

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



**Département D'Aéronautique**

**D.A.B**

**PROJET DE FIN D'ETUDE**  
**EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME**  
**D'ETUDE UNIVERSITAIRE APPLIQUEE (D.E.U.A)**  
**EN AERONAUTIQUE**

**OPTION : STRUCTURE.**

**THEME**

**Etude et Réalisation Des Pièces D'un Micro-Turboréacteur**  
**(Roue Compresseur – Arbre – Entrée d'air)**

**Présenté par :**

**MAHDJOUBI MOURAD.**  
**DJEFEL BRAHIM.**

**Encadreurs :**

**Mr. SETTOUF Med.**  
**Mr. BENTRAD Hocine.**

**-Promotion: 2007/2008-**

# بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## ملخص

هذا العمل المتواضع يتمثل في صنع جزء من محرك نفث مصغر - مقسم. غطاء المقسم. محور المحرك. غطاء محور المحرك. مخروط المحرك. لهذا بدأنا بتقديم مختلف المحركات النفاثة متطرقين إلي مختلف الأجزاء المكونة لها و بالأخص الضاغط المركزي. بعد هذا تطرقنا إلي دراسة مختلف تقنيات التصنيع بالخصوص التقنيات التي اعتمدنا عليها. بعد هذا قمنا بدراسة تقنية لتحديد مختلف مقاييس الأجزاء المصنعة و اختيار المدحرجات الملائمة. و أخيرا قمنا بتصنيع مختلف الأجزاء.

## Résumé:

Ce modeste travail consiste en la réalisation d'une partie d'un micro turboréacteur ( diffuseur, cache diffuseur, arbre moteur, cache arbre et cône moteur ) , pour cela nous avons commencé par la présentation des différents turboréacteur ainsi que leurs divers constituants, parmi les quels figure le compresseur centrifuge, ensuite nous avons abordé les différents procédés d'usinage en se basant essentiellement sur ceux que nous avons utilisés lors de notre réalisation, en troisième position nous avons effectué une étude technologique qui nous permet le choix des dimensions adaptées ainsi que le types des roulements utilisés. Une fois fixé, nous avons procédé à l'usinage des différentes pièces.

## Abstract:

This modest work is the realization of part of a micro turbojet (broadcaster, cache broadcaster, shaft, cache engine shaft and cone) for this we began with the presentation of the various turbojet and their various constituents, among the what is the centrifugal compressor, then we deal with the different machining processes relying primarily on those we used in our achievement. in third position we conducted a study technology that allows us the choice of a suitable size and the types of bearings used. Once set, a process to realization of different parts.

## REMERCIEMENT

Nous remercions le bon Dieu, le tout puissant de nous avoir accordé courage, force et endurance pour pouvoir achever ce travail.

Nous adressons notre gratitude à nos encadreurs Mr. Settouf et Mr. Bentradi pour nous avoir fourni une aide précieuse, nous a dirigé et accompagné pendant cette longue période de travail.

Nos remerciements vont aussi à messieurs : Hadeg et Abdelkrim, et à tous les personnels de l'atelier Modelage de l'entreprise POVAL-SPA de Berrouaghia.

Nos remerciements vont vers nos professeurs, qui ont fait de nous ce que nous sommes aujourd'hui.

On tient à témoigner notre gratitude à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Enfin, on remercie les membres du jury qui nous ont fait l'honneur de juger notre travail, espérant qu'ils trouveront l'expression de nos profonds respects et croire à notre sincère gratitude.

# Dédicace

C'est avec un grand plaisir que je dédie ce modeste travail à ceux qui mon élevé, soutenue, encouragé durant tous ces longues année d'étude.

Mes très chers parents.

À tous mes frères et sœurs.

À tous mes amis du département aéronautique de Blida ; tout spécialement :  
HICHEM, HASSAN, AZZEDDINE, FERHAT, ASSIA,  
OUAFA, ASMA, NOURRA et MOUNIRA.

A mon binôme MOURAD et toute sa famille.

A toutes la famille DJEFEL et TOUIZA.

A tous ceux qui connaissent BRAHIM.

D.Brahim.

# Dédicace

A La Mémoire De Mon Père Et A Ma Très Chère Ma Mère, Engage de la patience et de sacrifice dont ils ont fait preuve tout au long de mon cursus universitaire.

A mes très chers frères et sœur.

A mes cousins et neveux.

A toute la famille MAHDJOUBI et CHORFI.

A mon binôme et toute sa famille.

A tous mes amis (es) de l'option Structure.

A tous mes amis (es) et voisins.

A toute la promotion 2008 du D.A.B.

A tous ceux qui connaissent MOURAD.

A mes très chère amis et frères : KARIM (KAROU) et BRAHIM (BERHOUMA).

A celle qui occupe une place particulière dans mon cœur : Z.S.

Je dédie le fruit de toutes mes années d'études.

