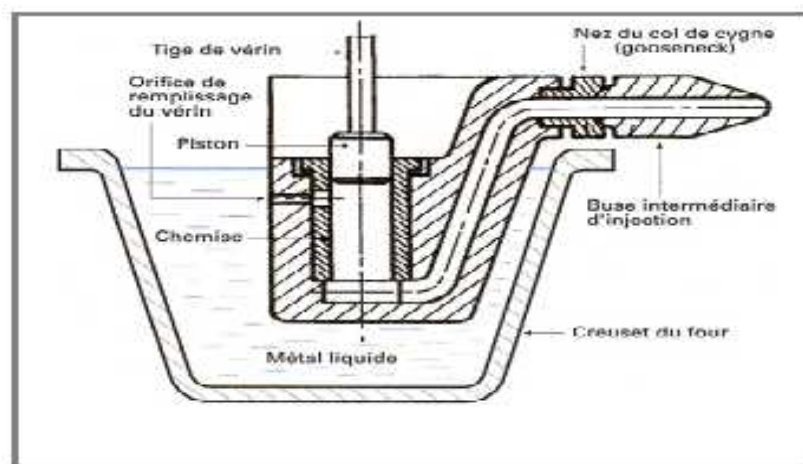


Figure [II.43] : Système d'injection à chambre chaude pour le moulage sous pression. [1]



Avantages	Inconvénients	Utilisations
Solidification rapide Cadence très élevée Automatisation totale Etat de surface	Taille limitée des pièces Coulée presque exclusive des zamaks	Coulée des zamaks

Tableau (II.18) - caractéristique du moulage sous pression utilisant une chambre chaude. [4]

à *chambre froide* : La chambre d'injection n'est pas immergée dans l'alliage liquide. Le piston coulisse selon l'axe horizontal dans le conteneur, tous les deux sont en acier au chrome-molybdène (Figure [II.44]) et tableau (II.19)

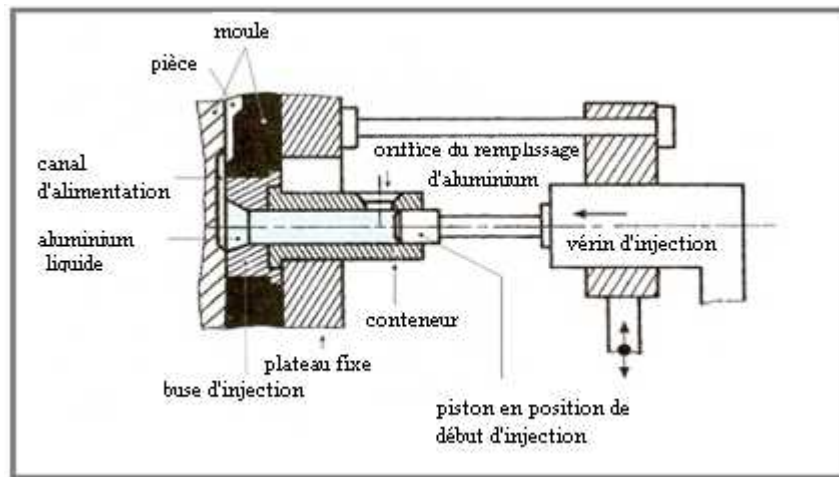


Figure [II.44] : système d'injection à chambre froide pour moulage sous pression installé sur des presses horizontales. [1]

Avantages	inconvénients	utilisations
Solidification rapide Cadence élevée Automatisation totale Précision dimensionnelle Etat de surface Caractéristiques mécaniques amélioré	Air et oxydes inclus dans la structure : porosités Traitement thermique impossible Coût élevé des outillages Usure des outillages	Coulée d'alliages Al_Si

Tableau (II.19)-caractéristiques du moulage sous pression utilisant dans la chambre froide. [4]



Trois phases distinctes sont à considérer :

- \_ Le remplissage du conteneur et l'avancée du piston à faible vitesse, la pression est faible ;
- \_ Le remplissage et l'empreinte, la vitesse est très élevée, la pression augmente;
- \_ La pression de solidification, la vitesse est nulle, la pression maximale.

Le remplissage doit avoir lieu à l'état pulvérisé pour un remplissage et une solidification homogène.

#### d- Le thixomoulage

Il représente une évolution intéressante de la coulée sous pression. Un alliage est dit thixotrope lorsqu'il passe à l'état liquide par une légère agitation et qu'il se régénère par le repos.

Le principe consiste à chauffer une billette en alliage d'aluminium à une température suffisante pour atteindre l'état de «beurre mou», c'est-à-dire une fraction liquide d'environ 60 %. Cette billette est ensuite positionnée par un robot dans le conteneur d'une machine d'injection à chambre froide.

La billette est alors injectée dans le moule, les particules solides roulant dans le liquide pendant la phase de remplissage. Les phases sont identiques à la coulée en chambre froide (tableau II.20).

Avantages	inconvénients	utilisations
Pas de porosités Caractéristiques mécaniques améliorées Cadence améliorée Usure moindre des outillages Traitement thermique possible	Difficile à maîtriser Coût élevé des billettes	Pièces de sécurité automobiles en Al - Si

Tableau (II.20)- caractéristiques du thixomoulage. [4]

#### e- le squeeze casting

Ce procédé a également comme dénomination le forgeage liquide. Il consiste à couler une pièce, généralement de forme simple, donc compressible en alliage d'aluminium, dans une matrice telle que celle utilisée en forge.



Une louche robotisée dose une quantité de métal prédéfinie pour une pièce et la coule dans l’empreinte de la matrice.

La presse vient ensuite compresser l’alliage pendant sa phase de solidification et de retrait. La pièce obtenue a donc une structure compacte comparable à celle des alliages forgés et en hérite les caractéristiques (figure [II.45] et tableau (II.21)).

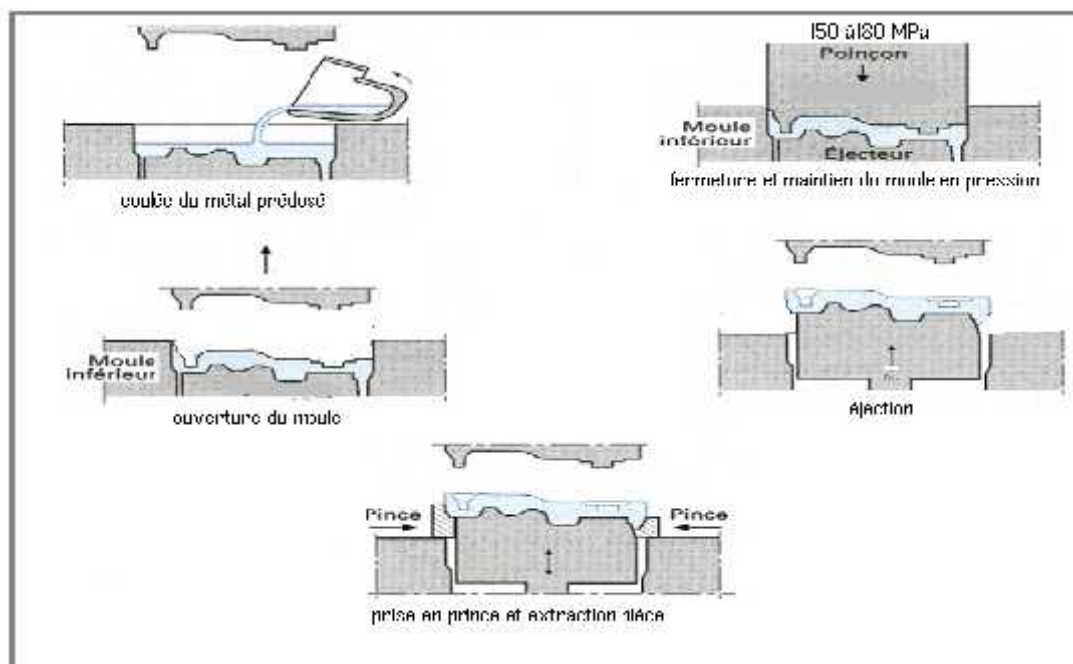


Figure [II.45] : principe du squeeze casting. [1]

Avantages	Inconvénients	utilisations
Caractéristiques mécaniques améliorées	Pièce de forme simple	Pièce de sécurité en alliage d’aluminium
Productivité	Problème avec les peaux d’oxydes	
Pas de surplus de matière		
Mécanisation totale		

Tableau (II.21) - caractéristiques du squeeze casting. [4]

**f- la coulée continue**

À partir d’un bain d’alliage liquide titré, c’est-à-dire défini selon une composition chimique voulue, le fondeur peut couler à la demande un demi-produit sous forme de jet de barre ou de tôle.

Le principe est simple : l’alliage liquide est refroidi et solidifié dans une filière qui définit des formes simples pleines ou creuses. Un dispositif de traction par galet fait avancer le jet solidifié



sur quelques centimètres de manière à solidifier une nouvelle portion dans la filière. Le cycle continu permet d'obtenir des barres généralement coupées à longueur ou des tôles enroulées en bobine (Figure [II.47] et tableau(II.22)).

La coulée peut être verticale ou horizontale.

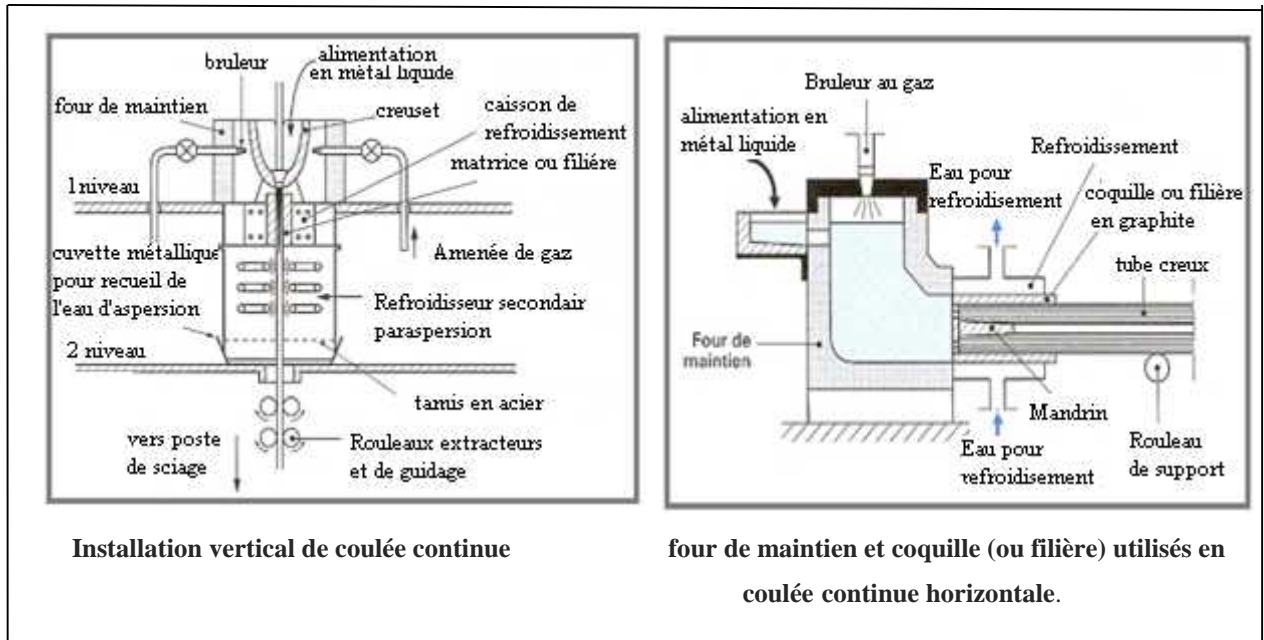


Figure [II.47] schéma de principe de coulée continue. [1]

Avantages	inconvénients	utilisations
Coulée automatique Productivité Faible prix de revient	Profils limités	Profils creux ou pleins ligots

Tableau (II.22) -caractéristiques de la coulée continue. [4]

**g- la centrifugation**

Du métal liquide est coulé dans un moule animé d'un mouvement de rotation autour de son axe principal. Les masses liquide sont soumises à la force centrifuge qui tend à l'éloignés de l'axe de rotation et à les plaqué contre les parois du moule.

Le moule est généralement métallique (Figure [II.48] et tableau (II.23)).





Trois types de machines existent

- > à axe horizontale ;
- > à axe vertical ;
- > à axe oblique.

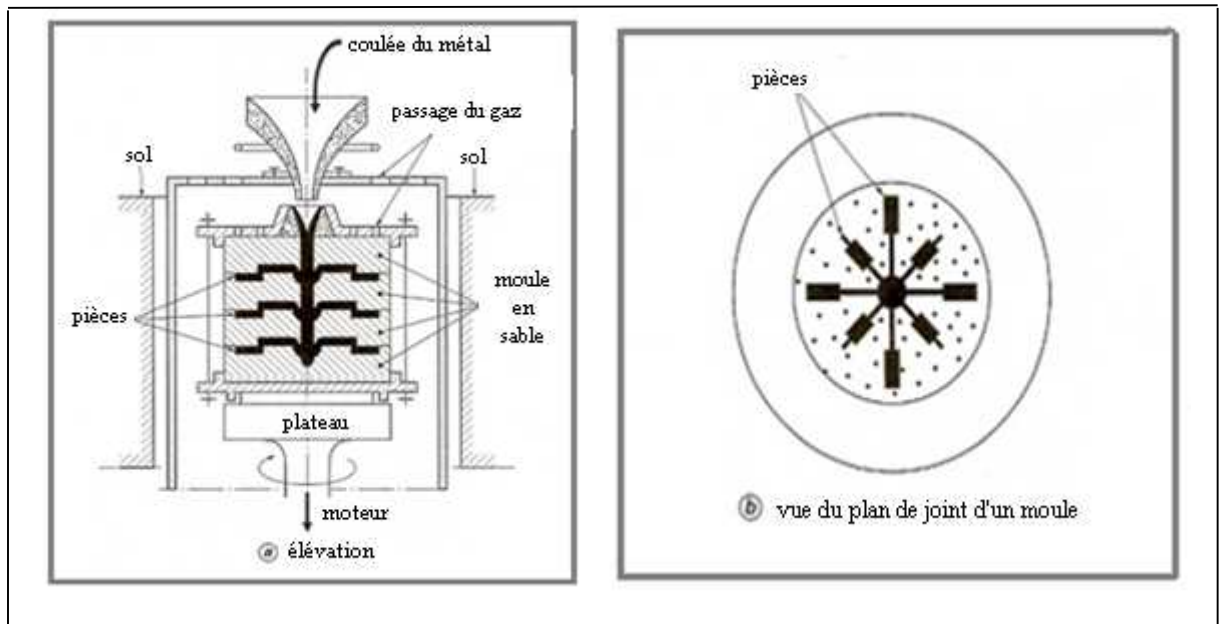


Figure [II.48] : machines de coulée sous pression centrifuge à axe vertical. [1]

Avantages	inconvénients	utilisations
Augmentation de la compacité de l'alliage	Formes simples des pièces	Cylindre de laminoir
Ségrégation centrale des éléments de faible masse volumique	Etat de surface interne moyen	Chemises automobiles
Possibilité de réalisée sans dispositif de coulée		Tuyau bijouterie

Tableau II.23- caractéristiques du moulage par centrifugation. [4]



Le diagramme ci-dessous résume les différents procédés de moulage :

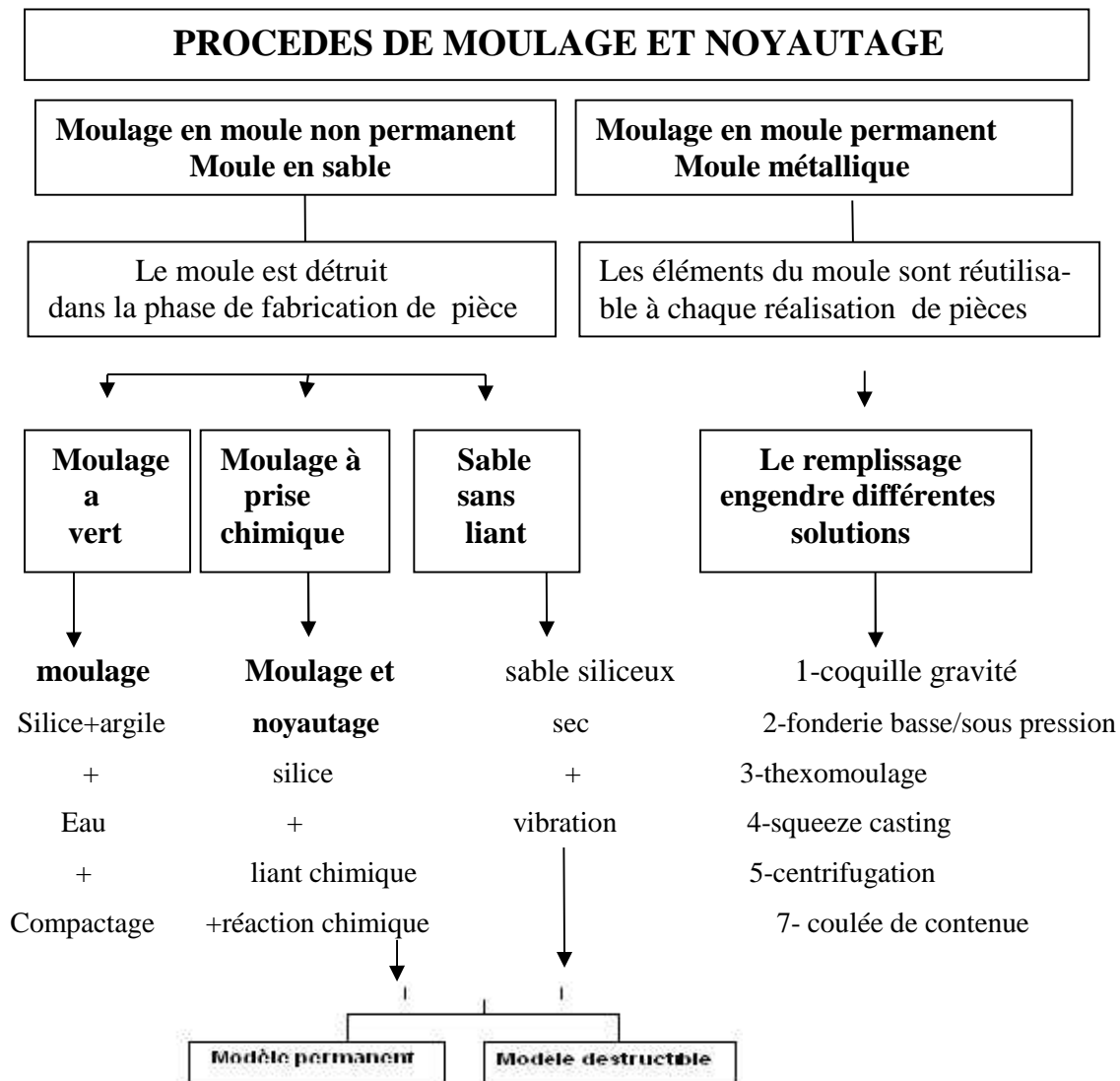


Figure [II.49] : organigramme non exhaustif des techniques de moulage et de noyautage. [4]

## II-5/ conception des pièces

La conception d’une pièce de la fonderie tend à être définie à partir des facteurs principaux suivants : les contraintes, les matériaux utilisés, le procédé et le coût.

