

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université SAAD DAHLAB Blida
Faculté des Sciences de l'ingénieur

Département d'Aéronautique

069/08

Projet de fin d'études En vue de l'obtention du Diplôme des
Etudes Universitaires Appliquées (DEUA) en aéronautique
Option : propulsion



Thème:

***Conception et réalisation d'un
moule de modèle en cire perdue
(stator)***

Réalisé par :

ATHMANI Mahreb
HAMADI Ismail Adel

Promoteur :

Mr. BENTRAD Hocine

Co-Promoteurs :

Mr. MEBRAK Mohamed
Mr. DEGOUAH Mustapha

Promotion: 2008



REMERCIEMENTS

D'abord et avant tous, nous remercions Dieu « Allah » le tout puissant de nous avoir donné la patience et le courage et de nous avoir aidé à réaliser ce travail et de ne pas nous avoir laissé même dans les moments les plus difficiles. Et notre prophète « Mohamed » que le salut de Dieu soit sur lui.

En second lieu nous tenons à remercier notre promoteur et au même temps notre professeur Mr. BENTRAD Hocine, ne pas oublier aussi MR. "MEBREK Mohamed", "ami Nordin et ami Mostafa", pour leurs encouragements et leurs conseils qui nous étés très bénéfiques.

Nous tenons également à remercier tous nos professeurs de l'institut d'aéronautique de Blida qui ont assuré notre formation pendant ces trois années. Et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'accomplissement notre travail de fin d'études.

Merci pour tous.



DÉDICACES

Je tiens à dédier ce modeste travail à la plus merveilleuse des mamans, qui ma toujours sur être présente, ma supporté, conseillé et dirigé

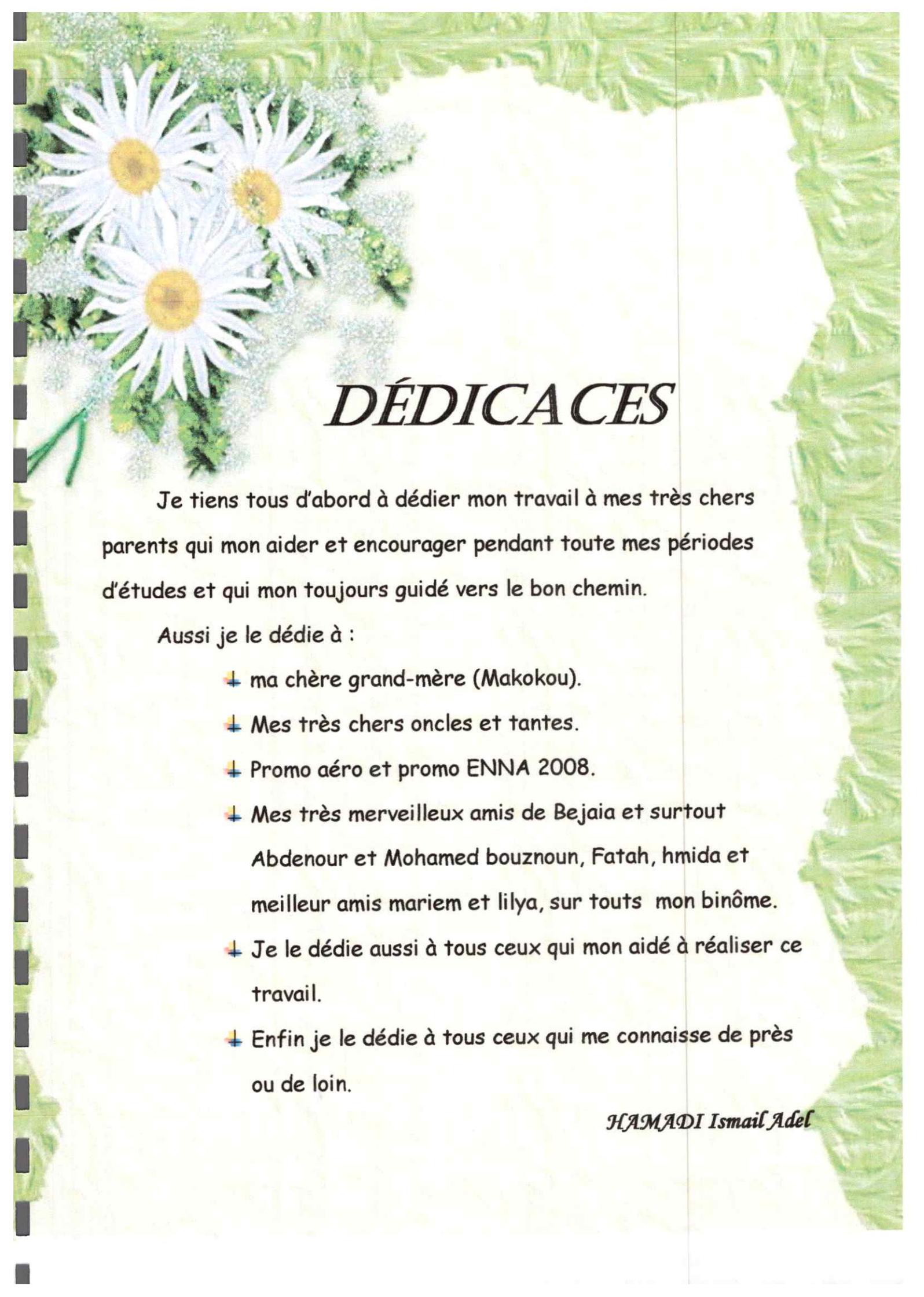
Je le dédie également à mon père, mes frères et sœurs " Souad, Salem, Houria, Mounir, Medjda, Naima " qui sont les personnes que j'aime le plus au monde, je profite cette occasion pour les remercier pour tout ce que ils ont faits pour moi.

Puis, je le dédie à Adel et Djamel.

Puis, je le dédie à mes amis avec lesquels j'ai partagé mes moments de joie et de tristesse à Blida ; mon binôme, YACIN, LAHCEN, RASSIM, ABDELHAK, NESRO, SALIM, MAAMMER, bento AICHA, bento IMAN, LaLA ASMA, OUIZA, WARDA, WIDAD, SARAH, MINOU86, Promo propulsion.

Enfin, je le dédie à tous ceux que je connais et qui me connaissent de prêt ou de loin.

ATHMANI Mahreb



DÉDICACES

Je tiens tous d'abord à dédier mon travail à mes très chers parents qui m'ont aidé et encouragé pendant toute mes périodes d'études et qui m'ont toujours guidé vers le bon chemin.

Aussi je le dédie à :

- + ma chère grand-mère (Makokou).
- + Mes très chers oncles et tantes.
- + Promo aéro et promo ENNA 2008.
- + Mes très merveilleux amis de Bejaia et surtout Abdenour et Mohamed bouznoun, Fatah, hmida et meilleur amis mariem et lilya, sur tous mon binôme.
- + Je le dédie aussi à tous ceux qui m'ont aidé à réaliser ce travail.
- + Enfin je le dédie à tous ceux qui me connaissent de près ou de loin.

HAMADI Ismail Adel

Sommaire

Introduction.....	01
<u>Chapitre I</u>	
I-1/ Introduction.....	02
I-2/ Moteur à réaction (turboréacteur).....	02
I-3/ Cycle thermodynamique	03
I-4/ Paramètre des performances du moteur.....	04
I-5/ La turbine.....	06
I-5-1/ Description et rôle.....	06
I-5-2/Degré de réaction d'un étage.....	07
a) Turbine à action.....	08
b) Turbine à réaction.....	08
c) Turbine Liée et Libre.....	08
I-6/ La turbine axiale.....	09
I-6-1/ Triangle de vitesse.....	10
a) Stator.....	10
b) Le rotor (grille d'aubes tournantes).....	11
I-6-2/ Géométrie d'aube.....	11
I-6-3/ Fonctionnement.....	13
I-6-4/ Variation des paramètres du gaz dans les éléments de l'étage turbine.....	14
I-6-5/ Contraintes supportées par la turbine.....	14
I-6-6/ Matériaux utilisés.....	15
a) Distributeur turbine.....	15
b) Disque turbine	15
I-6-7/ Développement actuel.....	16
I-6-8/ Refroidissement et matériaux.....	17
I-6-9/ Fixation des aubes.....	18
I-7/Micro turboréacteur	20
I-7-1/Les composants de microréacteur.....	20
I-7-2/Domaine d'application du micro-turboréacteur.....	22
a- Le drone.....	23
b- Les miniatures	23

a- Le missile.....	24
--------------------	----

Chapitre II

II-1/Introduction.....	25
II-2/le moulage.....	25
II-3/Le modèle.....	25
II-4/Le moule	26
II-4-1/Les événements	26
II-4-2/Emplacement des événements.....	27
II-4-3/Différentes parties d'une coulée	27
1-Entonnoir	27
2-Jets de coulée (descentes)	28
3-Canaux de coulée	29
4-Attaques de coulée	30
5-Exemples de dispositifs de coulée	31
II-5/Moulage en moule permanent.....	31
a) Coulée par gravité ou coquille gravité.....	32
b) Moulage sous pression.....	32
II-6/Moulage en moule non permanent.....	33
II-6-1/Le moule déformable (sable à vert)	33
a) Le moulage manuel.....	34
b) Le moulage mécanique.....	34
c) Serrage basse pression	34
II-6-2/Le moule rigide (sable aggloméré)	36
I-7-1/Le moulage à la cire perdue.....	36
1- Obtention d'un modèle non – permanent.....	36
2- Création d'un arbre en cire.....	37
3- Enrobage Céramique.....	38
4- Séchage.....	38
5- Décirage.....	38
6- Mise en étuve.....	39
7- Recyclage de la cire	39
8- Cuisson de la céramique - mise en température.....	39

9- Coulée métallique.....	40
10- Refroidissement.....	40
11- Décochage.....	40
II-7-2/Pièces moulées par le procédé à la cire perdue.....	41
II-8/Les alliages.....	41
● Les fontes	43
● Les aciers	43
● Les alliages base cobalt ou nickel	43
● Les alliages d'aluminium.....	44
● Les alliages de magnésium	44
● Les alliages de cuivre	44
● Les alliages de zinc.....	44

Chapitre III

III-1/Introduction	45
III-2/Description du moteur :	45
III-2-1/Le point de fonctionnement	46
III-3/Recherche des données pour les turbines	47
III-3-1/Etude et la conception de la turbine liée	48
III-3-2/Détermination de la géométrie des aubes stator	49
III-3-3/Étude de la conception de la turbine libre.....	50
III-3-4/Détermination de la géométrie des aubes stator ...	51
III-4/Dessin des profils des aubes	52
III-5/Conception et mise en plans	53
III-6/Réalisation des stators.....	54
III-6-1/Matériels et moyen utilisés.....	54
III-6-2/Procédé de fabrication et opération d'usinage effectuée.....	54
a) Tournage	54
b) Perçage	55
III-7/Réalisation des modèles permanents.....	56
III-7-1/Calcul des côtes plus retrait	56
a) Définition du retrait	56
b) Exemple de calcul des côtes plus retrait.....	56

III-7-2/Réalisation du carter modèle.....	57
III-7-2-1/Réalisation de l'épure.....	57
III-7-2-2/Réalisation des jantes modèles.....	58
III-7-2-3/Plateaux deviseurs.....	59
III-7-2-4/Réalisation des ailettes.....	61
III-7-3-1/Réalisation des modèles non permanons (en cire).....	62
III-7-3-2/Réalisation de jante.....	62
a) Réalisation de moule.....	62
b) La cire	63
c) La coulée de la cire.....	64
III-7-3-3/Réalisation des ailettes.....	64
a) Le moule.....	64
b) La coulée.....	65
c) Les événements	66
III-7-3-4/ le moule en céramique.....	66
a) Enrobage céramique.....	66

CONCLUSION

ANNEXE : les plans.

BIBLIOGRAPHIE.

Liste des figures

Figure (I.1.a) : propulsion indirecte	02
Figure (I.1.b) : propulsion directe.....	02
Figure (I.2) : Cycle du turboréacteur.....	03
Figure (I.3) : Schéma de différente station d'un turboréacteur.....	03
Figure (I.4) : Etage de turbine.....	06
Figure (I.5) : turbine axiale.....	07
Figure (I.6.a) : Schéma de la turbine centrifuge radiale.....	07
Figure (I.6.b) : Schéma de la turbine centripète radiale.....	07
Figure (I.7.a) : Coupe d'un étage de Turbine à action.....	08
Figure (I.7.a) : Coupe d'un étage turbine à réaction.....	08
Figure (I.8.a) : turbine libre.....	09
Figure (I.8.b) : turbine liée.....	09
Figure (I.9) : L'étage d'une turbine axiale.....	09
Figure (I.10) : Les triangles des vitesses.....	10
Figure (I.11) : Le distributeur d'un étage d'une turbine axial.....	10
Figure (I.12) : Le rotor d'un étage d'une turbine axiale.....	11
Figure (I.13) : Représentation un profil d'aube.....	11
Figure (I.14) : Paramètres géométriques d'un profil d'aube.....	12
Figure (I.15) : Présentation de vrillage.....	12
Figure (I.16) : La répartition de la pression sur le contour de l'aube.....	13
Figure (I.17) : Le graphique de variation des paramètres du gaz dans les éléments de l'étage.....	14
Figure (I.18) : Détériorations des aubes.....	14
Figure (I.19) : Evolution de refroidissement.....	17
Figure (I.20) : Montage à queue d'aronde multiple.....	18
Figure (I.21) : Montage en pied de sapin.....	19
Figure (I.22) : Liaison par bandage rivé.....	19
Figure (I.23) : Micro turboréacteur.....	20
Figure (I.24) : Diffuseur d air.....	21
Figure (I.25) : Roue turbine.....	21
Figure (I.26) : Arbre.....	20
Figure (I.27) : La chambre de combustion.....	22
Figure (I.28) : Coupe annotée d'un micro-turboréacteur.....	22

Figure (I.29): Drone en vol.....	23
Figure (I.30): Avion miniature avec son micro-turboréacteur.....	23
Figure (I.31) : Différent types de micro-turboréacteur avec les missiles qu'ils équipent.....	24
Figure (II.1) : Moule en plâtre.....	25
Figure (II.2) : Le model et son empreinte.....	25
Figure (II.3) : Moule métallique.....	26
Figure (II.4) : Les événements.....	26
Figure (II.5) : Différents types d'événets.....	27
Figure (II.6) : Entonnoirs de coulée.....	28
Figure (II.7) : Jets de coulée.....	28
Figure (II.8) : Types de jets.....	29
Figure (II.9) : Canaux de coulée.....	30
Figure (II.10) : Les attaques de coulée et leurs sections.....	30
Figure (II.11) : Groupage de pièces : 260 à 1580g.....	31
Figure (II.12) : Moule permanent.....	31
Figure (II.13) : Coulée par gravité.....	32
Figure (II.14) : Schéma d'une machine d'injection sous pression.....	33
Figure (II.15) : Moulage manuel.....	34
Figure (II.16) : Serrage basse pression.....	34
Figure (II.17) : Serrage Par secousses.....	35
Figure (II.18) : Par pression et secousses.....	35
Figure (II.19) : Moule rigide.....	36
Figure (II.20) : Modèle en cire.....	37
Figure (II.21) : Arbre en cire.....	37
Figure (II.22) : Enrobage de modèle.....	38
Figure (II.23) : Etuve.....	39
Figure (II.24) : Coulée du métal dans le moule.....	40
Figure (II-25) : Pièces de turbine obtenues par moulage de précision à la cire perdue.....	41
Figure (II-26) : Pièces pour l'aéronautique obtenues par moulage de précision à la cire perdue.....	41
Figure (II.25) : Diagramme d'équilibre de phases simplifiées d'un alliage binaire.....	42
Figure (III.1) : Schéma du micro-turbopropulseur.....	45
Figure (III.2) : La poussée spécifique en fonction de la consommation pour les différentes températures et différents taux de compression.....	47

Figure (III.3) : Programme TURBN.....	48
Figure (III.4) : Profil T6 des turbines à gaz.....	52
Figure (III.5) : Logiciel solidworks 2007.....	53
Figure (III.6.a) : Stator pour turbine liée.....	54
Figure (III.6.b) : Stator pour turbine libre.....	54
Figure (III.7) : Tour mécanique.....	55
Figure (III.8) : Perceuse.....	55
Figure (III.9) : Le carter après chariotage et avant mise en forme.....	57
Figure (III.10) : Carter fini.....	57
Figure (III.11) : Usinage de la jante.....	58
Figure (III.12) La jante modèle en aluminium.....	59
Figure (III.3) : Support fixe.....	59
Figure (III.13) : Plateau deviseur.....	60
Figure (III.14) : Tressage de l'angle de calage.....	60
Figure (III.15) : La jante percée sur sa circonférence.....	60
Figure (III.16) : Du petit clou monté dans les trous.....	60
Figure (III.17): Ailette fixé sue la jante.....	61
Figure (III.18): Tirage des aubes en mastic.....	61
Figure (III.19): Cire de démoulage.....	62
Figure (III.20): Déférente partie de moule.....	62
Figure (III.21): Cire AQUA.....	63
Figure (III.22.a): Coulée de la cire.....	64
Figure (III.22.b): Jante fini.....	64
Figure (III.23): Exécution de moule en silicone.....	64
Figure (III.24): Enrobage de moule avec du mastic.....	65
Figure (III.25):Les deux modèles en cire.....	65
Figure (III.26): Emplacement des évents.....	66
Figure (III.27): Enrobage céramique (liquide).....	67
Figure (III.28): Enrobage céramique (sèche).....	67

Introduction

Une turbine transforme l'énergie provenant du combustible en mouvements de rotation, elle prend par avec les pièces complexes difficile a réalisé. Le moyen le plus simple de fabriquer se type de pièce c'est le moulage à la cire perdu.

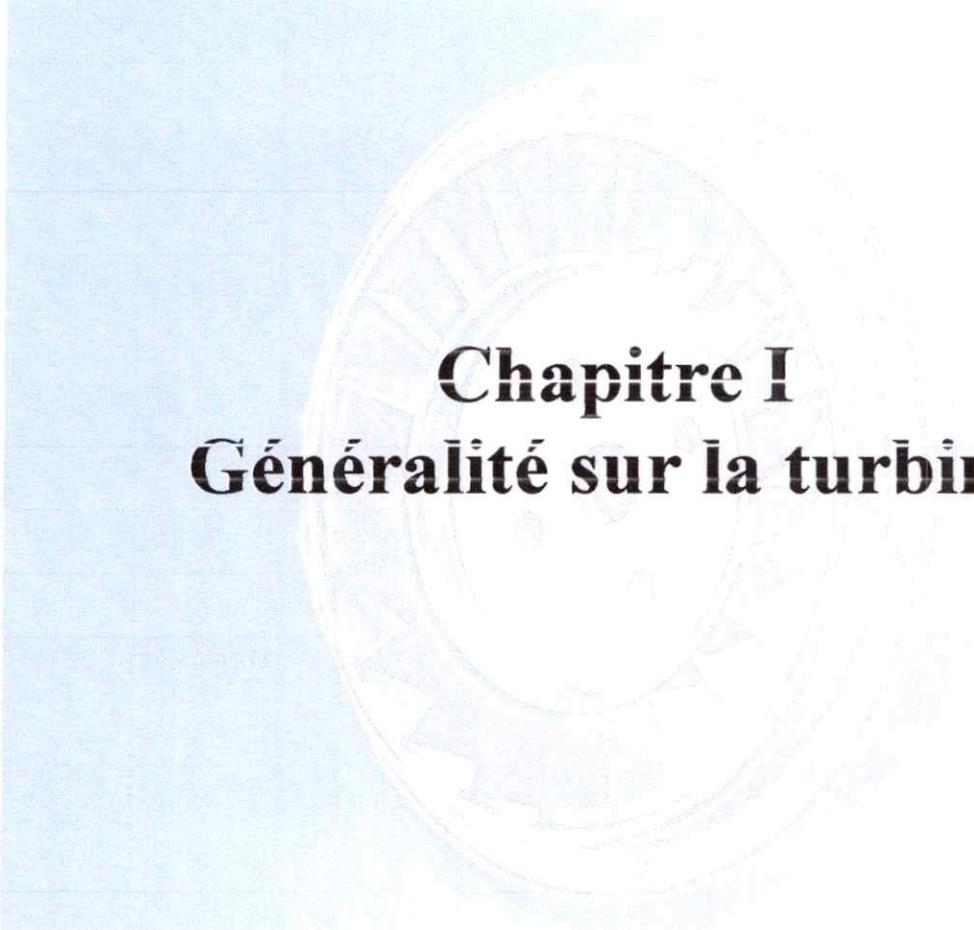
Le travaille présente dans cette mémoire est de réaliser un moule pour un model en cire perdu (stator) destinée à un micro-turbopropulseur d'une poussé de 450 N.

Ce mémoire est composée de trois chapitres, le premier chapitre nommé généralité sur la turbine traite : le rôle et utilisation, les différente type, et fonctionnement de la turbine ainsi que des applications du micro-turboréacteur.

Le second chapitre on présenté le moulage en générale et plus particulièrement le procédé de moulage à la cire perdue.

Enfin le troisième chapitre, est consacrée à la conception de la turbine et les détails de la réalisation des moules et des modèles, on applique le procédé de moulage a la cire perdue.

L'objectif de ce mémoire est d'améliorée le travaille de nous prédécesseurs et de faire connaissance ou étudient les déférentes étapes de la réalisation de la turbine (conception, mise en plans, réalisation).



Chapitre I
Généralité sur la turbine

I-1/ Introduction

Depuis Icare, l'être humaine à toujours rêvé de s'envoler dans les airs et vaincre la gravité terrestre. Grâce aux progrès de la science et la technologie l'apparition des moteurs à combustion interne et la turbine à gaz a permis à l'aviation de réaliser un développement considérable. En effet aujourd'hui, on vole à des vitesses supersoniques et on transporte plus de 600 passagers à bord des avions. Aussi, la réglementation de l'aviation à ordonner l'utilisation des espaces aériennes et a augmenté la sécurité des utilisateurs et des passagers.

I-2/ Moteur à réaction (turboréacteur)

Un moteur à réaction et une machine thermodynamique qui développe une puissance utile permettant de réaliser une propulsion directe ou indirecte selon le principe de l'action et de la réaction de "newton".

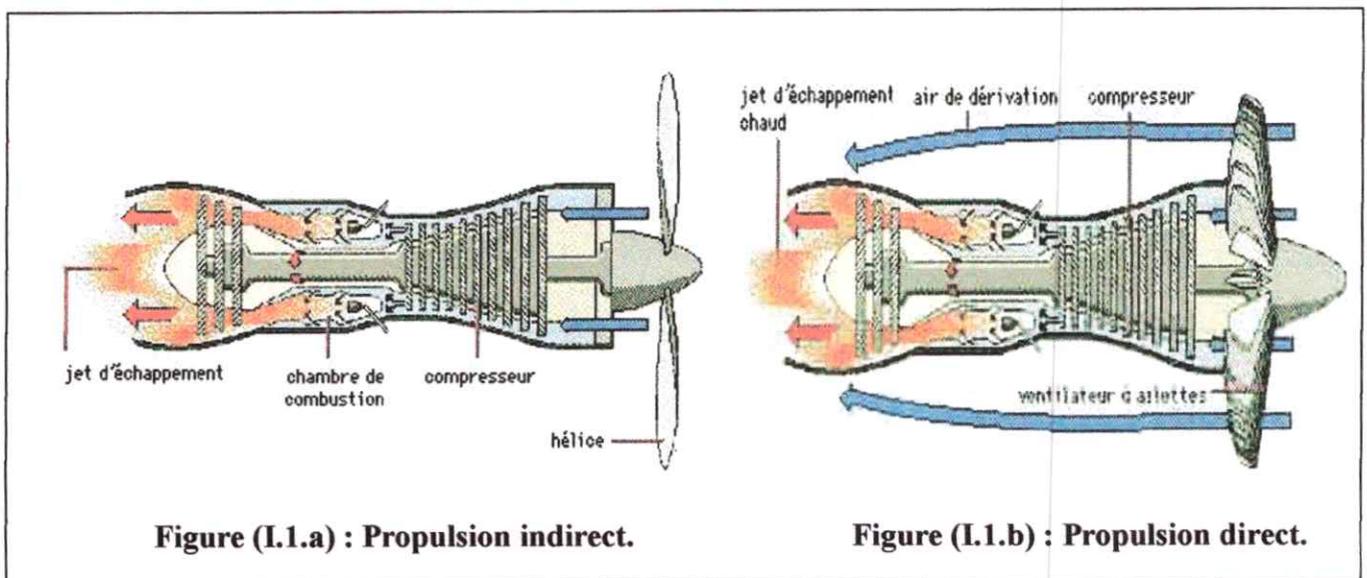


Figure (I.1.a) : Propulsion indirect.

Figure (I.1.b) : Propulsion direct.

Le turboréacteur prend part avec la catégorie des propulseurs directs, car en réalité la turbine à gaz qui le constitue génère du gaz en continu et l'expulse par une tuyère pour réaliser une détente. Cette expansion de gaz chaud réalise une différence de quantités de mouvements est ce qui donne une force de propulsion appelée poussée, dirigée à l'opposé de l'éjection des gaz.

Un turboréacteur est formé d'un tube à l'intérieur duquel sont disposés, d'avant en arrière, un compresseur à aubes comportant plusieurs étages, une chambre à combustion disposée sur le même axe, une turbine à gaz et une tuyère de sortie.

I-3/ Cycle thermodynamique

Tous les turboréacteurs travaillent suivant « le cycle de JOULE » ou cycle de turbine à gaz. Ce cycle est composé de trois phases à savoir la compression, la combustion et la détente. Cependant la détente se produit dans la turbine ou dans la tuyère ou dans les deux.

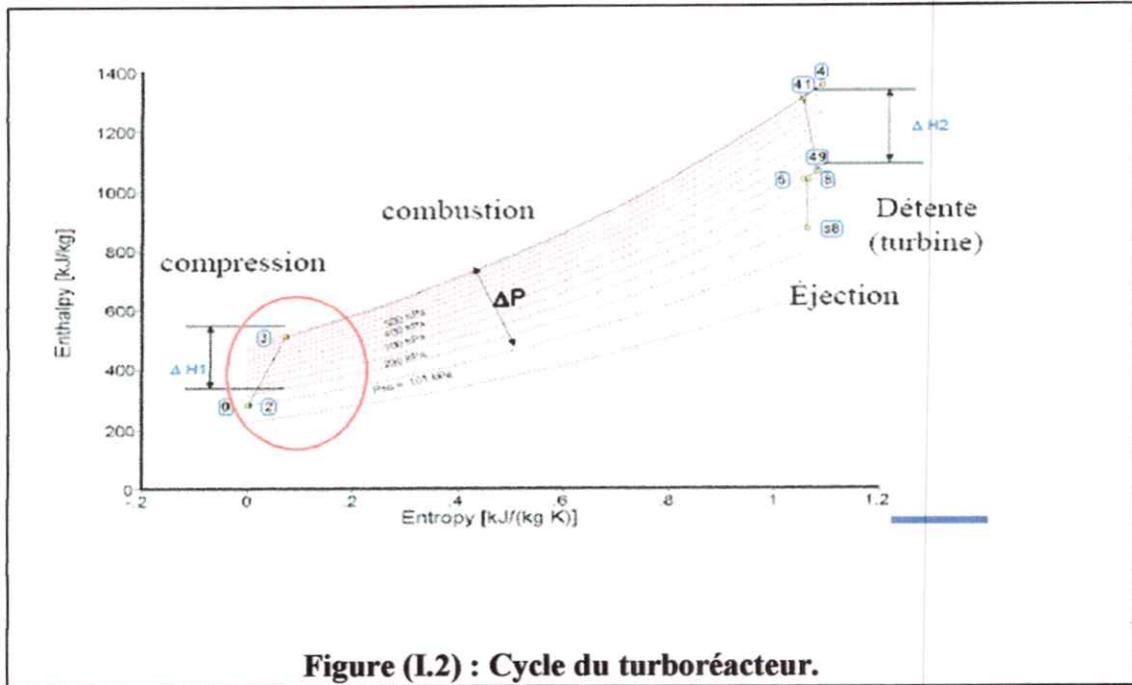


Figure (I.2) : Cycle du turboréacteur.