M. Mourad.



# Sommaire

INTRODUCTION :

## CHAPITRE I :

<b>I.1</b>	Différents types des moteurs a réaction .....	<b>2</b>
<b>I.1.1</b>	Turboréacteur .....	<b>3</b>
<b>I.1.2</b>	Le turbo fan .....	<b>4</b>
<b>I.1.3</b>	Les turbopropulseurs .....	<b>5</b>
<b>I.1.4</b>	Les statoréacteurs .....	<b>6</b>
<b>I.1.5</b>	Les pulsoréacteurs .....	<b>7</b>
<b>I.1.6</b>	Les propulsions par flux hydraulique .....	<b>8</b>
<b>I.2</b>	LES DEFERENTS COMPOSANTS DE LA TURBOMACHINE .....	<b>9</b>
<b>I.2.1.</b>	Les compresseurs .....	<b>9</b>
<b>I.2.1.1</b>	Les compresseurs axiaux .....	<b>10</b>
<b>I.2.1.2</b>	Compresseur centrifuge .....	<b>12</b>
<b>a.</b>	Etude Technologique d'un Compresseur Centrifuge En Coupe .....	<b>14</b>
<b>a.1</b>	La partie amont .....	<b>14</b>
<b>a.2</b>	La roue .....	<b>15</b>
<b>a.3</b>	Le diffuseur .....	<b>17</b>
<b>b.</b>	Triangle des vitesses .....	<b>18</b>
<b>I.2.2.</b>	La chambre de combustion .....	<b>19</b>
<b>I.2.2.1</b>	Les déférents types de chambre de combustion .....	<b>20</b>
<b>a.</b>	Les chambres de combustion individuelles ou tubulaires .....	<b>20</b>
<b>b.</b>	Chambres de combustion annulaire .....	<b>21</b>
<b>c.</b>	Chambres de combustion turbo-annulaire .....	<b>21</b>
<b>d.</b>	Les chambres annulaires a flux inversé .....	<b>22</b>
<b>I.2.2.2</b>	Conditions De Fonctionnement d'une Chambre De Combustion .....	<b>23</b>
<b>I.2.2.3</b>	Qualités requises par une chambre de combustion .....	<b>25</b>
<b>I.2.3</b>	La turbine .....	<b>25</b>
<b>I.2.4</b>	La tuyère .....	<b>28</b>

# Sommaire

## Chapitre II :

II.1	Présentation De l'entreprise POVAL- Spa .....	30
II.2	La fondrière .....	31
II.2.1	Possibilités de la fonderie .....	31
a.	La structure des alliages .....	31
b.	Les pièces .....	32
II.2.2	Méthodes de fabrication et processus industrie.....	33
II.2.2.1	Méthodes .....	33
II.2.2.2	Processus industriel.....	33
II.2.3	Matériaux de moulage .....	36
II.2.3.1	Sables de base .....	36
a.	Sables siliceux .....	36
b.	Sables spéciaux .....	36
c.	Moulage aux sables restant plastiques .....	36
II.2.3.2	Sables de moulage .....	37
1.	Matières de base.....	37
a.	Préparation du sable.....	39
b.	Caractéristiques des sables de moulage.....	39
2.	Sableries .....	39
II.2.4	Procédés de moulage .....	43
II.2.4.1	Moulage a main .....	43
1.	Principe.....	44
2.	Matériaux et sables utilisés .....	45
3.	Description du procédé .....	48
4.	Machine .....	51
5.	Outillages .....	52
II.2.4.2	Moulage machine.....	53
1.	Moulage machine avec châssis. Serrage basse-pression .....	53
2.	Moulage avec châssis. Serrage moyenne et haute pression .....	55
II.3	Tournages .....	57
II.3.1	Les machines de tournage.....	57
1.	Les tours parallèles a charioter et a fileter.....	57
2.	Les tours a copié.....	58
3.	Les Tours Semi-automatiques.....	58
4.	Les tours automatiques.....	58
5.	Les tours automatiques multibroches.....	59
6.	Les tours a commande numérique.....	59
II.3.2	Définitions des opérations de tournage.....	60
1.	Chariotage.....	60
2.	Alésage.....	60
3.	Dressage.....	60
4.	Perçage.....	60

# Sommaire

5.	Rainurage.....	61
6.	Chanfreinage.....	61
7.	Tronçonnage.....	61
8.	Filetage.....	61
<b>II.3.3</b>	Les Plaquettes d'outils.....	62
1.	Les plaquettes.....	62
2.	Le Corps d'outil.....	62
3.	Les différentes formes de plaquettes.....	63
4.	Les plaquettes réversibles.....	64
<b>II.3.4</b>	Les outils de tournage.....	65
1.	Les outils a charioté.....	65
2.	Les outils a dressé.....	65
3.	Les outils a charioté – dressé.....	66
4.	Les outils a aléser.....	67
5.	Les outils a aléser – dressé.....	68
6.	Les outils rainurés.....	68
7.	Les outils a tronçonner.....	68
8.	Les outils a fileter.....	68
<b>II.3.5</b>	Conditions de coupe.....	69
<b>II.3.6</b>	Les portes pièces.....	70
1.	Les portes pièces standards.....	70
2.	Les portes pièces dédiées.....	70
3.	Réalisation et caractéristiques des montages portes pièces.....	71
	..	

## **Chapitre III :**

<b>III.1</b>	Présentation du micro turboréacteur .....	73
<b>III.2</b>	Etude de l'arbre .....	75
<b>III.2.1</b>	Introduction .....	75
<b>III.2.1</b>	Etude statique .....	76
1.	Calcul des réactions aux appuis .....	76
2.	Calcul de l'effort tranchant et du moment fléchissant.....	77
<b>III.2.2</b>	Etude dynamique.....	80
1.	Compresseur.....	80
2.	Turbine .....	81
3.	L'arbre .....	81
4.	Ensemble .....	82
<b>III.2.3</b>	Choix des roulements .....	83
<b>III.3</b>	Bureau Méthode et dessin technique .....	87
1.	L'arbre .....	87
2.	Le Cache arbre .....	89
3.	Le diffuseur .....	91