La figure [II.50] établit pour une pièce coulée les corrélations entre les matériaux, la fabrication et la conception. Elle illustre très bien les liaisons étroites pour l’obtention d’une pièce de qualité. Il va de soi que la meilleure pièce représentera toujours un compromis technico-économique lié à un minimum de matière.

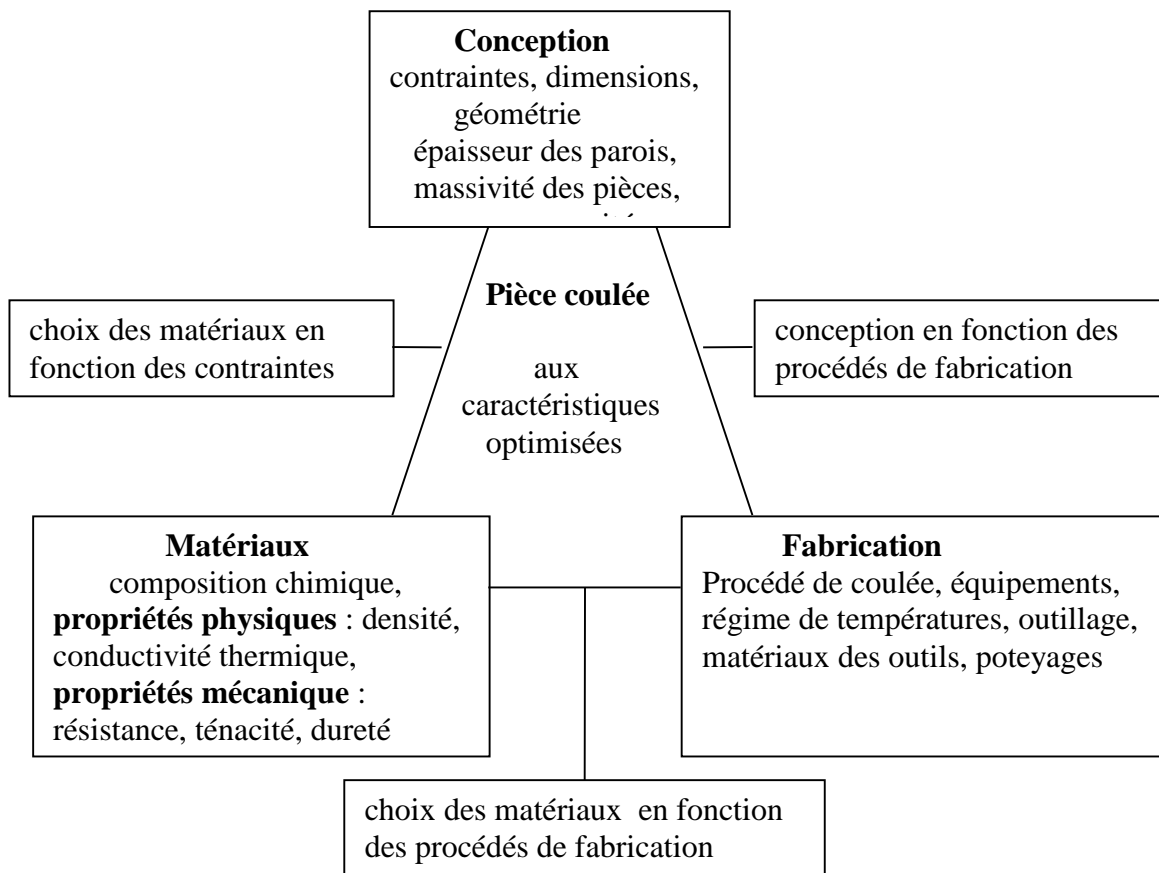


Figure [II.50] : facteurs principaux pour la réalisation de pièces coulée. [4]

3eme chapitre :

Etude de

conception

Des roues

Turbines



### III.1/Introduction

Notre projet consiste à réaliser deux roues mobiles « liée et libre », qui vont être montées sur un micro turbopropulseur. Ces turbines auront pour rôle, la récupération d'un travail utile et l'entraînement d'une hélice.

Dans ce chapitre on va essayer d'expliquer les étapes de conception. Il est donc indispensable d'étudier le comportement de ce micro turbopropulseur, et ses performances, ce qui nous permettra de déterminer les caractéristiques et les dimensions de ces turbines.

### III.2/Description du moteur

C'est un micro turbopropulseur dimensionné pour un point de fonctionnement stabiliser bien déterminé, pour lequel le cycle de fonctionnement s'optimise en fonction des critères de performance « poussée, poussée spécifique, et consommation spécifique... » .

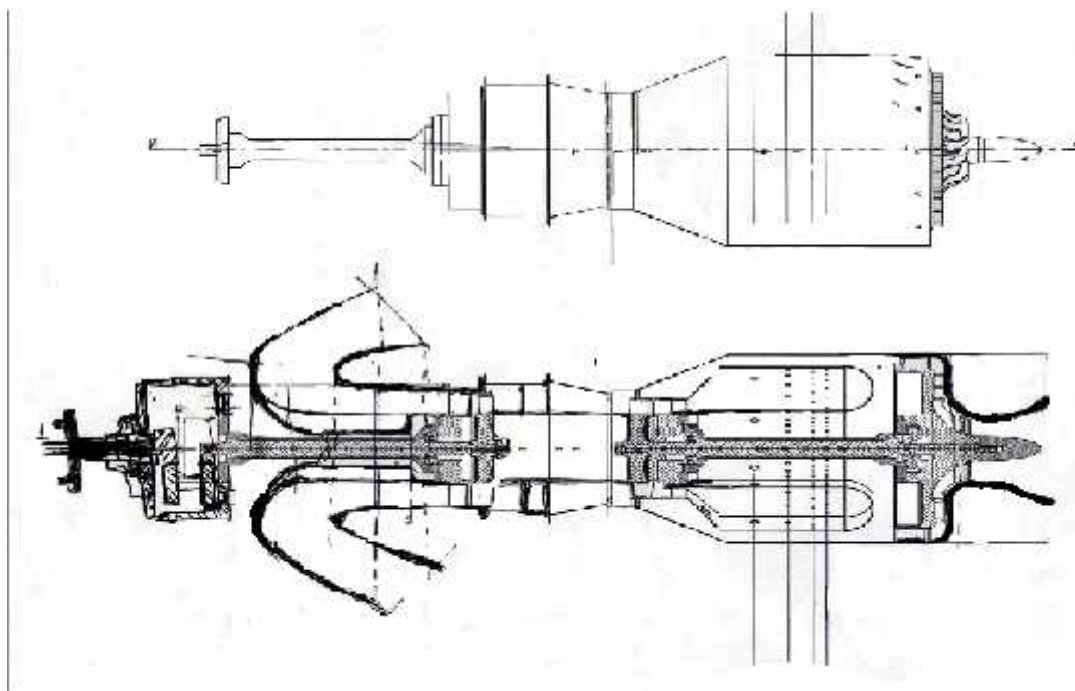


Figure (III .51) : schéma du micro turbopropulseur

Dans cette étape on va déterminer le cycle moteur afin de pouvoir effectuer un choix sur un point de fonctionnement qui nous garantira les exigences à considérer pour nos turbines et donc déterminer les paramètres d'entrée turbine libre .Ceux-ci sont issus d'une étude d'un moteur à réaction d'une poussée max 500N.



On supposant que :

-Le fonctionnement est en adaptation.

-L'écoulement est isentropique.

-Le gaz est considéré comme calorifiquement parfait :

$$C_{pc} = 1,005 \text{ [kJ/kg}^\circ\text{k]} \quad \text{et} \quad c = 1,4$$

$$C_{pt} = 1,2310 \text{ [kJ/kg}^\circ\text{k]} \quad \text{et} \quad t = 1,3$$

$$- PV = n RT$$

-Le point de fonctionnement est au sol ( $H=0$ ) ;

Les paramètres d'entrée seront donnés comme suite :

$P_0, T_0$  : pression et température d'entrée aux conditions ambiantes.

$T_{t_{4max}}$  : température dans la chambre de combustion (entrée turbine), elle dépend des caractéristiques du matériau utilisé.

$\dot{m}$  : le débit d'air.  $pc_i$  : c'est le pouvoir calorifique, selon le carburant utilisé.

$c$  : taux de compression spécifique à la roue du compresseur utilisée.

$d, c, b, t, r$  : rendements de chaque composant « diffuseur, compresseur, chambre de combustion, turbine, tuyère ».

### 1-Le point de fonctionnement

Le déroulement d'un programme pour des taux de compressions variant dans l'intervalle [1 - 4] et une température entrée turbine de [700°K - 1100°K] nous permet d'exploiter les résultats de la simulation sous forme de tracés sur la figure(III.2) ci-dessous, où la consommation spécifique et la poussée spécifique sont représentées en fonction du rapport de compression à différentes températures d'entrée turbine.

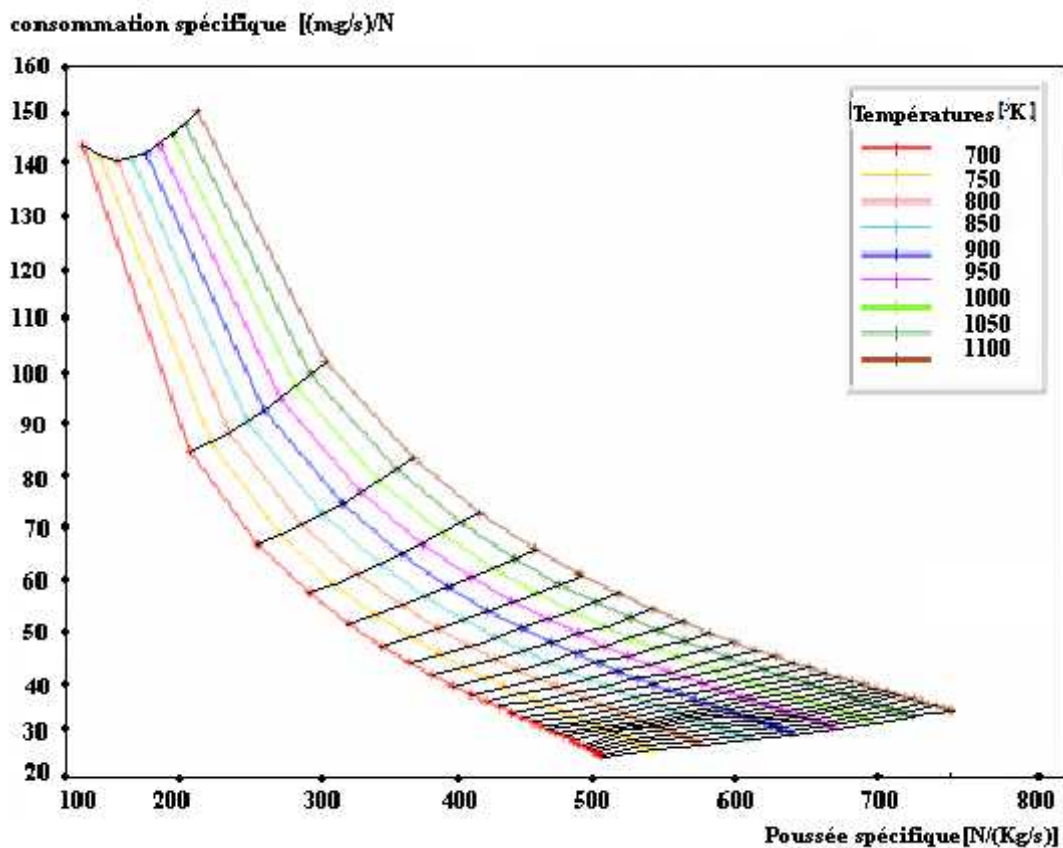


Figure (III.52) : La poussée spécifique en fonction de la consommation pour les différentes températures et différents taux de compression

Cela nous donne le comportement du moteur dans une large plage de données et de limites de fonctionnement ce qui nous permettra dans ce cas de définir un point de conception préliminaire pour notre moteur qui pourra satisfaire aux conditions éditées dans le cahier de charge du constructeur.

La disponibilité de la courbe de fonctionnement du compresseur figure (III. 3), nous permet de déterminer les valeurs du débit max et min pour un rendement maximum de la roue sur la figure précédente. Ce la revient à estimer la poussée pour un choix de température fixée  $T_{t4}$ . L'idée est de choisir une roue qui nous assure un débit qui correspond a fin de produire une poussée spécifique d'environ 500 N.

Sur le tableau qui suit, on a représenté le résultat pour une gamme de roue de compresseur de la série T du constructeur **GARETT**.

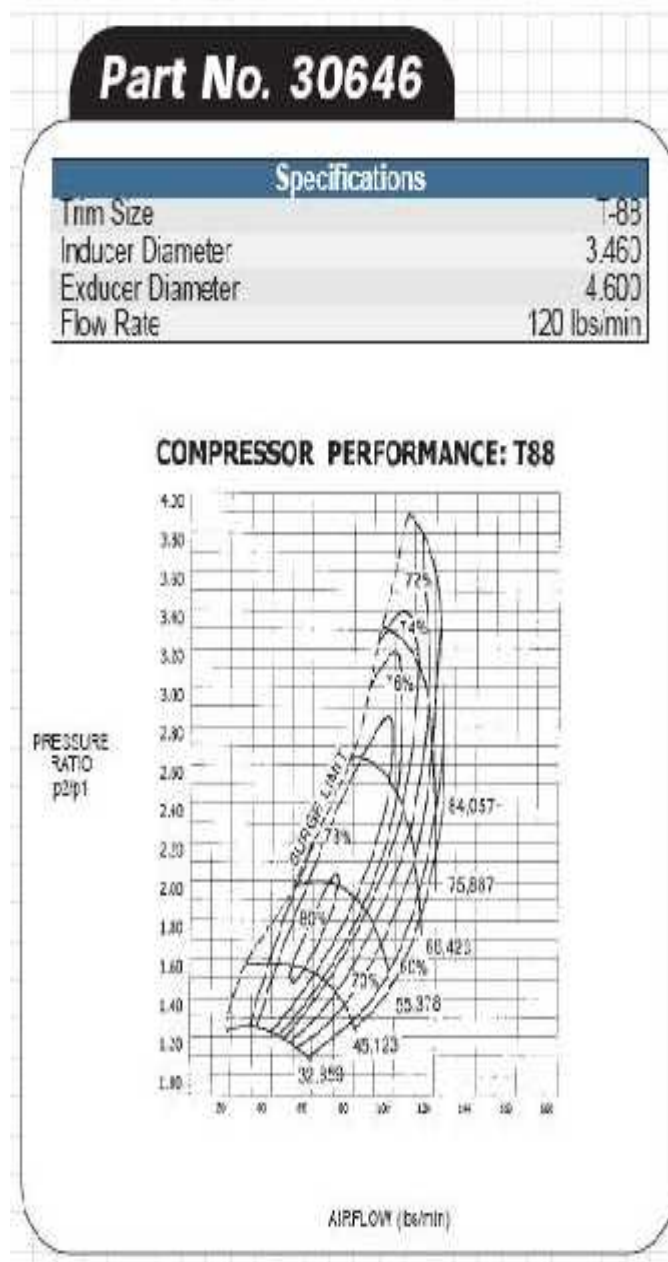


Figure (III. 53) : les performances compresseur selon la série T88

Weel Series	Débit maxKg/s	(F/m)		
		400 N	450 N	500 N
T40	0.2723	1468.96	1652.58	1836.21
T46	0.3102	1289.49	1450.67	1611.86
T50	0.3556	1124.85	1265.46	1406.07
T54	0.3404	1175.06	1321.7	1465.86
T57	0.37	1081.08	1216.21	1351.35
T60	0.378	1058.2	1190.47	1322.75
T58	0.4509	881.25	991.4	1101.56
T61	0.4509	881.25	951.4	1101.56
T64	0.47	851.06	957.44	1063.82
T66	0.5144	777.6	874.8	972.006
T70	0.5977	669.23	752.88	836.54
T72	0.6052	660.90	743.55	826.17
T76	0.688	581.39	654.06	726.74
<b>T88</b>	0.9108	439.39	494.07	548.96
T91	0.9833	406.71	457.54	508.38
T100	1.26	294	330.8	367.64

Tableau (III.1) : résultats du compresseur de la série T du constructeur GARETT

Notre choix c'est porté sur la série T88 de dimension 116.84 mm de diamètre de l'extracteur et d'une valeur de 87.884 mm de diamètre de l'aspirateur. La lecture sur la courbe de la figure (III.3) pour un choix optimal correspondant à un rapport de compression  $c = 3,6$  qui nous permet d'obtenir une consommation minimale de l'ordre de  $C_s = 40 \text{ mg/N/s}$ .





Dans le tableau ci-dessous sont résumées les caractéristiques retenues en ce point d'adaptation :

$\pi_c$	$T_{t4} (^{\circ}K)$	$\dot{m}$ (kg/s)	$F$ (N)	$C_p$ (mg/s/N)	$N$ (tr/mn)	$\eta_c$ (%)
3.6	1100	0.78	550	40	71637	73

Tableau (III.2) : point de fonctionnement du moteur.