Le schéma suivant montre les différentes stations d'entrée et de sortie des éléments constituant un turboréacteur.

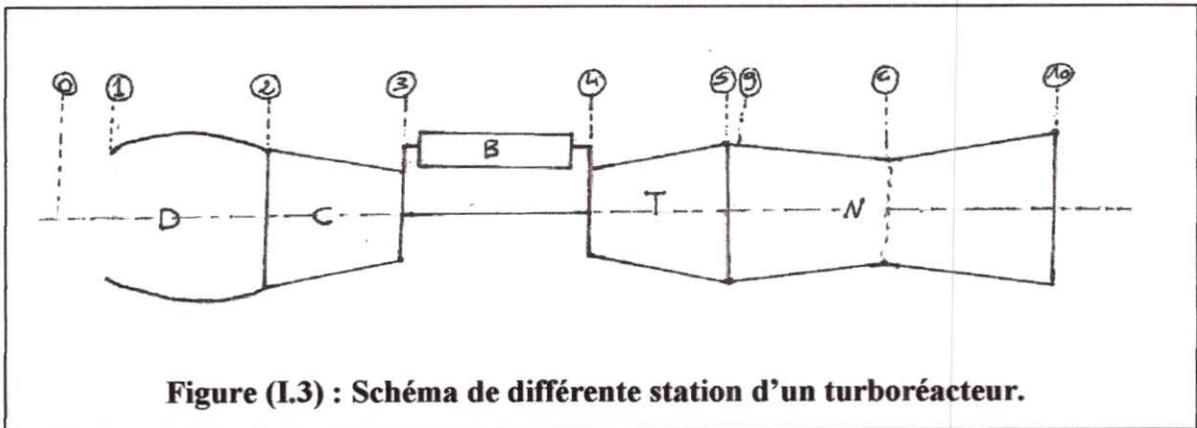


Figure (I.3) : Schéma de différente station d'un turboréacteur.

Station 0 : Ecoulement à l'avant du turboréacteur.

Dans cette phase, l'air n'est pas perturbé, ses caractéristiques thermodynamiques restent inchangées.

Station 1-2 : Entrée d'air.

Deux cas peuvent être présentés, soit le moteur travaille à l'état statique et la pression totale est légèrement inférieure à la pression atmosphérique, soit le moteur travaille en vol et l'augmentation de pression est dite la pression dynamique.

Station 2-3 : Compresseur.

Le processus de la compression est réel, la pression et la température totale augmente alors que le volume spécifique diminue.

Station 3-4 : Chambre de combustion.

La combustion se fait à pression constante, l'enthalpie des gaz augmente considérablement au cours de cette phase.

Station 4-5 : Turbine.

Le compresseur est alimenté par la turbine qui transforme une partie de l'énergie des gaz sous forme de travail sur l'arbre, la pression totale et la température totale diminue à travers la turbine.

Station 5-10 : Tuyère d'éjection

A l'entrée de la tuyère, la pression et la température sont relativement haute, la tuyère à une section convergente ou convergente divergente, bien que la température totale et la pression restent constantes le long de la tuyère, la température statique et la pression statique diminue, la chaleur produit une augmentation de vitesse, la pression statique peut être égale ou supérieur à la pression atmosphérique. Si elle est égale, on dit que la tuyère est adaptée mais si elle est supérieure on dit que la détente est incomplète.

I-4/ Paramètre des performances du moteur**• Poussée :**

La poussée est produite par la tuyère lors de la détente des gaz et de leurs éjections. Elle dépend du débit d'air et de la différence entre la vitesse d'admission et la vitesse d'éjection des gaz.

La poussée est exprimée par la relation ci-dessous lorsque la pression des gaz éjectés est égale à la pression environnante et en négligeant le débit carburant.

$$F = m^{\circ} \times (V_{\text{sortie}} - V_{\text{entrée}}) \quad (\text{I-1})$$

Avec :

m° : Débit massique (Kg/s).

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

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

• Puissance thermique

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

$$Q = m_{f_{\text{seul}}}^{\circ} \times PCI \quad (\text{I-2})$$

Avec :

$m_{f_{\text{seul}}}^{\circ}$: Débit carburant (Kg/s).

PCI : Le pouvoir calorifique du carburant.

• La puissance propulsive

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

$$P_p = F \times V \quad (\text{I-3})$$

Avec :

F : La poussée (N).

V : La vitesse de l'avion (m/s).

• La puissance utile

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

$$W_u = \frac{1}{2} m^{\circ} \times (V_{\text{sortie}}^2 - V_{\text{entrée}}^2) \quad (\text{I-4})$$

Avec :

m° : Débit massique de l'air passant dans le moteur, le débit du carburant étant négligeable (Kg/s).

c) Rendements :

Par définition, le rendement d'une machine thermique est le rapport de la puissance de sortie sur la puissance d'entrée.

- **Rendement de propulsion :**

Le rendement propulsif est rapport de la puissance de propulsion sur la puissance thermique réelle :

$$\eta = \frac{P_p}{W_u} \quad (\text{I-5})$$

- **Rendement thermique :**

Le rendement thermique est le rapport de la puissance thermique sur la puissance calorifique :

$$\eta_{th} = \frac{W_u}{Q_{th}} \quad (\text{I-6})$$

I-5/ La turbine

I-5-1/ Description et rôle

La turbine se compose de deux éléments fixes et mobile appelés stator et l'autre le rotor le premier permis d'accélérer les gaz sortants de la chambre de combustion et de le orienter avec un angle déterminé ver la roue mobile. Cette dernière par impacte de gaz l'or de son passage détermine une récupération de l'énergie et se met en relation ce qui nous permet de récupérer une énergie mécanique à être exploiter.

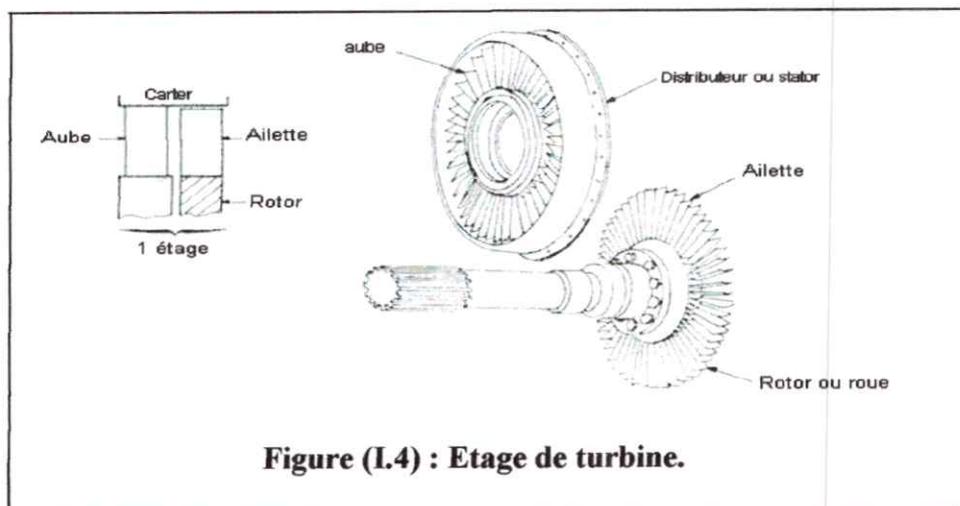


Figure (I.4) : Etage de turbine.

Il existe alors deux type de turbine selon la direction générale du mouvement du fluide moteur, les turbines se répartissent en axiales et radiales.

Dans la turbine axiale, le sens principal du mouvement du gaz est le long de l'axe de rotation du rotor.

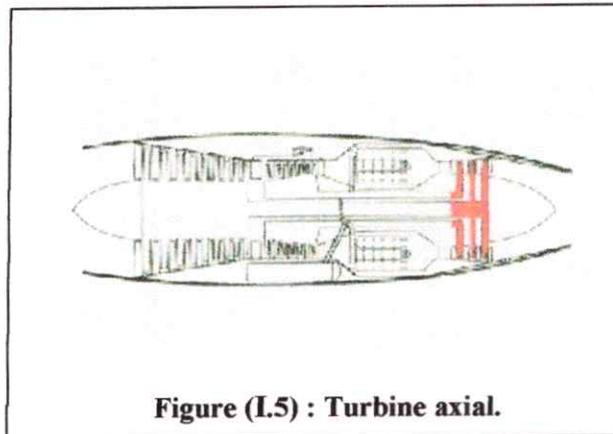


Figure (I.5) : Turbine axiale.

Dans la turbine radiale, le flux gazeux se déplace dans le sens perpendiculaire à l'axe de la machine. En cas du mouvement du gaz du centre vers la périphérie, la turbine radiale est appelée centrifuge.

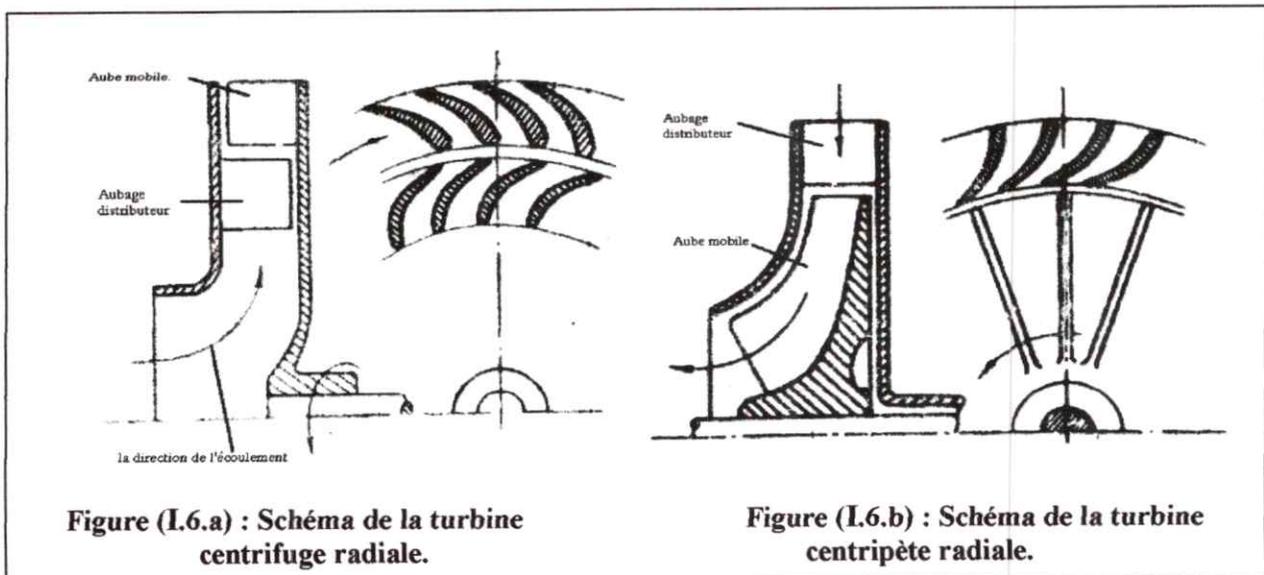


Figure (I.6.a) : Schéma de la turbine centrifuge radiale.

Figure (I.6.b) : Schéma de la turbine centripète radiale.

Si ce même flux gazeux se déplace de la périphérie vers le centre, la turbine est donc appelée centripète.

I-5-2/Degré de réaction d'un étage

C'est le rapport de l'énergie de pression perdue par les gaz dans le rotor, à l'énergie de pression perdue dans tout l'étage. Il exprime la fraction d'expansion dans le rotor, et il est défini en termes de chute d'enthalpie au lieu de chute de pression.

a) La turbine à action

En réalité la détente s'effectue dans le distributeur, la pression à la sortie de la roue mobile est la même qu'à l'entrée, de plus on remarque la forte convergence des sections de passage des grilles distributrices ce qui indique que toute la détente y est effectuée.

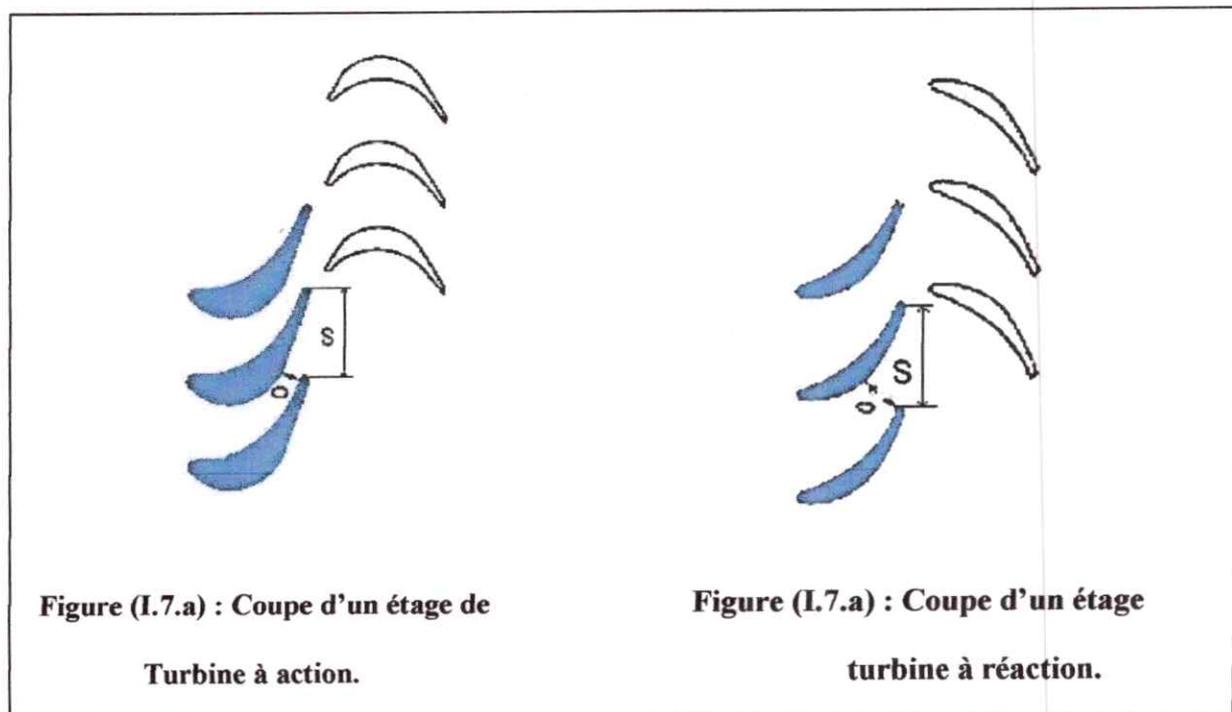


Figure (I.7.a) : Coupe d'un étage de
Turbine à action.

Figure (I.7.a) : Coupe d'un étage
turbine à réaction.

Ce type de turbine n'est pas utilisé sur les GTR. Est qui représente une forme géométrique des aubes stator à forte courbure et en parenthèses pour le rotor.

b) Turbine à réaction

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

Le degré de réaction qui caractérise l'énergie perdue dans le rotor par rapport à celle de l'étage varie selon le type de turbine.

c) 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.

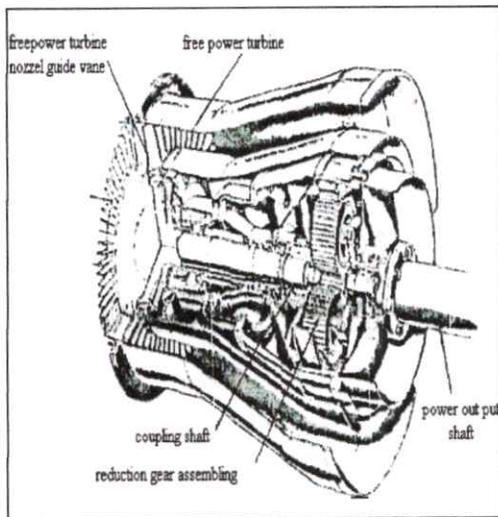


Figure (I.8.a) : Turbine libre.

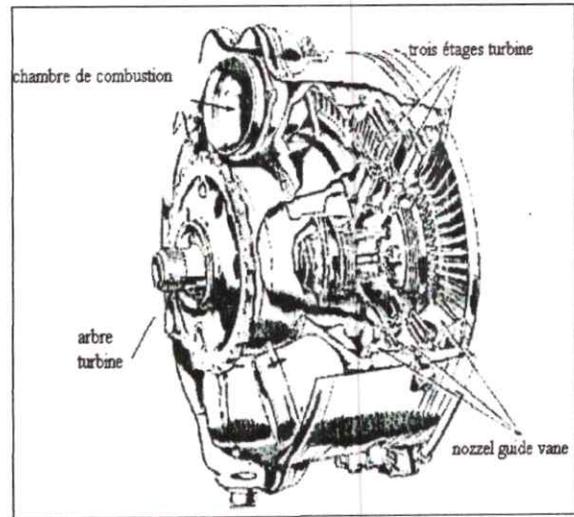


Figure (I.8.b) : Turbine liée.

I-6/ La turbine axiale

• **L'étage d'une turbine axial :**

L'ensemble turbine comprend un ou plusieurs étages, chaque étage étant constitué d'une rangée d'aubes fixes (distributeur) suivie d'une rangée d'aubes mobiles (roue de turbine).

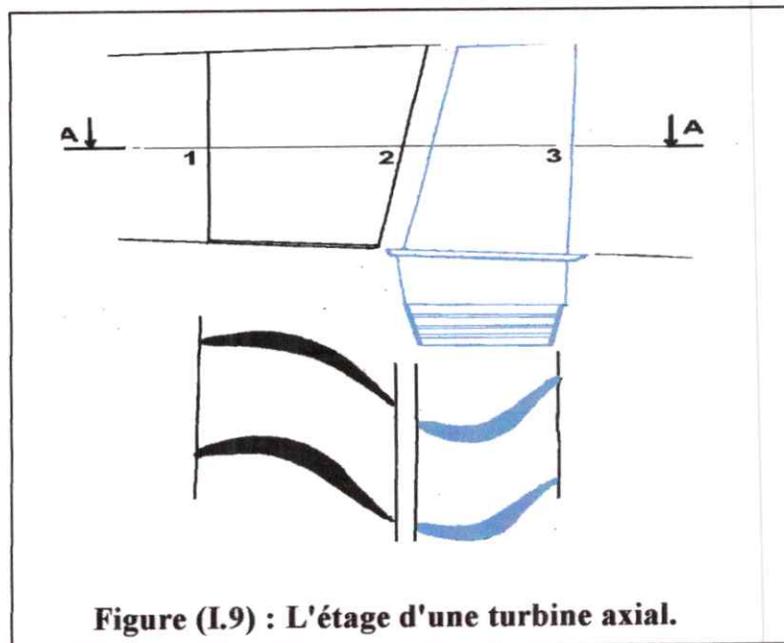


Figure (I.9) : L'étage d'une turbine axial.

L'écoulement est parallèle à l'axe du moteur.

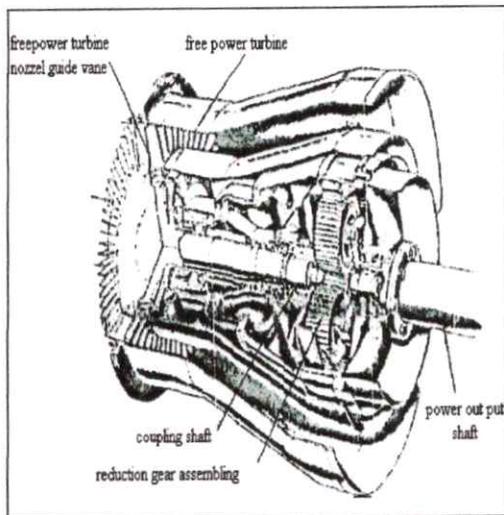


Figure (I.8.a) : Turbine libre.

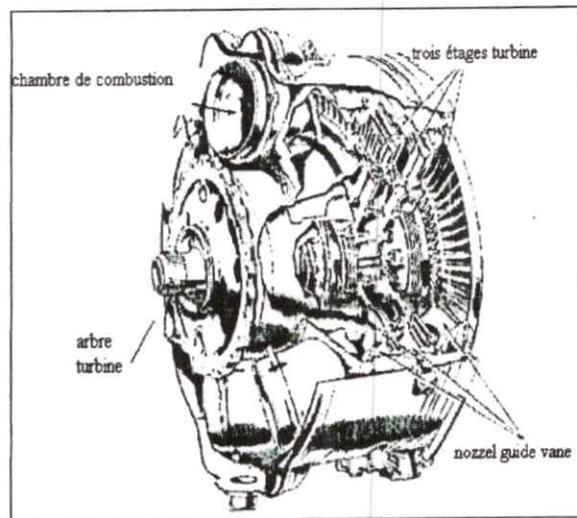


Figure (I.8.b) : Turbine liée.

I-6/ La turbine axiale

• **L'étage d'une turbine axial :**

L'ensemble turbine comprend un ou plusieurs étages, chaque étage étant constitué d'une rangée d'aubes fixes (distributeur) suivie d'une rangée d'aubes mobiles (roue de turbine).

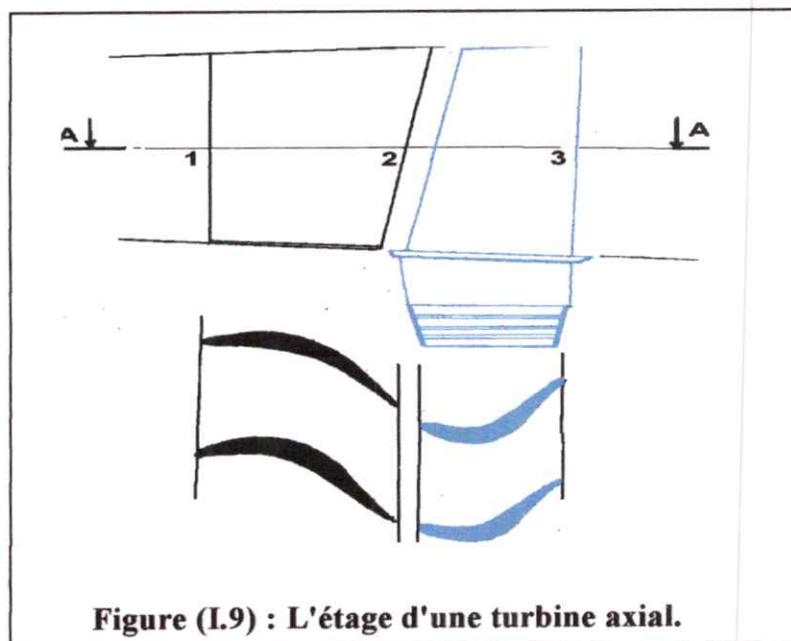


Figure (I.9) : L'étage d'une turbine axial.

L'écoulement est parallèle à l'axe du moteur.

I-6-1/ Triangle de vitesse

Les aubes de la roue rotor reçoivent l'énergie cinétique fournie au flux lors de son passage dans le stator, et la transforme en énergie mécanique de rotation. Le schéma représente un étage de turbine, mais il est évident qu'un moteur peut comporter plusieurs étages. Il faut aussi noter que le calage, le nombre, la longueur et la forme des aubes varient d'un étage à un autre. Le diagramme fait apparaître :

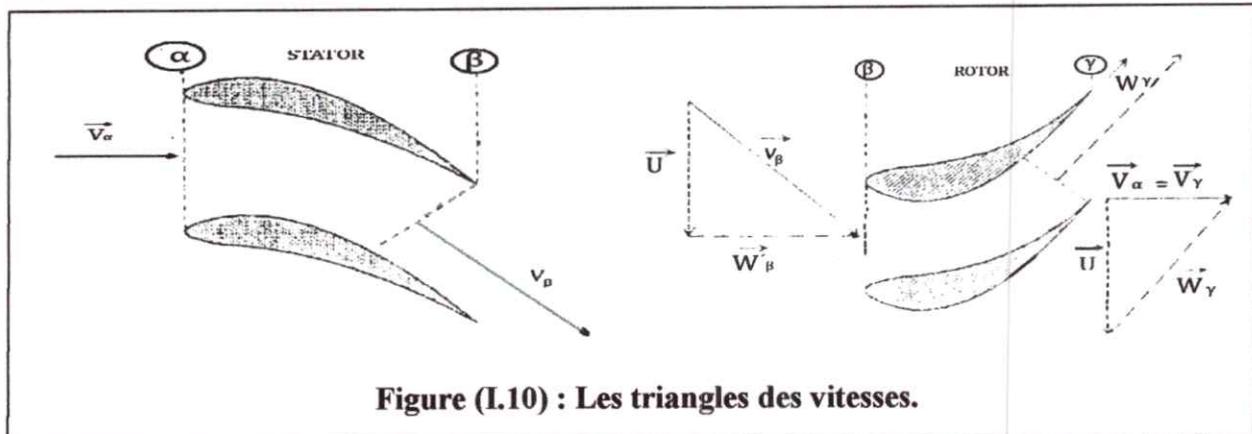


Figure (I.10) : Les triangles des vitesses.

En caractérisant respectivement la station entrée et sortie des éléments d'un étage turbine avec les indices α , β et γ . Le diagramme de vitesse est représenté sur la figure (I.10).

a) Stator

Les aubes fixes sont généralement montées entre deux anneaux cylindriques. L'anneau extérieur se monte dans le carter turbine et l'anneau intérieur enveloppe l'arbre liant la turbine au compresseur.

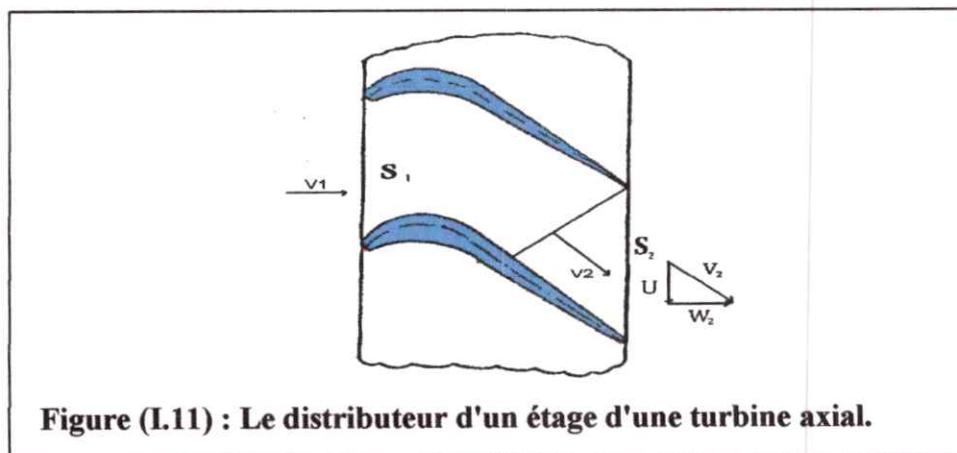


Figure (I.11) : Le distributeur d'un étage d'une turbine axiale.