# Sommaire

4.	La roue .....	93
5.	Le cône .....	94
6.	Le cache diffuseur .....	96

## Chapitre IV :

IV.	Introduction .....	98
IV.1	Réalisation de diffuseur .....	98
IV.1.1	Modelage.....	99
1.	Le dessin technique .....	99
2.	Confection du modèle .....	100
3.	Confection boîte noyau .....	100
IV.1.2	La coulée des pièces .....	102
1.	Noyautage .....	102
2.	Le moulage à main .....	104
3.	La coulée .....	107
IV.2	Réalisation du l'arbre moteur .....	111
IV.3	Réalisation du cache arbre .....	112
IV.4	Le cône moteur .....	113
IV.5	La roue .....	113
IV.6	Le montage .....	115

Liste des figures

**Chapitre I :**

<b>Fig. I.1</b>	Turboréacteur.....	03
<b>Fig. I.2</b>	Le Turbo fan.....	04
<b>Fig. I.3</b>	Le turbopropulseur.....	05
<b>Fig. I.4</b>	Statoréacteur.....	06
<b>Fig. I.5</b>	Pulsoréacteur.....	07
<b>Fig. I.6</b>	Propulsion par flux hydraulique.....	08
<b>Fig. I.7</b>	Compresseur haut prissions.....	09
<b>Fig. I.8</b>	Compresseur haut prissions.....	10
<b>Fig. I.9</b>	Compresseur basse prissions.....	11
<b>Fig. I.10</b>	Compresseur centrifuge.....	12
<b>Fig. I.11</b>	Compositions d'un compresseur centrifuge.....	13
<b>Fig. I.12</b>	Vue schématique d'un étage de compresse Centrifuge, d'après Baines (2005).....	14
<b>Fig. I.13</b>	Les roues.....	15
<b>Fig. I.14</b>	Les Surfaces de référence dans un compresseur centrifuge : projection méridienne, plan aube à aube et coupe orthogonal.....	16
<b>Fig. I.15</b>	Les diffuseurs.....	17
<b>Fig. I.16</b>	Montage compresseur avec le diffuseur <b>(a)</b> Entrée roue. <b>(b)</b> Sortie roue.....	18
<b>Fig. I.17</b>	Triangle des vitesses (les indices 1 et 2 se referant aux stations dans la roue.....	19
<b>Fig. I.18</b>	Chambre de combustion individuelle.....	20
<b>Fig. I.19</b>	Chambres de combustion annulaire.....	21
<b>Fig. I.20</b>	Chambre de combustion tubo-annulaire.....	22
<b>Fig. I.21</b>	Chambre de combustion annulaire à flux inversé.....	22
<b>Fig. I.22</b>	Paramètres limitatifs à la combustion.....	23
<b>Fig. I.23</b>	Compositions d'une turbine basse pression.....	26
<b>Fig. I.24</b>	Compositions d'une turbine haute pression.....	27
<b>Fig. I.25</b>	La tuyère.....	28

**Chapitre II :**

Fig. II.1	Schéma de principe de la fabrication de pièces de fonderie.....	36
Fig. II.2	Schéma de principe d'une sablerie.....	42
Fig. II.3	Croquis synoptique des systèmes de manutention et de stockage d'une sablerie.....	43
Fig. II.4	Machine à retourner et à démouler.....	45
Fig. II.5	Secoueurs à moule.....	45
Fig. II.6	Fabrication d'un élément de tuyauterie par moulage main.....	50
Fig. II.7	Châssis pour moulage main.....	51
Fig. II.8	Machine à projection de sable (Piper).....	52
Fig. II.9	Moulage machine – Serrage basse pression.....	55
Fig. II.11	Moulage machine – Serrage moyenne pression.....	58

## Liste des figures

Fig. II.12	Toure parallèle.....	61
Fig. II.13	Opération de chariotage.....	61
Fig. II.14	Opération de alésage.....	61
Fig. II.15	Opération de dressage.....	62
Fig. II.16	Opération de perçage. ....	62
Fig. II.17	Opération de rainurage.....	62
Fig. II.18	Opération de chanfeinage.....	63
Fig. II.19	Opération de tronçonnage.....	63
Fig. II.20	Opération de filetage.....	63
Fig. II.21	Outils de coupe.....	65
Fig. II.22	Les délirantes plaques.....	66
Fig. II.23	Les plaquettes réversibles et non réversibles.....	66
Fig. II.24	Direction des outils.....	67
Fig. II.25	Direction des outils dressage.....	67
Fig. II.26	Direction des outils dressage ou chariotage.....	68
Fig. II.27	Direction d'outil dressage ou chariotage.....	68
Fig. II.28	Direction des outils d'alésage chariote.....	69
Fig. II.29	Direction des outils d'alésage dressé.....	69
Fig. II.30	Direction des outils d'alésage dressé.....	69
Fig. II.31	Outils de rainure.....	70
Fig. II.32	Outils De tronçonnage.....	70
Fig. II.33	Outils de filetage.....	70

### **Chapitre III :**

Fig. III.1	La Vues 3D De des éléments a réalisés.....	77
Fig. III.2	Vues en coupe 3D.....	77
Fig. III.3	<b>Dessin en 2D.....</b>	78
Fig. III.4	Longueurs de chaque tronçon.....	79
Fig. III.5	Diagramme du moment tranchant et le moment fléchissant et de torsion.....	83
Fig. III.6	Centre de gravité de compresseur.....	84
Fig. III.7	Centre de gravité de turbine.....	85
Fig. III.8	L'arbre.....	86
Fig. III.9	Démontions de roulement.....	88