En obtenant le cycle et le débit fixes pour une condition de vol donnée ; il devient alors possible de dimensionner chaque composant du moteur.

### III.3/Etude et conception des turbines

#### a-Etude et conception de la turbine liée

Le fonctionnement de la turbine axiale dépend du fonctionnement du compresseur axial. Cela nous permet de réaliser un changement de pression et d'énergie et permet une grande efficacité. Cependant, plusieurs contraintes participent simultanément dans la conception des aubes à causes du groupement d'un grand travail et d'une très haute température. Ceci nous dicte en général la forme de l'aube.

Alors dans cette partie on a fait appelle à un programme de désigne de la turbine pour dimensionner les turbines (stator et rotor) afin de fixer la géométrie : nombre d'aubes, les diamètres, angles d'entrée et sortie, courbure, corde axial, hauteur et l'espacement entre les aubes sur laquelle sera basée notre réalisation pratique. (Voir annexe 02).

Ce programme nécessite d'avoir des données dont certains sont tirer à partir des résultats du turboréacteur d'autre ont été tiré à partir des équations des cours de propulsion.

Ces équations traitent l'écoulement axial dans les différentes stations de la turbine (station1, station2 et station3)

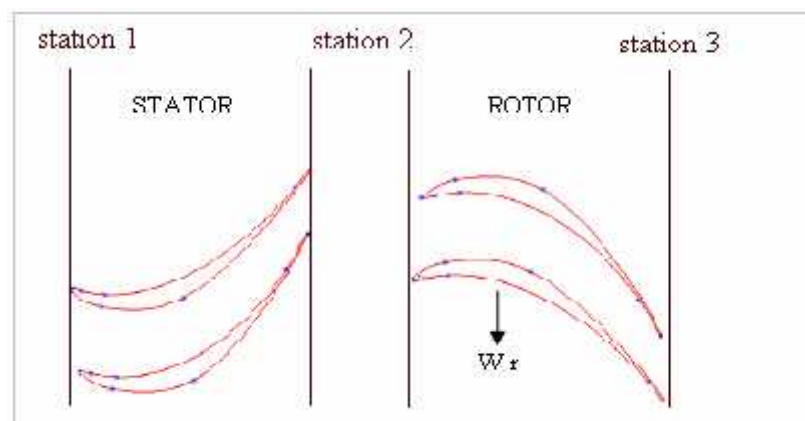


Figure (III.54) : différentes stations de la turbine



Les résultats sont étudiés et vérifiés pour les meilleures conditions et choix de conception adéquat à notre moteur. Les valeurs optimales retenues après traitement des résultats sont mentionnées dans le tableau ci-dessous.

Mass flow	M 2	Stator c/h	N° étage stator	Rotor c/h	N <sup>br</sup> étages rotor	W (rad/s)
0.7800	0.8000	1.3000	1	0.9000	1	7850

Tableau (III.3) : conditions de la conception.

A partir des données précédentes le logiciel Turbn nous donne les résultats représentés ci-dessous.

```

Corr Flow = 0,84 kg/s  M1 = 0,4000  Tt1 = 1100,0 K  Pt1 = 380,00 kPa
Mass Flow = 0,78 kg/s  M2 = 0.8000  AL2 = 61,00  AL1 = 0,00
u3/u2 = 1,0000 phis= 1,044 et = 0,900  Um = 249,00 m/s  rm = 0,055 m
Stator: Z = 1,0000  c/h = 1,3000  Rotor: Z = 1,0000  c/h = 0,9000
Gamma = 1,3000 Gas Const = 0,2873 kJ/kg-K  w = 7850 rad/s  M3R = 0,800
Omega = 0,2281  Cp = 1,2451 kJ/kg-K

RESULT: Tt3/Tt1 = 0,8780  Pt3/Pt1 = 0,5345  DTt = 137,00 K  AN^2= 2,605 E+07
Reaction Hub = 0,1556  Mean = 0,4723  Tip = 0,6392  Eff = 90,64 %
Flow Area 1 = 0,0028  Area 2 = 0,0046  Area 3 = 0,0050  m^2
Coeff. Load = 1,5759  Flow = 0,7293  Vel Rat = 0,5633  RPM = 74 962
Nozzle-Vanes: c/s = 20/1,394  Rotor-Blades: c/s = 24/1,370  M3Rt = 0,885

Station  lh  lm  lt  2h  2m  2t  2Pm  3Pm  3h  3m  3t
Prop\
Tt  K | 1100 1100 1100 1100 1100 1100 1026 1026 986 986 986
T  K | 1074 1074 1074 0979 1025 1048 1025 0960 958 960 0961
Pt  kPa | 380,0 380,0 380,1 307,1 307,1 307,1 206,4 269,0 203,1 203,1 203,1
P  kPa | 342,9 342,9 342,9 169,7 206,6 228,1 206,4 180,8 179,3 180,8 181,6
M  | 0,400 0,400 0,400 0,989 0,800 0,688 0,423 0,800 0,442 0,425 0,417
Vel  m/s | 256 256 256 598 495 431 261 479 264 255 250
u  m/s | 256 256 256 240 240 240 240 240 240 240 240
v  m/s | 0 0 0 548 433 358 104 415 110 86 70
alpha/beta | 0,00 0,00 0,00 66,35 61,00 56,15 23,41 59,94 24,71 19,64 16,24
radius  m | 0,037 0,042 0,047 0,033 0,042 0,051 0,042 0,051 0,032 0,042 0,051

```

Figure (III.55): tableau des performances moteur et les paramètres internes de chaque station

### Présentation du logiciel TURBN

C'est un logiciel qui permet de calculer les performances des moteurs, et compris les paramètres aérodynamiques de la turbine qui, à partir des paramètres de référence donne :



- Les paramètres internes de chaque station du moteur ;
- Les dimensions de la turbine (stator, rotor) ;
- Les dimensions des aubes turbine ;
- Le vrillage (les angles de calage des profils des aubes turbine) ;

les figures ci-dessous présentent les dimensions des disques turbine (stator, rotor) ainsi que les dimensions des aubes (anges d'entrée et sortie, angles de calage des profils) données par le logiciel TURBN

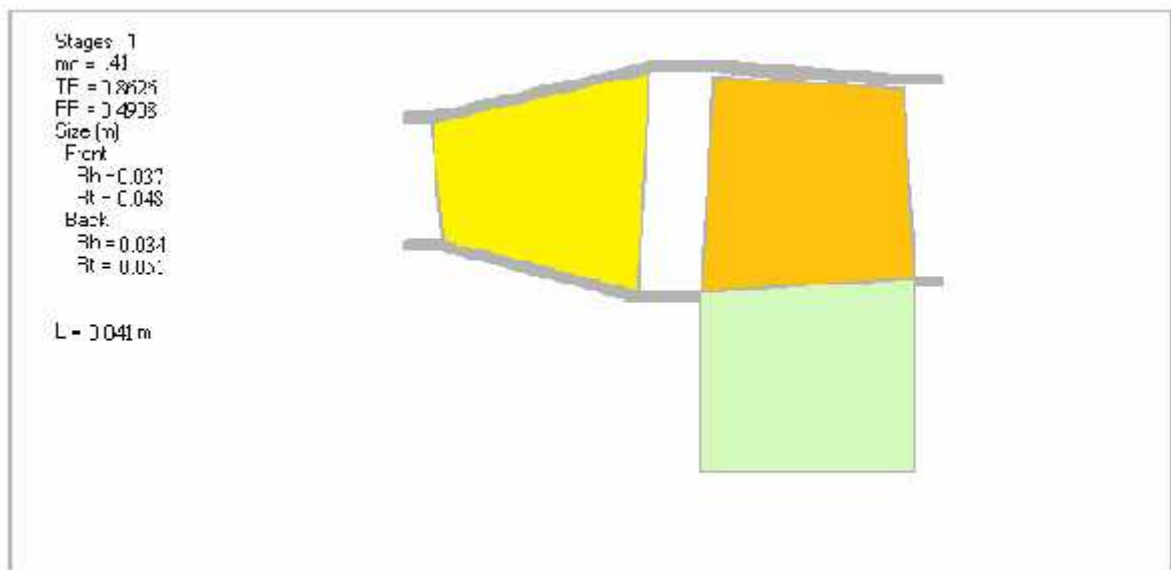


Figure (III.56) : dimensions de la turbine liée.

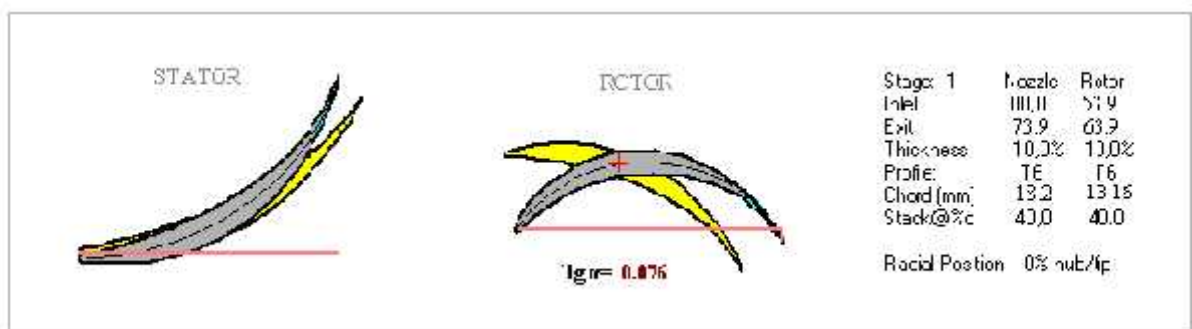


Figure (III.57) : dimension et angles des profils à la position hub

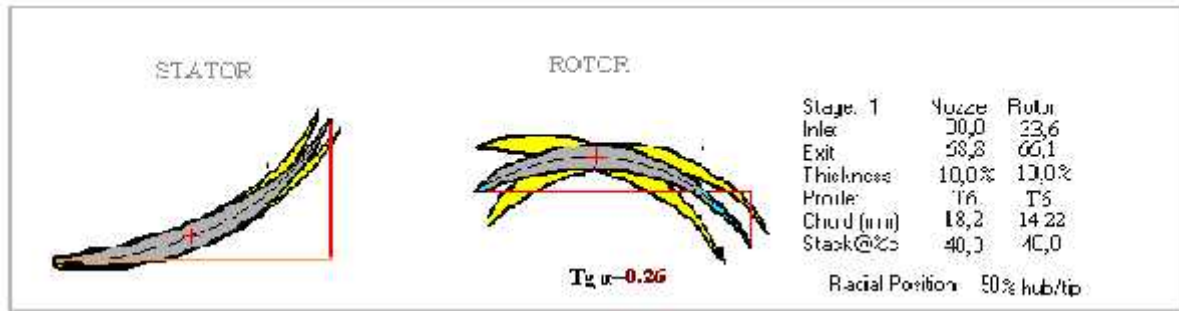


Figure (III.58) : dimensions et angles des profils à la position moyenne

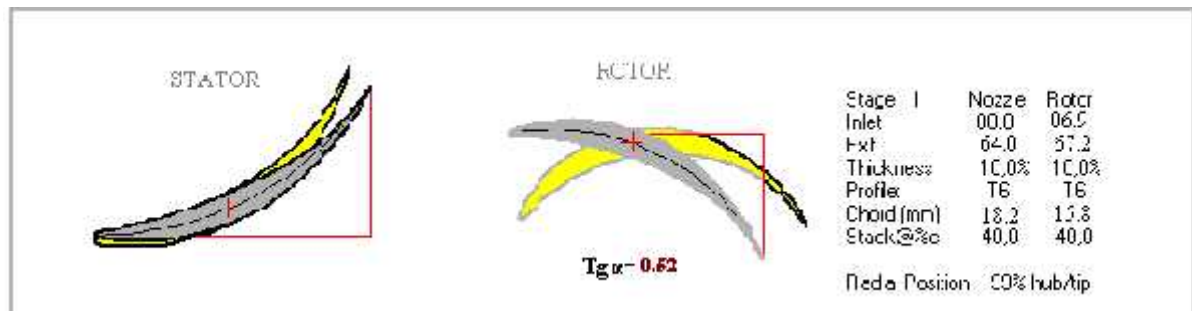


Figure (III.59) : dimensions et profils des aubes à la position tip

### Détermination des dimensions de la roue

D'après les équations des contraintes appliquées sur le disque et de la jante de la roue nous constatons que des efforts importants de traction sont générés par la force centrifuge, ce qui nous a mené à fixer  $D=80$  mm. La figure ci-dessous illustre les dimensions de la roue turbine

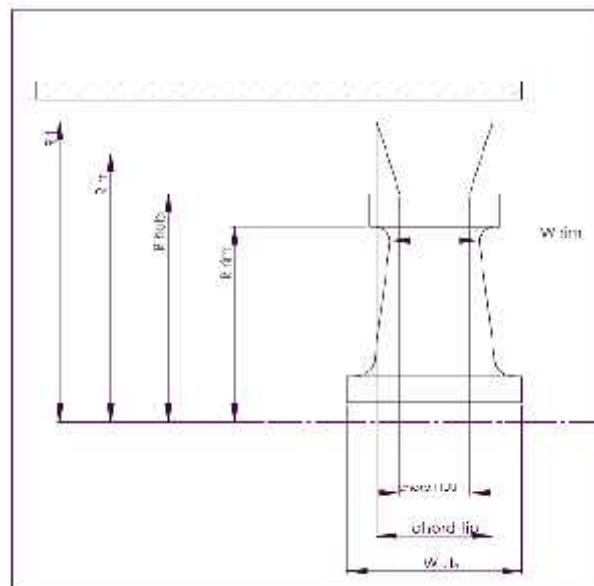


Figure (III.60): Dimensions de la gante et l'aube



R tip (mm)	R hub (mm)	R m (mm)	R rim (mm)	W rim (mm)	W ds (mm)
56	40	48	37	12	22

Tableau (III.4): dimensions de la roue.

### Détermination de la géométrie des aubes rotor

Pour la turbine liée le rotor est constitué de 24 aubes, ce nombre est choisi à partir du programme EXCEL (annexe 02) suivant des caractéristiques bien définies, et chaque aube est construite à partir de trois profils avec des géométries différentes, le tableau ci-dessous représente les caractéristiques de chacun des profils d'aube.

	Le profil au Rh	Le profil au Rm	Le profil au Rt
L'angle de calage	4.35°	14.57°	27.69°
L'angle d'entrée	53.9°	33.6°	06.9°
L'angle de sortie	63.9°	66.1°	67.2
La corde axiale	13.16 mm	14.22 mm	15.80 mm

Tableau (III .5): coordonnées des aubes

### Dessin des profils des aubes

Pour les deux turbines « liée, libre » le profil défini par le logiciel TURBN est le profil T6, ce dernier est utilisé généralement pour définir la géométrie des aubes des turbines à gaz et à vapeur. Cette forme à une ligne de courbure en arc et autour d'elle le profil de l'intrados et l'extrados sont construits.

On note dans le profil T6 qu'il est symétrique par rapport à la ligne moyenne et a les caractéristiques géométriques suivantes :

- Rapport d'épaisseur max /corde égale à 0.1,
- Rayon de bord d'attaque de 12 pourcent de  $t$



- Rayon de bord de fuite égale à 6 pourcent de  $t$
- La position de la flèche max est à 40 pourcent a partir du bord d'attaque.
- $t$  représente la flèche max.

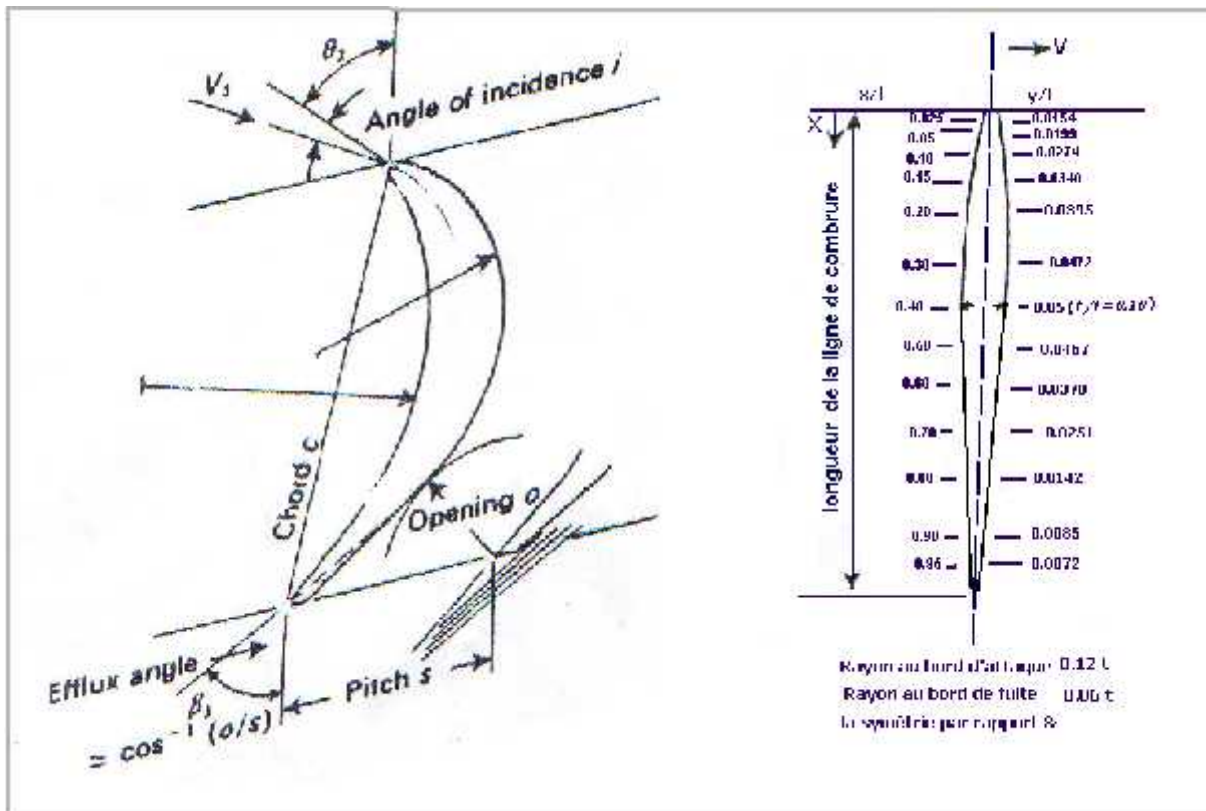


Figure (III.61) : Profil aérodynamique T6 des turbines à gaz

Pour permettre une schématisation des pièces, on a utilisé le logiciel SOLIDWORKS 2008,

### Présentation du logiciel SOLIDWORKS

C'est un logiciel qui permet aux étudiants dans un temps d'apprentissage rapide d'exprimer leurs idées, sous forme des modèles et de convertir ses modèles en prototype. Lors de l'apprentissage du processus de conception, les étudiants acquièrent des compétences précieuses en matière de communication, de collaboration et de résolution de problèmes. Aux outils de création



sont associés des principes mathématiques, scientifiques et d'ingénierie, qui préparent les étudiants à relever les multiples défis qu'ils pourront rencontrer au cours de leur enrichissante carrière.