L'air arrive de la chambre de combustion à la vitesse absolue V_1 et pénètre dans le distributeur de turbine par la section de passage S_1 . La forme des profils d'aubes stator entraîne une déflexion de

l'écoulement et à la sortie, d'autre les gaz chaud qui passeront dans les passages convergent seront de se fait accéléré du moment que $S_2 < S_1$ ce qui donne par conséquence $V_2 > V_1$.

b) Le rotor (grille d'aubes tournantes)

L'air arrive ensuite à l'entrée de la roue de turbine dont le profil d'aube considéré tourne à une vitesse circonférentielle U . Considérons le triangle des vitesses satisfaisant la relation :

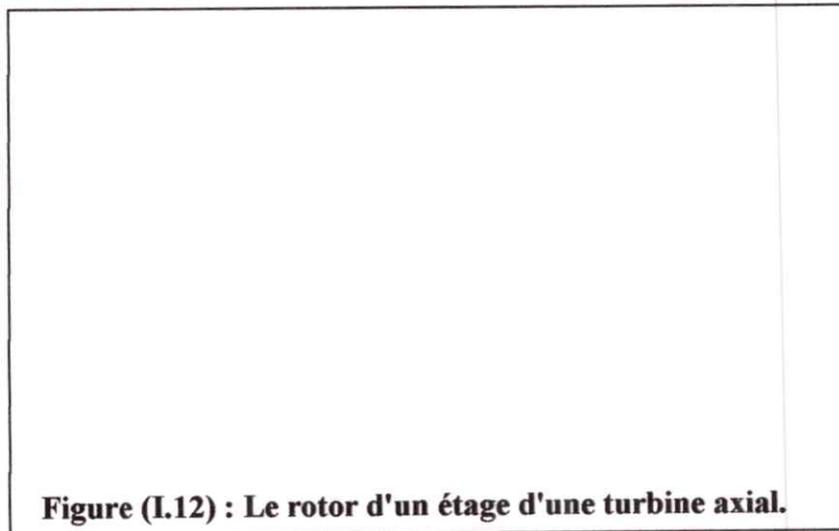


Figure (I.12) : Le rotor d'un étage d'une turbine axial.

$\vec{V}_2 = \vec{U} + \vec{W}_2$. Nous voyons alors que les filets d'air pénètrent dans le rotor à la vitesse relative W_2 par la section S_2 . La forme des aubes va les en faire sortir par la section $S_3 > S_2$ et donc à une vitesse $W_3 > W_2$. La forme des profils d'aubes est telle qu'en construisant, le triangle des vitesses $\vec{V}_3 = \vec{U} + \vec{W}_3$ en sortie rotor, nous obtenons à peu près $V_3 = V_1$.

I-6-2/ Géométrie d'aube

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

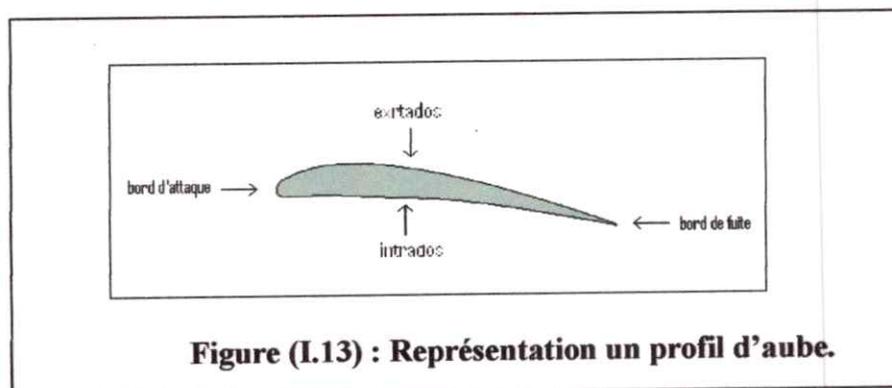


Figure (I.13) : Représentation un profil d'aube.

Les aubes turbine sont conçues de façon à obtenir une meilleure récupération de l'énergie, elles sont donc d'un profil aérodynamique, caractérisé par des paramètres géométriques comme le montre la figure ci-dessus :

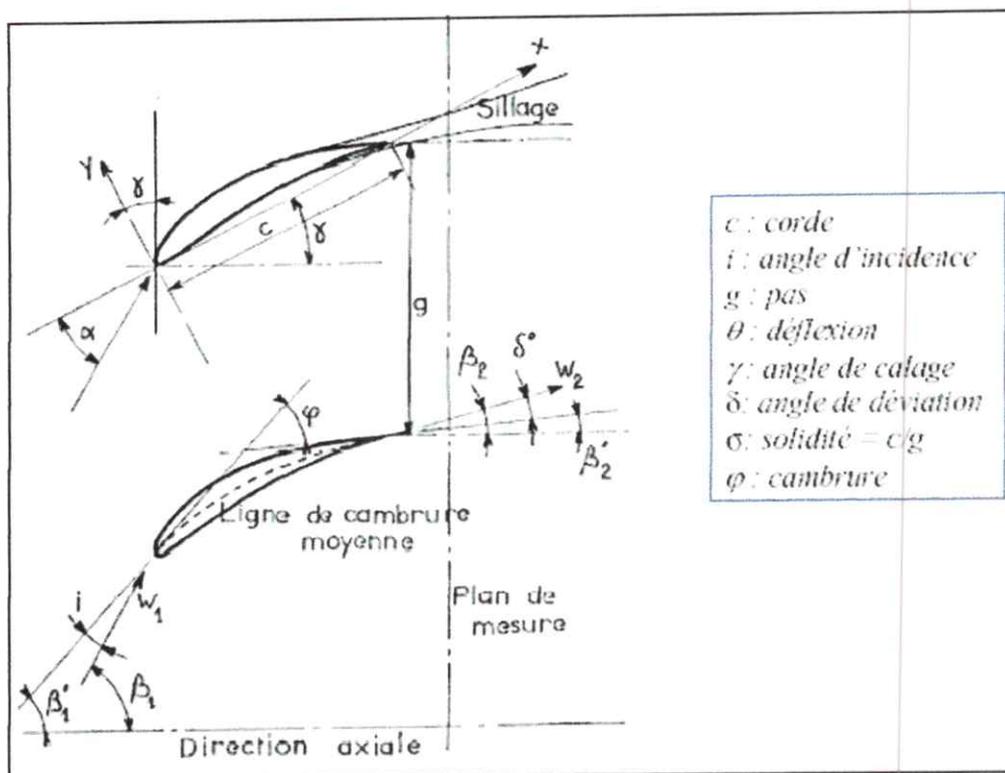
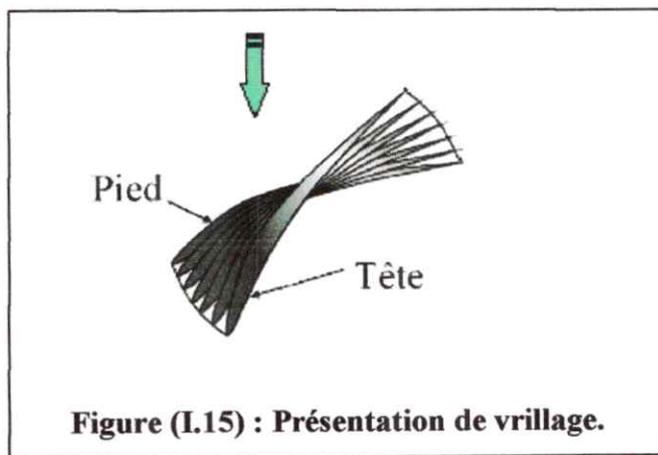


Figure (L.14) : Paramètres géométriques d'un profil d'aube.

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.



Le couple fourni par la turbine est déterminé par le débit des gaz et la variation d'énergie. Si l'énergie des gaz est suffisamment absorbée, le mouvement de rotation des gaz donné par le

distributeur est redressé pour permettre un bon écoulement à l'échappement. Dans le distributeur la vitesse augmente et la pression diminue du pied à l'extrémité des aubes.

I-6-3/ Fonctionnement

Le principe de fonctionnement de l'étage réside dans ce qui suit, le flux de gaz, en passant dans l'aubage distributeur avec la vitesse V_1 , la pression P_1 et la température T_1 , acquiert une réserve déterminée d'énergie potentielle et cinétique, dans le processus de détente du gaz dans les claires-voies des aubes de distributeur, une partie de son énergie potentielle (énergie de pression) se transforme en énergie cinétique d'où, il résulte que la vitesse de l'air augmente considérablement lors de son déplacement dans l'aubage distributeur.

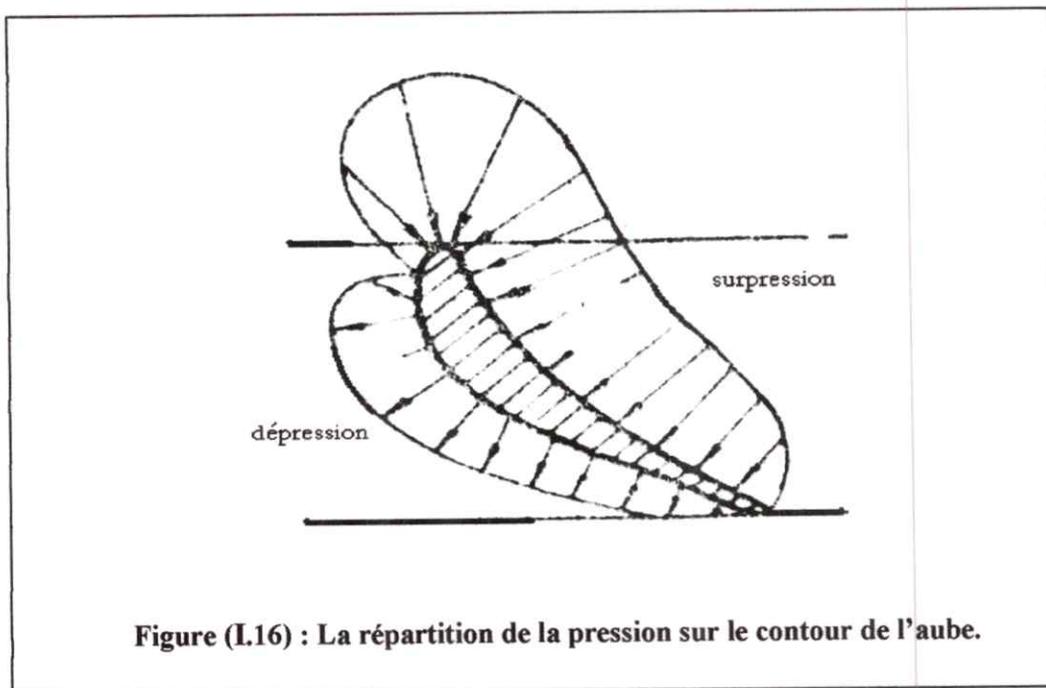


Figure (I.16) : La répartition de la pression sur le contour de l'aube.

A la sortie de l'aubage distributeur, le jet de gaz qui possède une grande vitesse, passe sur les aubes du rotor, lors de l'écoulement des aubes, apparaissent des forces de mécanique des fluides, identiques à la portance de l'aile. La vitesse locale du gaz au niveau de la surface convexe de chaque aube devient plus importante que sur le côté concave. Il en résulte que la pression du gaz sur la surface concave dépasse la pression sur le côté convexe de l'aube Fig. (I.16).

La composante circulaire de la force aérodynamique totale forme le moment de rotation sous l'action duquel se produit la rotation du rotor et la réalisation du travail mécanique. Les turbines permettent d'obtenir de très grandes puissances, un poids faible et un rendement élevé du processus. Ces particularités importantes ont même déterminé le large emploi des turbines dans l'aviation.

I-6-4/ Variation des paramètres du gaz dans les éléments de l'étage turbine

Dans l'aubage distributeur, la pression du gaz diminue de P_1 à P , dans ce cas sa vitesse augmente de V_1 à V . Conformément à la chute de pression, la température du gaz diminue aussi de T_1 à T . Dans le rotor, la pression et la température du gaz continuent de diminuer, respectivement, de P , T à p_2 , t_2 .

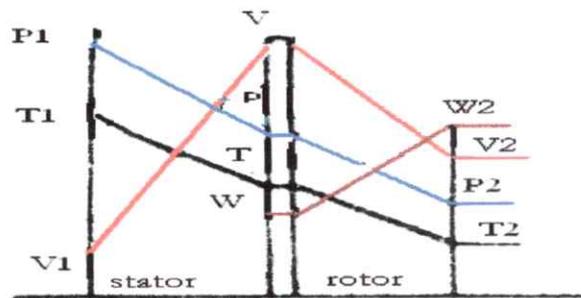


Figure (I.17) : Le graphique de variation des paramètres du gaz dans les éléments de l'étage.

Il en résulte que la vitesse relative du gaz augmente de W à W_2 . La vitesse absolue aussi, en se déplaçant à travers le rotor, diminue, dans ce cas, de V à V_2 suite à la transformation d'une partie de l'énergie cinétique du gaz en travail mécanique au niveau des aubes de la turbine.

I-6-5/ Contraintes supportées par la turbine

Les turbines et en particulier les aubes, sont soumises à des contraintes mécaniques importantes du fait de la force centrifuge et à des très hautes températures. Il est nécessaire de limiter ces contraintes à fin d'éviter les détériorations des aubes. En effet si les contraintes sont très fortes, il peut se produire un allongement de l'aube. Ce phénomène s'appelle le fluage et il est important d'éviter son apparition en fonctionnement.

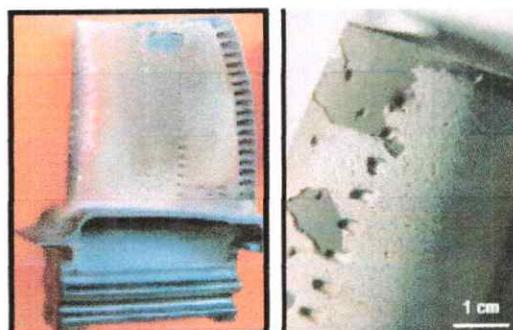
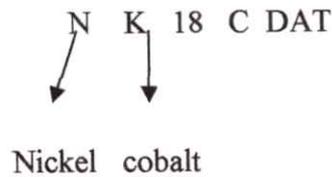


Figure (I.18) : Détériorations des aubes.

Ailettes de turbine :

Exemple :



C=chrome 15 à 20 %

D=molybdène

A=aluminium 3 %

T= titane 3 %

NIMONIC 90

Carbone =0,07 ; Manganèse (Mn=0.3) ; Si =0,3 ; Chrome =19,5 ; Nickel =59 ;

K (cobalt) =16,5 ; Ti =2,45 ; Al =1,45 ; brome et zirconium =0,003 et 0,006.

I-6-7/ Développement actuel

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

$$\eta = 1 - T_f / T_c$$

Où T_f est la température source froide (atmosphère) et T_c est la température source chaude (T_3 sur le moteur). Ce rendement est d'autant plus grand que T_3 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 peut être réalisé 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 :

- NK 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

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

I-6-8/ Refroidissement et matériaux

Afin de garantir une bonne tenue mécanique, les matériaux de la turbine sont de types réfractaires (des alliages à base de chrome, nickel et molybdène), d'autre part une technique de refroidissement est employée sur les aubes stator et rotor afin d'extraire la chaleur emmagasinée dans le matériau par une canalisation interne où circule de l'air. Cette combinaison améliore la tenue mécanique et permet une longévité plus importante de l'aube et un bon potentiel

a) Par transpiration

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

b) Par convection interne

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

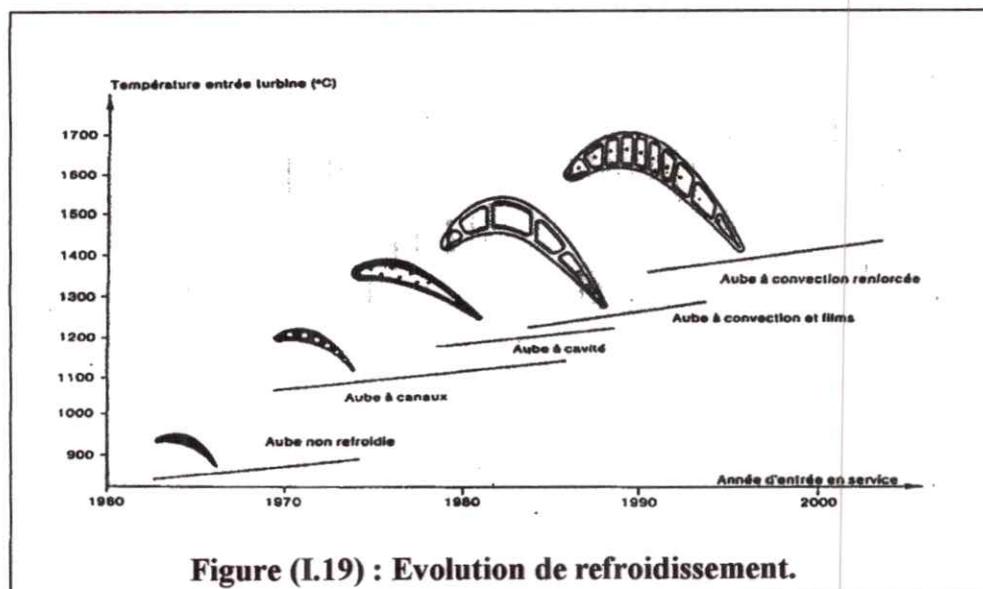


Figure (I.19) : Evolution de refroidissement.

Pour cela différentes techniques sont utilisées :

1) Le chemisage :

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

2) Par cavités :

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

3) Par canaux :

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

I-6-9/ Fixation des aubes

Les aubes reçoivent l'énergie cinétique fournie au flux lors de son passage dans le stator, et la transforme en énergie mécanique de rotation, ces aubes sont constituées :

- D'un pied d'aubage assurant la liaison avec le rotor
- Du corps d'ailettage qui reçoit le flux des gaz
- La tête d'ailette qui généralement est liée aux autres aubages

1- Montage à queue d'aronde

La périphérie du disque est usinée par une rainure en forme de T inversé, le talon de l'aubage est inséré dans la rainure en alternance avec une pièce d'espacement. Pour terminer l'implantation des aubages, une pièce de blocage est rivetée sur le disque.

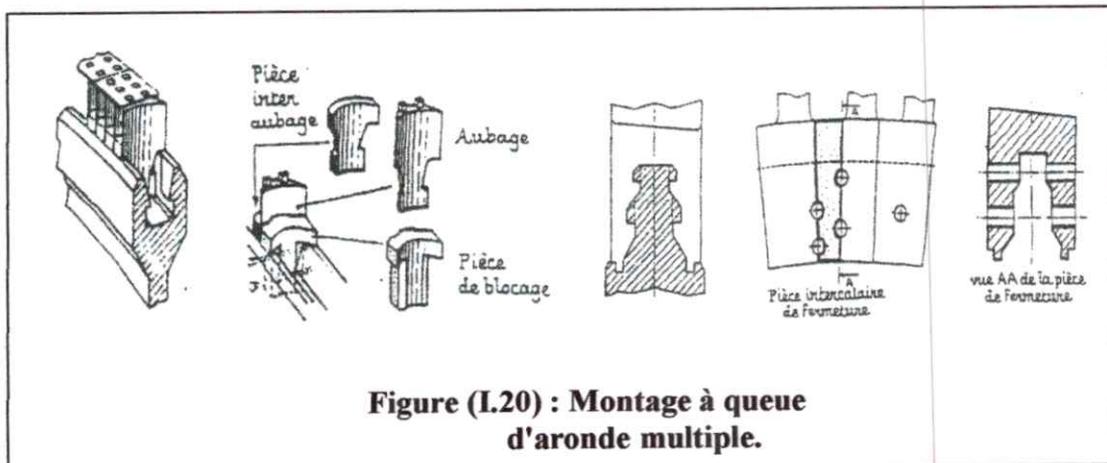


Figure (I.20) : Montage à queue d'aronde multiple.

Les aubages sont liés les uns aux autres par rivetage d'un bandage en tête d'ailette.

2- Montage en pied de sapin

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 donnée.

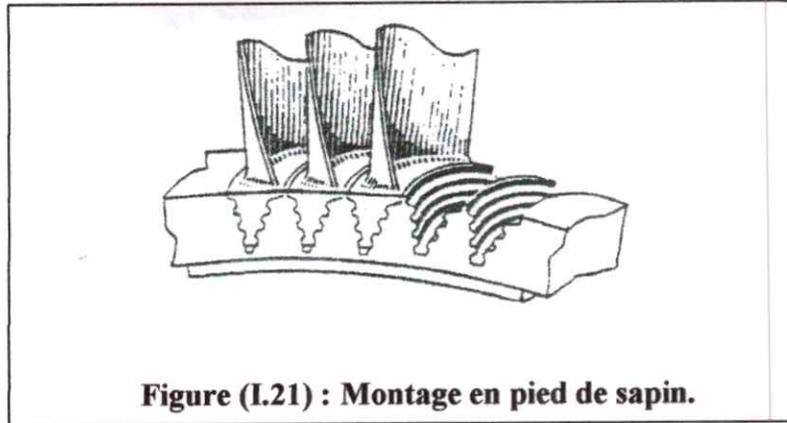


Figure (I.21) : Montage en pied de sapin.

Cette forme est obtenue par une opération de brochage avec un outil de forme arrachant la matière à des passes consécutives afin d'obtenir la forme désirée. Bien entendu, le disque obtenu par procédé de moulage et usinage est doté de la même empreinte que l'aube. Ces opérations sont d'un coût élevé.

1- Liaison par bandage rivé

Pour les aubes stator elles sont donc fixées par unité ou regroupé en paquet de trois et retenue par une virole à leurs extrémités.

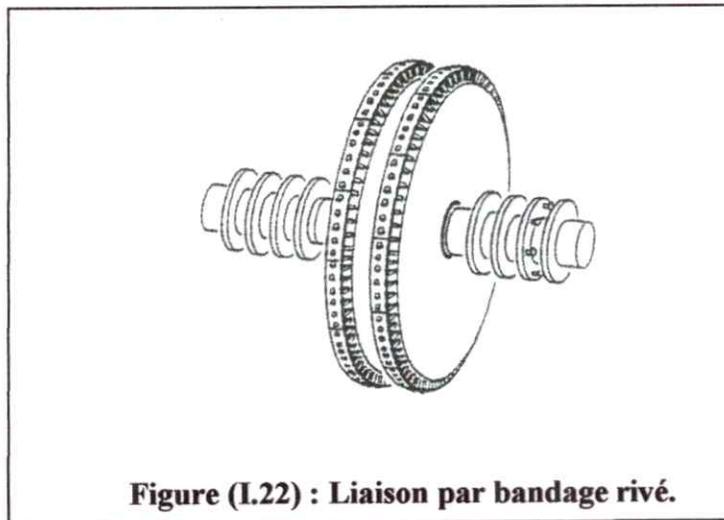


Figure (I.22) : Liaison par bandage rivé.

Fréquemment on solidarise une dizaine d'aubages ensemble à l'aide d'un bandage rivé sur la tête des ailettes.

I-7/Micro turboréacteur

Les petits micros turboréacteurs n'ont jamais cessé d'évoluer depuis le 1er modèle. Ils peuvent fonctionner au gaz, au kérosène, au gasoil et au pétrole (avec tous les carburants). Ils sont très puissants, de 1.6 Kg à 20 Kg de poussée pour certains, niveaux de bruit 72Db, avec de hautes températures entre 580°C à 630°C



Figure (I.23) : Micro turboréacteur.

Dans ce type de turboréacteur le même principe que pour le vrai, mais avec une légère différence. Un compresseur aspire l'air à grande vitesse et le comprime contre les parois, l'air comprimé passe dans la chambre à combustion. Une bougie allume le carburant. Les gaz d'échappement sont éjectés de la chambre à combustion avec une très grande pression.

OXYGENE Comprimé + CARBURANT Comprimé = Grande réaction chimique

I-7-1/Les composants de micro-turboréacteur

Le micro turbo réacteur se compose de même module que le turboréacteur avec des organes réduit.

Le diffuseur d'air, cette pièce en aluminium est entièrement taillée dans la masse, c'est l'exemple même d'une pièce complexe à réaliser.



Figure (I.24) : Diffuseur d'air.

Le rotor est moulé en inconel (acier très dur résistant aux très hautes températures et aux contraintes extrêmes).



Figure (I.25) : roue turbine.

Axe du micro-réacteur est réalisé dans un acier très particulier résistant à des efforts énormes en torsion et entièrement rectifié après avoir été trempé.

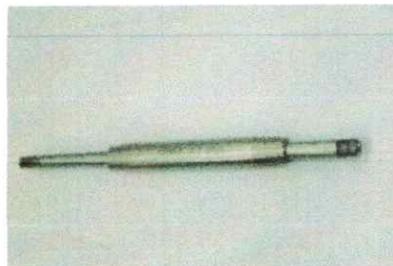


Figure (I.26) : Arbre.

La chambre de combustion est toute en acier inoxydable, dans la chambre la température peut être supérieure à 1500° . Tous les tubes d'injection et les injecteurs sont en acier inoxydable car soumis à des températures avoisinant les 1000° .



Figure (I.27) : La chambre de combustion.

I-7-2/Domaine d'application du micro-turboréacteur

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

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

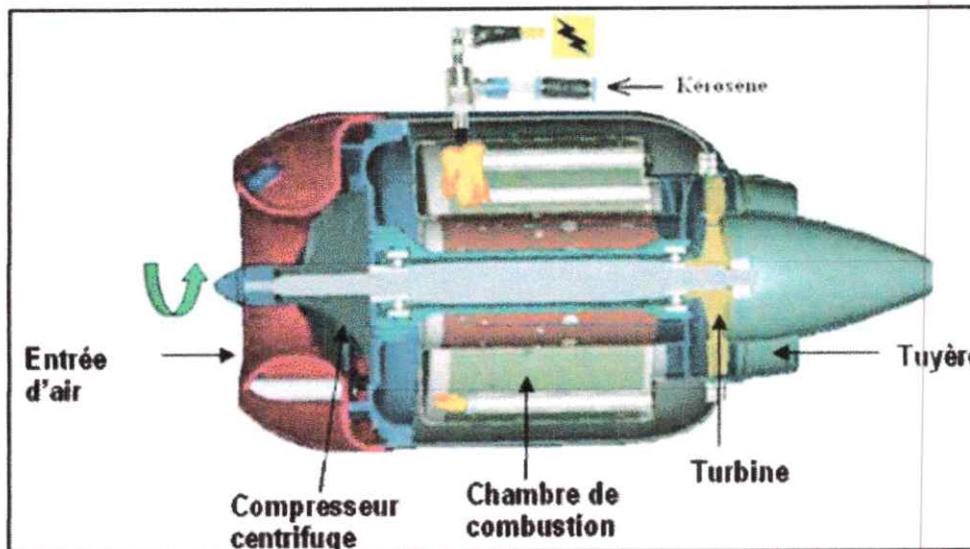


Figure (I.28): Coupe annotée d'un micro-turboréacteur.

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

Les utilisations les plus connues sont :

a) Le drone

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



Figure (I.29): Drone en vol.

b) Les miniatures

La principale exigence des miniatures est une exigence de volume à laquelle répond parfaitement le micro-turboréacteur.



Figure (I.30): Avion miniature avec son micro-turboréacteur.

c) Le missile

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

L'illustration qui suit expose quelques missiles avec leurs différents micro-turboréacteur.