**Chapitre IV :**

Fig. IV.1	Le diffuseur (pièce finie).....	98
Fig. IV.2	L'ancien Diffuseur.....	99
Fig. IV.3	Le modèle.....	100
Fig. VI.3	La boîte noyau.....	101
Fig. IV.4	Schéma d'un Mélangeur Contenu.....	102
Fig. IV.5	Noyau.....	103
Fig. VI.6	Noyau après l'enduirage et séchage.....	103
Fig. IV.7	Le moule à l'intérieur de demi-châssis inférieur.....	104
Fig. IV.8	Moulage de la demi-partie inférieur.....	104
Fig. IV.9	Talcage et indexage du châssis .....	105
Fig. IV.10	Moulage de demi-partie supérieur.....	105
Fig. IV.11	Ouverture du moule.....	105
Fig. IV.12	Enduirage de l'empreinte.....	106
Fig. IV.13	Crampage des châssis .....	106
Fig. IV.14	La fusion.....	107
Fig. IV.15	Découchage.....	108
Fig. IV.16	La pièce brute.....	108
Fig. IV.17	Représenter 3D du cache diffuseur (solidworks).....	109
Fig. IV .18	Le cache diffuseur.....	110
Fig. IV.19	L'arbre moteur.....	111
Fig. IV .20	Le cache arbre.....	112
Fig. IV .21	Le cône moteur.....	113
Fig. IV .22	La roue (rotor).....	113
Fig. IV .23	Vue d'ensemble des pièces réalisées. ....	114
Fig. IV.24	L'assemblage des différents éléments réalisé.....	116

Liste des tableaux :

Tab II.1	Les angles des outils.....	64
Tab II.2	L'isostatique des pièces.....	75
Tab III.1	Tableau de déferent élément.....	78
Tab. III.2	valeurs des moments.....	82
Tab. III.3	Tableau Des Pulsations Critiques.....	86
Tab. III.4	Les Roulements Pour La Fréquence De Rotation Elevée.....	89
Tab. III.5	Les Etapes D'usinage De L'arbre.....	92
Tab. III.6	Les Etapes D'usinage De Cache arbre.....	94
Tab. III.7	Les Etapes D'usinage De Diffuseur.....	96
Tab. III.8	Les Etapes D'usinage De Conne.....	99
Tab. III.9	Les Etapes D'usinage De Cache Diffuseur.....	101
Tab. IV.1	Les Matières Première.....	106

## NOMENCLATURE

M	nombre de Mach
RPM	tour par minute
VSV	stators à calage variable
VBV	les vannes de décalage
IGV	Aubage de prérotation
T	température
S	entropie
H	altitude au niveau de la mer
W	travail , vitesse relative
Q	la quantité de chaleur
h	enthalpie
C <sub>p</sub>	chaleur spécifique
.r	constante des gaz parfaits $r=R/M$
T <sub>t</sub>	température totale , d'arrêt
V <sub>a</sub>	vitesse de l'avion
P <sub>t</sub>	pression d'arrêt
P <sub>a</sub>	pression atmosphérique
p	pression
n	coefficient polytropique
f	dosage
m <sub>f</sub>	débit du carburant
m <sub>o</sub> ,m <sub>a</sub>	débit d'air
r	la richesse, rayon
P <sub>ci</sub>	pouvoir calorifique inférieur
P	la puissance
P <sub>c</sub>	pression critique
F	la poussée
F <sub>sp</sub>	poussée spécifique
P <sub>p</sub>	puissance propulsive
P <sub>c</sub>	puissance calorifique
P <sub>th</sub>	puissance thermique
C <sub>h</sub>	consommation horaire du carburant
C <sub>sp</sub>	consommation spécifique
U	vitesse d'entraînement
n	nombre d'aubes
A	la section
V	vitesse absolue
V <sub>u</sub>	vitesse absolue tangentielle moyenne
C <sub>a</sub>	vitesse axiale
C <sub>r</sub>	vitesse radiale
C <sub>w</sub>	vitesse tangentielle
C	vitesse absolue du flux
d	diamètre
MFP	masse flow parameter, Paramètre du débit (fonction)

## Symboles grecs

$\eta_c$	rendement adiabatique de compression
$\eta_{pc}$	rendement polytropique de compression
$\Delta T$	variation de la température
$\Delta h$	variation de l'enthalpie
$\eta_t$	rendement adiabatique de la turbine
$\eta_d$	efficacité de l'entrée d'air
$\pi_d$	pertes de pression
$\Delta h_t$	variation de l'enthalpie totale
$\pi_c$	Taux de compression
$\tau_c$	rapport de température dans le compresseur
$\tau_t$	rapport de température dans la turbine
$\eta_{pc}$	rendement polytropique du compresseur
$\eta_{pt}$	rendement polytropique de la turbine
$\eta_b$	rendement de la chambre de combustion
$\pi_T$	Taux de détente dans la turbine
$\pi_N$	Taux de détente dans la tuyère
$\eta_N$	rendement de la tuyère
$\eta_{th}$	rendement thermique
$\eta_p$	rendement propulsif
$\eta_g$	rendement global
$\sigma$	facteur de ralentissement
$\Psi$	facteur de charge
$\rho$	la masse volumique
$\beta$	angle relatif
$\alpha$	angle absolu
$\gamma$	$C_p/C_v$

## Indice

th	thermique
T,t	turbine ,d'arrêt
C	compresseur , col , critique
0	écoulement ambiant
1	entrée d'air
2	entrée compresseur
3	entrée chambre de combustion
4	entrée turbine
5	entrée tuyère
6	extérieur
R,r	réel
S	isentropique , stochiométrique
.f	fuel
.a	admission
.p	polytropique
N	tuyère
.e	échappement
.u	tangentiel

## TABLEAU DE CONVERSION

### MESURES DE PRESSION

1Kg/cm<sup>2</sup> = 14.22 psi (Livre par pouce carré)