Figure (III.62) : Interface du logiciel SOLIDWORKS

Donc à partir de ce logiciel les étudiants peuvent esquisser leurs idées grâce aux fonctions de base suivantes :

- Conception de pièces,
- Conception d'assemblages,
- Mise en plan associative,
- Modélisation de surfaces,
- Conception de pièces de tôlerie,
- Conception d'ensemble mécano-soudés,
- Conception d'empreintes de moules,
- Assemblage intelligent de pièces,
- Familles de pièces,
- Configuration d'assemblages,
- Génération automatique des nomenclatures (au format Microsoft Excel ou autres),
- Personnalisation des attributs de pièces, composants et assemblages,
- Librairie de fonctions.....etc.







Sur le plan qui est déjà choisi on peut suivre les étapes suivantes pour chacun des profils, afin de construire une aube constitué de trois profils tracés dans des trois plans parallèles.

- 1-définir la corde axiale limité par deux lignes parallèles, représenté dans le schéma par le sagement AB.
- 2- Tracer la corde du profil ; en portant une ligne qui passe par le centre du sagement AB, faisant un angle de calage  $\alpha$ . Avec la référence AB
- 3-Tracer les deux segments CG et FG avec les deux angles  $\beta$  et  $\gamma$  par rapport à l'horizontal qui représentent respectivement l'angle d'attaque et l'angle de fuite.
- 4-Tracer l'arc qui passe par les deux points C et F, qui est tangent aux deux segments CG et FG, l'arc trouvé représente la ligne moyenne du profil.
- 5-Une fois la ligne moyenne est tracée, intrados et l'extrados sont tracés par rapport à cette ligne selon les coordonnées des tableaux ci-dessous :

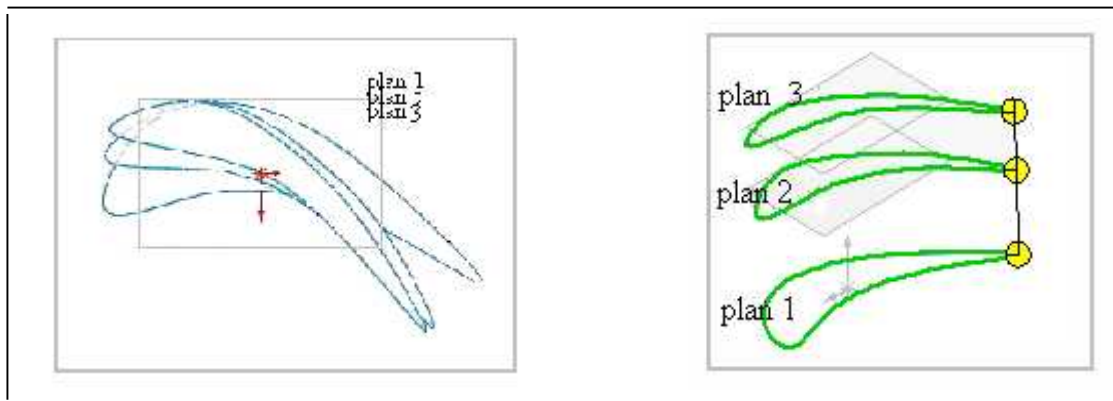


Figure (III.64) : profils d'aube

X	0.33	1.32	2.54	5.28	6.6	7.92	10.56	11.88	12.54
Y	0.203	0.361	0.521	0.660	0.616	0.488	0.187	0.112	0.095

Tableau (III .6) : Le profil dans la position hub.

X	0.355	1.422	2.844	5.688	7.11	8.532	11.376	12.798	13.509
Y	0.218	0.389	0.561	0.711	0.664	0.526	0.20	0.12	0.102

Tableau (III.7) : Le profil dans la position moyenne de l'aube.



X	0.446	1.784	3.568	7.136	8.92	10.704	14.272	16.052	16.948
Y	0.274	0.488	0.704	0.892	0.833	0.660	0.253	0.151	0.128

Tableau (III.8) : Le profil dans la position tip.

La figure ci-dessous représente une schématisation de SOLIDWORKS en 3D

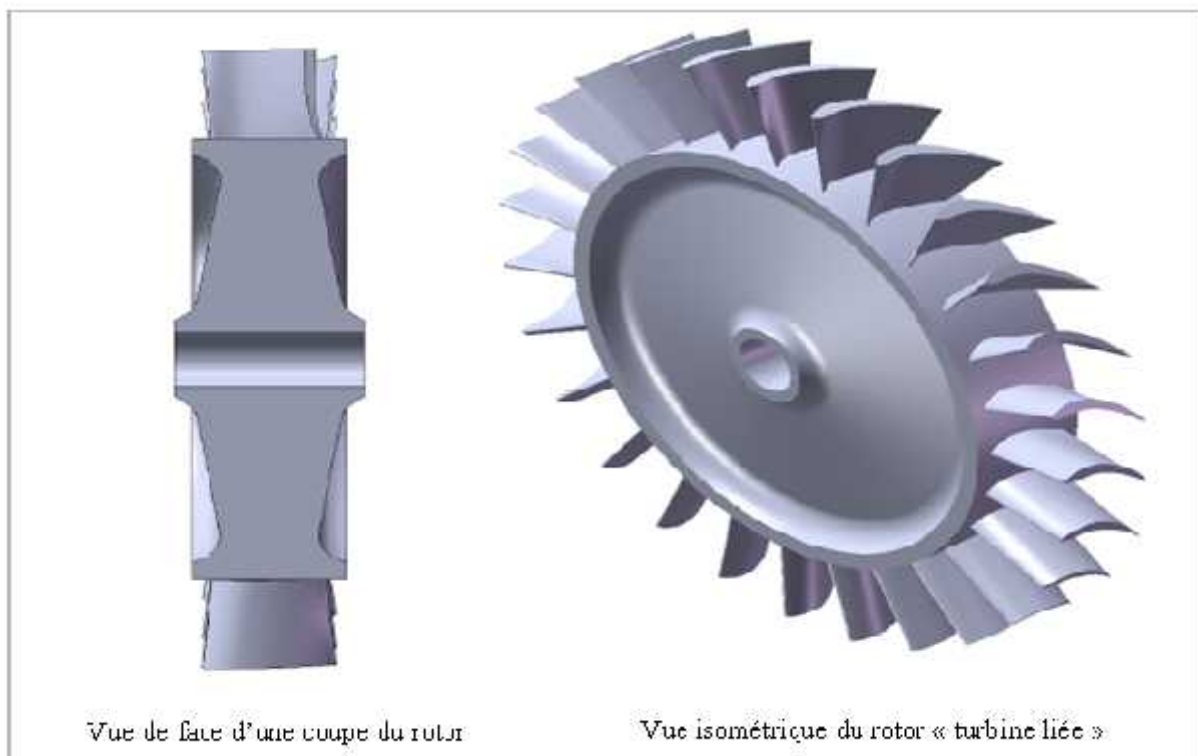


Figure (III .65) : schématisation de la turbine liée.

### b - Étude de la conception de la turbine libre

Dans cette partie on va chercher les dimensions de la turbine libre. Et a fin de fixer ses paramètres d'entré les paramètres de sortie turbine liée sont mentionnée dans le tableau ci-dessous:

$P_{15}$ (KP)	$P_5$ (KP)	$T_{15}$ (°K)	$T_5$ (°k)	$M_5$	$V_5$ (m/s)	$m^\circ$
175 .5	151.7	957	925	0.477	280	0.80

Tableau (III.9) : paramètres de sortie turbine liée.



A fin de sortir les conditions d'entrer de la turbine libre, on a supposé que le cycle est théorique et que les pertes de pressions sont nulles. Grâce aux principes de propulsion on a trouvé les résultats représentés ci-dessous :

$P_{t6}$ (KP)	$P_6$ (KP)	$T_{t6}$ (°K)	$T_6$ (°k)	$M_6$	$V_6$ (m/s)	$A$ (m <sup>2</sup> )
175.5	158.4	957	925	0.4	236	0.59

Tableau (II.10) : paramètres d'entrée de la turbine libre.

A partir des données du tableau précédent le logiciel turbin nous donne les résultats suivants, qui traitent l'écoulement axial dans la turbine libre.

```

Corr Flow = 0,84 kg/s  M1 = 0,4000  Tt1 = 957,0 K  Pt1 = 175,50 kPa
Mass Flow = 0,80 kg/s  M2 = 0,9500  AL2 = 61,00  AL1 = 0,00
u3/u2 = 1,0000  phis= 1,044  et = 0,900  Um = 249,00 m/s  rm = 0,055 m
Stator: Z = 1,0000  c/h = 1,3000  Rotor: Z = 1,0000  c/h = 0,9000
Gamma = 1,3000  Gas Const = 0,2873 kJ/kg-K  w = 4500 rad/s  M3R = 0,850
Omega = 0,2281  Cp = 1,2451 kJ/kg-K

RESULT: Tt3/Tt1 = 0,8738  Pt3/Pt1 = 0,5222  DTt = 120,79 K  AN^2=1,972E+07
Reaction Hub =-0,2743  Mean = 0,3405  Tip = 0,5981  Eff = 90,66%
Flow Area 1 = 0,0057  Area 2 = 0,0107  Area 3 = 0,0093 m^2
Coeff. Load = 2,4256  Flow = 1,0379  Vel Rat = 0,4540  RPM = 42 972
Nozzle-Vanes: c/s = 14/1,236  Rotor-Blades:c/s = 22/1,639  M3Rt = 0,9001

Station  lh  lm  lt  2h  2m  2t  2Rm  3Rm  3h  3m  3t
Prop\
Tt  K | 957,0 957,0 957,0 957,0 957,0 957,0 888,7 888,7 836,2 836,2 836,2
T  K | 934,6 934,6 934,6 763,0 842,9 876,7 842,9 801,8 796,1 801,8 804,5
Pt  kPa | 175,5 175,5 175,5 121,7 121,7 121,7 88,3 119,3 91,7 91,7 91,7
P  kPa | 158,4 158,4 158,4 45,6 70,2 83,3 70,2 76,4 74,1 76,4 77,5
M  | 0,400 0,400 0,400 1,302 0,950 0,781 0,602 0,850 0,580 0,535 0,513
Vel  m/s | 236 236 236 695 533 447 338 465 316 293 281
u  m/s | 236 236 236 258 258 258 258 258 258 258 258
v  m/s | 0 0 0 645 466 365 217 387 182 138 111
alpha/beta | 0,00 0,00 0,00 68,17 61,00 54,70 40,05 56,25 35,14 28,06 23,22
radius  m | 0,047 0,055 0,064 0,040 0,055 0,071 0,055 0,071 0,042 0,055 0,069

```

Figure (III.66) : tableau des performances moteur et les paramètres internes de chaque station.



Pareillement à la turbine précédente le logiciel nous donne aussi une schématisation de la roue et les dimensions de chaque profil d'aube, comme il est schématisé ci-dessous :

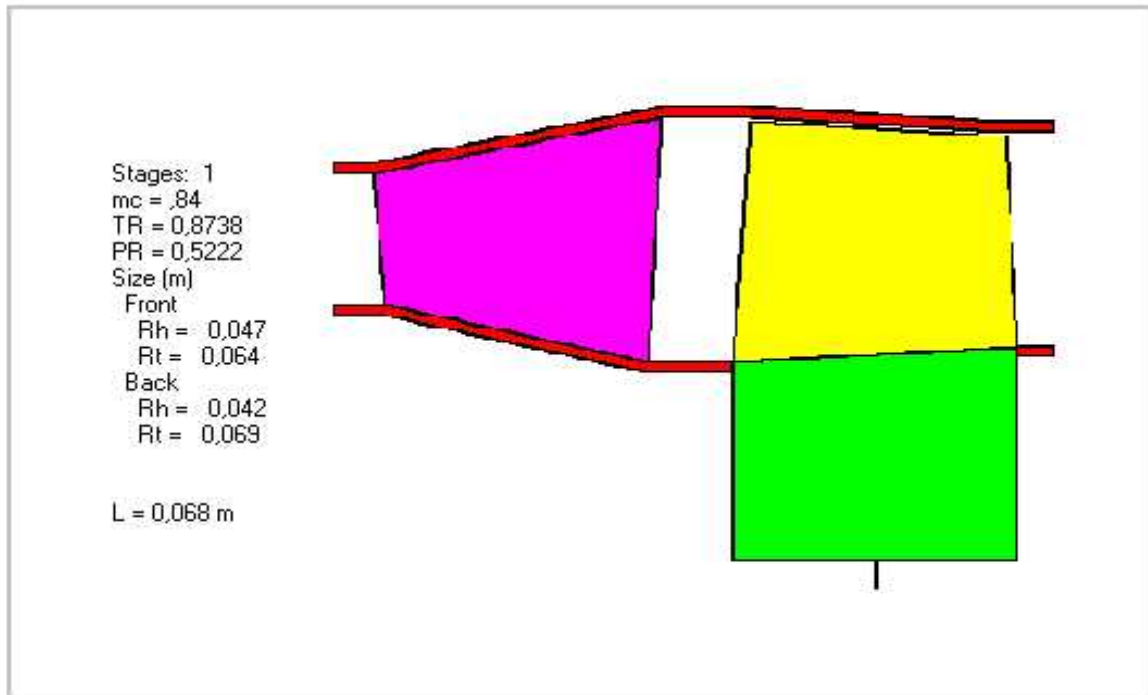


Figure (III.67) : dimensions de la turbine libre.

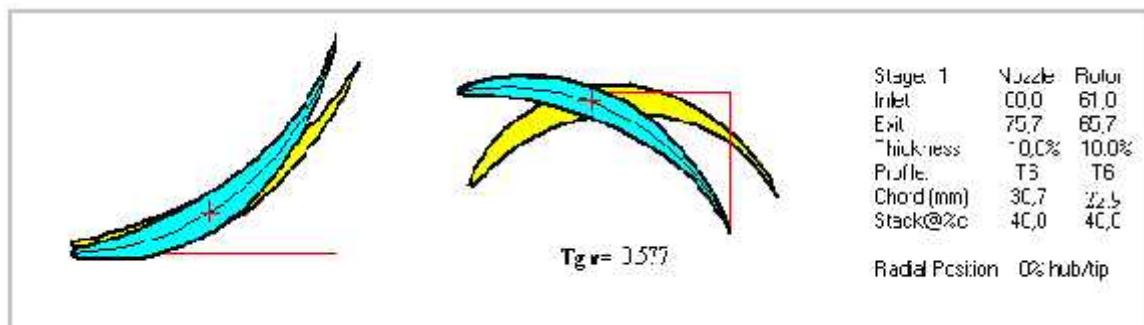


Figure (III.68) : dimension et angles des profils à la position hub.

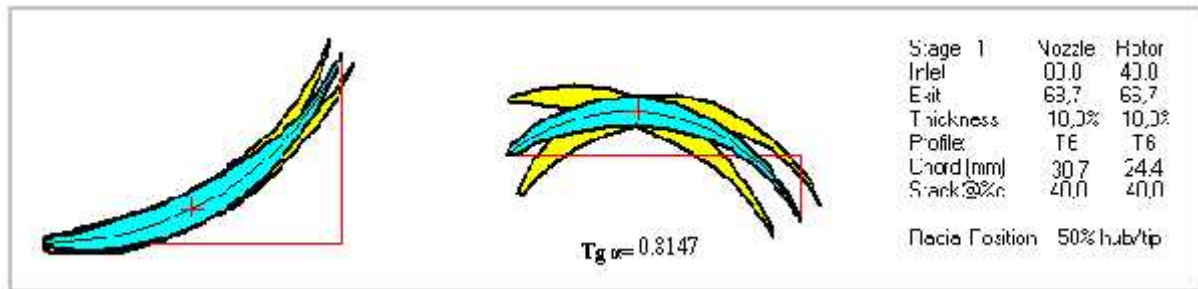


Figure (III.69) : dimensions et angles des profils à la position moyenne

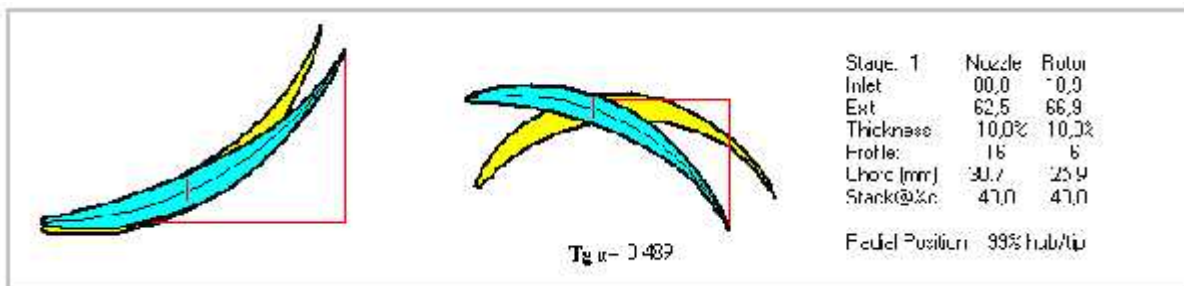


Figure (III.70) : dimensions et profils des aubes à la position tip

### Détermination des dimensions de la roue

Pour cette turbine on a gardé le même diamètre de la turbine liée, et a cause de l'augmentation des contraintes appliquées sur la roue générées par la force centrifuge, nous sommes mené à fixer les dimensions présentées sur le tableau suivant :

R t1	R m	R h	R rim	W rim	W ds
69 mm	54.5 mm	40 mm	37 mm	18 mm	30 mm

Tableau (III.11) : paramètres d'entrée de la turbine libre.