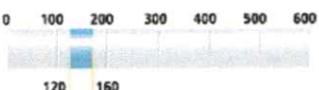
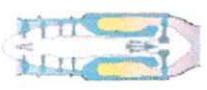
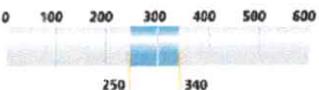
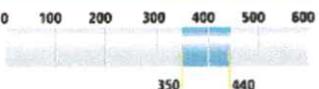
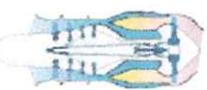
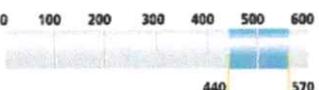
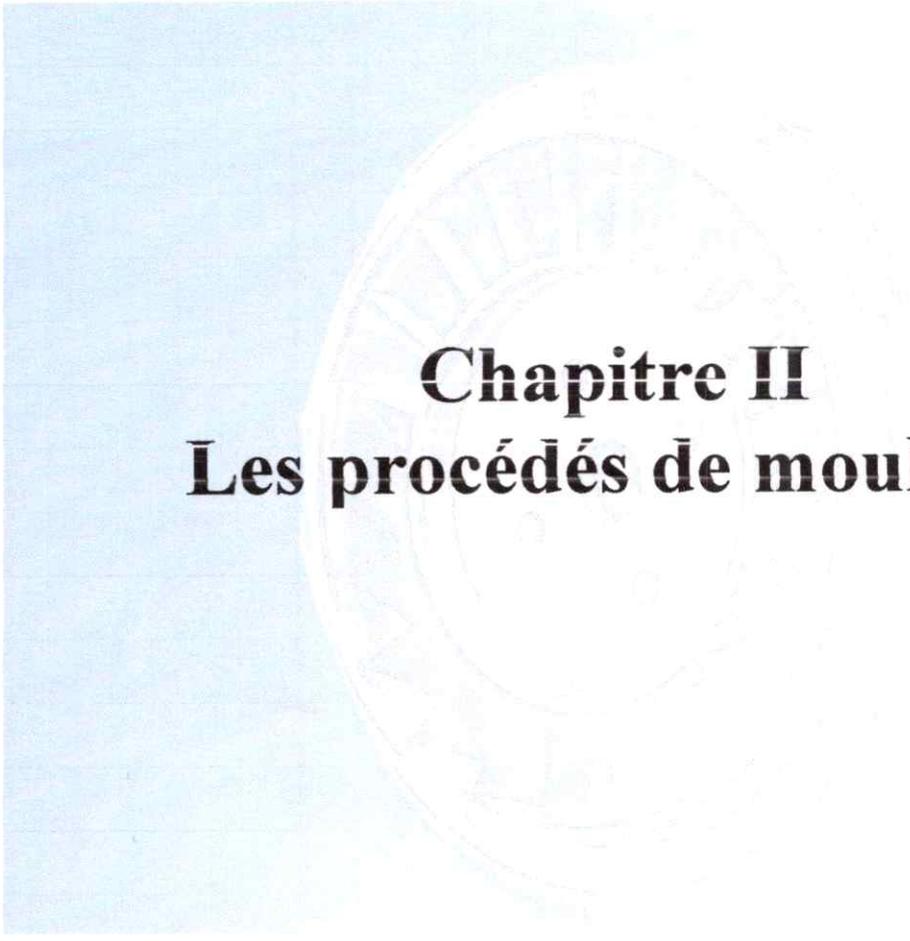
Model	Architecture	Thrust (daN)	Main Application
 TRS 18-1	 Centrifugal Compressor	 120 160 120 to 160 daN / 270 to 360 lbt	 Mirach 100-5 Target drone - Galileo Avionica
 TRI 40	 4 stage-axial compressor	 250 340 250 to 340 daN / 560 to 750 lbt	 NSM anti-ship Missile - KDA / MBDA
 TRI 60-5	 3 stage-axial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

Figure (1.31) : Différent types de micro-turboréacteur avec les missiles qu'ils équipent.

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



Chapitre II

Les procédés de moulage

II-1/Introduction

L'industrie aéronautique utilise des pièces en acier moulé, notamment pour les pièces de sécurité présentes dans les trains d'atterrissage ainsi que les aubes de turbines de réacteurs qui sont élaborées dans des alliages à base de nickel et sont coulées avec une structure monocristalline suivant le procédé de la cire perdue.

II-2/le moulage

Le moulage est l'action de prendre une empreinte qui servira ensuite de moule dans lequel sera versé un matériau et qui permettra le tirage ou la production en plusieurs exemplaires d'un modèle. Mais il ne suffit pas simplement de choisir un produit, d'en recouvrir le modèle et d'attendre que cela durcisse pour réaliser un moule.

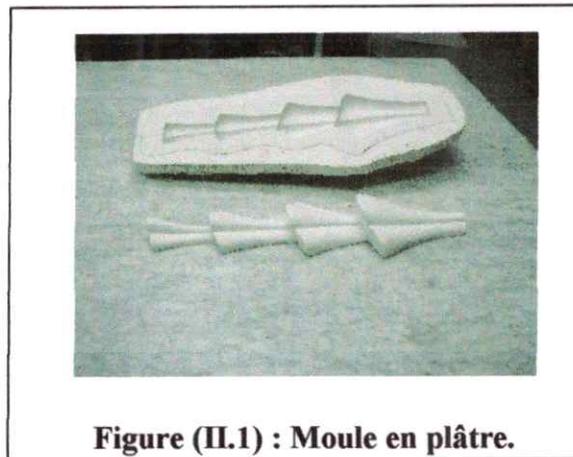


Figure (II.1) : Moule en plâtre.

Avant toute opération il faut étudier minutieusement les formes, en sentir les moindres détails. Avec un peu d'expérience, cette observation attentive du modèle alliée à un peu de pratique permet de déterminer le choix de la technique, et des produits à utiliser.

II-3/Le modèle

Réaliser en bois, résine, métal c'est la réplique exacte des pièces à obtenir. Les démontions de la pièce sont augmentées de la valeur du retrait dû à la contraction du métal ou cour de refroidissement. Sert obtenir une empreinte dans le sable ayons les formes et démontions du modèle cette empreinte est ensuite remplie de métal qui on solidifiant conserve les même forme (pièce).

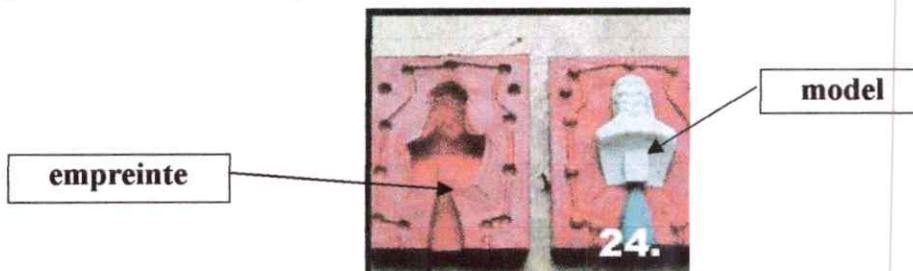


Figure (II.2) : Le model et son empreinte.

II-4/Le moule

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



Figure (II.3) : Moule métallique.

II-4-1/Les événements

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

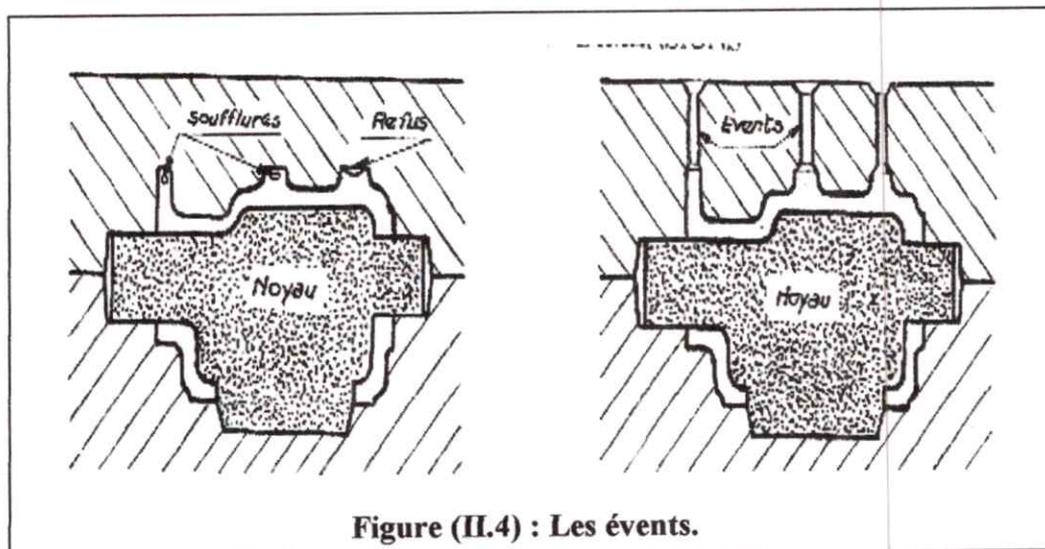


Figure (II.4) : Les événements.

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

II-4-2/Emplacement des évents

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

Les points hauts: Seront tout particulièrement surveillés, brides, bossages, nervures, parties de pièces en saillie. Suivant le cas, on placera des évents directs, borgnes, à jour, à talon ou assis sur les portées de noyau.

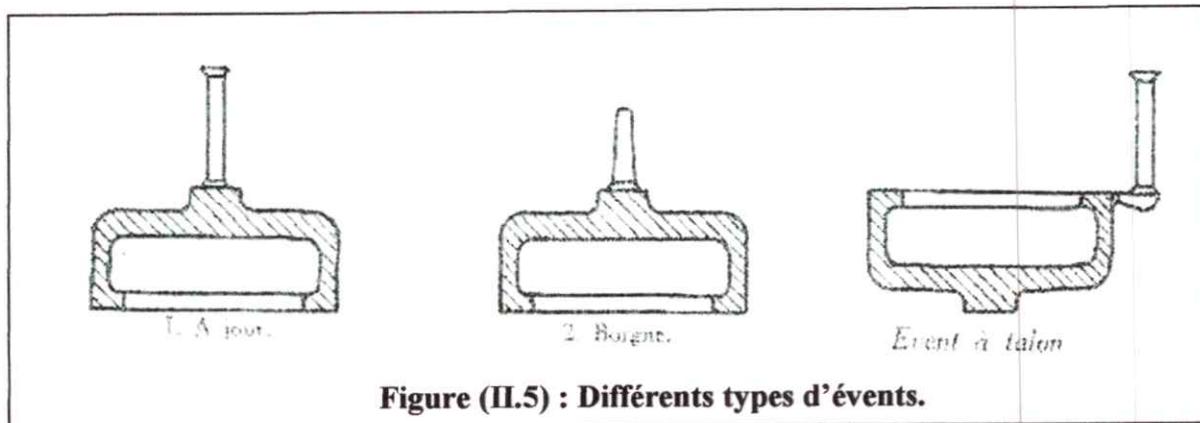


Figure (II.5) : Différents types d'évents.

Les fonds d'empreinte: Eloignés de la coulée, dans laquelle un matelas d'air a pu se créer, ils seront ventilés au moyen d'évents plants, de tirettes ou de bavures s'il s'agit de pièce minces et de profils tourmentés.

II-4-3/Différentes parties d'une coulée

Le mot coulée désigne, l'opération qui consiste à remplir de métal liquide les moules prêts à être coulés. Elle comprend également l'ensemble des travaux, manœuvres et opérations de transport du métal en fusion, depuis les fours jusqu'au remplissage des moules. Le transport du métal liquide s'effectue :

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

1-Entonnoir

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

L'entonnoir est taillé comme le montre la figure (II.6) pas profond et doit répondre à un angle pas trop aigu, car en réalité il entrainera le métal et le fera tourbillonner ce qui favorise la

formation de bulle d'air par aspiration. Les dimensions sont normalisées et sont de l'ordre de 60 mm avec un angle variant de [20°-30°].

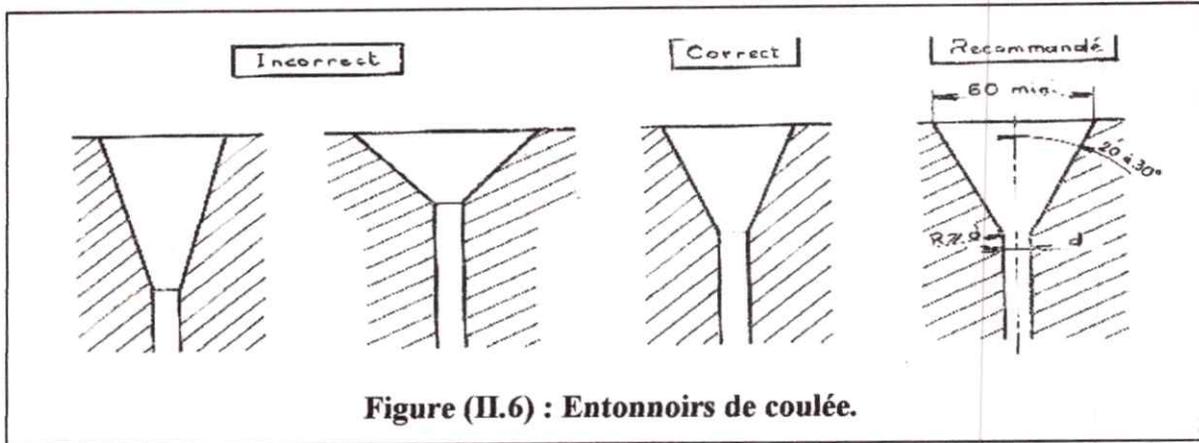


Figure (II.6) : Entonnoirs de coulée.

2-Jets de coulée (descentes)

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

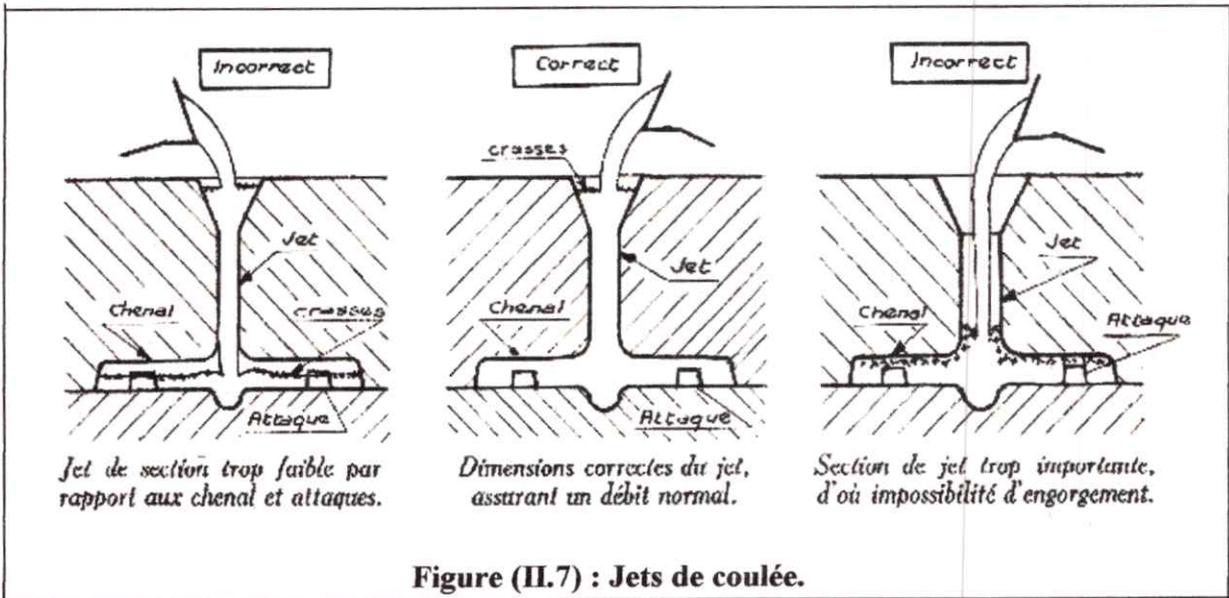
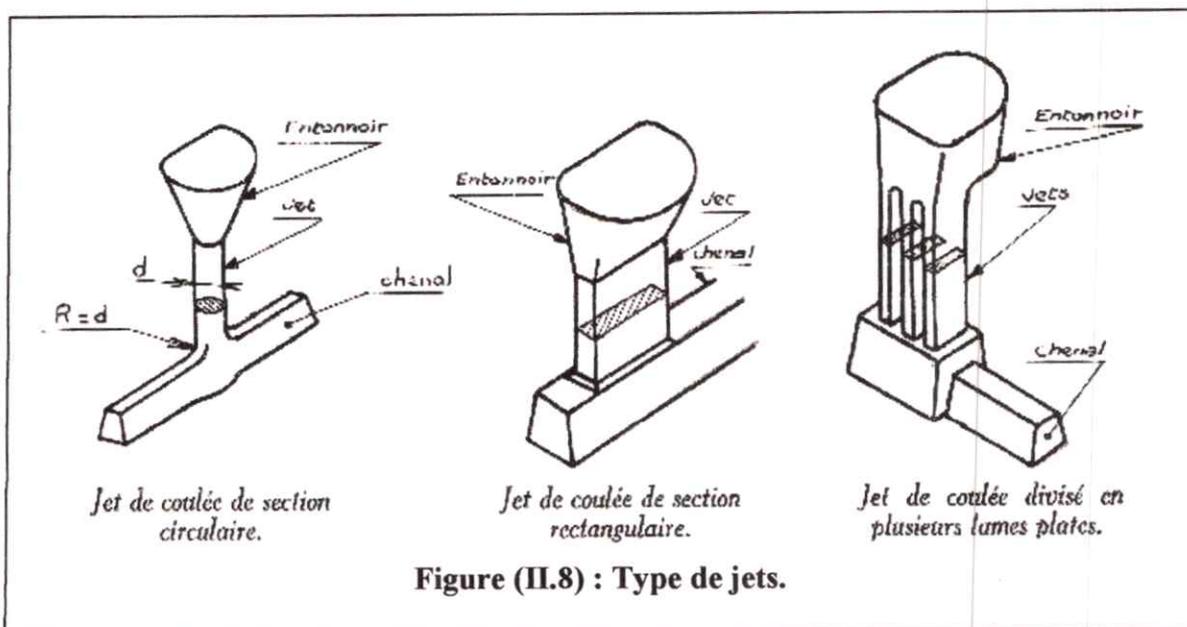


Figure (II.7) : Jets de coulée.

Une trop grande vitesse de l'alliage coulée produirait fatalement une érosion des parois du jet. Il faut éviter les sections de jets trop importantes ou trop faibles par rapport aux chenal et attaques. En fonte, les vitesses admises varient de 0.40m à 0.80m à la seconde pour la coulée en sable vert.

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



Dans la figure (II.8) on remarque 3 différents types de jets employés dans la fonderie :

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

Pour établir le tracé des jets de coulée il faut :

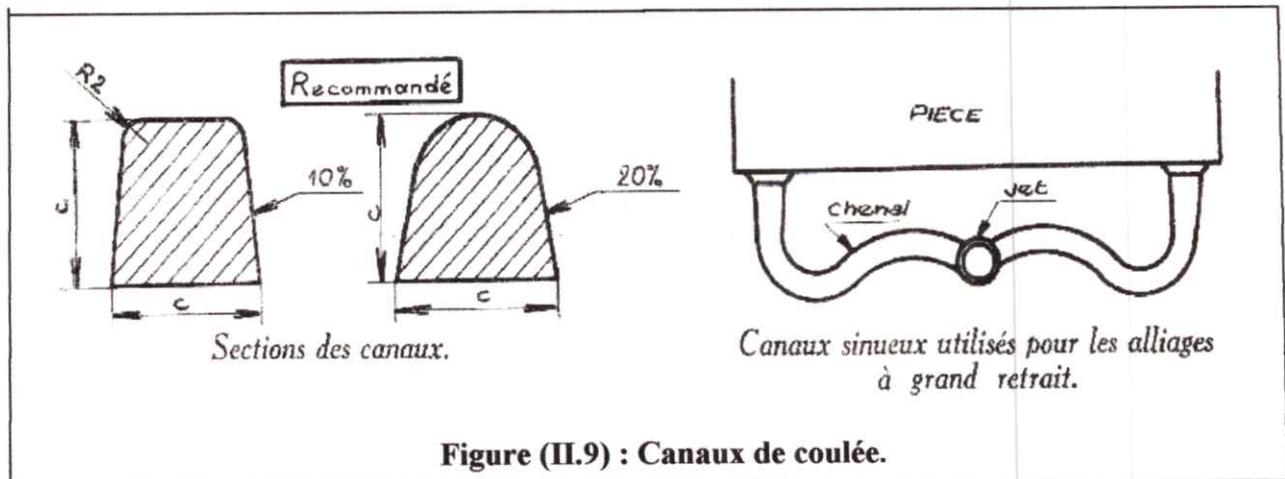
- Donner un remplissage correct de l'empreinte.
- Faciliter l'engorgement de la coulée.
- Assurer la retenue des crasses.
- Éviter les érosions et les chocs dans le fond du moule, sur les attaques ou dans le cul d'œuf.

3-Canaux de coulée

Pour relier les jets de descente aux attaques qui répartissent le métal dans l'empreinte, on tracera des canaux de coulée dans les plans de joint. Ces canaux pouvant également être réservés dans le sable, quelle que soit la méthode employée, ces canaux devront :

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

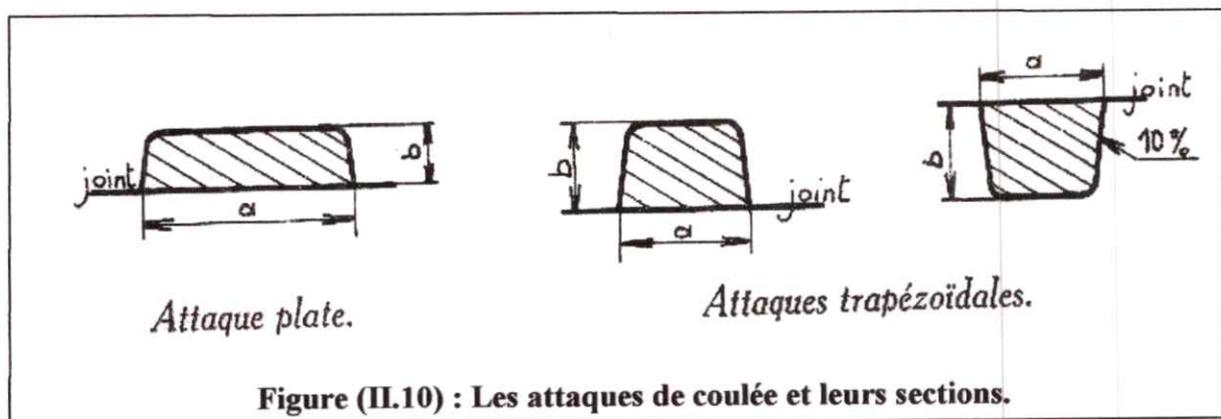
Les canaux de coulée, comme tout ce qui conduit le métal au moule, doivent être d'une parfaite propreté, sans fausse serre, et passés à l'enduit ou à la couche, comme le reste du moule.



4-Attaques de coulée

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

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



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

5-Exemples de dispositifs de coulée

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

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

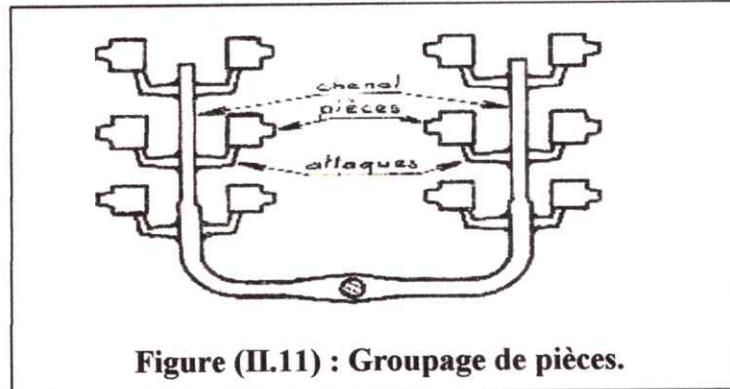


Figure (II.11) : Groupage de pièces.

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

II-5/Moulage en moule permanent

Sont des moules métalliques, réalisés en fonte ou en acier selon le procédé de fonderie retenu. Ces procédés se différencient notamment par le mode d'introduction de l'alliage liquide dans le moule. L'alliage peut être versé dans le moule (coquille ici) ou sous base pression dans un moule ferme (on peut aussi effectuer une centrifugation). Il peut aussi être introduit sous haute pression dans un moule fermé par de grosse presse.

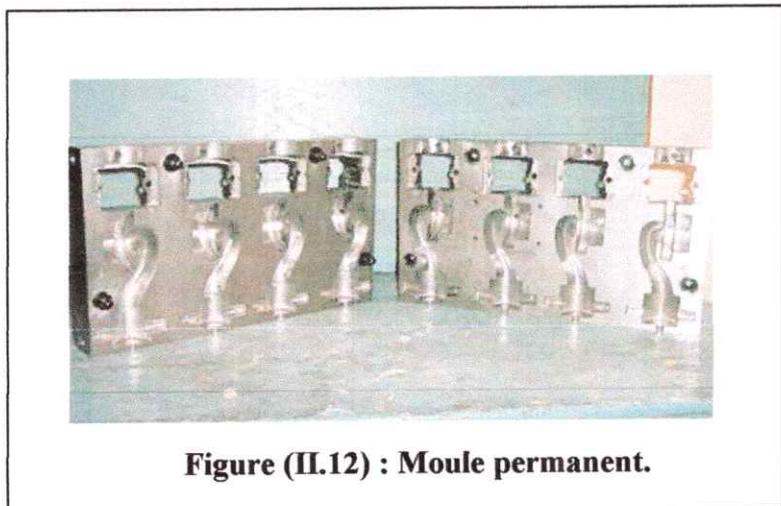


Figure (II.12) : Moule permanent.

D'autre part, la répétitivité des opérations fondamentales que sont le remplissage, l'alimentation et l'éjection impose des contraintes techniques particulières pour la conception et la mise en œuvre des moules.

La technique de moulage en moule permanent regroupe plusieurs procédés qui dépendent essentiellement du système de remplissage :

a) coulée par gravité ou coquille gravité :

Après réalisation d'une empreinte en creux en deux parties de la pièce à obtenir, on coule le métal porté à l'état liquide par simple gravité. Après solidification de l'alliage, la pièce est extraite du moule puis débarrassée des appendices nécessaires à la coulée

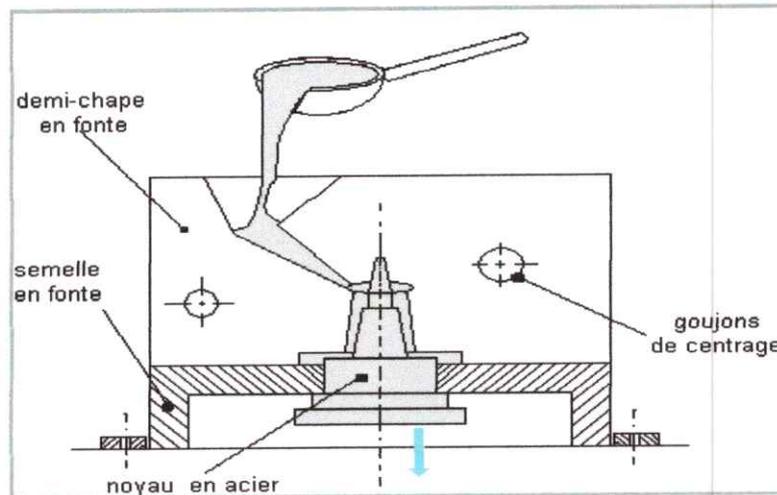


Figure (II.13) : Coulée par gravité.