1 atm ( pression atmosphérique ) = 1.033Kg/cm<sup>2</sup> = 1.013Hpz = 14.7 psi = 14.7Ib/in<sup>2</sup>

1 pascal = 1N/m<sup>2</sup>

### MESURES DE TEMPERATURE

Degré fahrenheit = 9/5 (Degré centigrade +32)

Degré centigrade = 5/9 (Degré fahrenheit -32)

1 Degré Kelvin = 237.15°C = 1.8°R (Degré Rankin)

### LONGUEUR

1pouce (inch) = 2.54 cm

1pied (foot) = 30.48 cm

1 MILLE = 1.6093Km

1MILLE MARIN = 1.8532Km

1Yard = 3pieds = 36 pouces = 0.914m

### SURFACE

1pouce carré (Square inch) = 6.452 cm<sup>2</sup>

1pied carré (Square foot) = 0.093m<sup>2</sup>

1Acre = 0.0040 Km<sup>2</sup> = 0.4Ha

1 mille carré (Square Mile) = 2.590Km<sup>2</sup>

1Yard carré = 9 pieds carrés = 0.836m<sup>2</sup>

1Hectare = 0.01 Km<sup>2</sup> = 2.471 acres

1Km carré = 100 hectares

1once (ounce) = 28.35 grammes

1Livre (pound (LB)) = 0.453 kg

1tonne (TON) = 1.016 Kg 1Kg = 2.20462 Ibs



# Chapitre I

## Généralité Sur Les Turboréacteurs

*Généralité Sur Les  
Turboréacteurs*

# Chapitre II

Le Procédure  
D'Usinage

# Chapitre III

*Etude Technologique*

# Chapitre IV



## **Introduction :**

Des origines à la Seconde Guerre mondiale, l'essor de l'aviation a été associé à la propulsion par l'hélice. Suivant les possibilités technologiques apportées par d'autres branches d'activités, l'hélice fut mise en mouvement par un moteur à vapeur - cas des avions de Clément Ader -, puis par un moteur à combustion interne de plus en plus léger et puissant à la fois et, désormais, par une turbine à gaz.

Cette même évolution technologique a permis au fil des années l'apparition de l'aviation légère qui nécessite des moteurs de petites dimensions, aussi légers qu'ils sont puissants, ce qui a conduit à l'apparition du micro turboréacteur.

C'est dans ce contexte, et dans le cadre de la réalisation d'un micro turboréacteur, figure notre modeste projet de fin d'études qui consiste à la réalisation d'une partie de ce dernier, en mettant en œuvre les moyens informatiques à notre disposition, et les moyens d'usinages qui ont été mis à notre disposition durant notre stage à l'entreprise **POVAL-SPA** de **Berrouaghia**.

Pour cela nous avons adopté le plan de travail suivant :

- Ø Introduction.
- Ø Généralité sur les Turboréacteurs.
- Ø Procédés D'Usinage.
- Ø Etude Technologique.
- Ø Réalisation.
- Ø Conclusion.

## **I.1 Différents types des moteurs à réaction :**

Il existe différents types de moteurs à réaction qui fonctionnent tous sensiblement selon le même principe : l'air pénétrant dans le moteur passe tout d'abord dans un compresseur avant d'atteindre la chambre de combustion, où l'oxygène de l'air brûle avec le combustible présent dans la chambre ; les gaz de combustion entraînent alors des turbines qui actionnent le compresseur et le rotor du moteur.

Les trois moteurs à réaction les plus utilisés sont les turboréacteurs, les turbopropulseurs et les turbo fans. Toutefois, il existe encore d'autres types de moteurs à réaction, notamment les statoréacteurs et les pulsoréacteurs, mais leurs utilisations sont plus restreintes. Par ailleurs, la propulsion par flux hydraulique est un mode de propulsion à réaction qui se distingue par l'absence de chambre de combustion.

On distingue deux grands types :

### **A. Moteur à propulsion direct :**

Ces moteurs sont ainsi nommés car ils produisent directement la force propulsive ; appelée poussée ; celle-ci s'exprime en newton ou deca newton, dans cette grande famille, sont rassemblées :

- ∅ les groupes turboréacteurs dont l'appellation courante GTR.
- ∅ les statoréacteurs, pulsoréacteurs et les moteurs fusés.

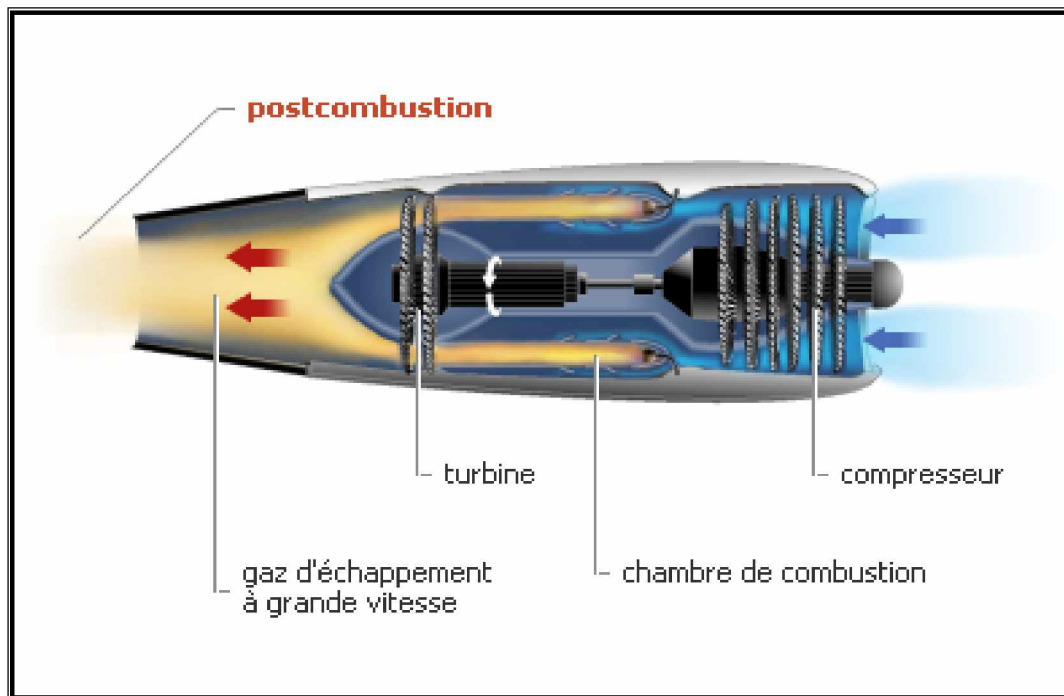
### **B. Moteur à propulsion indirecte :**