### Détermination de la géométrie des aubes rotor

Pour cette turbine libre le rotor est constitué de 24 aubes, ce nombre est choisi à partir du même programme EXCEL précédent (annexe 02) suivant des caractéristiques bien définies, et chaque aube est construite à partir de trois profils avec des géométries différentes comme la turbine précédente, le tableau ci-dessous montre les caractéristiques de chacun des profils d'aube :



	Le profil au Rh	Le profil au Rm	Le profil au Rt
L'angle de calage	30°	39.169°	26.05°
L'angle d'entrer	61.0°	40.0°	10.9°
L'angle de sortie	65.7°	66.7°	66.9°
La corde axiale	22.90 mm	24.40 mm	25.9 mm

**Tableau (II.12) : dimensions des profils d'aubes.**

### Dessin des profils des aubes

A fin de dessiner les profils d'aubes, on suit les mêmes étapes sauf le changement des coordonnées de l'intrados et l'extrados qui sont suivants les tableaux ci-dessous :

X	0.539	2.158	8.624	12.93	17.248	19.40	20.48
Y	0.332	0.59	1.078	0.797	0.30	0.183	0.155

**Tableau (III .13) : Le profil dans la position hub.**

X	0.61	2.44	9.76	14.64	19.52	21.96	23.18
Y	0.375	0.668	0.963	1.139	0.346	0.207	0.175

**Tableau (III.114) : Le profil dans la position moyenne de l'aube.**

X	0.58	2.327	9.308	13.96	18.6	20.9	22.1
Y	0.358	0.637	1.163	0.860	0.33	0.197	0.160

**Tableau (III.15) : Le profil dans la position tip.**



La figure ci-dessous représente une schématisation de SOLIDWORKS en 3D :

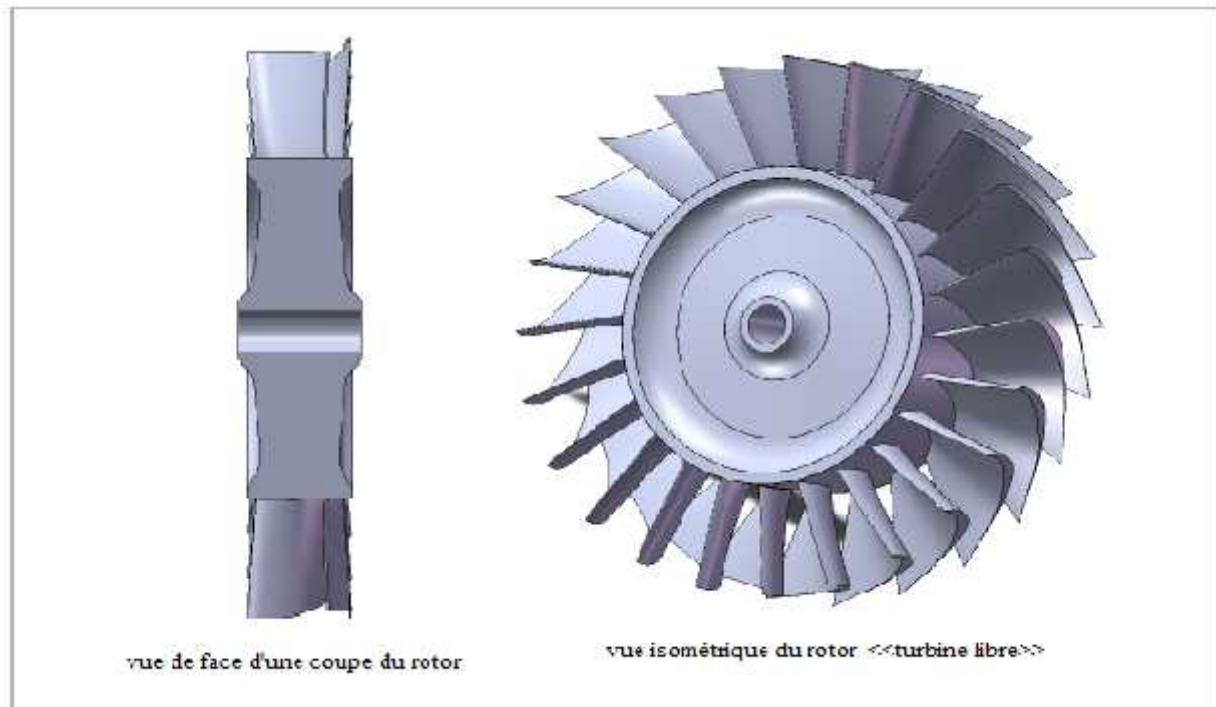


Figure (III .71) : schématisation de la turbine libre.

### III.4/ Les alliages utilisés pour la réalisation des aubes turbine

Généralement les aubes sont soumises à des contraintes de pression et de températures très élevées, ce qui mènent les constructeurs à développer des alliages, afin d'améliorer les propriétés des turbines. le tableau ci-dessous représente les teneurs des composant d'un exemple d' alliage utilisé pour la réalisation des aubes turbine :

Les éléments	Pourcentage	Les éléments	Pourcentage	Les éléments	Pourcentage
Ni	59 %	Ti	1.5 %	Cu	0.05 %
Co	10 %	Hf	1.5 %	Zr	0.05 %
W	10 %	Fe	0.25 %	B	0.015 %
Cr	09 %	Mo	0.25 %	S	< 0.008 %
Al	5.5 %	C	0.15 %	Pb	<0.005 %
Ta	2.5 %	Si	0.1 %	Mn	0.1 %

Tableau (III.16) : les teneurs des composants d'un alliage turbine.

**Remarque :**

*chaque symbole chimique correspond a un métal mentionnée dans un (tableau annexe 1 ) avec son symbole mécanique et sa densité et le point de fusion.*

**1-Propriétés des aubes turbine**

- résistance au fluage
- résistance à l'oxydation à haute température
- résistance à la fatigue thermique
- stabilité a la température
- ténacité
- faible densité

**2-L'élaboration des aubes turbine**

A fin d'obtenir des aubes qui répondent aux critères précédents, les aubes sont élaborées par :

- Une coulée à la cire perdue
- Une solidification directionnelle « dirigée » a fin d'allonger les grains c'est-à-dire diminutions de possibilité de fluage thermique et résistance à la traction et à la flexion.

Et pour développer cette coulée ;

- l'alliage est chauffé à la température eutectique qui dépasse les 100 °C.
- La céramique réfractaire dépasse les 1000 °C, afin de diminuer la conductibilité thermique.



4eme chapitre :

Réalisation

des deux

Roues

Turbines



## IV.1/Introduction

Ce chapitre est consacré à la phase de réalisation des deux roues turbine dont on a fait l'étude de conception dont le chapitre précédent. On essayera donc de porter intérêt sur les différentes étapes de réalisation avec des illustrations de chaque opération effectuée.

Comme on l'a déjà mentionné aux chapitres précédents, la méthode la plus utilisée en industrie aéronautique est la méthode de moulage à la cire perdue vue l'excellente qualité de surface qu'il fait ressortir mais aussi la possibilité de réaliser les petits détails de la pièce et éviter l'usinage.

Vue notre manque d'expérience en matière de moulage, on fait appel au modeleurs de la société nationale des véhicules industriels (SNVI) section DFR de Rouïba, qui nous ont aidé durant notre stage au sein de cette société à accomplir notre travail.

## IV.2/Réalisation des modèles

Le modèle est une réplique de la pièce à réalisée qu'on utilise pour la fabrication du moule. Et comme le procédé de moulage utilise des matières en fusion qui se contractent au refroidissement, il est indispensable de prévoir un retrait pour le modèle qui compensera l'éventuel rétrécissement de la pièce.

### 1-Calcul du retrait

Le retrait dépend de plusieurs facteurs à savoir : le refroidissement de la pièce, la température de coulée de l'alliage, les dimensions de la pièce, la rigidité et dilatation du moule. Il est donc nécessaire de prendre en compte le procédé de moulage qui est en fonction du nombre de pièces à obtenir pour modifier le dessin de la pièce.

Pendant la réalisation on utilisera plusieurs matières mais il n'y a que trois qui ont un retrait considérable : l'alliage de coulée, la céramique et la cire qui ont respectivement les retraits suivants : 2%, 1.2%, 1.1%.

On va donc travailler avec un triple retrait égal à 4.3% obtenu par l'addition des trois retraits précédents. Mais sous le conseil d'un modeleur expérimenté on a arrondi le retrait à 4.5% pour garantir l'obtention d'un meilleur résultat.

Le calcul des côtes à utilisées se fait par produit des( **côtes réels** × **le retrait final**) +**côte réelle**, prenant comme exemple le diamètre extérieur du disque qui est de 80 mm.

$$(80 \times 0,045) + 80 = \mathbf{83,6 \text{ mm}}$$

-Le résultat obtenu est : **la côte + retrait**



On a regroupe dans le tableau qui suit les dimensions à utilisées dans la réalisation des pièces :

		Dimensions de la turbine liée		Dimensions de la turbine libre	
		Côte initiale	Côte+retrait	Côte initiale	Côte+retrait
Corde axiale	R tip	56	58.52	69	72.105
	R hub	40	41.8	40	41.8
	R moy	48	50.16	54.5	56.925
	R rim	37	38.665	37	38.665
	W rim	12	12.54	18	18.81
	W ds	22	22.99	30	31.35
	Profil Rh	13.16	13.7522	22.9	23.9305
	Profil Rm	14.22	14.8588	24.4	25.498
	Profil Rh	15.80	16.511	25.9	27.655

Tableau (IV .1) : les dimensions utilisées dans la réalisation.

## 2-Réalisation du modèle

Le disque modèle est réalisé avec deux matières différentes, le disque intérieur en bois et l’anneau extérieur en aluminium.

### a-Réalisation du disque intérieur

Le disque intérieur sera réalisé en deux parties (deux faces) qui seront collées sur les deux cotés de l’anneau comme le montre le schéma ci-dessous :

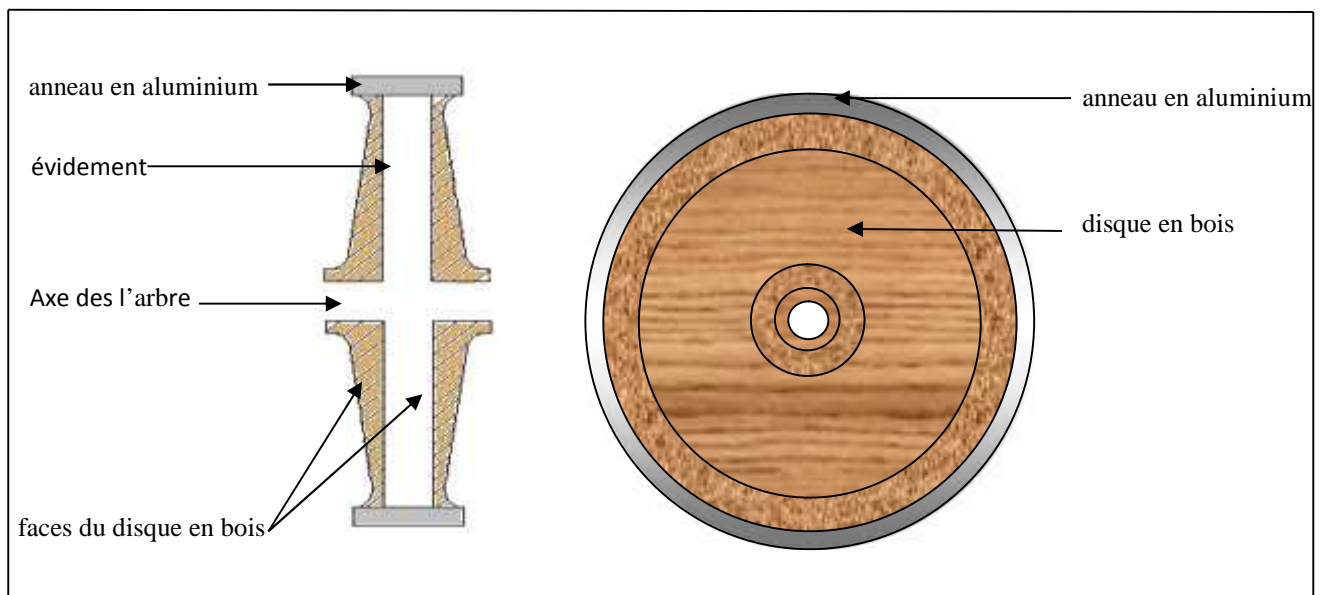


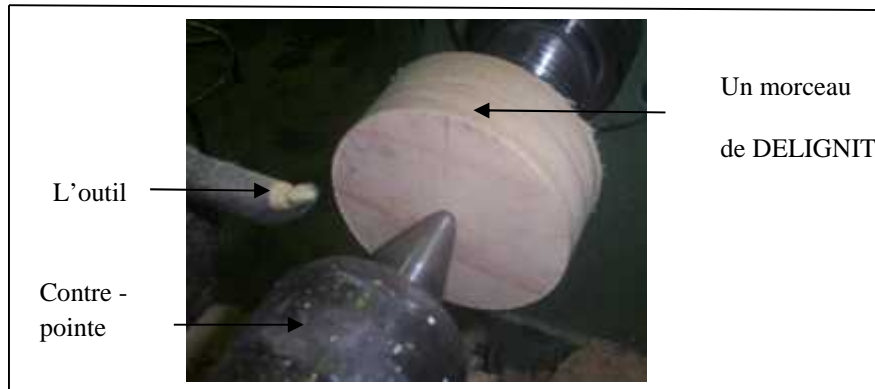
Figure [IV.72] : les différentes parties du disque modèle

Le bois utilisé est un bois spécial modelage qui a pour référence DIN 1511-H1a + H1 de marque DELIGNIT.



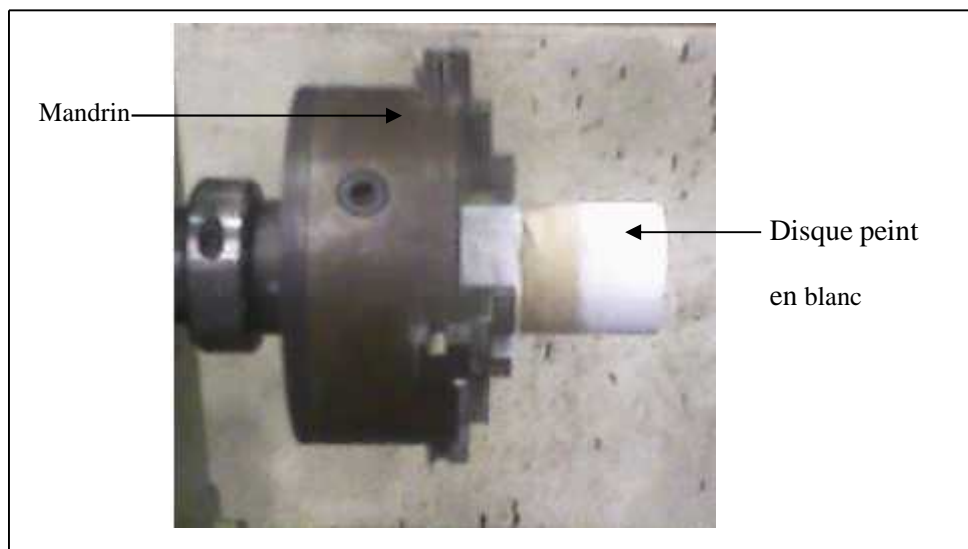
Un morceau de ce bois est de forme à peu près ronde fut découpé puis fixé par l'une de ces faces au mandrin d'un tour à bois.

Des opérations de chariotage sont effectuées sur le disque pour atteindre le diamètre voulu, commençant avec une petite vitesse puis augmenter la vitesse pour un meilleur aspect de la surface.



**Figure [IV.73] : disque après chariotage et avant mise en forme.**

Après avoir peint le disque en blanc (pour mieux visualiser le travail), on commence à former le bossage. Pour ça on a utilisé un outil à alésé, ce dernier est réglé sur le centre du disque puis déplacé vers la circonférence de la pièce sur une distance correspondante au rayon du bossage, puis l'outil est enfoncé de 1mm.



**Figure [IV.74] : disque monté au mandrin du tour et peint en blanc.**

Par la suite on forme la pente toujours avec l'outil à alésé, par calcul de tangente l'angle de pente est de  $7^\circ$  ce qui nous a mené à incliner l'outil à cette angle puis on a déplacé l'outil d'une manière à obtenir le diamètre voulu et réalisé au même temps le congé.



Ces opérations sont effectuées sur chacune des faces du disque.

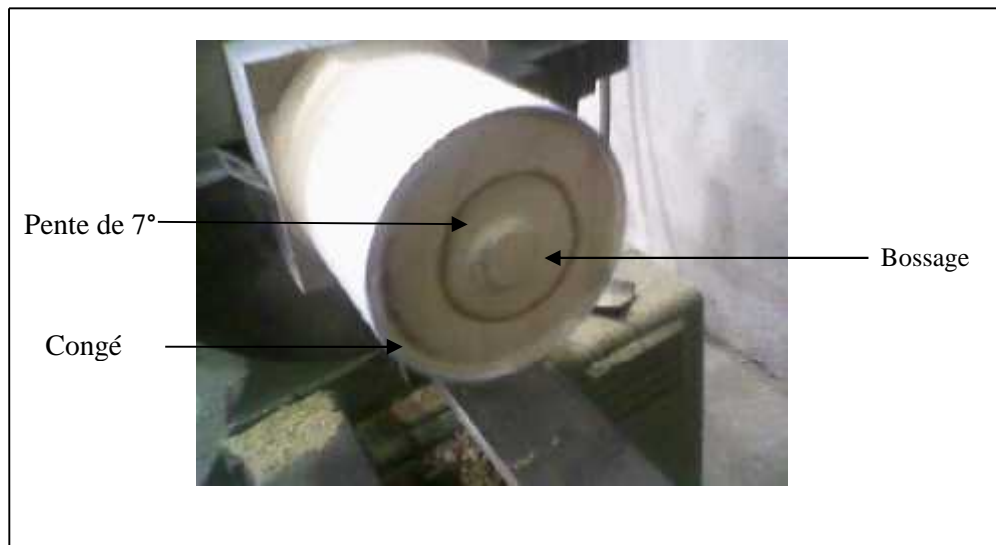


Figure [IV.75] : disque après mise en forme.