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.

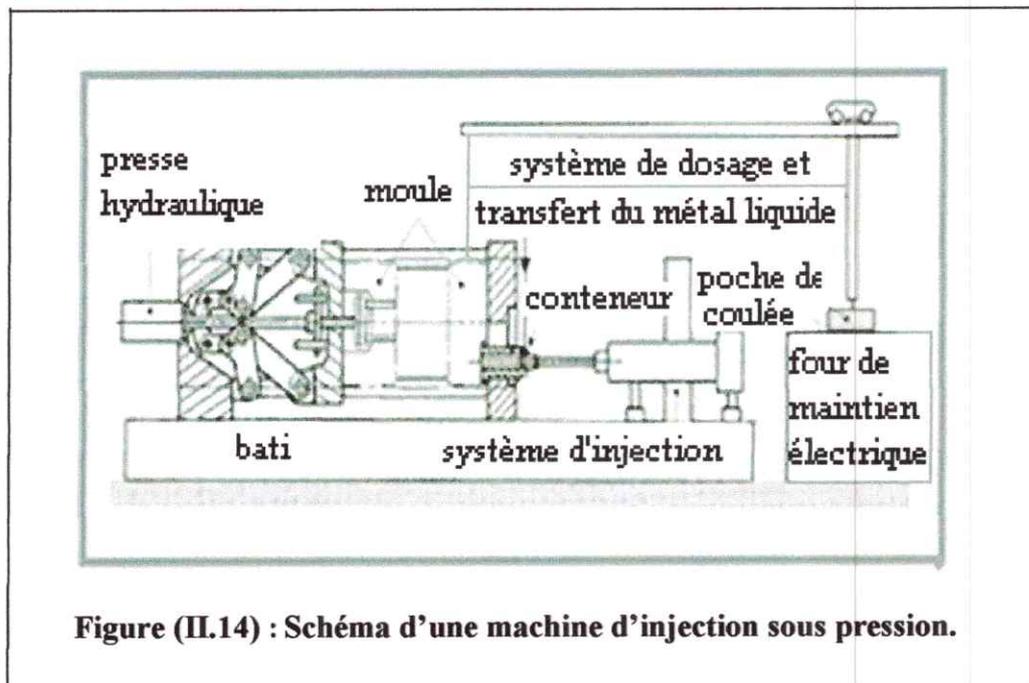
b) Moulage sous pression

Le procédé de moulage sous pression est utilisé lors du traitement d'alliage léger d'aluminium et de magnésium. La coulée est pressée à grande vitesse à l'aide d'un piston d'injection dans un moule d'acier, dans lequel l'alliage durcit en quelques secondes. En raison des courtes périodes de remplissage des moules, il est entre autres possibles de fabriquer des éléments de construction de grande surfaces avec une épaisseur de parois inférieure à 3 mm.

Le moulage sous pression à vide permet de fabriquer des pièces de construction de sécurité pour les éléments de châssis, structures et carrosseries qui puissent subir un traitement thermique et être soudées.

• Étapes du procédé

- Le moule est fermé. Le métal liquide est dosé dans le compartiment de coulée.
- Le piston d'injection entraîne lentement la coulée jusqu'à la cavité du moule. En cas de moulage sous pression à vide, le moule est fait dans la cavité.
- Le remplissage de la cavité du moule s'effectue en fractions de secondes.
- La coulée durcit sous la pression.
- Le moule s'ouvre et la pièce de fonderie en sort.
- Le moule est nettoyé et on applique un produit séparateur.
- La machine à mouler sous pression peut être utilisée pour un nouveau cycle.



II-6/Moulage en moule non permanent

Dans les techniques de moulage en moule non permanent, il faut fabriquer un moule pour chaque pièce ou grappe de pièce. Il n'y a pas pérennité de l'empreinte de la pièce car le moule est détruit pour extraire la pièce après solidification et refroidissement de l'alliage (décochage de la pièce). La technique de moulage en moule non permanent regroupe plusieurs méthodes qui dépendent la constitution de moule.

II-6-1/Le moule déformable (sable à vert) :

C'est le procédé le plus couramment utilisé, il est économique et aussi il est utilisé pour la coulée des pièces unitaires.

a) Le moulage manuel :

Utilisé pour des pièces unitaires ou de très petites séries, le moulage étant avec modèle ou sans modèle (troussage,...). La méthode consiste simplement à tasser le sable autour du modèle puis d'enlever ce dernier avant de couler l'alliage.



Figure (II.15) : Moulage manuel.

b) Le moulage mécanique :

Utilisé pour des pièces de petite à la très grande série. Le sable est serré mécaniquement contre la plaque-modèle selon plusieurs techniques : projection, vibration, pressage ou soufflage. Selon l'intensité de serrage du sable, le moule est réalisé par :

c) Serrage basse pression :

Le moule est plastique, et présente un faible gêne au retrait pour la pièce solidifiée dans le moule. Ce type de serrage est employé pour des alliages ayant un important retrait ou pour des alliages ou des tracés de pièces susceptibles de présenter des criques, Les modes de serrage sont les suivant :

- Par pression :

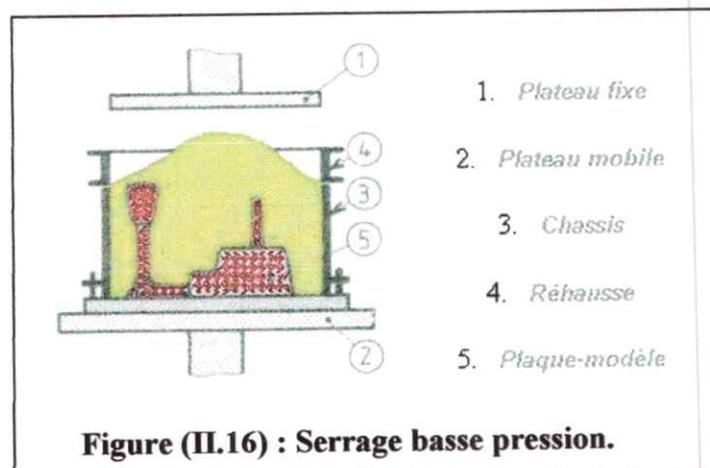
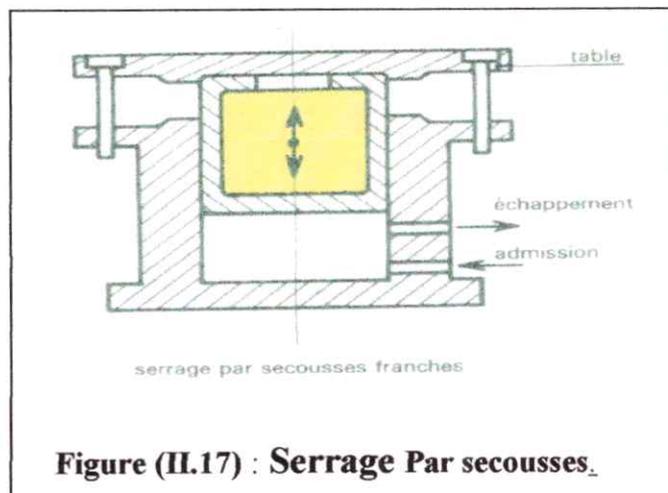


Figure (II.16) : Serrage basse pression.

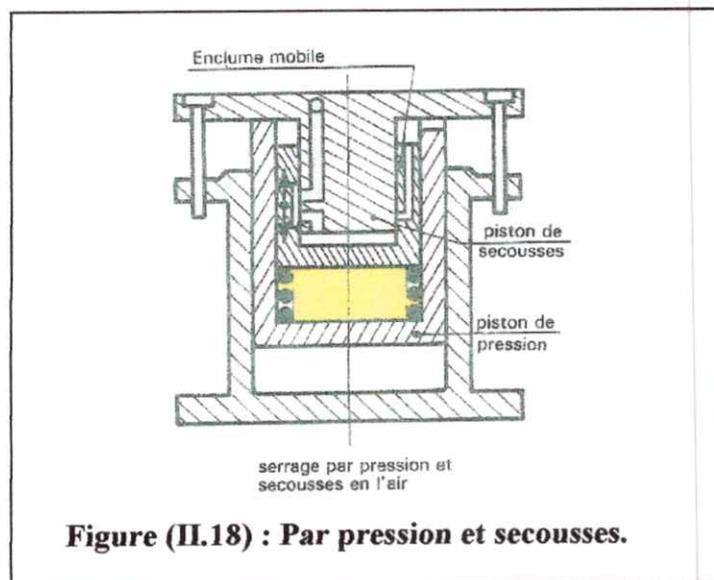
Le sable est serré entre la plaque modèle et un plateau. C'est soit le plateau, soit la plaque modèle qui se déplace. Afin que les efforts de compression soient uniformément répartis dans la masse de sable, il ne faut utiliser ce mode de serrage que pour des pièces au relief peu accentué.

- **Par secousses :**



Serré par inertie, le sable s'écoule mieux. Les secousses peuvent avoir jusqu'à 20 mm d'amplitude à des fréquences de 350 coups/minute. La secousse peut être franche (la table retombe sur une masse fixe), ou en l'air (la masse sur laquelle retombe la table est montée sur ressorts).

- **Par pression et secousses :**



Les deux modes précédents sont associés impliquant une complémentarité de leurs qualités. Pression et secousses peuvent être simultanées ou successives.

II-6-2/Le moule rigide (sable aggloméré) :

L'agglomération des grains de sable se fait avec des liants dont le durcissement est obtenu par une réaction chimique. Selon la nature des produits la réaction chimique se fait à température ambiante (prise à froid) ou sous l'effet de la chaleur (prise à chaud).

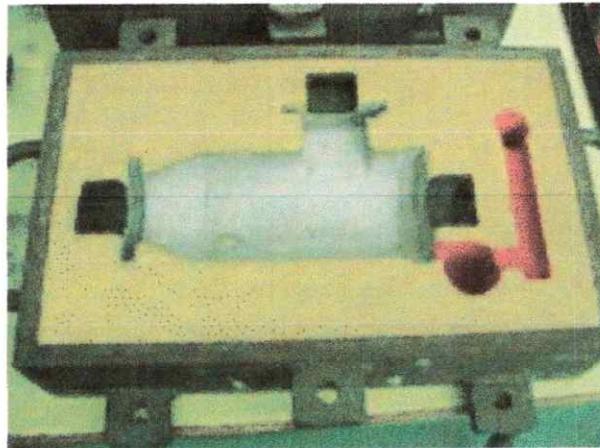


Figure (II.19) : Moule rigide.

La réaction chimique de durcissement se fait au contact de l'outillage (modèle, plaque-modèle, boîte à noyau...). Les produits mélangés au sable donnant un durcissement à froid donnent un sable auto-durcissant.

II-7-1/Le moulage a la cire perdue

Le procédé cire perdue consiste à réaliser un moule céramique (carapace) autour d'une pièce modèle généralement en cire. Cette carapace, vidée de la pièce modèle, est remplie de métal liquide. Lorsque le métal est solidifié, la carapace est détruite pour obtenir la pièce métallique.

Ce procédé permet ainsi de mouler des pièces pour lesquelles la réalisation d'un moule permanent pour la fonderie serait très complexe et donc coûteuse. Procédé de précision, les caractéristiques dimensionnelles des pièces, mais surtout d'état de surface sont supérieures aux autres procédés de fonderie.

Le procédé "cire perdue" comprend différentes opérations :

1- Obtention d'un modèle non – permanent

Le modèle non permanent, en cire ou en résine, est une image de la pièce souhaitée en métal. Elle doit donc répondre aux exigences demandées par les techniques de fonderie pour un remplissage et un refroidissement corrects de la pièce (ex: rayons de raccordements importants).

Le modèle représente le volume utilisé par le métal à l'état liquide. Lors du refroidissement de ce métal, la pièce métallique va se rétracter et donc perdre du volume. La pièce métallique sera donc "plus petite" que le modèle en cire. C'est pourquoi, le modèle non permanent a toujours des dimensions supérieures à la pièce à réaliser.

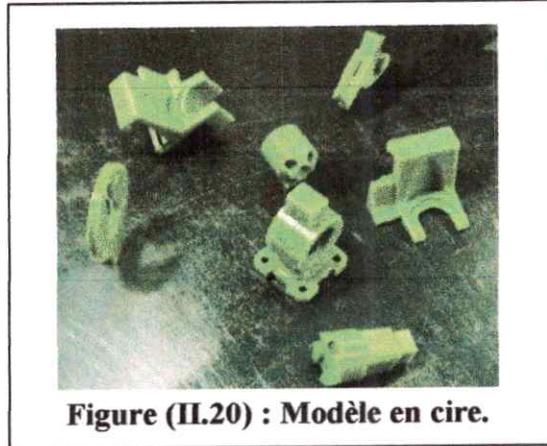


Figure (II.20) : Modèle en cire.

2- Création d'un arbre en cire

Suite à l'obtention de modèles non permanents, un arbre en cire est réalisé. Cette opération consiste à coller les pièces en cire sur des barreaux également en cire. Cet assemblage représente le volume à remplir avec le métal liquide. Il doit donc comporter :

- Un entonnoir (ou godet) de coulé permettant d'avoir une large ouverture pour l'arrivée du métal liquide
- Un système d'alimentation permettant un remplissage correct des pièces
- Attaques de coulée adaptées à la pièce (attaques dans les parties massives...), pour obtenir un refroidissement correct de la pièce

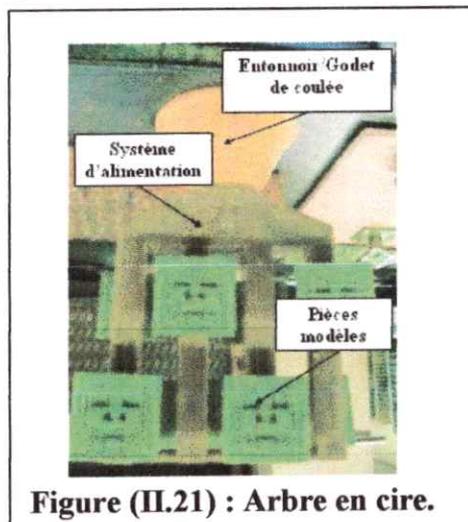


Figure (II.21) : Arbre en cire.

La réalisation des pièces et des arbres en cire peut nécessiter un dégraissage de la pièce.

3- Enrobage Céramique

L'enrobage céramique consiste à déposer sur l'arbre en cire une succession de couches de céramique. On parle alors de carapace céramique.

Après retrait de la cire (décirage), on obtiendra à l'intérieur de la carapace un volume en négatif de l'arbre en cire, d'une épaisseur d'environ 1cm, elle devra résister à la coulée du métal liquide l'enrobage se fait en deux étapes :



Figure (II.22) : Enrobage de modèle.

-Enrobage céramique manuel : La première opération de l'enrobage est souvent manuelle. Elle consiste à déposer la première couche de céramique. L'arbre en cire est plongé dans un bain que l'on appelle barbotine, puis est saupoudré de fines particules de sable réfractaire. C'est cette première couche, en contact avec la pièce cire qui permettra une bonne réplique des détails et un bon état de surface.

-Enrobage céramique automatisé : Le dépôt des autres couches (5 à 7) est lui automatisé. L'opération est similaire à l'enrobage manuel, mais les particules de sable réfractaire sont ici beaucoup plus grosses. En effet, seule la première couche est en contact avec la pièce cire, et c'est donc elle seule qui doit enrober fidèlement la pièce.

4- Séchage

Suite à l'enrobage, une période de séchage est nécessaire pour que la céramique commence à se solidifier. Cette solidification sera achevée par une cuisson avant la coulée. La première période de séchage varie de 1 à 3 jours selon la taille et la forme de la pièce.

5- Décirage

Le décirage consiste à retirer la cire de la carapace céramique. En fin de décirage, nous obtiendrons donc une carapace creuse ayant la forme de l'arbre en cire en négatif. Des précautions sont nécessaires pour éviter un éclatement de la céramique lors du décirage ou lors de la coulée.

6- Mise en étuve

L'autoclave utilise dans son fonctionnement de la vapeur d'eau. A leur sortie, les carapaces sont imprégnées d'eau qu'il faut alors retirer. La mise en étuve (environ 3 heures) permet de sécher complètement la céramique. La carapace sera alors perméable à l'air. Cette propriété est primordiale pour l'évacuation des vapeurs de cire lors de la cuisson de la céramique.



Figure (II.23) : Etuve.

7- Recyclage de la cire

La cire issue des carapaces ne peut pas être utilisée pour la réalisation de modèle. En effet les caractéristiques de retrait et d'injection de la cire doivent être parfaitement connus, d'où l'utilisation de cire neuve ayant toujours les mêmes propriétés. En revanche, cette cire peut être utilisée pour la réalisation des arbres "porte modèles".

8- Cuisson de la céramique - mise en température

Avant l'opération de coulée métallique, il est nécessaire de cuire la carapace céramique. Cette opération a trois objectifs:

- Eliminer les résidus de cire
- Cuisson de la céramique (durcissement).
- Mise de la carapace à une température proche de celle du métal en fusion à couler, afin d'éviter des chocs thermiques pour éviter l'éclatement.

9- Coulée métallique

La coulée métallique est la phase où le métal liquide est versé dans la carapace vide. On obtient ainsi une réplique métallique de l'arbre en cire réalisé précédemment. Afin d'éviter l'éclatement de la carapace, celle-ci doit être chauffée à une température proche de celle du métal en fusion. Diverses méthodes existent pour réaliser cette opération:

- Par renversement : le moule est lié au creuset contenant le laitier (métal fondu).



Figure (II.24) : Coulée du métal dans le moule.

10- Refroidissement

Lors du refroidissement, le métal se solidifie. Cette phase, si elle n'est pas maîtrisée, peut provoquer des fissures ou des criques sur la pièce.

Pour éviter cela, la conception même du système d'alimentation est importante. Il faut en effet que la zone d'alimentation du métal se solidifie en dernier afin de continuer à alimenter la pièce lors du retrait.

11- Décochage

Le décochage consiste à retirer la céramique de la pièce métallique. Pour cela, diverses méthodes peuvent être utilisées:

- **Décochage par vibrations:** Le décochage par vibrations (présenté sur la vidéo ci-dessous) est le plus utilisé, du fait de sa grande rapidité de mise en œuvre. Mais il est surtout dédié aux pièces peu fragiles.
- **Décochage par jet d'eau :** Le décochage par jet d'eau est plutôt dédié au décochage de pièces fragiles (pièces fines, en aluminium...).

II-7-2/Pièces moulées par le procédé à la cire perdue

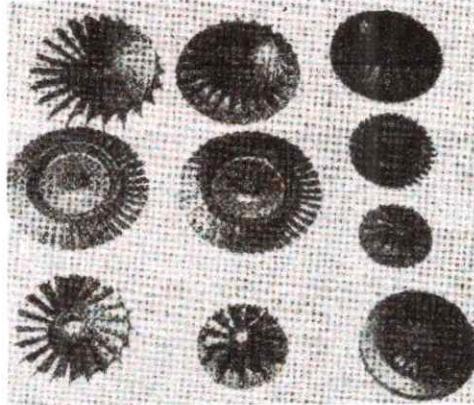


Figure (II -25) : Pièces de turbine obtenues par moulage de précision à la cire perdue.

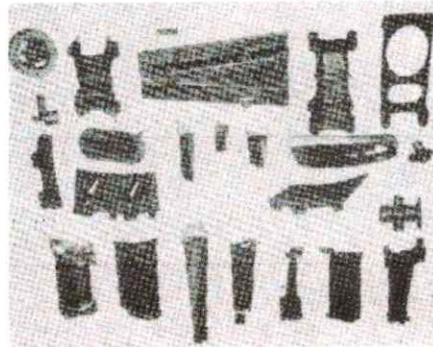


Figure (II -26) : Pièces pour l'aéronautique obtenues par moulage de précision à la cire perdue.

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

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

II-8/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.

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 à 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)).

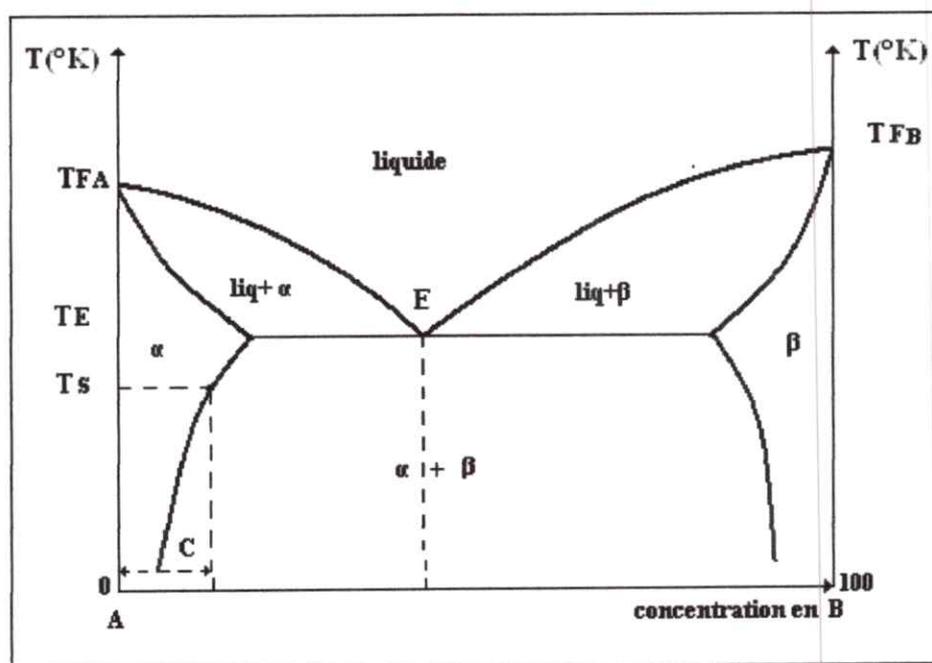


Figure (II.27) : Diagramme d'équilibre de phases simplifiées d'un alliage binaire.

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

α : Solution solide riche en métal A et de même système cristallin que A.

β : Solution solide riche en métal B et de même système cristallin que B.

Apparaît aussi une zone intermédiaire entre α et β ; 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 TFA et TFB 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.

- **Les fontes :**

Issues directement du traitement du minerai de fer dans le haut fourneau, les fontes présente souvent un prix de revient relativement faible, donc très intéressant si le poids n'est pas un inconvénient (masse volumique 7.2 Kg/dm³)

La diversité des fontes permet souvent de répondre a nombre de sollicitations, elles sont donc très utilisées.

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 durcissant peuvent favorablement être envisagés.

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 (7,8Kg/dm³).

- **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.

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 contiennent 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.

• Les alliages de magnésium

Ces alliages ont connu un essor dans les années 1960 mais leur coût limitait leur utilisation, 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 Kg/dm³) tend à favoriser l'allègement des véhicules.

• Les alliages de cuivre

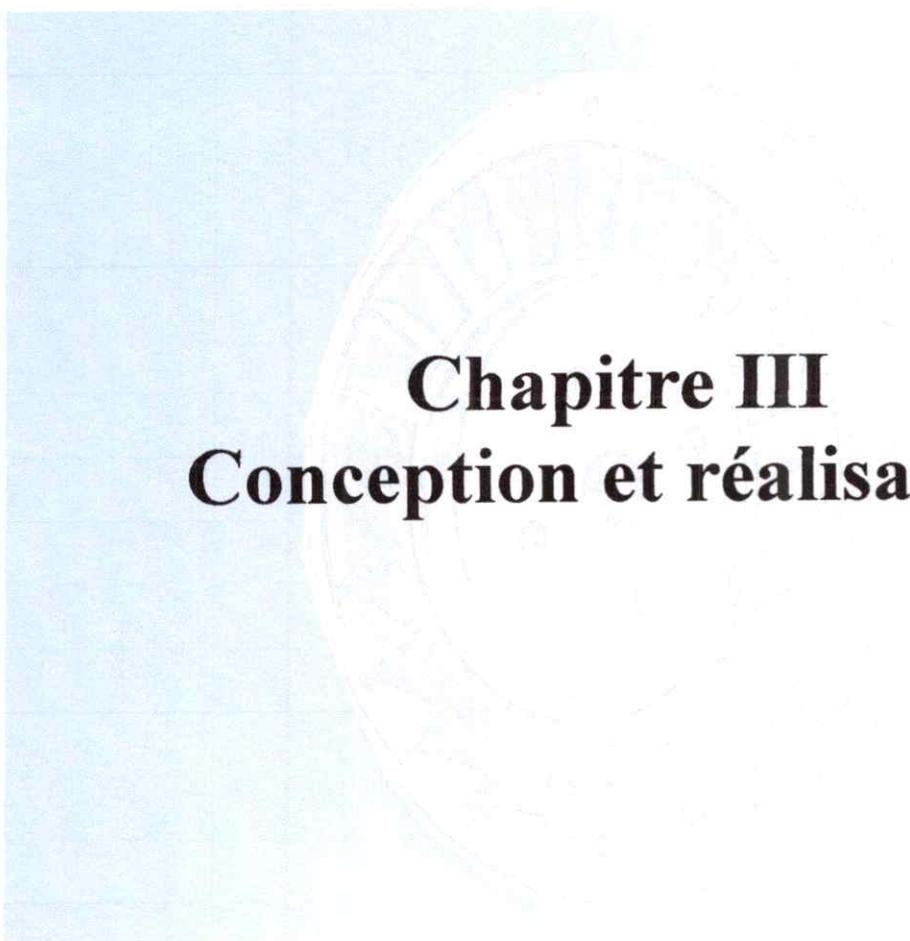
Le cuivre et ses alliages sont utilisés depuis la plus haute antiquité. Il présente de nombreuses qualités :

- 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.

• 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 coulée sous pression, leur masse volumique est relativement élevée (6,6Kg/dm³).



Chapitre III
Conception et réalisation

III-1/Introduction :

Le travail que l'on va exposer présente les différentes étapes de l'exécution des deux stators pour deux turbines " libre et liée " qui sont prévus pour un micro-turbopropulseur, ces turbines sont de type axial, leur rôle est de transformer l'énergie calorifique en énergie mécanique pour entraîner une hélice.

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 :

Le dimensionnement de micro-turbopropulseur et déterminer pour un point de fonctionnement bien déterminé en fonction des critères de performance « poussée, poussée spécifique, et consommation spécifique... » .