Ces moteurs sont ainsi nommés car ils ne produisent pas directement la force, mais délivrent une puissance sur l'arbre ; celle-ci est ensuite convertie en puissance propulsive par un organe assurant la traction (l'hélice), ces moteurs se classent en deux catégories bien distinctes :

- ∅ les groupes motopropulseurs dont l'appellation usuelle **GMP**.
- ∅ les groupes turbopropulseurs plus couramment appelés **GTP**.

### I.1.1 Le turboréacteur :

Les turboréacteurs sont les moteurs à réaction les plus utilisés dans l'aviation militaire. Toutefois, dans l'aviation civile, les turboréacteurs simples ont cédé leur place aux turboréacteurs à double flux (ou turbo fans), moins bruyants et plus économiques.



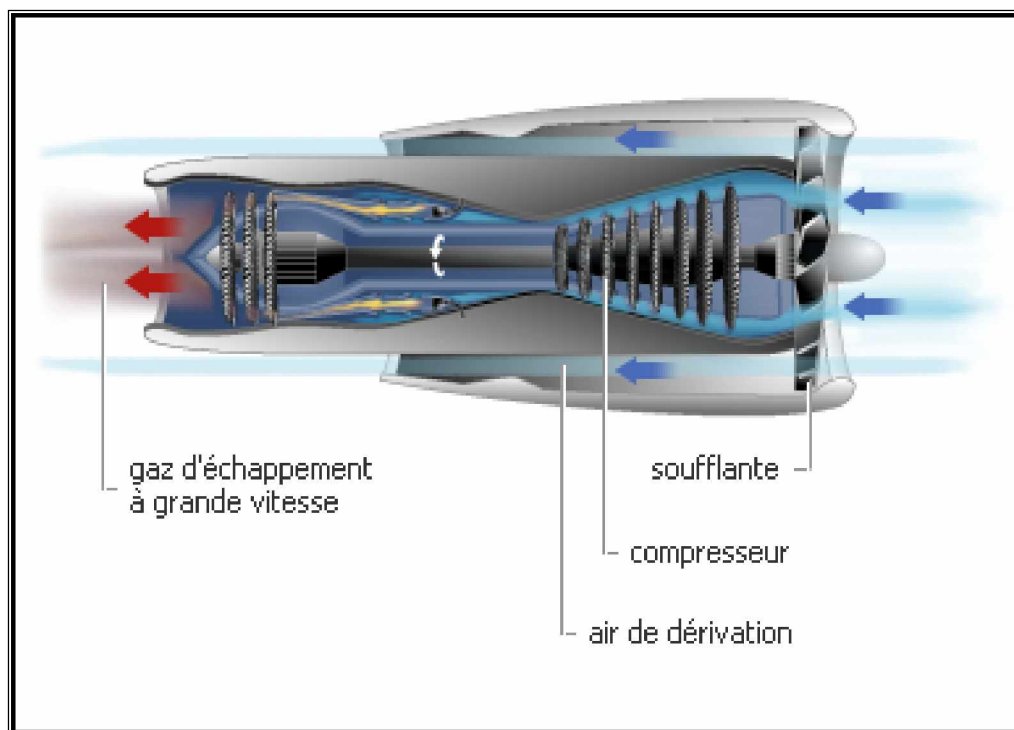
**Fig. I.1:** Le Turboréacteur

Dans un turboréacteur simple, un compresseur aspire et comprime de grandes quantités d'air, qui sont ensuite envoyées dans des chambres de combustion où l'air comprimé est mélangé à du kérosène de manière à constituer un mélange explosif. La combustion de ce mélange produit des gaz chauds qui sont violemment éjectés vers la tuyère. Ces gaz d'échappement entraînent une turbine, qui actionne les compresseurs par le biais d'un axe central qui les lie.

### I.1.2 Le Turbo fan :

Le turbo fan (ou turboréacteur à double flux) est une version améliorée du turboréacteur, dans laquelle l'air est aspiré par un compresseur supplémentaire de grande taille, appelé soufflante. Seule une partie de l'air aspiré pénètre dans le moteur et est comprimée, la majeure partie étant déviée directement vers l'arrière du réacteur.

Cet air détourné est ensuite mélangé avec les gaz très chauds sortant de la turbine, avant d'atteindre la tuyère.