#### b-Réalisation de l'anneau

L'anneau extérieur est réalisé en aluminium pour la facilité de son usinage avec le tour. Pour cette opération, on a découpé un cylindre d'un diamètre légèrement plus grand que celui de notre pièce au quel on fait un enlèvement de matière. Les dimensions pris en compte sont : le diamètre intérieur, le diamètre extérieur, l'épaisseur et la largeur.



Figure [IV.76] : anneaux en aluminium peint en bleu

Pour une plus grande robustesse et une meilleure adhérence des ailettes sur le disque, l'anneau est devisé en 24 parties égales par des traits correspondant aux nombres d'ailettes à obtenir. Les traits sont inclinés d'un angle égal au calage de l'ailette.

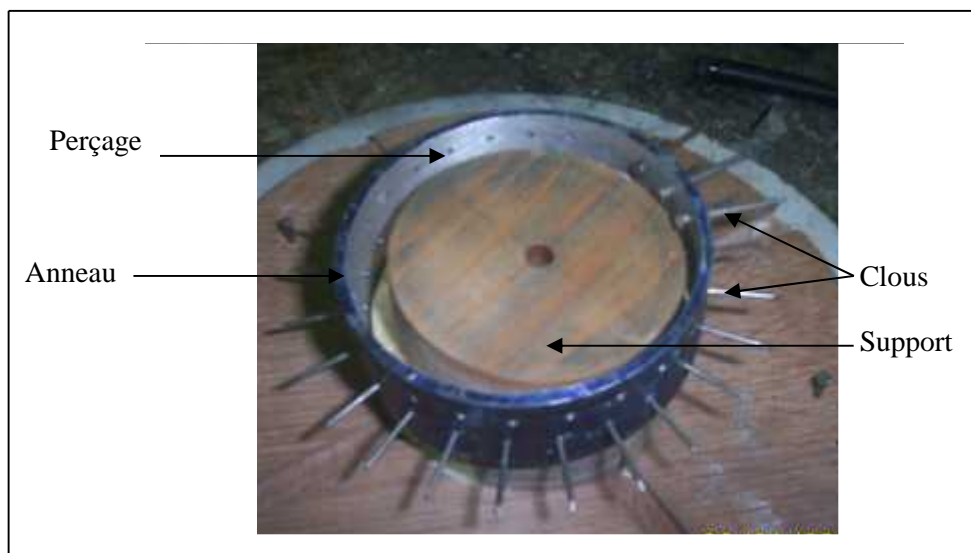


La figure ci-dessous montre l'opération de traçage de l'anneau :



**Figure [IV.77] : anneaux devisé avec des traits inclinés.**

En suite de petits perçages sont effectués sur la circonférence de l'anneau aux emplacements des ailettes avec un foret de 1.5mm .De petits clous y sont insérés de l'intérieur, ils serviront de fixation mais aussi d'armatures pour une meilleure rigidité du mastic avec lequel seront coulées les ailettes.



**Figure [IV.78] : anneaux avec des clous implantés tout au tour.**



### 3-Réalisation des ailettes

Pour une plus grande précision lors de la coulée, un plateau deviseur est prévu, il va jouer le rôle d'un support disque-moule.

Ce dernier est composé de :

- un disque inférieur fixe comportant des trous correspondant au nombre d'ailettes et un axe central.
- un disque supérieur mobile comportant un trou de fixation et une rainure.
- un gougeons de fixation.

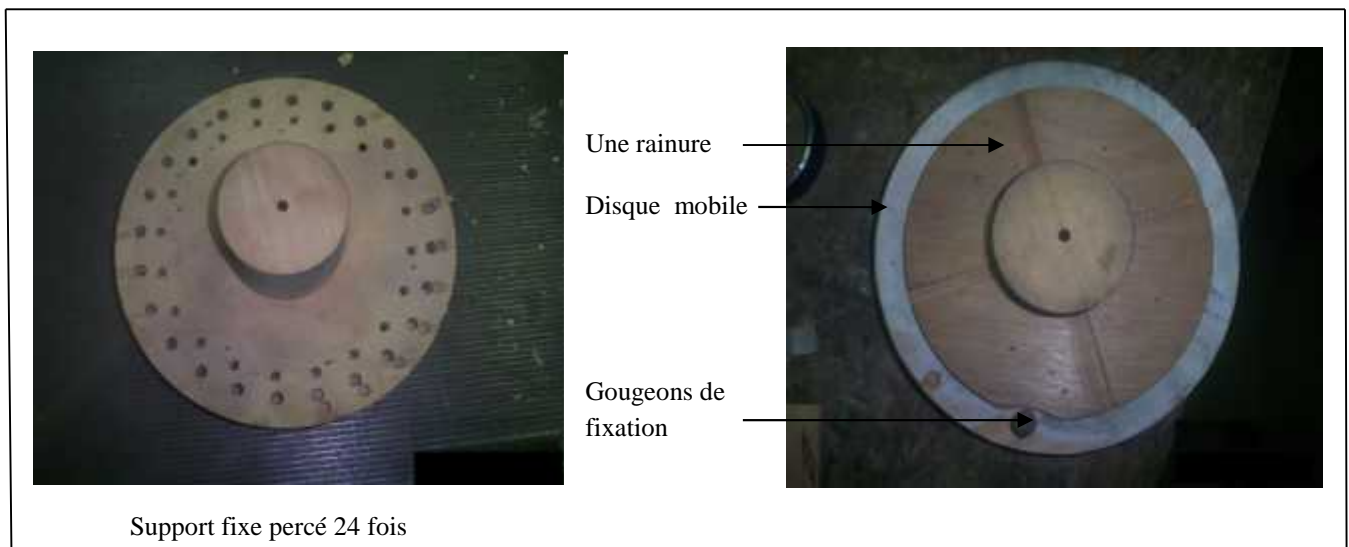


Figure [IV.79] : différentes parties du plateau deviseur.

La réalisation du moule de l'ailette consiste à fabriquer deux parties :

- une partie évidée formant le profil de l'extrados
- une partie bossée formant le profil de l'intrados

Les deux parties sont montées sur glissière qui glissera le long de rainure du plateau deviseur pour garantir un guidage de l'ailette.

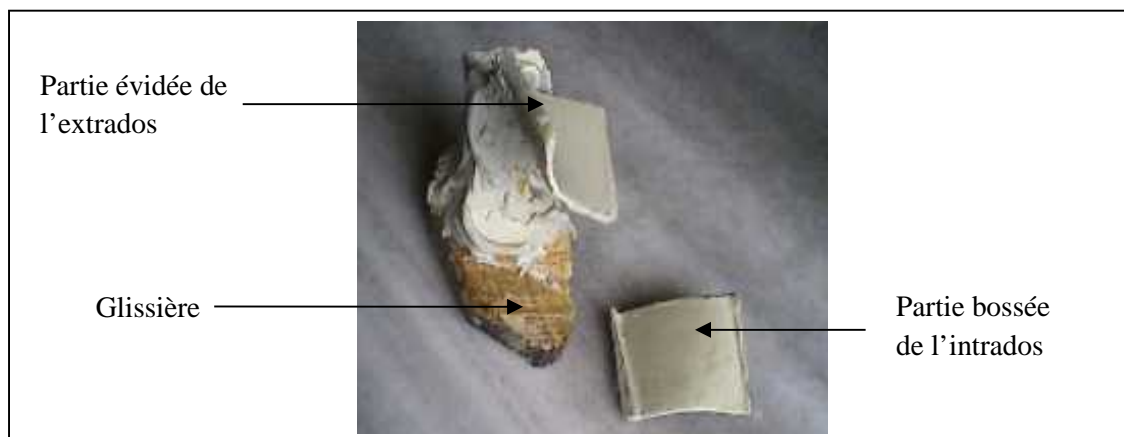


Figure [IV.80] : différentes parties du moule de l'ailette.



La roue est fixée sur le support, un des traits de l'anneau est repéré avec la rainure du disque supérieur du plateau deviseur puis les deux disques sont assemblés avec les gougeons de fixation pour éviter toute possibilité de jeu.

Les deux parties du moule sont enduites avec la cire de démoulage qui empêche le mastic de coller aux parois du moule.



Figure [IV.81] : cire de démoulage.

Le mastic est mélangé au durcisseur puis coulé sur le premier moule. La fusion des deux parties du moule permet d'avoir la forme de l'ailette dont le mastic prend la forme. Le surplus de mastic est soigneusement enlevé avec une spatule. La séparation des deux parties du moule nous révèle l'ailette.

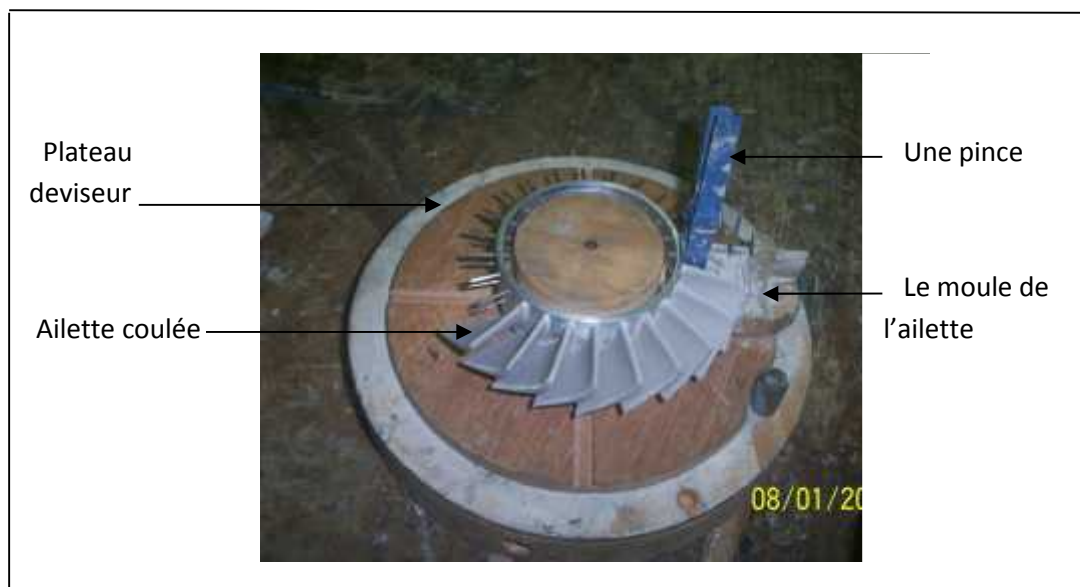


Figure [IV.82] : opération de coulé de mastic pour la réalisation d'une ailette.





Cette opération est répétée 24 fois.



Figure [IV.83]: l'anneau avec toutes les ailettes.

#### 4-Assemblage des parties du disque modèle

Les deux faces du disque intérieur sont finalement, placées par les deux cotées de l'anneau et l'évidement formé servira de logement pour les têtes des clous. Du mastic est utilisé pour le collage des faces et le remplissage de l'évidement.

#### Note :

*- les pièces modèles ont toutes les deux été réalisées avec la manière exposée précédemment.*

*-L'étape suivant la réalisation des modèles devait être la fabrication d'un moule en élastomère avec lequel seront reproduits les modèle en cire. Mais le manque de moyens, essentiellement l'élastomère, nous a obligés à envisager une autre méthode qu'on essayera d'expliquer dans les paragraphes qui suivront.*

*-Les pièces modèles réalisées sont finalement gardées comme modèles d'exposition qui montrent la forme et l'allure finale de nos roues turbine.*



Figure [IV.84] : les modèles des roues réalisées



### IV.3/Réalisation des modèles en cire

Le principe avec lequel on va procéder est le même que celui utilisé pour la réalisation des modèles. Il consiste à réaliser les disques puis couler les ailettes sur.

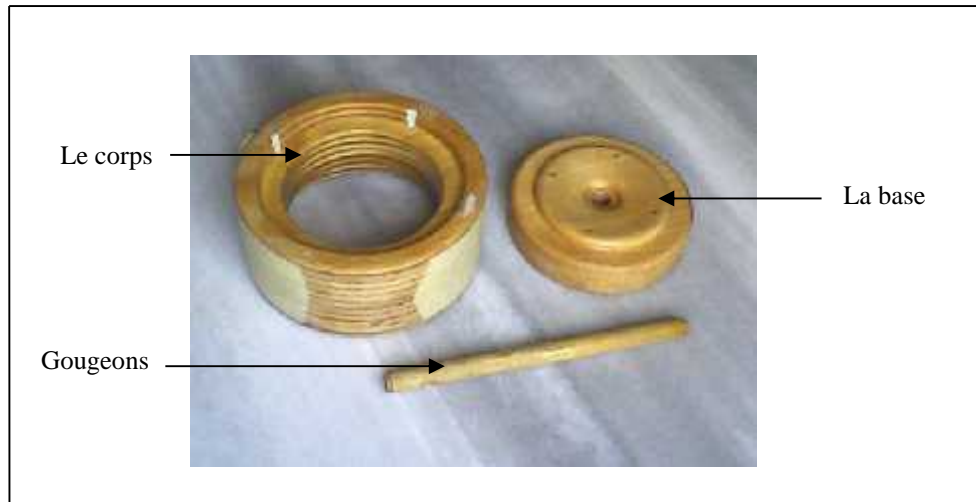
#### 1-Réalisation des disques

##### a- Le moule :

Pour réaliser le disque avec toutes ses formes, on a décidé de fabriquer un moule où sera coulée la cire.

Le moule est réalisé avec de la DELIGNIT et est composé de trois parties faites au tour à bois :

- La base : un disque sculpté à la forme de la face du disque de la pièce.
- Le corps : un cylindre creux d'une épaisseur égale à celle du disque.
- un gougeons : un axe central.



Figure[IV.85] : le moule de la cire.

##### b- la cire :

Elle est de 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 en vente chez les fournisseurs d'articles de bijouterie.

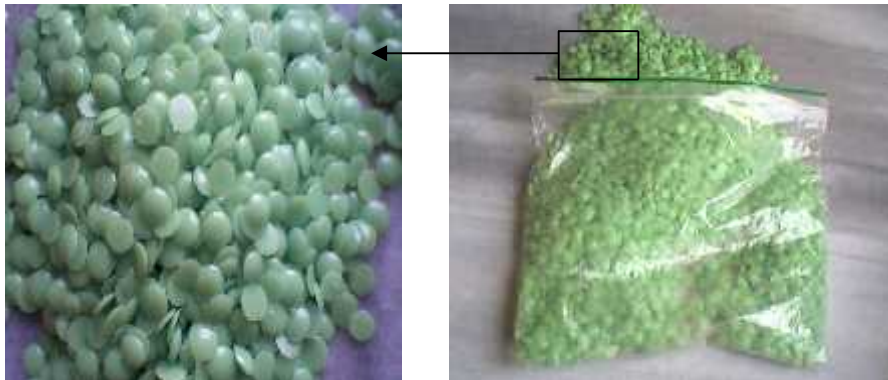


Figure [IV.86] : cire AQUA.

### c- la coulée

Avant l'assemblage du moule, ces parois intérieures sont enduites avec de la silicone pour empêcher la cire de se coller.

-la silicone est de type SEALANT, en vent au niveau des quincailleries.



Figure [IV.87] : silicone SEALANT.

Après assemblage du moule, la cire est fondue puis coulée dans le moule à moitié de la hauteur.

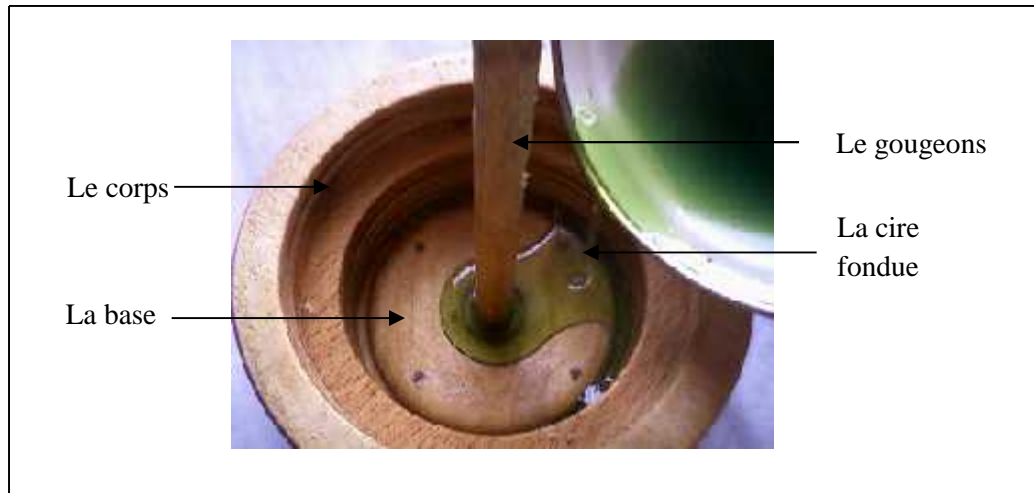


Figure [IV.88] : coulée de cire.

30 minutes après, la cire est dure et le démoulage peut être effectué. Le demi-modèle en cire est prêt.



Figure [IV.89] : démoulage du demi-modèle en cire.

Pour la réalisation du modèle entier on est passé par les étapes suivantes :

-On trace sur la paroi intérieure du corps une ligne de niveau montrant l'épaisseur qui manque à la moitié pour l'obtention d'un disque entier.