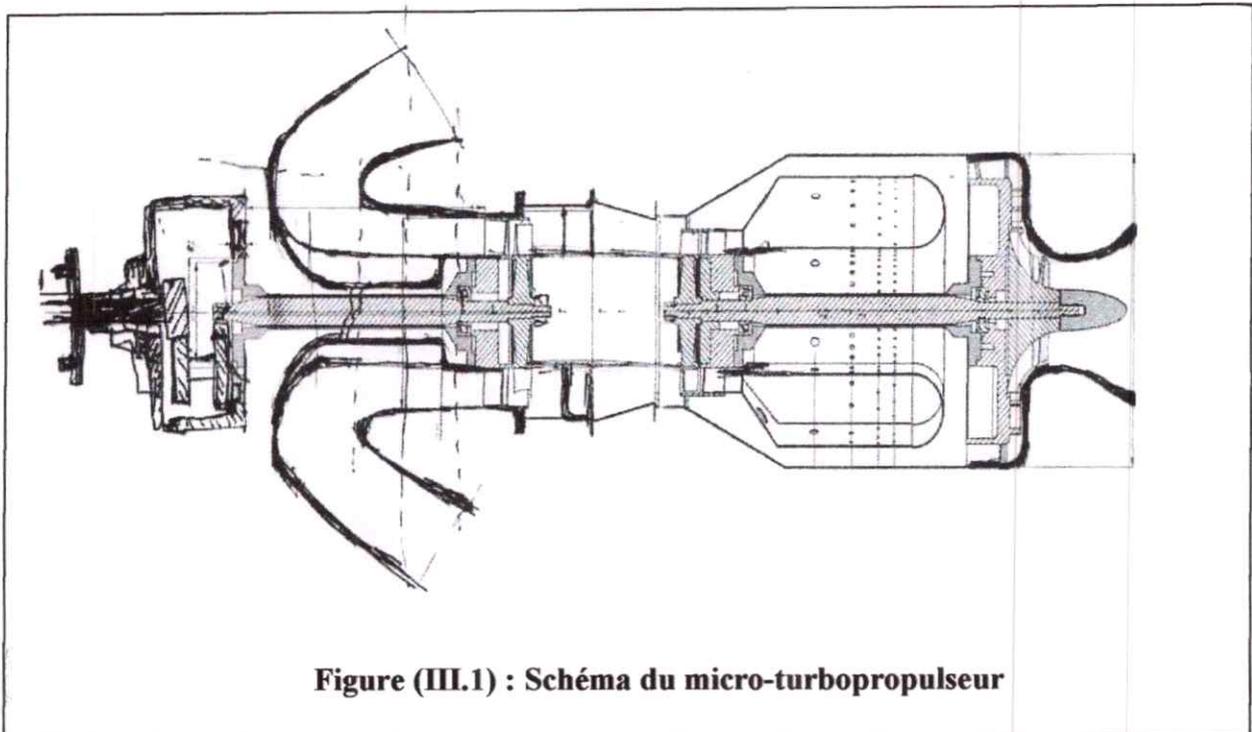


Figure (III.1) : Schéma du micro-turbopropulseur

On va essayer de déterminer le cycle moteur afin de choisir un point de fonctionnement qui nous garantira l'exactitude des paramètres d'entrée turbine libre. Ces paramètres sont issus d'une étude d'un moteur à réaction d'un poussé max 750N.

III-2-1/Le point de fonctionnement :

A partir des courbes caractéristiques de la roue du compresseur utilisé et on se basant sur le meilleur rendement possible, on a choisi un point de fonctionnement qui sera en concordance avec le comportement de la turbine pour une poussée désirée à atteindre par le moteur. Donc on supposant que :

- Le fonctionnement est en adaptation.
- L'écoulement est isentropique.
- Le gaz est considéré comme calorifiquement parfait
- $C_{pc} = 1,005 \text{ [kJ/kg}^\circ\text{k]}$ et $\gamma_c = 1,4$
- $C_{pt} = 1,2310 \text{ [kJ/kg}^\circ\text{k]}$ et $\gamma_t = 1,3$
- $PV = nRT$
- 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_{t4max} : température dans la chambre de combustion (entrée turbine), elle dépend des caractéristiques du matériau utilisé.

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

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

$\eta_d, \eta_c, \eta_b, \eta_t, \eta_r$: rendements de chaque composant « diffuseur, compresseur, chambre de combustion, turbine, tuyère ».

Le tableau (III.1) contient les paramètres du point de fonctionnement choisi qui permettra la conception de moteur :

π_c	F (N)	$T_{t4 \text{ max}}$ (°K)	Cs (mg/s/N)	N générateur (tr/mn)
3.6	2595	1123.0	7.1845	71619.7

Tableau (III.1) : Point de fonctionnement

Le point de fonctionnement est déterminé par un cycle thermodynamique pour une gamme de température d'entrée turbine liée T_t [700 – 1100°], un taux de compression π_c [1-4] et un débit max de 40 mg/s.

Les résultats de la simulation sont décrits dans la courbe ci-dessous qui regroupe les performances du moteur

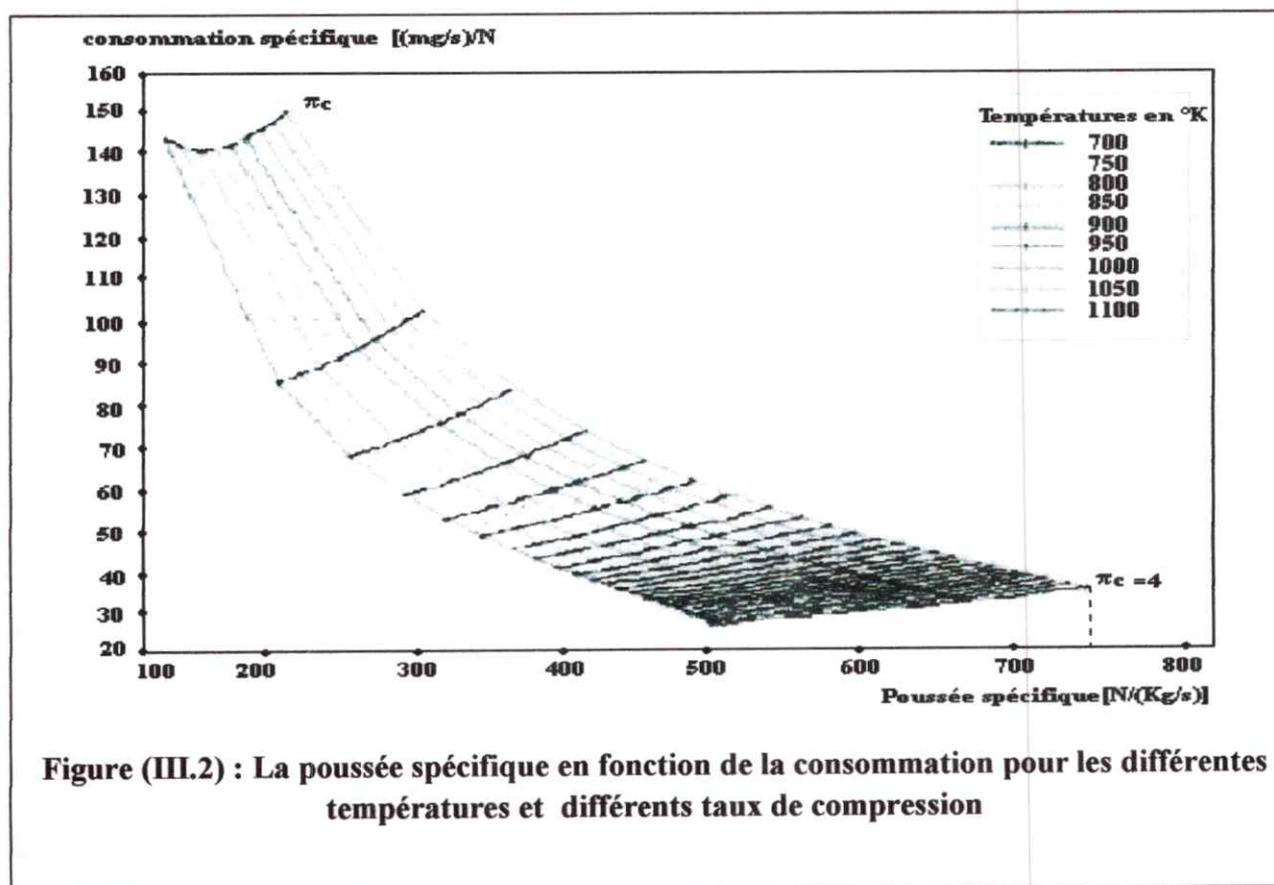


Figure (III.2) : La poussée spécifique en fonction de la consommation pour les différentes températures et différents taux de compression

III-3/Recherche des données pour les turbines

Le calcul des données pour les turbines ont été réalisées avec le programme TURBN. Ce programme calcule la moyenne de conception en ligne de plusieurs turbines à flux axial à l'appui des paramètres référence du compresseur. les résultats obtenu sont :

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

Dans un deuxième temps on a vérifié les données obtenus à l'aide d'un programme EXCEL élaboré par notre promoteur pour bien choisir les dimensions des turbines en fonction des paramètres moteurs et les conditions de fonctionnement idéal.

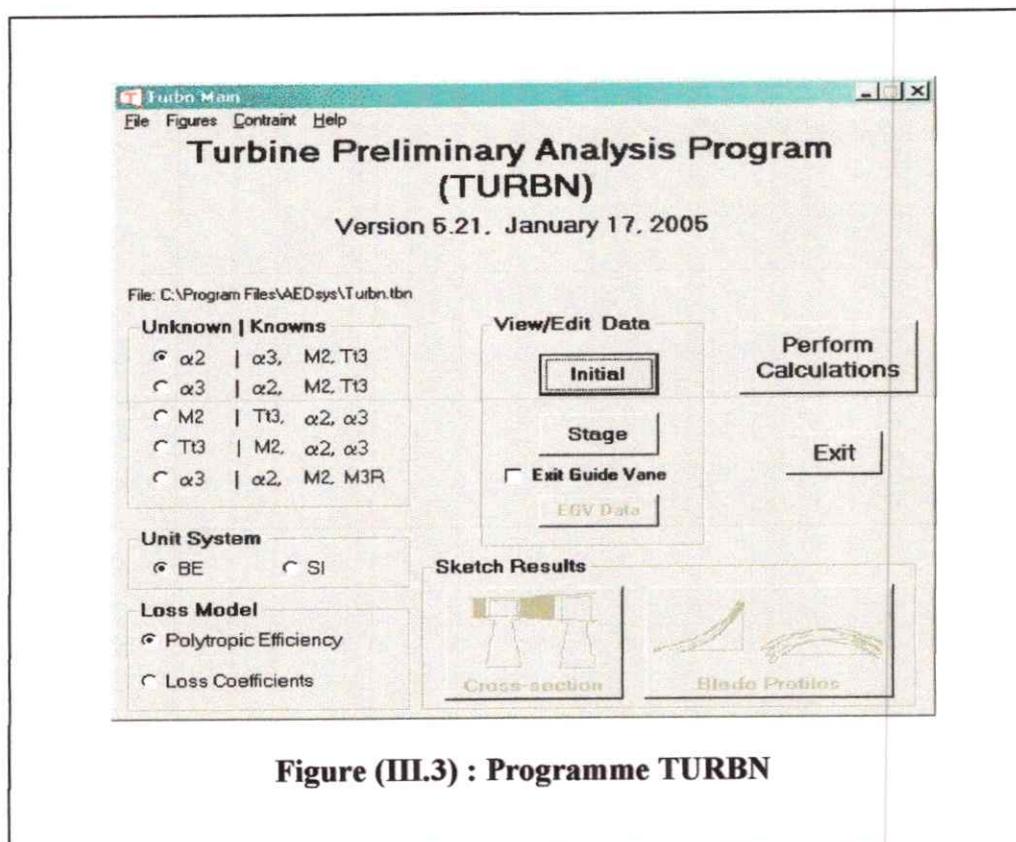


Figure (III.3) : Programme TURBN

Ses deux programmes nécessitent des données représentées ci-dessous (tableau III.2)

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

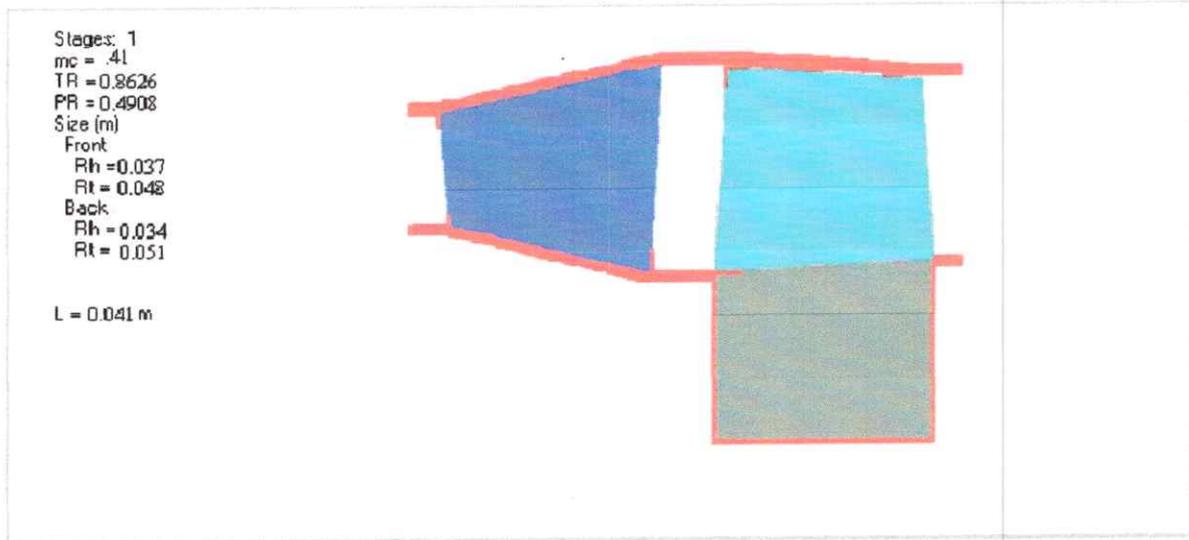
Tableau (III.2) : Paramètres entrée turbine.

III-3-1/Etude et la conception de la turbine liée :

La première étape consiste à entrer les données dans le programme TURBN afin d'avoir la géométrie (nombre d'aubes, les diamètres, angles d'entrée et sortie, courbure, corde axiale, hauteur et l'espacement entre les aubes sur laquelle sera basée notre réalisation pratique

Le diamètre de la jante a été choisi selon les dimensions de la roue compresseur, ce qui nous a mené à fixer $D=80$ mm.

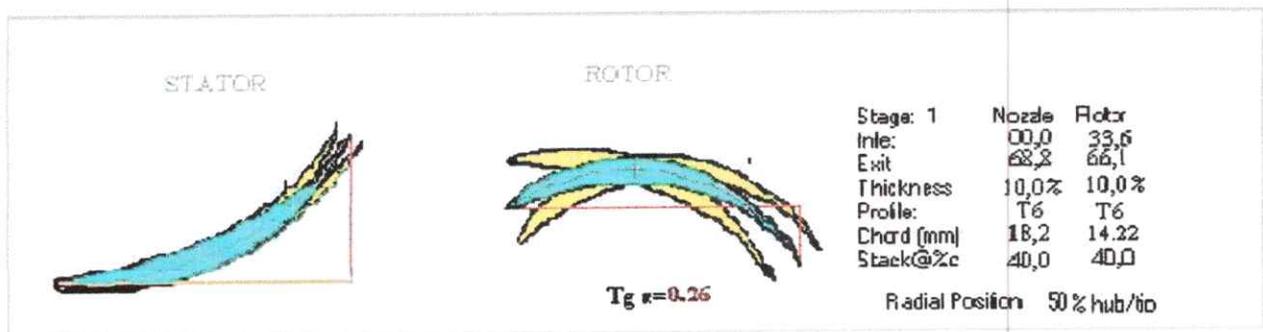
A partir des données précédentes le logiciel TURBN nous a donné les résultats représentés ci-dessous :



Rh: rayon hub (40mm)

Rt: rayon tip (60mm)

Rm : rayon moyen (48mm)



III-3-2/Détermination de la géométrie des aubes stator :

Pour la turbine liée le stator est constitué de 20 aubes, ce nombre est choisi à partir d'un programme EXCEL suivant des caractères bien définies, le tableau (III.3) ci-dessous représente les caractéristiques de profil d'aube.

L'angle de calage	32.26°
L'angle d'entrer	00.0°
L'angle de sortie	68.8°
La corde axiale	18.2 mm

Tableau (III.3) : Caractéristiques de profil d'aube stator (turbine liée).

III-3-3/Étude de la conception de la turbine libre

A partir des paramètres de sortie de la turbine liée on obtient les résultats suivants :

P _{t5}	P ₅	T ₁₅	T ₅	M ₅	V ₅	m°
175.5 KP	151.7 KP	957 K	925 k	0.477	280 m/s	0.80

A fin de sortir les conditions d'entrer de la turbine libre, on a supposé que le cycle est théorique, il n'y a pas de pertes de pressions, grâce aux principes de propulsion on a trouvé. Les résultats représentés ci-dessous

P _{t6}	P ₆	T _{t6}	T ₆	M ₆	V ₆	A
175.5 KP		957 K	925 k	0.4	236	0.59

```

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  Eif = 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
  
```

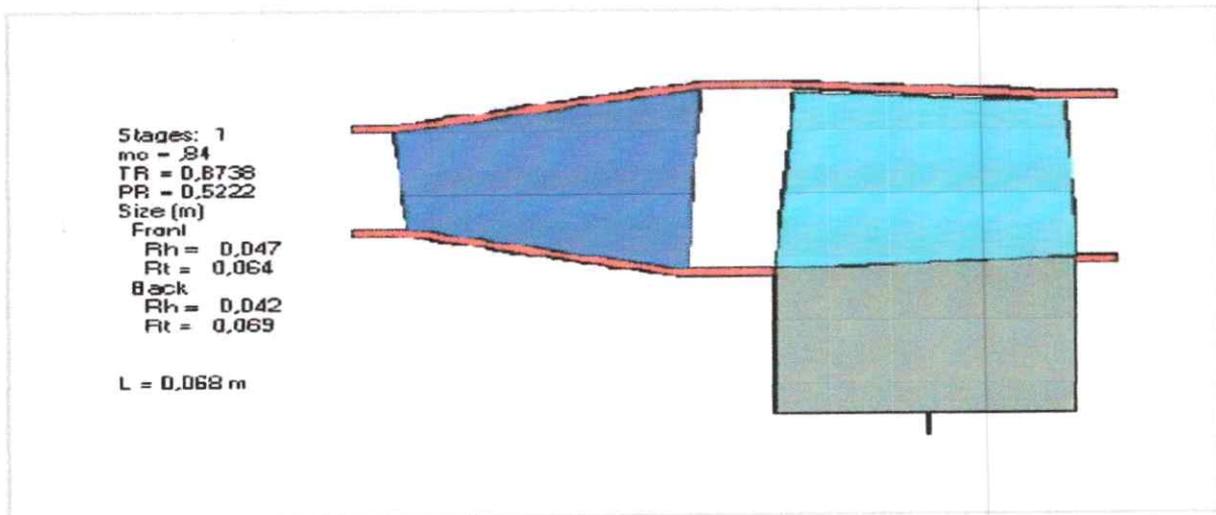
Station	lh	lm	lt	zh	zm	zt	zRm	zRm	zRm	zh	zm	zt
Prop\												
Tt	K	957,0	957,0	957,0	957,0	957,0	957,0	888,7	888,7	836,2	836,2	836,2
T	K	934,6	934,6	934,6	763,0	842,9	876,7	842,9	801,8	796,1	801,8	804,5
Pt	kPa	175,5	175,5	175,5	121,7	121,7	121,7	88,3	119,3	91,7	91,7	91,7
P	kPa	158,4	158,4	158,4	45,6	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

A partir de ses résultats on peut déduire :

Les gaz qui sortent du rotor de la turbine liée subissent une détente ce qui engendre une chute de la pression statique et une augmentation de la vitesse d'écoulement des gaz.

Donc les gaz entrent dans la première station avec une pression et une température statiques identiques dans les différentes stations des profils d'aubes $P = 158.4 \text{ Kpa}$ et $T = 934.5 \text{ °K}$, ces deux valeurs qui vont être diminuées à la sortie du stator ce qui explique l'augmentation de la vitesse qui touche la valeur de $V = 645 \text{ m/s}$ au niveau de l'hub.

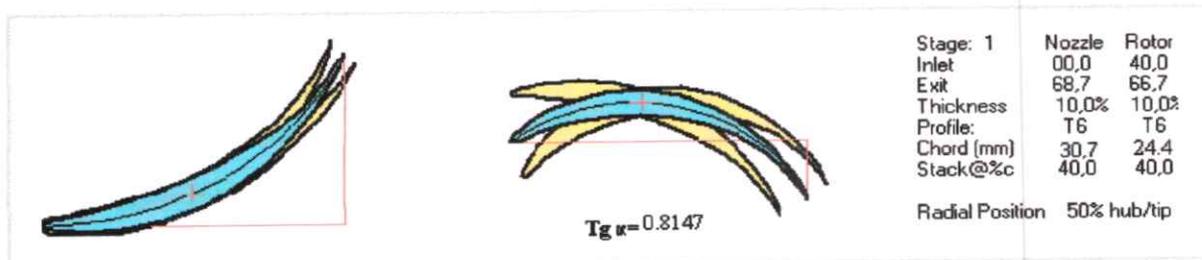
Les angles de sortie stator et entrée rotor sont choisis de telle manière de suivre la direction de la vitesse relative V .



Rt: 70 mm

Rh: 54.5 mm

Rm: 40 mm



III-3-4/Détermination de la géométrie des aubes stator :

Les étapes suivies pour le dimensionnement de la roue de cette turbine sont les mêmes, afin de trouver les résultats représentés dans le tableau ci-dessous :

Pour cette turbine libre le stator est constitué de 20 aubes, ce nombre est choisi a partir du même programme EXCEL précédent suivant des caractères bien définie, le tableau (III.3) ci-dessous illustre les caractéristiques de profil d'aube.

L'angle de calage	30°
L'angle d'entrer	61.0°
L'angle de sortie	65.7°
La corde axiale	22.90 mm

Tableau (III.4) : Caractéristiques de profil d'aube stator (turbine libre).

III-4/Dessin des profils des aubes

Les premiers dessins des stators étaient à la main (ANEXE I), pour cela on a utilisée le profil T6 qui est utilisé pour construire les profils des aubes des turbines à gaz et à vapeur.

L'exemple ci-dessous montre que dans un profil T6 qui est symétrique par rapport à la ligne moyenne, qui a les caractéristiques géométriques suivantes :

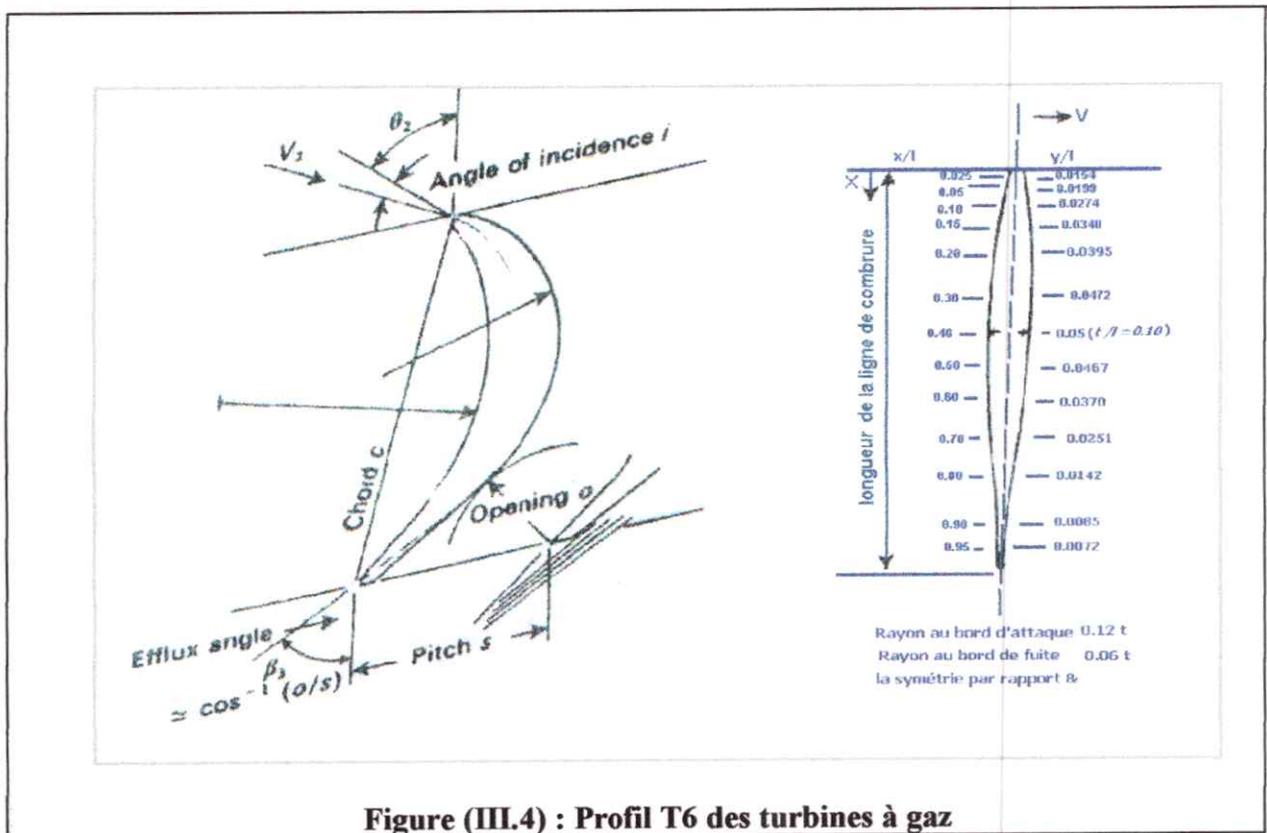


Figure (III.4) : Profil T6 des turbines à gaz

- 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.

III-5/Conception et mise en plans

A prés avoir les données de construction des deux turbines, on fait la conception est la mise en plans des stators sur le logiciel solidworks.