**Fig. I.2:** Le Turbo fan

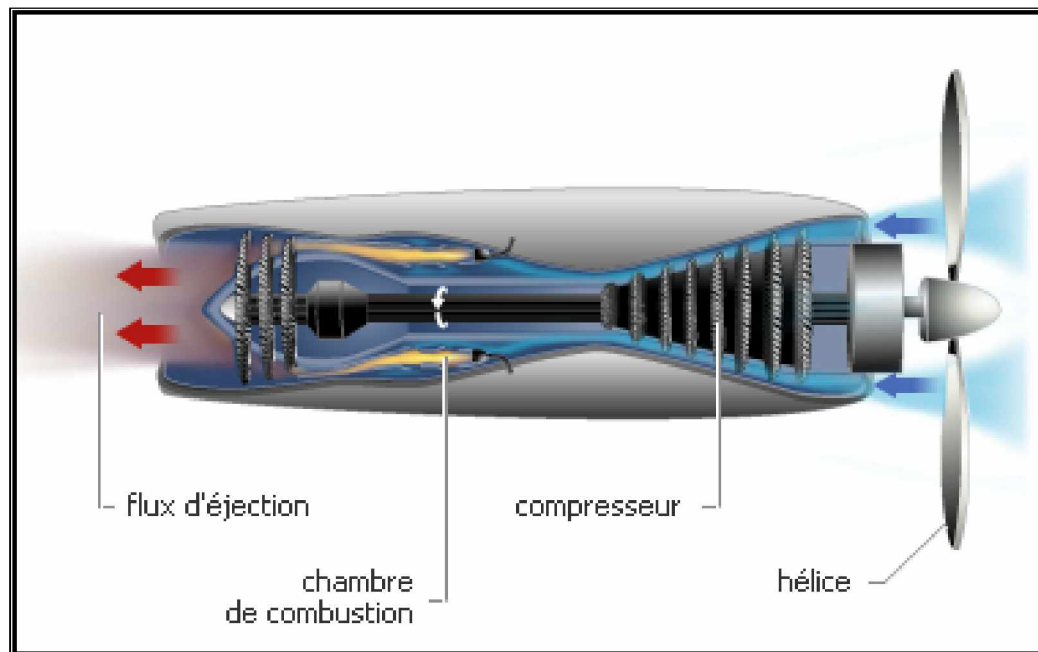
Un **turbo fan** dispose ainsi d'une plus grande poussée pour le décollage et l'ascension. De plus, la dérivation d'air refroidit le moteur et diminue son niveau sonore. Alliant la puissance d'un turboréacteur à l'efficacité et à l'économie d'un moteur à hélice, le turbo fan constitue le moteur de référence de l'aviation civile.



### I.1.3 Les Turbopropulseurs :

Un turbopropulseur fonctionne de manière assez similaire à un turboréacteur, à la différence qu'il utilise une hélice pour fournir son énergie de propulsion. Seuls **10 p. 100** environ de la poussée globale proviennent de l'énergie des gaz détendus, le reste est fourni directement par l'hélice.

Toutefois, comme la vitesse angulaire de la turbine est trop élevée pour alimenter directement l'hélice, un réducteur de vitesse est intercalé entre l'arbre de la turbine et celui de l'hélice ; ce dispositif a pour effet de diminuer fortement la vitesse de l'hélice mais augmente le couple qui lui est appliqué.



**Fig. I.3:** Le Turbopropulseur.

Ainsi, les turbopropulseurs conviennent parfaitement aux avions de petite taille et de taille moyenne qui volent à des vitesses inférieures à **750 km/h**.

### **I.1.4 Les Statoréacteurs :**

Le statoréacteur est le plus simple des moteurs à réaction. C'est un turboréacteur sans compresseur ni turbine. L'air qui arrive à l'entrée du réacteur est comprimé par la propre vitesse de l'avion. Le moteur est alimenté en carburant par des couronnes d'injection. Le carburant est brûlé en présence de l'air comprimé dans la chambre de combustion. Les gaz émis par cette combustion sont éjectés du moteur par une tuyère, ce qui assure la propulsion de l'engin. Dans ce type de moteur à réaction, la totalité des gaz d'échappement est convertie en poussée efficace puisqu'il n'a pas de turbine à actionner.

Cependant, comme le fonctionnement du statoréacteur dépend de la compression de l'air à l'entrée du moteur, il est nécessaire d'augmenter au préalable la vitesse de l'engin avant le statoréacteur (**vitesses supérieures à 320 km/h**) ; ainsi, le statoréacteur ne peut pas fonctionner au démarrage, au décollage et aux faibles vitesses.



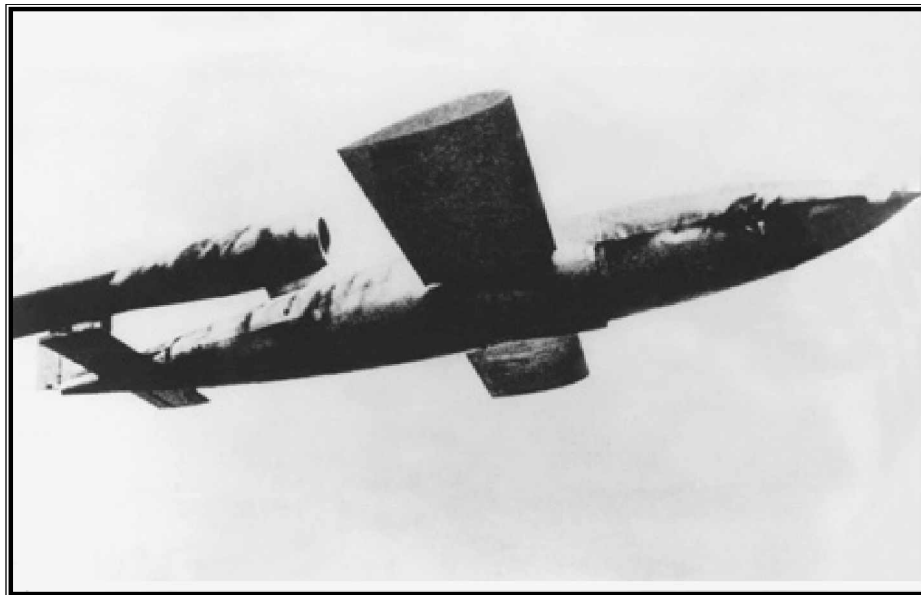
**Fig. I.4 :** Le Statoréacteur.