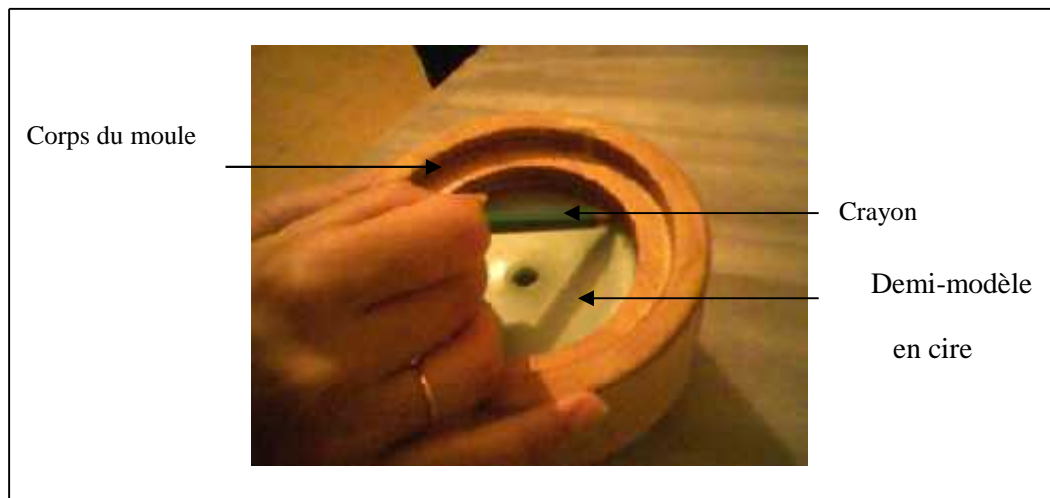


Figure [IV.90] : traçage du corps.

De la cire fondue est versée dans le moule à un niveau qui dépasse légèrement la ligne tracée pour compenser le retrait de la cire lors du refroidissement.



Figure [IV.91] : la coulée de la deuxième moitié du disque en cire

-La première moitié est ensuite placée sur la cire toujours en fusion pour garantir un collage des deux moitiés assemblées.

-une petite pression est exercée avec les doigts.

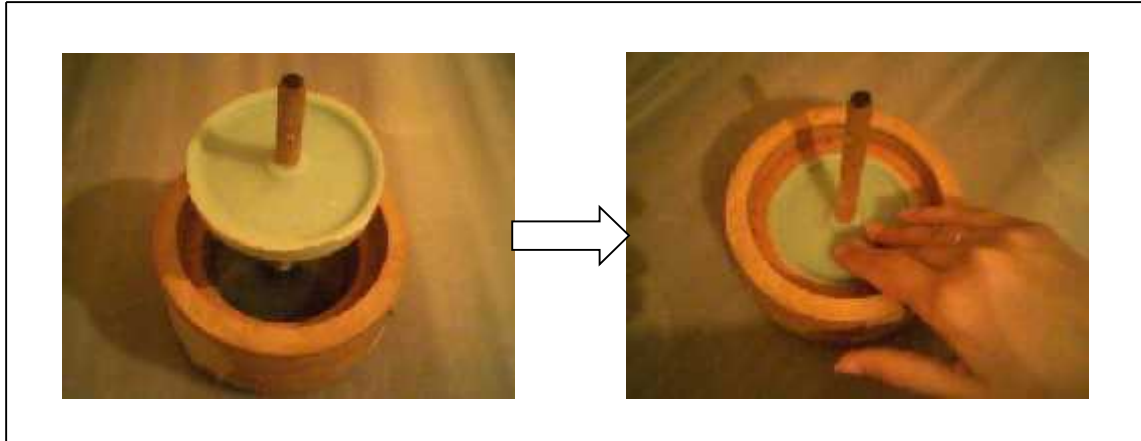


Figure [IV.92] : assemblage des deux demi-modèles en cire.

-30 minutes après, le modèle est prêt à être démoulé. Il est montré dans la figure ci-dessous



Figure [IV.93] : la forme finale du disque modèle en cire.

## 2-Coulé des ailettes

Comme on la fait pour les modèles en mastique, les ailettes seront directement coulées sur le disque après son ajustement sur le plateau diviseur.

Le moule de l'ailette est le même que celui utilisé au paravent mais enduit cette fois-ci de silicone pour éviter le collage de la cire.

La figure suivante montre l'opération effectuée :

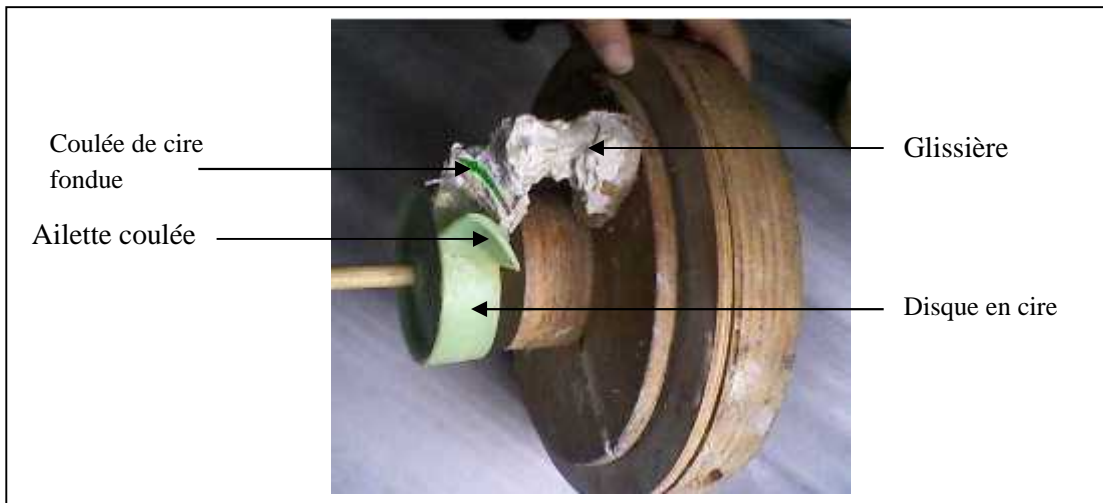


Figure [IV.94] : Opération de coulée des ailettes en cire.

Après la coulée de toutes les ailettes, voici la forme du modèle en cire entier représenté sur la figure ci-dessous :



Figure [IV.95] : modèles en cire.

Sur le modèle en cire, des cure-dents sont fixés sur les extrémités des aubes. Ces cure-dents feront dans le moule en céramique des canaux qui joueront le rôle des événements d'où s'échappera l'air, comme le montre la figure [IV.96]

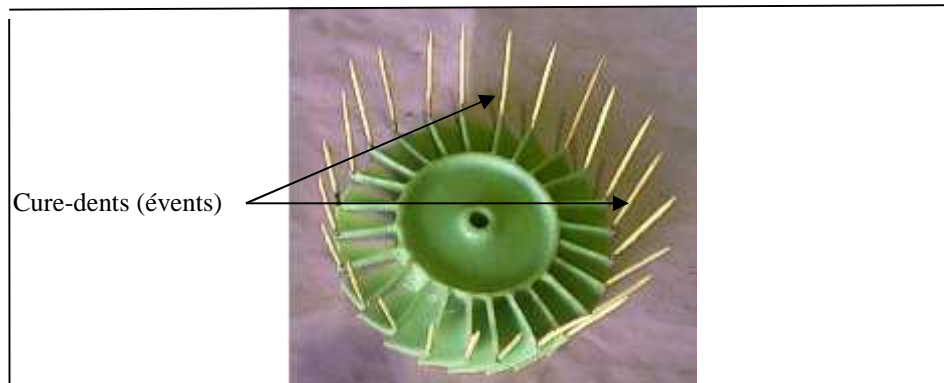


Figure [IV.97] : modèle avec les cure-dents.

Un cylindre et un entonnoir en cire sont ensuite réalisés et fixés au centre du modèle en cire, ils représenteront le chenal de coulée dans le moule en céramique.

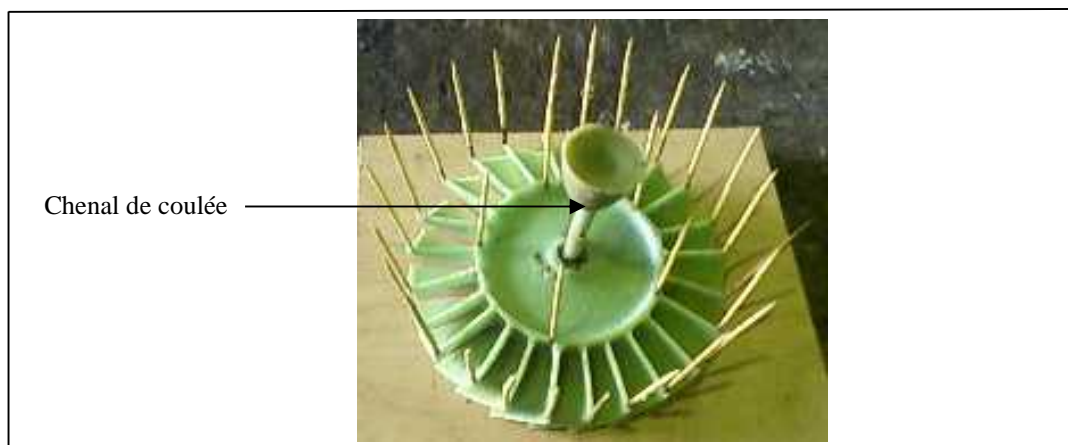


Figure [IV.98] : modèles en cire avec événements et chenal de coulée.

### IV.3/ Réalisation du moule en céramique

Pour la réalisation du moule en céramique, on est passé par les étapes suivantes :

-Un contenant en plâtre est fabriqué dans lequel sera coulée la céramique. Avant la coulée de la céramique, le plâtre est séché. Le plâtre déjà sec absorbe l'humidité de la céramique permettant ainsi un séchage plus rapide.





Figure [IV.99] : le contenant en plâtre.

-La céramique est préparée par mélange d'argile de poterie et de l'eau jusqu'à obtention d'une pâte semblable à une crème liquide, puis elle est verser dans le caisson à une hauteur d'environ 2 cm.

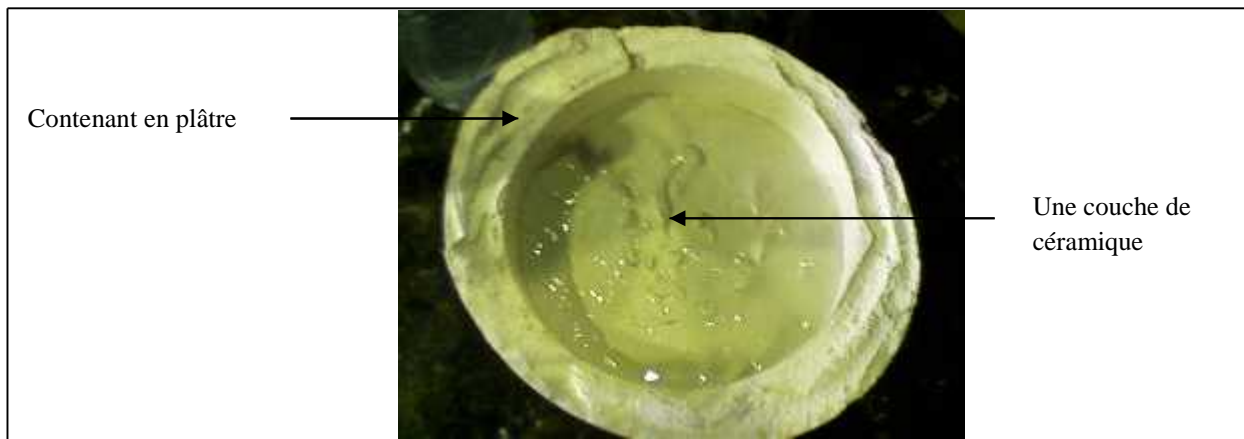


Figure [IV.100] : Le contenant avec de la céramique.

-Avant de l'émerger dans la céramique, le modèle en cire est enduit par sa partie inférieure de céramique afin d'éviter la formation de bulles d'air par conséquent éviter la déformation de la pièce.

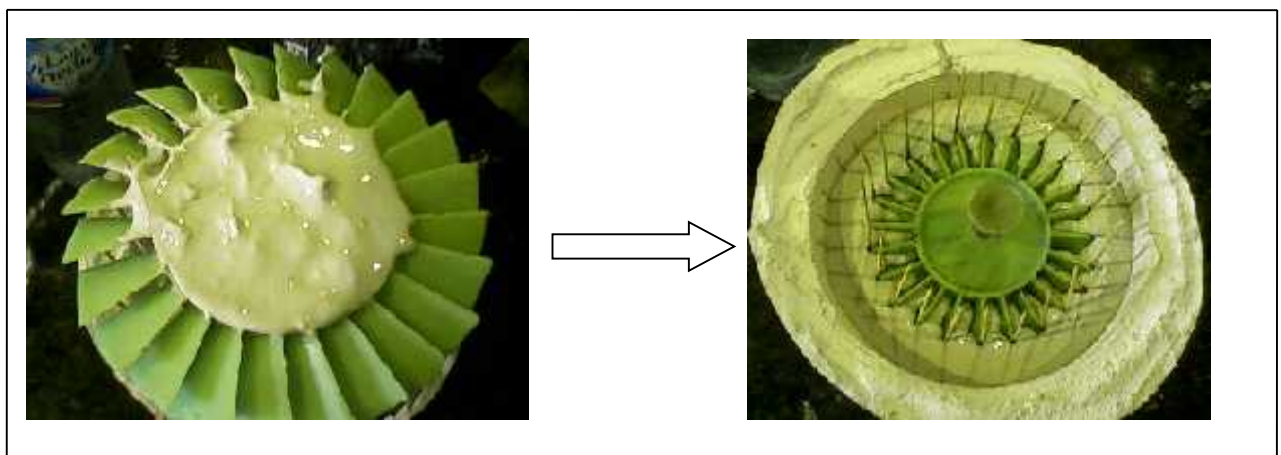


Figure [IV.101] : modèle en cire enduit de céramique par sa partie inférieure.



-Le contenant est maintenant rempli de céramique jusqu'à recouvrement total du modèle.



Figure [IV.102] : moule en céramique prêt à être étuvé.

-Le moule est ensuite étuvé à une température d'environ 85°C pour faire fondre la cire mais aussi pour garantir un séchage complet de la céramique. Le séchage total est indispensable car la moindre humidité peut provoquer un bris du moule lors de sa cuisson.



Figure [IV.103] : moule en céramique étuvé.

-Le moule est mis dans un four pour une cuisson de 8 heures à environ 900°C.



Figure [IV.104] : La mise du moule dans le four.

Annexe 01:

Les données  
relatives des  
alliages de  
La fonderie

Types des fontes	Symboles	Caractéristiques	Usure	Corrosion
A graphite lamellaire	GL Re = 350 a 300 MPa	Usage général Bonne usinabilité Résistance a la compression Retrait très faible	Résistance a l'usure moyenne Bon amortissement des vibrations	Résistance a la corrosion moyenne TTH divers
A graphite sphéroïdale	GS Re =350 a 800 MPa	Usage général Bonne tenue en traction Bonne ductilité Retrait moyen	Bonne tenue en fatigue	Traitements superficiels ou de protection
Bainitique et martensitique	Au Ni, Cr, Mo	Frottement intensif Abrasion	Bonne résistance a l'usure	Tenue acceptable a la corrosion
Austénitique	GL ou GS	Tenue en température > 700 °C	Résistance a l'usure moyenne	Bonne résistance e a la corrosion
blanches	Non ou peu alliées	Frottement, abrasion, in usinable Retrait élevée	Tenue < 500°C	faible
ferritiques	Si: 4 a 6 Si: 12 a 17 Si: 28 a 34	Température >700°C Retrait important acides	Tenue maxi 900 °C Tenue maxi 800 °C Tenue maxi 1050 °C	Bonne résistance a la corrosion

**Tableau (II.2)** \_ données relatives aux fontes.

Familles	Traitement ou structure	Application
Aciers alliés	Normalisé o trempé revenu	Résistance élevée, pièces d'usure Résistance a la corrosion moyenne
Aciers inoxydables martensitiques	Trempé revenu	Résistance élevée, pièces d'usure Résistance a la corrosion moyenne
Aciers inoxydables austénitiques	Hypertrempe	Bonne résistance a la corrosion (alimentaire, pétrochimie, acides organiques)
Aciers inoxydables austéno-ferritiques	hypertrempe	Bonne résistance aux milieux corrosifs (acides oxydable, chlorures, sodiques)
Aciers réfractaires ferritiques	Ferrite + carbures	Bonne résistance a l'oxydation Bonne résistance a l'usure
Aciers réfractaires austénitiques Ni et Cr	Austénite + ferrite + carbures	Résistance proportionnelle a la teneur en C

**Tableau (II.2)** \_ données relatives aux aciers.

Familles	Eléments d'alliages	Caractéristique
Base nickel ou cobalt	+ chrome + molybdène + fer + tungstène	Résistance élevée jusqu'à 1000 °C Résistance aux milieux corrosifs Culée sous vide
Base nickel	+ chrome + fer + molybdène + tungstène	Résistance a la corrosion en milieu très agressif inférieur à 600 °C
Base nickel	+ chrome + fer + tungstène	Résistance a l'oxydation et la carburation aux températures élevées
Base cobalt	+ chrome + tungstène + molybdène + nickel	Résistance a l'usure et aux chocs thermiques même a la température élevée

**Tableau (II.3)** \_ données relatives aux nickels

Familles	Mise en œuvre	Application
Al – Si :	Si améliore la coulabilité	Les plus utilisés
Al - Si 5 Cu	Coquille, bonne usinabilité	Pièces mécaniques courantes
Al – Si 7 Mg	Sable, coquille, sous pression	Pièces mécaniques a hautes caractéristiques (traitement thermique)
Al – Si 9 Cu 3	sous pression	bonnes caractéristiques mécaniques
Al – Si 13	bonne coulabilité, retrait moindre	pièces fines et développées
Al –Su :	Usinabilité améliorée	
Al – Cu 5 Mg Ti	Très hautes caractéristiques a l'état trempé – mûri, criticabilité élevée	Pièces a haute résistance
Al – Cu 8 Si	Bonne usinabilité	Pièces mécaniques frottement usiné
Al – Mg :		
Al- Mg 3 Ti	Résistance a la corrosion	Bonne usinabilité
Al – Mg 6	Faible coulabilité, criticabilité élevée :	Accastillage : résistance a la corrosion marine, corrosion chimique
Al – Zn	Bonne coulabilité	Pièces mécaniques
Al – Zn 5 Mg	Coulé en sable	

Tableau (II.4) – donnée relatives aux alliages d'aluminium.