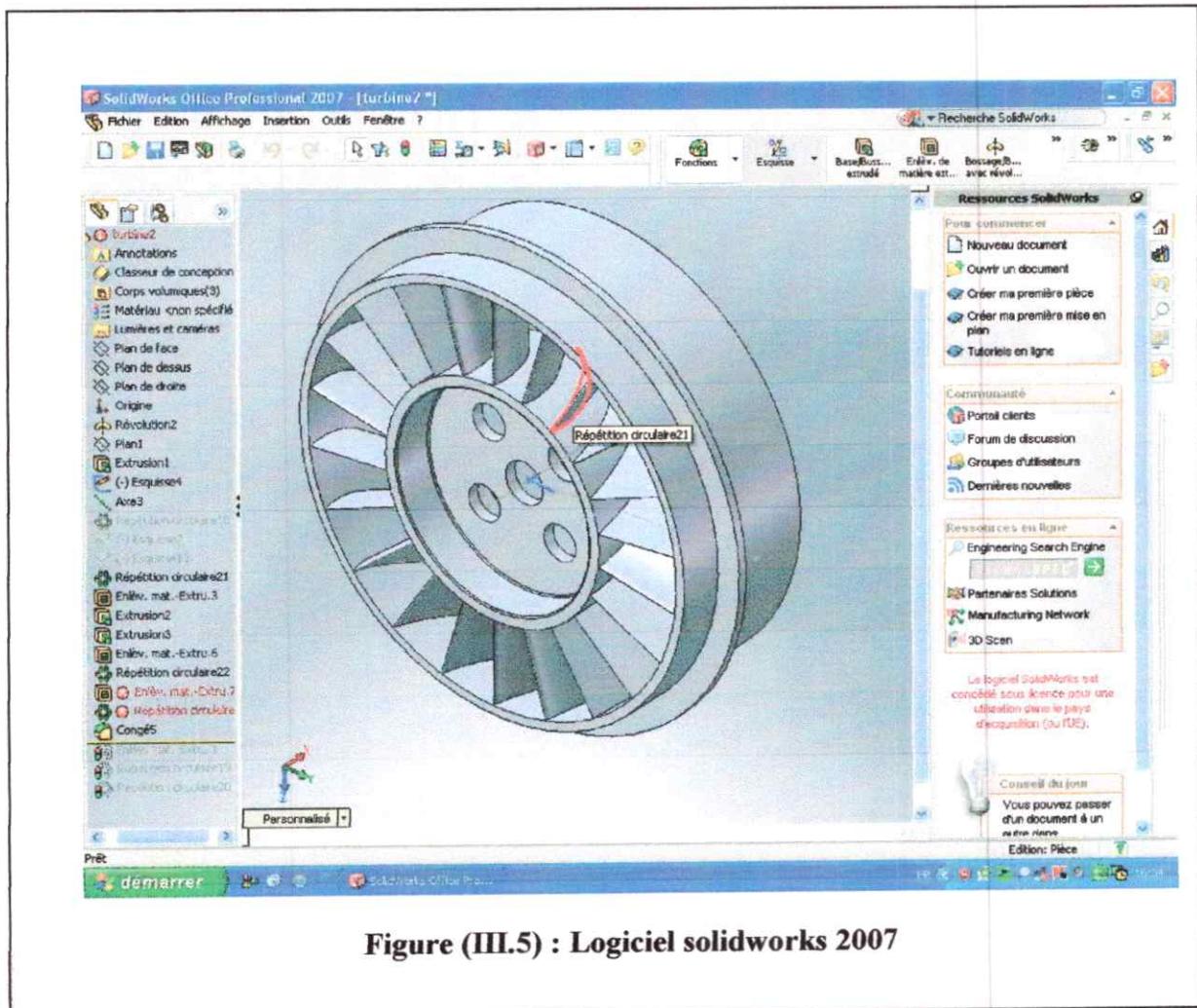


Figure (III.5) : Logiciel solidworks 2007

C'est un logiciel de conception assistée par ordinateur. Il est un modulateur 3D utilisant la conception paramétrique. Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : La pièce, L'assemblage, La mise en plan qui sont en relation. Toute modification à quel niveau que ce soit est répercutée vers tous les fichiers concernés.

Avec ce programme on réalisant les perspective, les plans des deux stators, le plateau diviseur est les plans des moules pour les modèles en cire (ANNEXE I).

Présentation des deux stators Figure (III.6.a) est Figure (III.6.b).

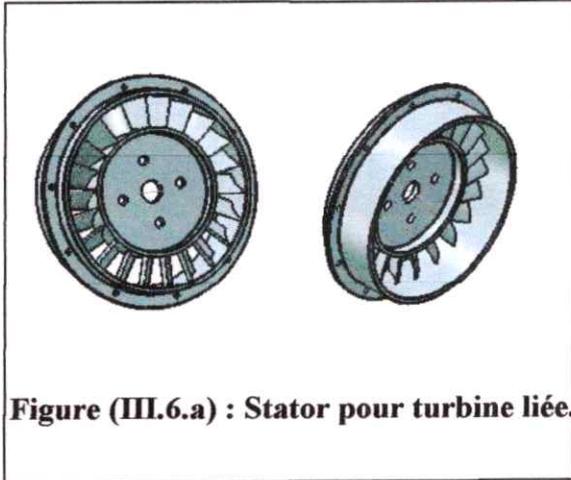


Figure (III.6.a) : Stator pour turbine liée.

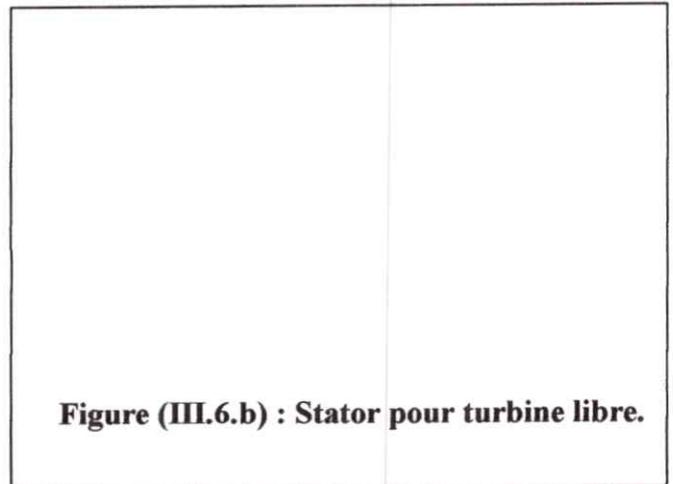


Figure (III.6.b) : Stator pour turbine libre.

III-6/Réalisation des stators

III-6-1/Matériels et moyen utilisées

Les matières premières utilisées pour la réalisation :

- Mastic fer et durcisseur.
- Bois dur.
- Plaque en aluminium de 16mm d'épaisseur nécessaire à la réalisation des partie des moules.
- Cylindre plans en aluminium pour les jantes model.
- La cire AQUA.
- La céramique (la barbotine)

À noter que l'aluminium utilisé est un alliage dont la référence est AS10G. Il contient : 90% d'aluminiums (Al). 10%de silicium et Magnésiums (Mg) entre 0.17 et 0.34%.

Les caractéristiques de l'aluminium seul ne sont pas très intéressantes.

- Lûmes et ciseaux de déferlantes tailles.
- Papier à vert pour la finition.
- Tour a bois pour les carter.
- Tour de fabrication mécanique pour l'usinage des jantes et les parties de moule.
- Perceuse.

III-6-2/Procédé de fabrication et opération d'usinage effectue

a) Tournage :

Les déferents procédés d'usinage permettant l'obtention de surface de révolution intérieure et extérieure, de surfaces planes ainsi d'autre surface.

Ces procédés s'effectuent à l'aide d'une machine appelée tour et moyennant des outils dont la forme et la désignation varient selon l'opération à effectuer sur la pièce. Les différentes opérations effectuées sont :

- Chariotage (diminution de diamètre).
- Dressage (diminution de la longueur).
- Tronçonnage (découpage de la pièce) d'usinage permutante.

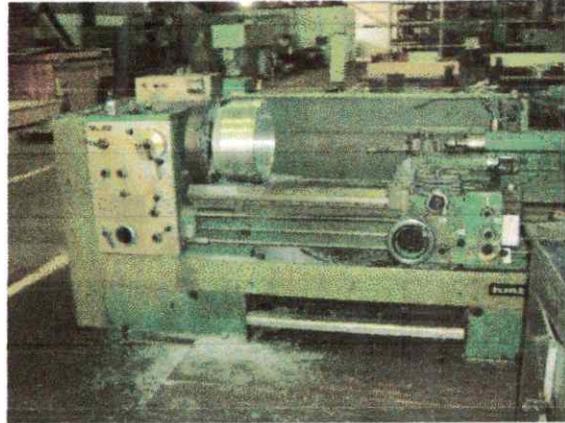


Figure (III.7) : Tour mécanique

b) Perçage

C'est une opération destinée à produire un trou cylindrique sous l'action d'un coupant appelée mèche ou foret, et auquel on donne un mouvement de coupe et un mouvement d'avance à l'aide d'une machine appelée perceuse.

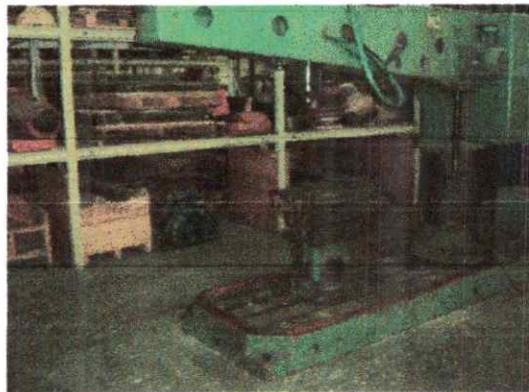


Figure (III.8) : Perceuse.

Le parçage des pièces est une phase délicate qui nécessite de la concentration et démarche rigoureuse qui doivent être respectés et ce pour déterminer l'entre-axe. Il faut pour cela utiliser des instruments de mesure et de tracer adéquats.

III-7/Réalisation des modèles permanents

III-7-1/Calcul des côtes plus retrait

a) Définition du retrait

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

Les facteurs intervenants sont :

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

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

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

Lors de notre procédé on a utilisée plusieurs matières, mais seulement trois qui ont un retrait, l'alliage de coulée, la céramique et la cire qui ont respectivement les retraits suivants : 2%, 1.2%, 1.1%.

Pour le retrait global on additionne les trois retraits, puis nous calculons.

L'addition des trois retraits nous donne 4.2%. Pour des raisons pratiques et dans le but de la certitude de l'obtention d'un bon résultat on a arrondi le retrait à 4,5% sur conseil d'un modelleur expérimenté.

b) Exemple de calcul de côte plus retrait

On prend pour exemple le diamètre extérieur de la jante stators qui est de 80mm.

$$80 \times 4,5\% = 3.6$$

Le résultat obtenu est la côte plus retrait, ce résultat sera utilisé pour la construction du modèle. Les résultats des calculs sont groupés dans le tableau (III.4) suivant :

	Dimensions de stators (turbine liée)		Dimensions stator (turbine libre)	
	Côte initiale	Côte+retrait	Côte initiale	Côte+retrait
R tip	60	62.7	70	73.1.5
R hub	40	41.8	40	41.8
R moy	48	50.16	54.5	56.45
Corde axiale	18.2	19.39	30.7	32.8

Tableau (III.5): Tableau regroupant les côtes plus retrait de la turbine à réaliser.

III-7-2/Réalisation du carter modèle

III-7-2-1/Réalisation de l'épure

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

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

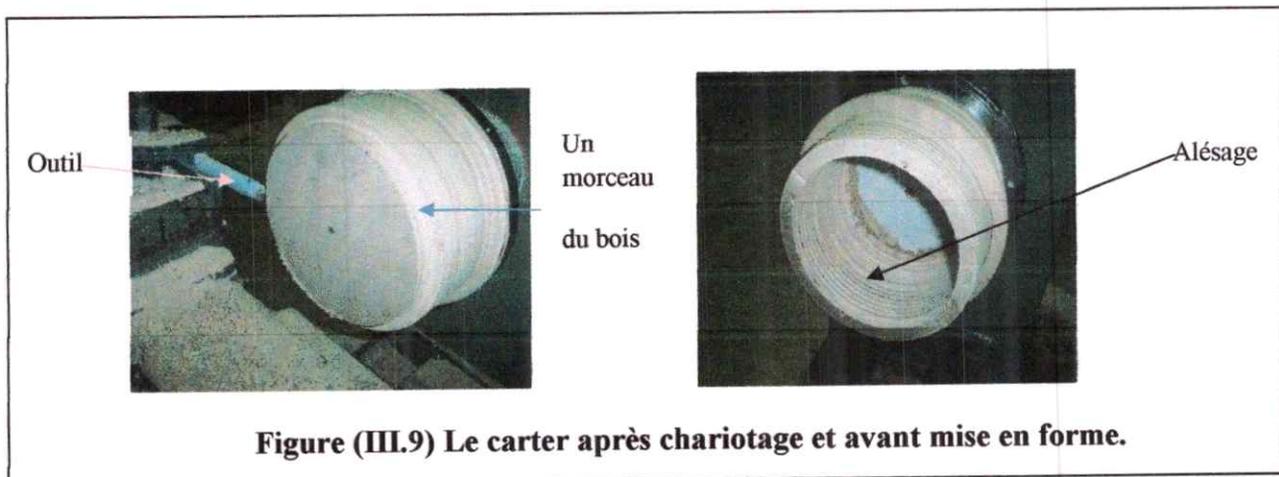


Figure (III.9) Le carter après chariotage et avant mise en forme.

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

Après avoir terminée l'usinage extérieur, on commence à faire un alésage qui donne la forme inférieure de carter. Pour sa on a utilisé un outil à alésé, ce dernier est réglé sur le centre du disque puis déplacé vers la intérieur de la pièce.

Le modèle en bois nous a aidée à tirer une empreinte de carter sur le sable pour le couler en métal, le manque de moyen (alliage nécessaire) nous a obligé de le réaliser en aluminium.



Figure (III.10) : Carter fini

Après l'exécution du modèle on a coulé le carter en aluminium par le procédé de moulage en sable et il a subi plusieurs opérations d'usinage.

III-7-2-2/Réalisation des jantes modèles

Pour la réalisation des jantes modèles nous avons utilisé un cylindre en aluminium d'un diamètre légèrement supérieur à celui de la jante et nous sommes passés par ces étapes :



Figure (III.11) : Usinage de la jante.

• Le cylindre monté sur le tour sera fixé au mandrin et subira des opérations de chariotage et de dressages avec un outil en carbure. Ces opérations ont pour but d'atteindre la forme et les cotes avec retrait égal à celui des plans, les premières opérations d'usinage, le tour sera réglé sur la vitesse de 380 tr/min, l'avance de l'outil doit être lente, pour atteindre un bon état de surface nous augmentons la vitesse du tour à 550 tr/min et nous réaffectons un dernier chariotage..



Figure (III.12) La jante modèle en aluminium

• L'opération de chariotage terminé, suit l'opération d'alésage qui nous permet d'avoir la forme intérieure de la jante

III-7-2-3/Plateaux diviseur

La jante fut divisée par des très et positionnée les 20 ailettes en égalité suivant un angle et un axe bien précis.

Pour cela un plateau diviseur a été fabriqué pour une plus grande précision de coulée, il est constitué de :

- Un support fixe en bois qui porte la jante.
- Un plateau mobile qui porte le moule.
- Un goujon en bois pour maintenir l'ensemble.



Figure (III.3) : Support fixe.

III-7-2-4/Réalisation des ailettes

Pour avoir les ailettes identique, on a réalisé un moule en mastic fixé sur une glissière, pour cela, une ailette est fixé sur la jante pour nous aidée a tirée le négatif de l'extrados qui représente la partie inferieur de moule et l'intrados qui représente la partie superieur.



Figure (III.17): Ailette fixé sue la jante.

La jante fixée au support de plateaux diviseur, une rainure et gravée sur le plateau mobile pour fixé le moule et l'ajusté pour éliminé toute possibilité de jeu.

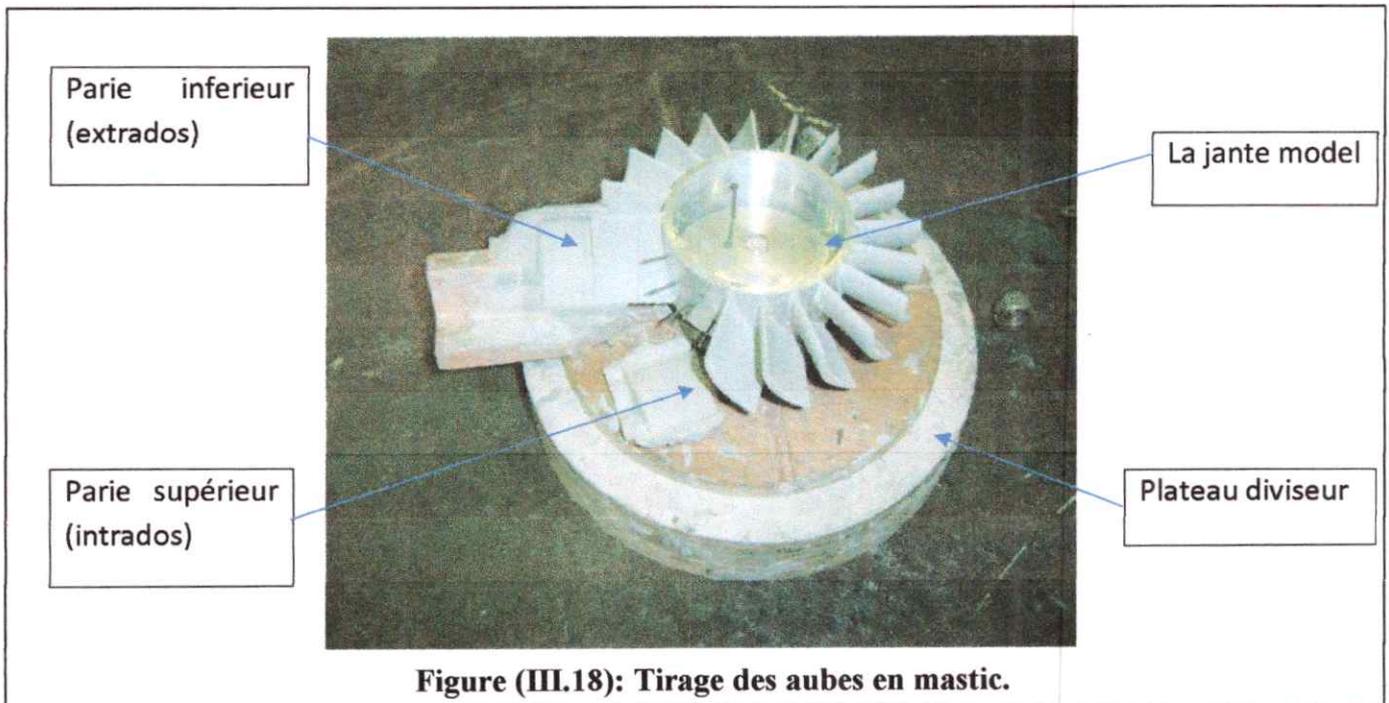


Figure (III.18): Tirage des aubes en mastic.

Le mastic est mélangé à un durcisseur puis coulé sur la partie inférieure du moule. La fusion des deux parties du moule nous permet d'avoir la forme de l'ailette dont le mastic prend la forme, l'excès de mastic est soigneusement retiré à l'aide d'une spatule.

La séparation des deux parties du moule nous laisse découvrir l'ailette, cette opération est répétée 20 fois. Le moule inférieur ainsi que le moule supérieur sont enduits de cire de démoulage qui empêche le mastic de coller aux moules.



Figure (III.19): Cire de démoulage.

Note :

Les deux stators modèles sont réalisés par les mêmes procédures décrites dans ce chapitre avec des dimensions différentes.

L'étape suivante devrait être la fabrication d'un moule en élastomère avec lequel seront reproduits les modèles en cire. Mais le manque des moyens, nous a obligés à envisager une autre méthode qu'on va essayer d'expliquer dans les paragraphes qui suivront. Le plan pour le moule en élastomère (ANNEXE I).

Les pièces modèles réalisées sont finalement gardées comme modèles d'exposition qui montrent la forme et l'allure finale des stators.

III-7-3-1/Réalisation des modèles non permanents (en cire) :

Les modèles en cire est réalisée avec les mêmes procédures que les modèles précédents c'est à dire, on réalise la jante est coulée les ailettes sur elle.

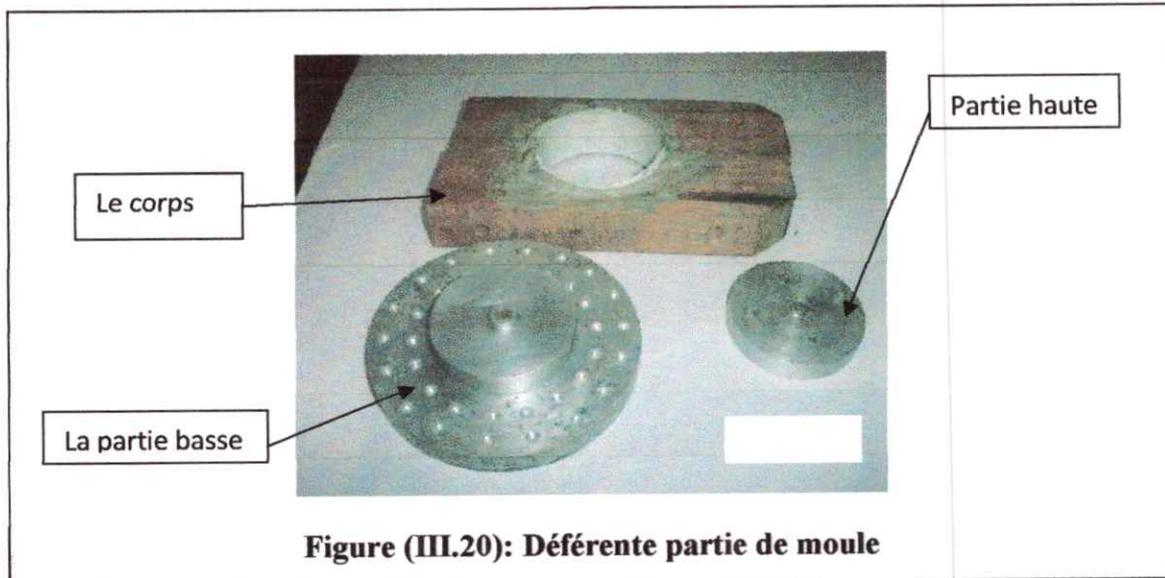
III-7-3-2/Réalisation de jante

a) Réalisation de moule

A cause de la complexité de la jante on réalise le moule en trois parties, sont:

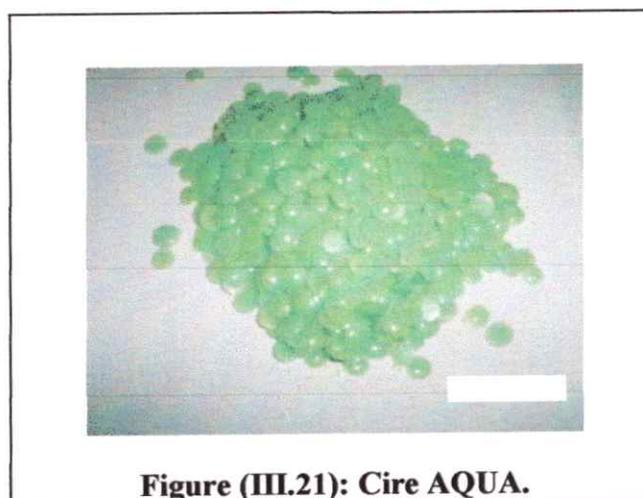
- La partie basse : un support en aluminium qui porte l'empreinte inférieure de la jante.

- La partie haute : un disque en aluminium qui forme l'empreinte supérieur de la jante est il comporte les trous pour la coulée.
- Le Corps : il forme la partie cylindrique de la jante (circonférence), réalisée en bois est silicone.



b) La cire :

Cire spéciale type AQUA de couleur verte présente en paillettes ou en plaques elle est facile à faire fondre au bain marie, elle convient très bien pour les imitations d'autres matériaux, elle peut être teintée avec des colorants de type " colorants à bougie " ou avec des pigments en poudre, Elle permet de prendre des empreintes par la méthode du moulage au trempé pour recevoir du plâtre ou de la céramique reconstituée comme matériau de tirage.



• Caractéristiques physiques de la cire

Elles sont très semblables. Nous évoquerons la cire AQUA comme modèle. Point de fusion : de 40 à 71°C. Le plus couramment, elle fond vers 55°C. Toutes ces cires (sauf liquides, évidemment) doivent être fondues - généralement au bain-marie - pour être moulées. Densité approximative : 0,9. Ce chiffre permet de mesurer la quantité de cire correspondant à un moule que vous aurez rempli d'eau pour en calculer le volume : compter environ 9/10èmes du poids d'eau. Cette cire est disponible dans les magasins spécialisés dans la vente de matériel de bijouterie.

c) La coulée de la cire

Une fois le moule est rassemblée, on a fait fondre la cire au bain marie et la remplie dans le moule, 15 minute après on a démoulée la jante et on fait quelque retouche pour enlever les bavure de moule a l'aide d'une spatule.



Figure (III.22.a): Coulée de la cire.



Figure (III.22.b): Jante fini.

III-7-3-3/Réalisation des ailettes

a) Le moule

Le moule de l'ailette est composée en deux matière, la silicone et le mastic, pour faire sortir la forme de l'ailette on a recouvre sa surface avec de la silicone est on la laissée séchée pendant une journée.

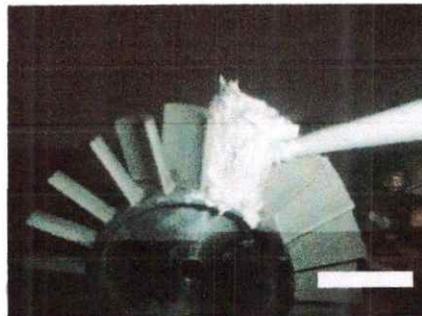


Figure (III.23): Exécution de moule en silicone.

A cause la flexibilité de moule en silicone on l'a englobée avec de mastic pour le donnée une rigidité et le fixé sur la glissière.

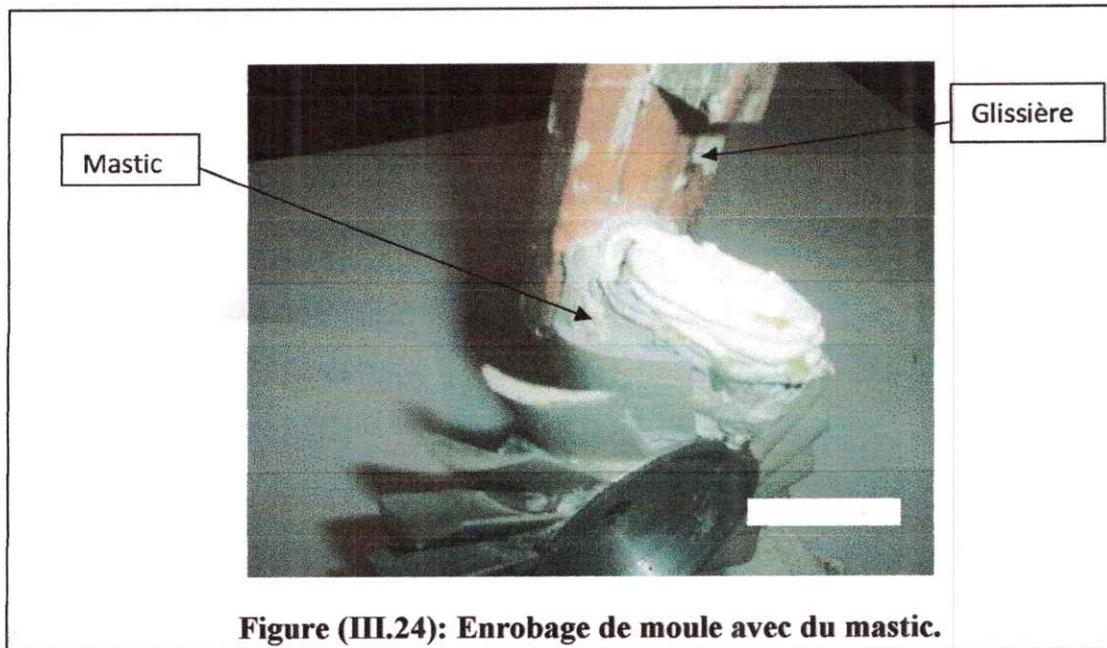


Figure (III.24): Enrobage de moule avec du mastic.

b) La coulée

La jante en cire est montée sur le plateau niveleur et avec le même principe précédent on a coulé les ailettes une par une 20 fois. et a l'aide d'une spatule on a éliminée les baveur des joins.

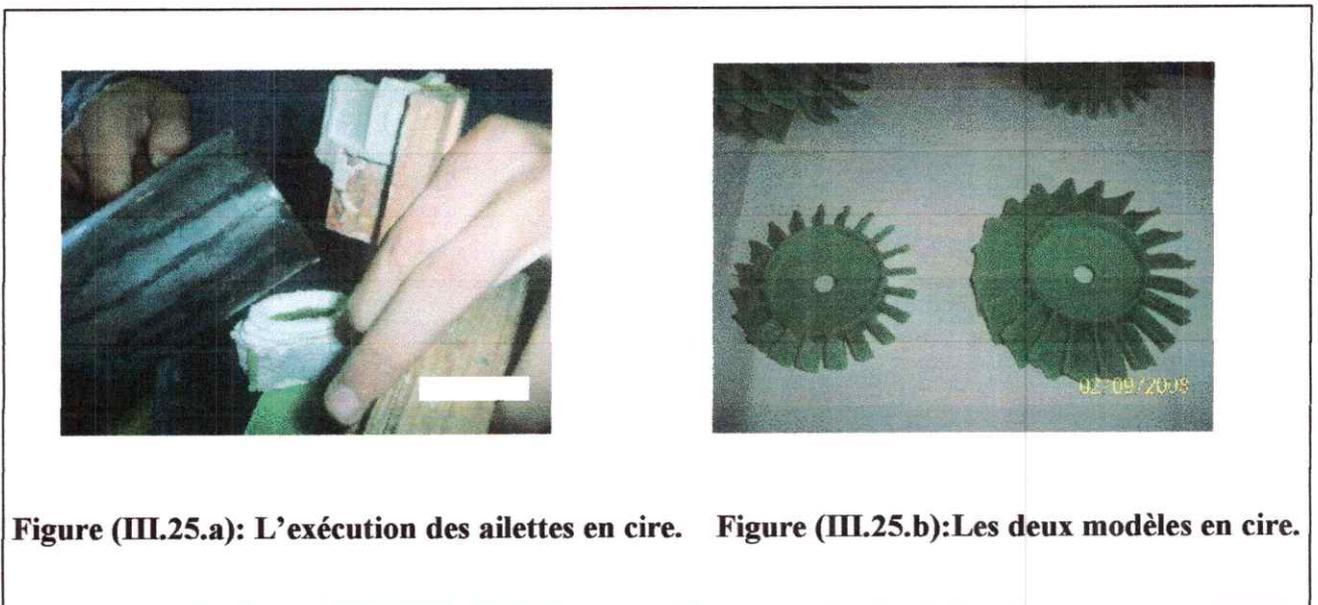


Figure (III.25.a): L'exécution des ailettes en cire. Figure (III.25.b): Les deux modèles en cire.

c) Les événements :

Pour éviter l'emprisonnement de l'air dans les ailettes on a placé de multiples "événements". Ce sont des tiges en bois supplémentaires placées sur toutes les extrémités de modèle susceptible d'emprisonner de l'air.

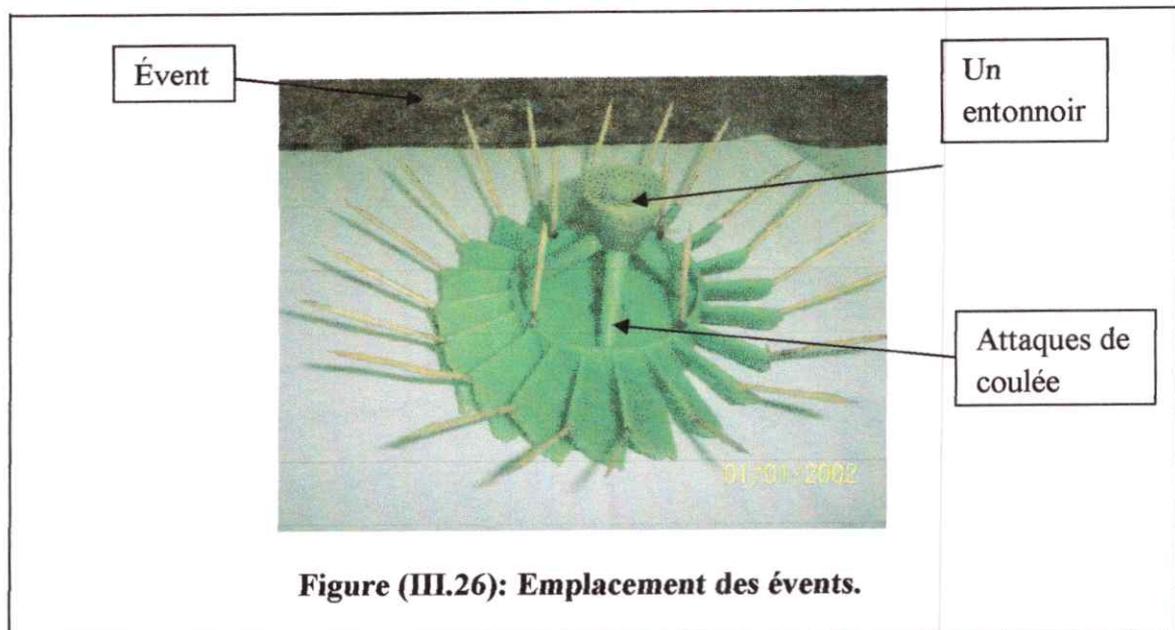


Figure (III.26): Emplacement des événements.

L'air sera ainsi repoussé dans l'évent et laissera métal prendre sa place dans les détails. On a aussi ajoutée

- Un entonnoir (ou godet) de coulée permettant d'avoir une large ouverture pour l'arrivée du métal liquide
- Attaques de coulée adaptées à la pièce (attaques dans les parties massives...), pour obtenir un refroidissement correct de la pièce

III-7-3-4/ le moule en céramique

a- Enrobage céramique

Pour la barbotine (céramique liquide), on ne connaît pas la quantité d'eau et les éléments additionnels nécessaires pour préparer la céramique, alors on a fait plusieurs essais.

Une succession de couches de céramique son enrobé pour apporter une rigidité à la carapace afin de résister à la pression du métal en fusion lors de la coulée est on la laissé sécher.



Figure (III.27): Enrobage céramique.

Malheureusement des fesseurs sont engendrée dans céramique a pré le séchage a cause de la male préparation de la barbotine.

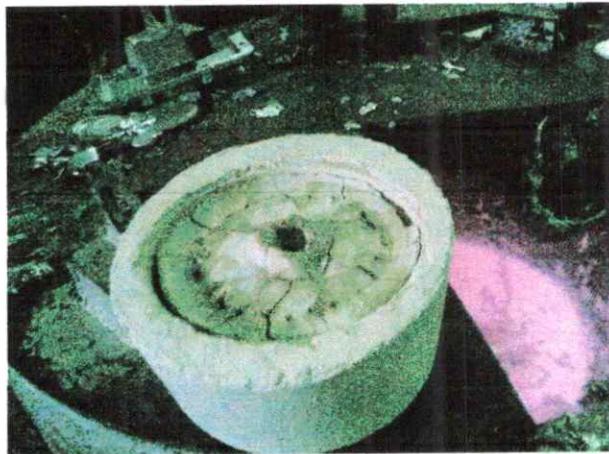


Figure (III.28): Enrobage céramique (sèche).

CONCLUSION

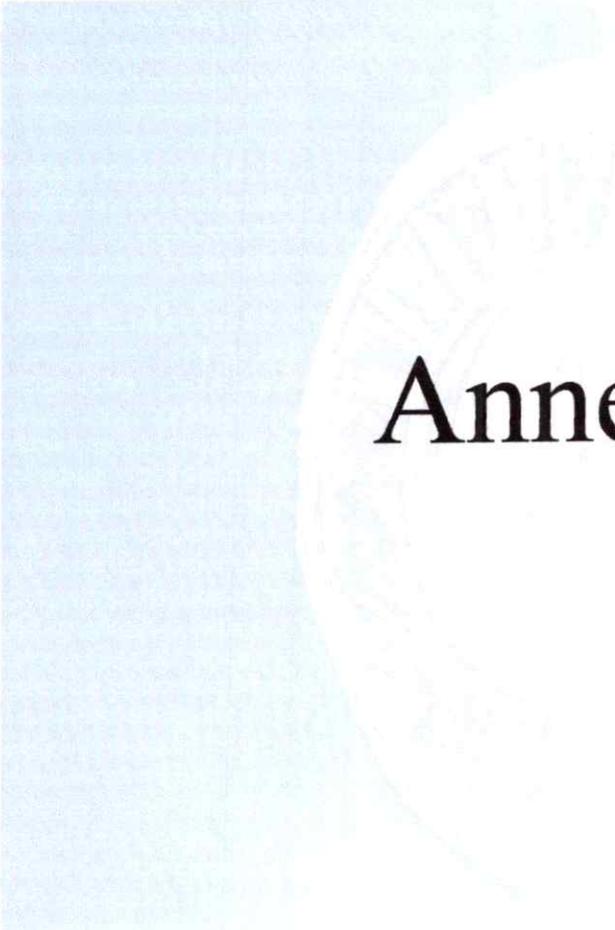
Ce mémoire nous a permis de réaliser un moule pour un model en cire perdu « stator », il entre dans le cadre du projet de la réalisation d'un micro-turbopropulseur.

Ce travail a été réalisé au niveau de la SNVI devisions fondrai Rouïba. Il nous aider à comprendre les étapes de la conception et la réalisation d'une turbine et amélioré le travail de nous prédécesseurs. Ces étapes sont :

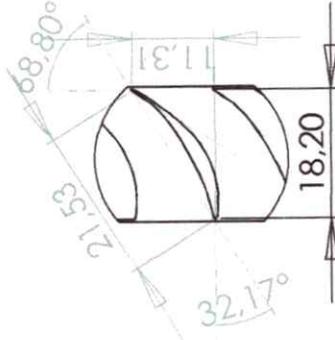
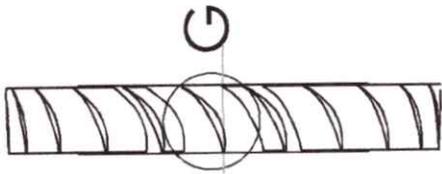
- 1- Modalisation de la turbine: a été fait par deux logiciels le premier c'est « TURBN » et l'autre c'est un programme Excel élaboré par notre promoteur.
- 2- Conception de la turbine : cette conception a été fait a l'aide d'un logiciel « CAO » conception assisté par ordinateur version solidworks2007.
- 3- Réalisation : exécution des deux modèles stator et réalisation des moules.

On a eu beaucoup de difficulté dans la réalisation. Dans la quel l'exécution du moule en élastomère avec lequel seront reproduits les modèles en cire a cause de manque des moyens et de matériel, malgré sa en arrivée a réalisé le model en cire, une coulée en aluminium a était faite. Des défauts sont apparus sur la pièce à cause du moule en céramique qu'il n'était pas cuit.

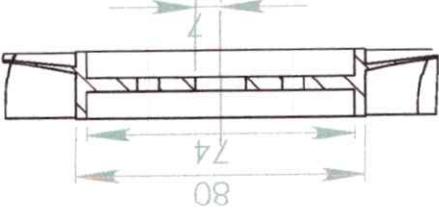
En fin, les pièces modèles réalisées sont gardées comme modèles d'exposition qui montrent la forme et l'allure finale des stators, ces modèles peuvent être utilisés par les étudiants pour les aider dans leurs projets de fin d'étude.



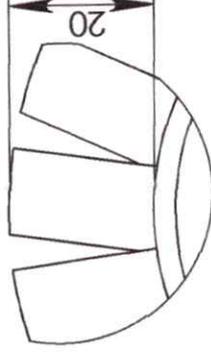
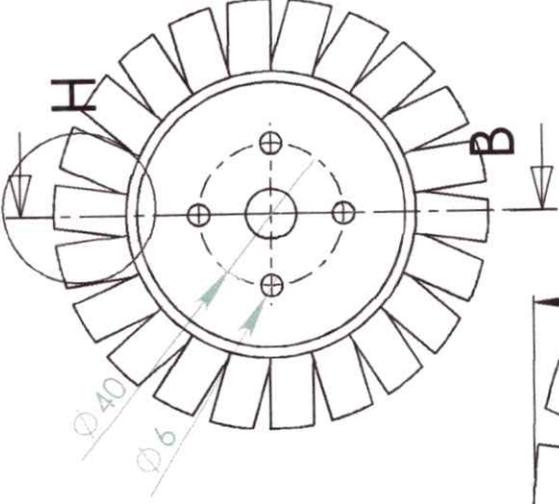
Annexe I



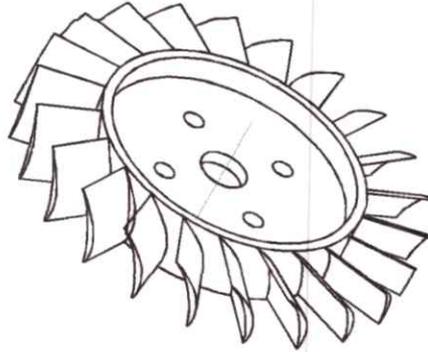
DÉTAIL G
ECHELLE 1 : 1



COUPE B-B



DÉTAIL H
ECHELLE 1 : 1



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:
DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS
SURFACE FINISH:
TOLERANCES:
LINEAR:
ANGULAR:

DEBUR AND
BREAK SHARP
EDGES

DO NOT SCALE DRAWING

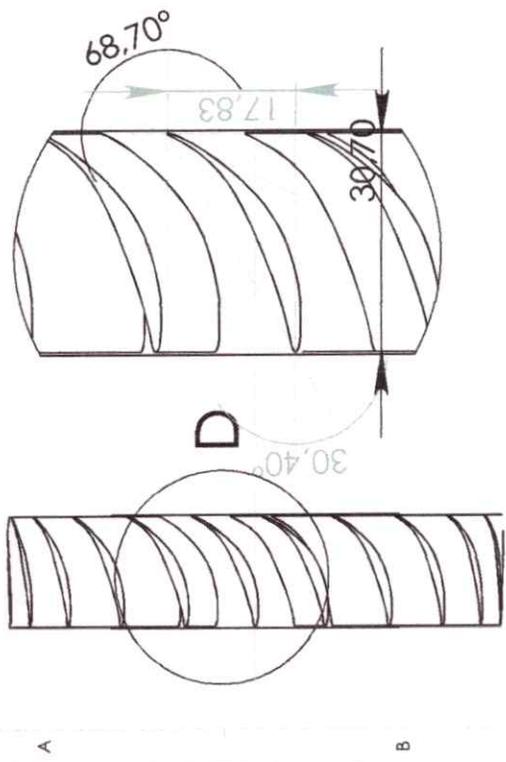
REVISION

DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE
CHK'D				
APP'VD				
MFG				
G.A				

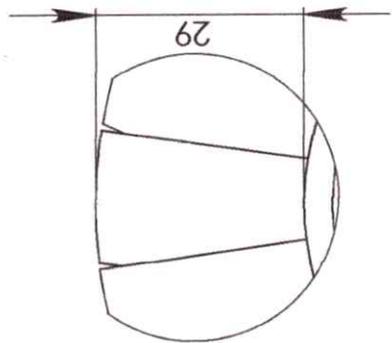
MATERIAL:

DWG NO.:

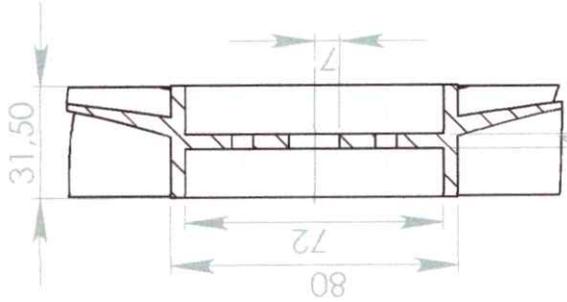
stator (liée)



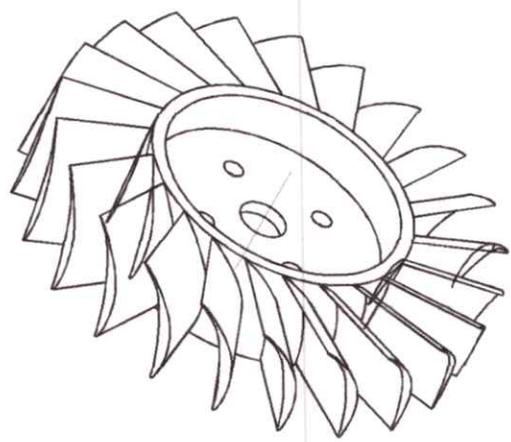
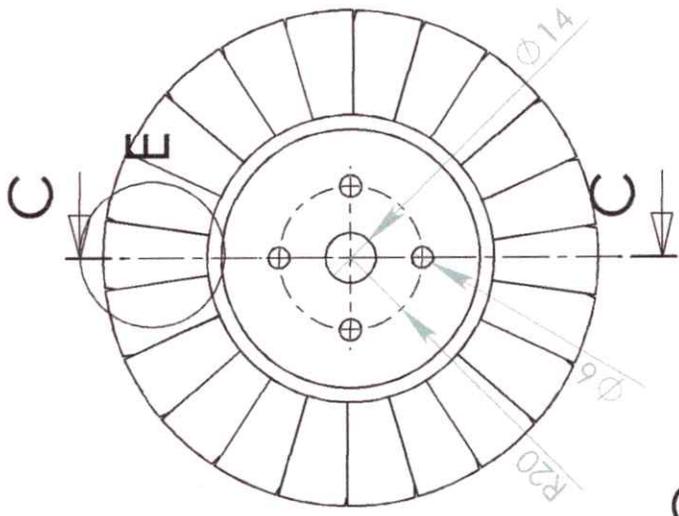
DÉTAIL D
ECHELLE 1 : 1



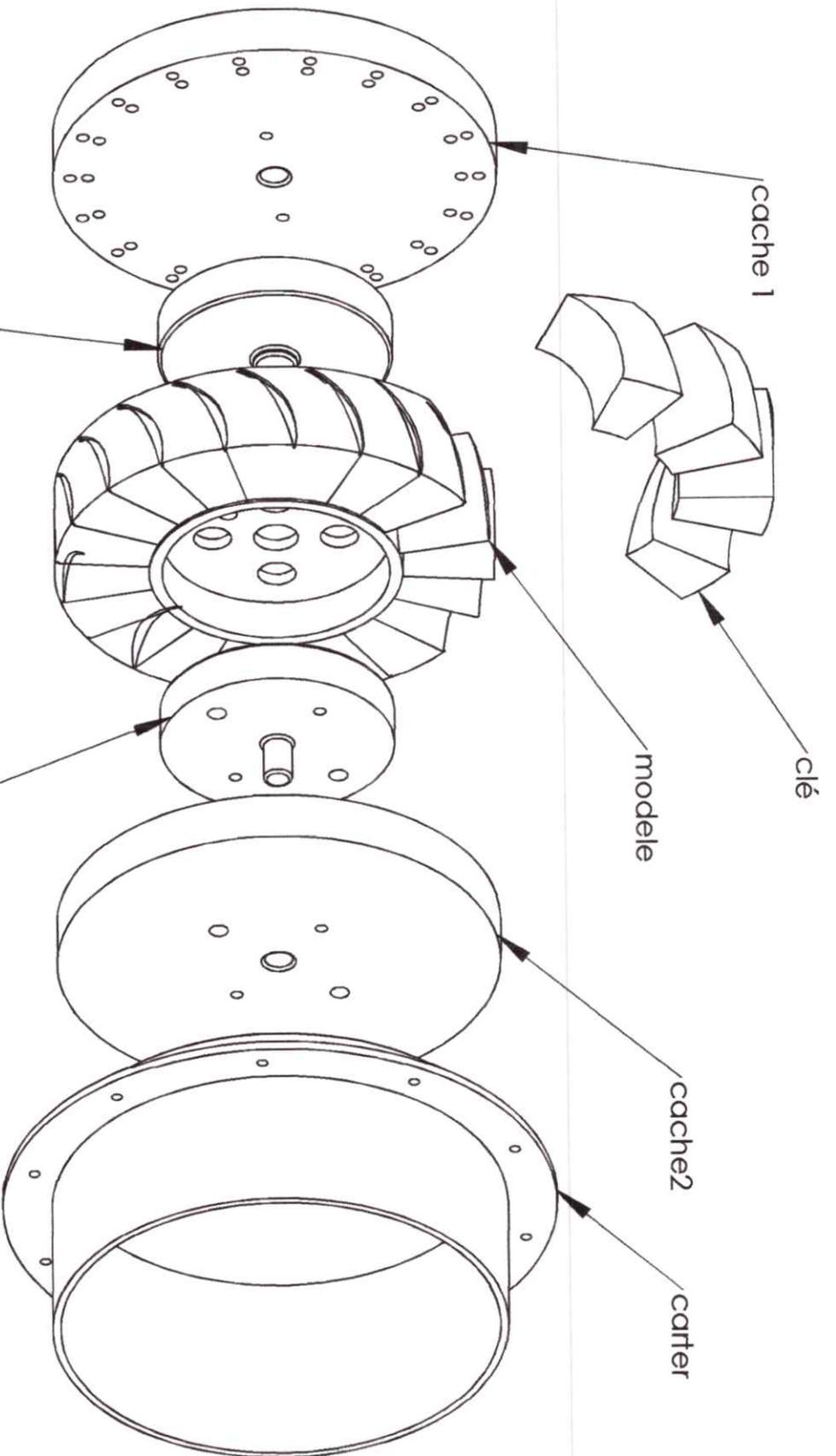
DÉTAIL E
ECHELLE 1 : 1



COUPE C-C



UNLESS OTHERWISE SPECIFIED: DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS		FINISH:	DO NOT SCALE DRAWING	REVISION
SURFACE FINISH:		DEBUR AND BREAK SHARP EDGES		
TOLERANCES:				
LINEAR:				
ANGULAR:				
DRAWN	NAME	SIGNATURE	DATE	TITLE:
CHK'D				
APP'VD				
MFG				
Q.A				
	MATERIAL:			DWG NO.
				stator libre
				A4



empreinte jante 1

empreinte jante 2

cache 1

modele

clé

cache 2

carter

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:

- DIMENSIONS ARE IN INCHES
- TOLERANCES:
- FRACTIONAL: ±
- ANGULAR: MACH ± BEND ±
- TWO PLACE DECIMAL ±
- THREE PLACE DECIMAL ±

- INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING PER MATERIAL
- FINISH
- DO NOT SCALE DRAWING

- DRAWN
- CHECKED
- ENG APPR.
- MFG APPR.
- Q.A.
- COMMENTS:

NAME DATE

TITLE:

PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL
 THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

NEXT ASSY USED ON APPLICATION

DO NOT SCALE DRAWING

SIZE DWG. NO. **Moule stator 21** REV
 SCALE: 1:5 WEIGHT: SHEET 1 OF 1

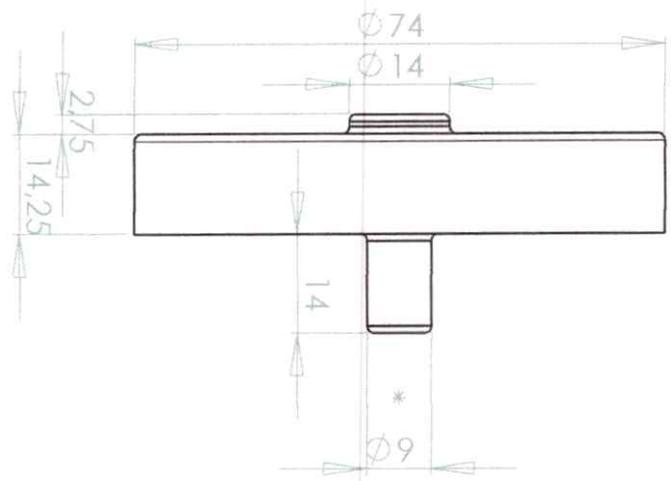
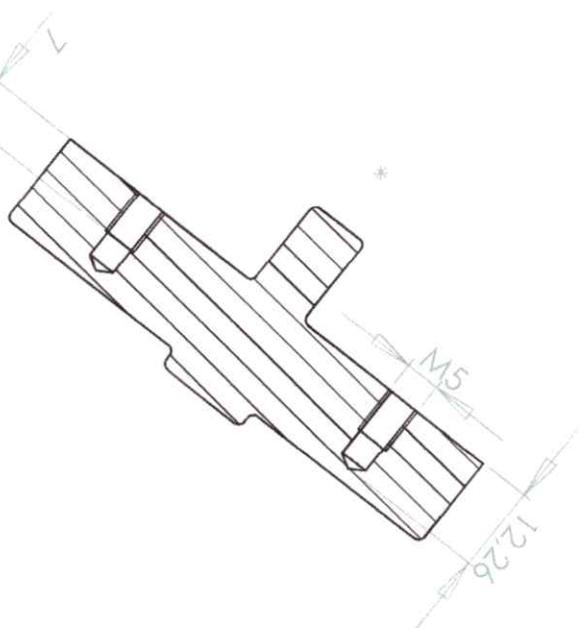
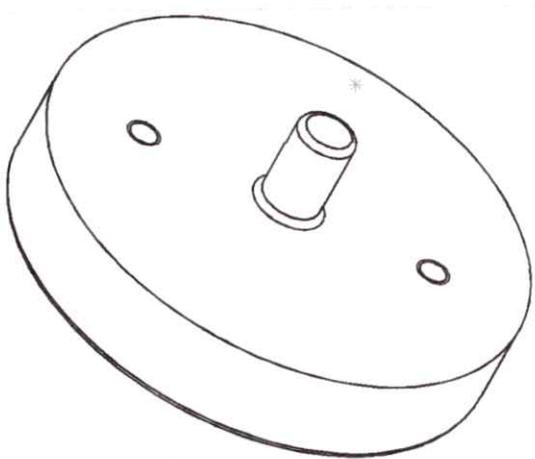
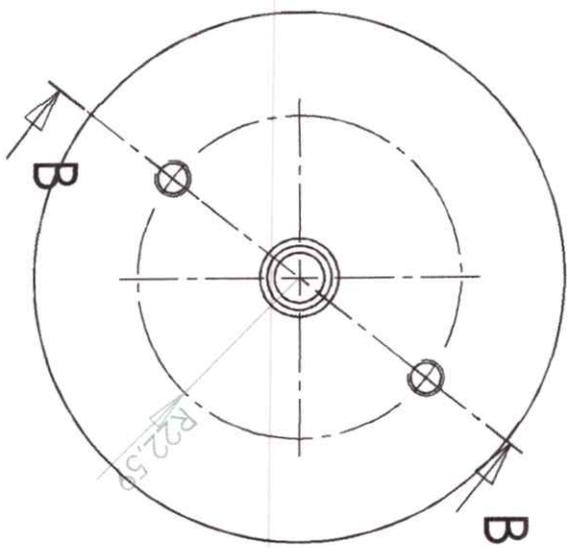
5

4

3

2

1



PROPRIETARY AND CONFIDENTIAL
 THE INFORMATION CONTAINED IN THIS DRAWING IS THE SOLE PROPERTY OF <INSERT COMPANY NAME HERE>. ANY REPRODUCTION IN PART OR AS A WHOLE WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF <INSERT COMPANY NAME HERE> IS PROHIBITED.

UNLESS OTHERWISE SPECIFIED:

DIMENSIONS ARE IN INCHES
 TOLERANCES:
 FINISH: ±0.001
 HOLE: ±0.001
 TWO PLACE DECIMAL
 THREE PLACE DECIMAL ±.001
 INTERPRET GEOMETRIC TOLERANCING PER: Q.A.
 MATERIAL:
 FINISH:
 USED ON:
 DO NOT SCALE DRAWING

COMP B B
ECHERLE 1:1

DRAWN
 CHECKED
 ENG APPR.
 MFG APPR.
 Q.A.
 COMMENTS:

NAME DATE

TITLE:

SIZE DWG. NO. **Aante carter 2** REV
 SCALE: 1:2 WEIGHT: SHEET 1 OF 1

5

4

3

2

1