Désignation	Caractéristiques	Usinabilité
Mg – Al 8 En	Faible masse volumique	la coulé sous pression. Pièces aéronautiques
Mg – Al 9 Zn	Conductibilité thermique élevée Usinabilité excellente Coulabilité élevée Coulée sous atmosphère contrôlée	Pièces automobiles (volant ..)

**Tableau (II.5) :** données relatives aux alliages de magnésium.

Alliages	Caractéristiques	Utilisations
Laiton Cu + Zn	Résistance a la corrosion marine et a l'usure	Construction navale, mécanique et électrique robinetterie Industrie chimique
Bronze Cu + Sn	Excellentes propriétés de fonderie Aptitude au frottement décoration	Pièces de frottement Cloches sculptures
Curpo - aluminium	Résistance a la corrosion	Constructions mécaniques, navales, ferroviaires, électriques, automobiles Industrie chimique
Curpo - béryllium	Résistance a la corrosion Conductivités électriques et thermiques	Moules ou matrices Pièces mécaniques refroidisseurs

**Tableau (II.6) –** Données relatives aux alliages du cuivre.



Alliages	Caractéristiques	Utilisations
Zamak 3	Excellente coulabilité	Pièces minces compliquées ou non
Zamak 5	Aptitude a la décoration Résistance a la corrosion cadences de production élevée Faible température de coulée	quincaillerie, visserie décoration boîtiers matériel électrique

Tableau (II.7) – données relatives aux alliages de magnésium.

Procédé	Sable a vert	Sable aggloméré	Coulée gravitaire	Sous pression	Cire perdue	Lost foam
Épaisseurs minimales (en mm)	3	1,5 à 3	2,5 à 3,5	1	0,8 à 1,25	3,5
Épaisseurs courantes (en mm)	4,5	5	4 à 5	3 à 5	2 à 3	4 à 5
Tolérance pour épaisseur (en mm)	0,3 à 0,8	0,1 à 0,8	0,1 à 0,8	0,1 à 0,3	0,05 à 0,7	0,1 à 0,25
Diamètre trou minimal (en mm)	6 à 7	6 à 7	4 à 5	3	0,8 à 1	5 à 6
Tolérance de longueur	Voir norme ISO 8062					
Exemple pour L= 150 (en mm)	0,9 à 2	0,9 à 2	0,45 à 0,9	0,3 à 0,6	0 ; 2 à 0,45	0,35 à 0,75

Tableau (II.8) \_ épaisseurs et tolérances.

<b>procédé</b>	<b>Sable avert</b>	<b>Sable aggloméré</b>	<b>Coulée gravitaire</b>	<b>Sous pression</b>	<b>Cire perdue</b>	<b>Lost foam</b>
<b>Coût d'outillages</b>	A	B	C	E	D	E
<b>Investissement chantier</b>	E	E	A	C	C	D
<b>Coût matière</b>	C	C	C	A	C	E
<b>Cadence</b>	B	D	C	A	B	A
<b>Duré de vie outillage</b>	A	A	B	E	D	C
<b>Caractéristiques mécaniques</b>	E	E	D	C	B	B
<b>Précision dimensionnelle</b>	E	D	C	B	A	B
<b>Complexité géométrique</b>	A	B	A	D	D	C
<b>Détails, finesse des formes</b>	E	D	C	A	B	A
<b>Etat de surface</b>	E	D	C	A	A	A
<b>Mise au mille</b>	E	D	D	C	A	B

**De A (très bon) à E (médiocre).**

**Tableau (II.9)** \_ comparatif des procédés de moulage des alliages d'aluminium.

Cote de base		Classe de tolérances dimensionnelles des pièces moulées							
		Tolérance totales de moulage (en mm)							
Au dessus de	Jusqu'à et y compris	4	5	6	7	8	9	10	11
				Cire Perdu Zinc SP	Sous Pression des légers	Sous pression des cuvreux	Coquille basse pression	Moulage Mécanisé En sable	Moulage Main des légers
–	10	0,26	0,36	0,52	0,74	1	1,5	2	2,8
10	16	0,28	0,38	0,54	0,78	1,1	1,6	2,2	3
16	25	0,30	0,42	0,58	0,82	1,2	1,7	2,4	3,2
25	40	0,32	0,42	0,58	0,82	1,2	1,7	2,4	3,2
40	63	0,36	0,50	0,70	1	1,4	2	2,8	4
63	100	0,40	0,56	0,78	1,1	1,6	2,2	3,2	4,4
100	160	0,44	0,62	0,88	1,2	1,8	2,5	3,6	5
160	250	0,50	0,70	1	1,4	2	2,8	4	5,6
250	400	0,56	0,78	1,1	1,6	2,2	3,2	4,4	6,2
400	630	0,64	0,90	1,2	1,8	2,6	3,6	5	7
630	1000		1	1,4	2	2,8	4	6	8
1000	1600			1,6	2,2	3,2	4,6	7	7

Interprétation au mieux de la norme [ISO 8062](#) pour les principaux procédés de moulage.

METALLS ET ELEMENT D'ADDITION	CHIMIQUE	MECANIQUE	DENSITES	POINT DE FUSION	METALLS ET ELEMENT D'ADDITION	CHIMIQUE	MECANIQUE	DENSITES	POINT DE FUSION
ALUMINIUM	Al	A	2,7	658°C	ANTIMOINE	Sb	R	6,71	630°C
ARGENT	Ag	-	10,53	960°C	BISMUTH	Bi	Bi	9,8	271°C
BORE	B	B	2,3	2400°C	CADMIUM	Cd	Cd	8,64	320°C
CERIUM	Ce	Ce	6,7	900°C	CHROME	Cr	Cr	6,8	1550°C
COBALT	Co	K	8,77	1477°C	CUivre	Cu	Cu	8,9	1083°C
ETAIn	Sn	E	7,22	232°C	FER	Fe	Fe	7,88	1527°C
MAGNESIUM	Mg	G	1,22	650°C	MANgANESE	Mn	Mn	7,21	1265°C
MERCURE	Hg	-	13,59	-39°C	MOlybDEME	Mo	Ma	10,20	2570°C
NICKEL	Ni	N	8,8	1452°C	NIObIUM	Nb	Nb	8,5	1900°C
OR	Au	-	19,36	1063°C	PHOSPHORE	P	P	1,83	44°C
PLATINE	Pt	Pt	21,48	1744°C	PLOMB	Pb	Pb	11,37	327°C
SILINIUM	Se	Se	4,8	213°C	SILINIUM	Si	Si	2,35	1430°C
SOUFRE	S	-	2,07	114°C	TANTALE	Ta	Ta	16,6	3000°C
TITANE	Ti	T	4,5	1820°C	TUNGSTENE	Tu	W	19,1	3460°C
URANIUM	U	U	18,68	1850°C	VANDIUM	V	V	5,6	1725°C
ZINC	Zn	Z	7,19	419°C	ZIRCONIUM	Zr	Zr	6,4	1750°C

Tableau des symboles -Densités- Points de fusions des principaux métaux et les éléments d'addition.

Annexe 02:

Calculs fait

suivant

Le logiciel

Turbn design

Calculs des paramètres de la turbine liée suivant le logiciel TURBINE DESGN .

Tt1 [°K]	V'		rm	Pt1 [Kpa]	Flow turning	et(poly eff)
1100	1170,30338	0,35550611	416,05	380	64,618499	0,9

V2	U	$\nu$ 2	$\nu$ 2R	2 [°]	Tt2r [°K]	3 [°]	$\nu$ 3
489,828214	237,47343	428,413409	12,36340872	2,98025834	1026,35724	61,6382406	23,84941876

3 [°]	T3 [°K]	tauxts	$\nu$ 3R	degreaction	P stage
5,73497631	926,001798	0,86261494	439,8994188	0,51380364	0,49087468

Ro satge	DT [°K]	Psi	VR	Phi
0,90722616	151,1235639	1,0870396	0,67820708	0,57078099

Cpt [ j/Kg°K]	yt	Rt	[rad/s]	rm [mm]
1245,1	1,3	287,330769	7850	53

2 [°]	M2	M3r	yt/( t-1)	N [ tr/mn]
61	0,8	0,85	4,33333333	71637

Station	1h	1t	2h	2t	3h	3t
Tt [°K]	1100	1100	1100	1100	948,876436	948,876436
T [°K]	1074,21875	1074,21875	979,1116967	1020,02312	925,913426	926,057756
Pt [Kpa]	380	305	305	305	186,532377	186,532377
P [Kpa]	342,886551	342,886551	184,163929	219,908295	167,745422	167,858759
Mach	0,4	0,4	0,907257135	0,72298882	0,40661518	0,40530372
V [m/s]	253,378114	253,378114	548,667525	446,271687	239,128601	238,375915
U [m/s]	253,378114	253,378114	237,4734302	237,47343	237,47343	237,47343
$\nu$ [m/s]	0	0	494,6134075	377,84228	28,0866124	20,7230974
[°]	0	0	64,35344022	57,8506866	6,74518875	4,98727698
[°]			3,439746711	2,62898674	65,3735052	58,1482966

<b>Rayon Moyen</b>		C/h	Zs	1 [°]	0	initial
	STATOR	1,3	1	2 [°]	69,5590105	1,032
	STATION	1	2	m	34,7795053	
	h [m]	0,00850925	0,014187242	Cx/S	1,03250099	
	[°]	0	61	S [m]	0,01428834	
	xs	0,848048096		Ns	24	
	C [m]	0,014752722				
		C/h	Zs	2 [°]	2,98025834	initial
	ROTOR	0,9	1	3 [°]	69,7766136	1,2488
	STATION	2	3	m	33,3981776	
	h [m]	0,01418724	0,015991338	Cx/S	1,02954254	
	[°]	2,98025834	61,63824063	S [m]	0,01319067	
	xs	0,859529419		Ns	27	
	C [m]	0,013580361				

<b>Stator hub/tip</b>		C/h	Zs	1h [°]	0	initial
	STATOR	1,3	1	2h [°]	73,8207519	0,95
	STATION	1	2	m	36,9103759	
	h [m]	0,00850925	0,014187242	Cx/S	0,97596151	
	[°]	0	64,35344022	S [m]	0,01511609	
	xs	0,780355319		Ns	20	
	C [m]	0,014752722				
		C/h	Zs	1t [°]	0	initial
	STATOR	1,3	1	2t [°]	65,7521253	1,082
	STATION	1	2	m	32,8760627	
	h [m]	0,00850925	0,014187242	Cx/S	1,07289414	
	[°]	0	57,85068658	S [m]	0,0137504	
	xs	0,901066628		Ns	24	
	C [m]	0,014752722				

<b>Rotor Hub/tip</b>		C/h	Zs	1h [°]	3,43974671	initial
	ROTOR	0,9	1	2h [°]	75,1207331	1,015
	STATION	2	3	m	35,8404932	
	h [m]	0,01418724	0,015991338	Cx/S	0,96030696	
	[°]	3,43974671	65,37350521	S [m]	0,01414169	
	xs	0,778473036		Ns	20	
	C [m]	0,013580361				
		C/h	Zs	1t [°]	2,62898674	initial
	ROTOR	0,9	1	2t [°]	65,697363	1,28
	STATION	2	3	m	31,5341882	
	h [m]	0,01418724	0,015991338	Cx/S	1,0818456	
	[°]	2,62898674	58,1482966	S [m]	0,01255296	
	xs	0,922087556		Ns	30	
	C [m]	0,013580361				

**Calculs**

**pour la turbine libre.**

Tt1 [°K]	V'		rm	Pt1 [Kpa]	Flow turning	et(poly eff)
957	1091,58632	0,22673424	247,5	175,5	96,4984863	0,9

V2	U	$\nu$ 2	$\nu$ 2R	2 [°]	Tt2r [°K]	3 [°]	$\nu$ 3
533,055777	258,430569	466,221088	218,7210877	40,2426974	888,923866	56,2557889	139,3532857

3 [°]	T3 [°K]	tauxts	$\nu$ 3R	degreaction	P stage
28,3348383	802,00642	0,87421568	386,8532857	0,33966101	0,52348509

Ro satge	DT [°K]	Psi	VR	Phi
0,90658649	120,3755983	2,44676514	0,45205248	1,04416391

Cpt [j/Kg°K]	$\nu$ t	Rt	[rad/s]	rm [mm]
1245,1	1,3	287,330769	4500	55

2 [°]	M2	M3r	$\nu$ t/( t-1)	N [ tr/mn]
61	0,95	0,85	4,33333333	71637

Station	1h	1t	2h	2t	3h	3t
Tt [°K]	957	957	957	957	836,624402	836,624402
T [°K]	934,570313	934,570313	818,8276947	859,923621	795,909576	804,820595
Pt [Kpa]	175,5	305	305	305	91,8716342	91,8716342
P [Kpa]	158,359447	158,359447	155,1847506	191,870224	74,0102694	77,6685459
Mach	0,4	0,4	1,060641487	0,86752343	0,58398111	0,51326823
V [m/s]	236,335371	236,335371	586,5804928	491,670214	318,414918	281,421108
U [m/s]	236,335371	236,335371	258,4305689	258,430569	258,430569	258,430569
$\nu$ [m/s]	0	0	526,5836264	418,274121	186,015324	111,406827
[°]	0	0	63,8596578	58,2901639	35,7459017	23,3203895
[°]			43,70900392	37,2095586	63,4140415	50,1175727



<b>Rayon Moyen</b>		C/h	Zs	1 [°]	0	initial
	STATOR	1,3	1	2 [°]	69,5590105	1,032
	STATION	1	2	m	34,7795053	
	h [m]	0,01698502	0,012609354	Cx/S	1,03250099	
	[°]	0	61	S [m]	0,01863082	
	xs	0,848048096		Ns	20	
	C [m]	0,019236345				
		C/h	Zs	2 [°]	40,2426974	initial
ROTOR	0,9	1	3 [°]	68,4092849	1,2488	
STATION	2	3	m	14,0832938		
h [m]	0,01260935	0,027593556	Cx/S	1,49091872		
[°]	40,2426974	56,25578892	S [m]	0,01213434		
xs	1,446106184		Ns	24		
C [m]	0,018091309					

<b>Stator hub/tip</b>		C/h	Zs	1h [°]	0	initial
	STATOR	1,3	1	2h [°]	73,254327	0,95
	STATION	1	2	m	36,6271635	
	h [m]	0,01698502	0,012609354	Cx/S	0,98564873	
	[°]	0	63,8596578	S [m]	0,01951643	
	xs	0,79101733		Ns	15	
	C [m]	0,019236345				
		C/h	Zs	1t [°]	0	initial
STATOR	1,3	1	2t [°]	66,2516279	1,082	
STATION	1	2	m	33,125814		
h [m]	0,01698502	0,012609354	Cx/S	1,0678653		
[°]	0	58,29016389	S [m]	0,01801383		
xs	0,89430792		Ns	22		
C [m]	0,019236345					

<b>Rotor Hub/tip</b>		C/h	Zs	1h [°]	43,7090039	initial
	ROTOR	0,9	1	2h [°]	78,5877574	1,015
	STATION	2	3	m	17,4393767	
	h [m]	0,01260935	0,027593556	Cx/S	1,24037905	
	[°]	43,7090039	63,41404148	S [m]	0,01458531	
	xs	1,183364514		Ns	19	
	C [m]	0,018091309				
		C/h	Zs	1t [°]	37,2095586	initial
ROTOR	0,9	1	2t [°]	60,9643608	1,28	
STATION	2	3	m	11,8774011		
h [m]	0,01260935	0,027593556	Cx/S	1,64366192		
[°]	37,2095586	50,11757268	S [m]	0,01100671		
xs	1,608471515		Ns	37		
C [m]	0,018091309					

*Conclusion*

**Bibliographie**

**[1] Technique d'ingénieurs:**

**R 2280** : les turbines à gaz.

**B 4425** : mise en œuvre des turbines à gaz dans l'industrie.

**D 4001** : production de l'électricité par turbines à gaz.

**BM 4565** : refroidissement des turbines à gaz.

**BM 4566** : refroidissement des turbines à gaz.

**BM 4567** : refroidissement des turbines à gaz et les chambres de combustion.

**BM 4560** : turbines à fluide compressible – conception et fonctionnement- .

**M 329** : aciers résistant au fluage.

**M 140** : essais de fluage.

**M 3620** : fonderie et moulage de l'acier.

**M 3004** : plasticité et mise en forme des matériaux à froid.

**M 3005** : plasticité et mise en forme des matériaux à chaud.

**M 3520** : métallurgie des alliages de fonderie.

**M 3535** : outillage de fonderie.

**M 3540** : spécification des pièces de fonderie- normalisation ingénieurs-.

**M 3500** : industrie de la fonderie.

**M 3510** : techniques de fabrication- généralités-.

**M 3512** : moulage et noyautage.

**[2] A - Judet de la combe –**

➤ (Manuel des turbomachines).

➤ **Edition 1978.**

**[3] B khojda**

➤ (La thermodynamique et la gazodynamique).

➤ **Edition : 1965**

---

**[4] G Facy**

- (Pièces de fonderie).
- **Edition :Paris 1959**

**[5] J Boesch**

- (Fonderie de précision à modèle perdu).
- **Edition :1967 .**

**[6] Lucien Vivier et Albin Michel**

- (turbine à vapeur et à gaz).
- **Edition 1965.**

**[7] Marcel sédille** (turbo machines hydraulique et thermique).

**[8] Paul chambudal –**

- (la turbine à gaz).
- **Edition : Paris 1987**

**[9] Thèse :**

- Belmahdi mustapha, Anseur younes.
- « étude de concéption d'un micro turbopropulseur »
- Département : Aéronautique.
- Promotion : 2004 /2005.
- Promoteur : Bentrads hocine .

**[10] sites web:**

<http://www.fondeursdefrance.org>

<http://www.bronze.fr>

<http://www.Fonderie - Wikipédia.mht>

<http://www.technologie-entwicklung.de/Gasturbines/gasturbines.html> (anglais et allemand)

<http://fr.wikipedia.org/wiki/Alliag>

[http:// www.afiap.org](http://www.afiap.org)

[http:// www.otua.org](http://www.otua.org)

---