En **novembre 2004**, l'avion expérimental sans pilote de la **NASA**, baptisé **X-43A**, équipé d'un statoréacteur à combustion supersonique appelé « **scramjet** » (supersonique combustion ram jet), a battu le record mondial de vitesse en volant pendant **11 secondes** à **Mach 10** (soit environ **11 000 km/h**, en tenant compte des paramètres d'altitude, etc....).

### **I.1.5 Les Pulsoréacteurs :**

Un pulsoréacteur est semblable à un statoréacteur. Toutefois, le pulsoréacteur est équipé d'une série de clapets, situés à l'avant de la chambre de combustion, qui contrôlent l'admission de l'air. Dans ce type de moteur à réaction, la combustion est intermittente, ou à impulsions, et non continue.

L'air est admis dans le moteur par quelques clapets. La combustion est amorcée, ce qui augmente la pression et provoque la fermeture des clapets. Les gaz chauds, expulsés par la tuyère arrière, produisent une poussée et abaissent la pression. Les clapets s'ouvrent alors et admettent à nouveau de l'air. Le cycle est ensuite réitéré.



**Fig. I.5:** Le Pulsoréacteur.

Le pulsoréacteur a été utilisé dans le missile allemand **V1** pendant la **Seconde Guerre mondiale** (image ci dessus). Cette « **bombe volante** » d'environ **8 mètres** de long, qui pouvait voler à la vitesse de **650 km/h**, préfigure les missiles de croisière actuels, équipés de moteurs-fusées et de turboréacteurs bien plus efficaces.

### **I.1.6 Les propulsions par flux hydraulique :**

Contrairement aux autres types de moteurs à réaction, la propulsion par flux hydraulique n'utilise pas de chambre de combustion. Dans ce système, l'eau entre à l'extrémité avant du bateau, s'écoule dans des pompes à haute pression et est ensuite éjectée à l'arrière par une ou plusieurs tuyères qui produisent des flux d'eau à grande vitesse.

Des pompes très efficaces et de grandes vitesses sont nécessaires pour obtenir des flux hydrauliques compétitifs avec les autres moyens de propulsion de navires.



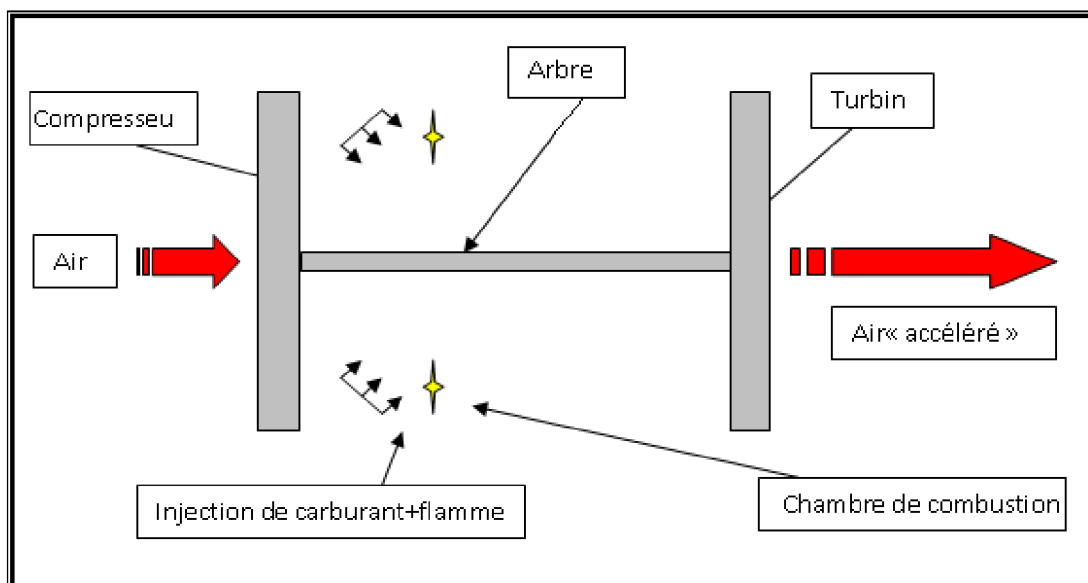
**Fig. I.6:** La propulsion par flux hydraulique.

Bien que la propulsion par flux hydraulique ne se soit pas révélée efficace pour de grands bateaux, elle est tout de même employée pour la propulsion de certains hydroptères (ou hydrofoils) et hors-bord de compétition.

## I.2 Les différents composants de la turbomachine :

Une turbomachine est composée de plusieurs éléments principaux. De l'avant vers l'arrière, ce sont : le compresseur, la chambre de combustion, la ou les turbines et enfin la tuyère.

Lorsque l'air traverse ces divers éléments : sa pression, sa température et sa vitesse varient. Ces variations produisent les forces dont la résultante est la force de propulsion de l'avion.



**Fig. I.7:** Vue schématique d'une turbomachine.

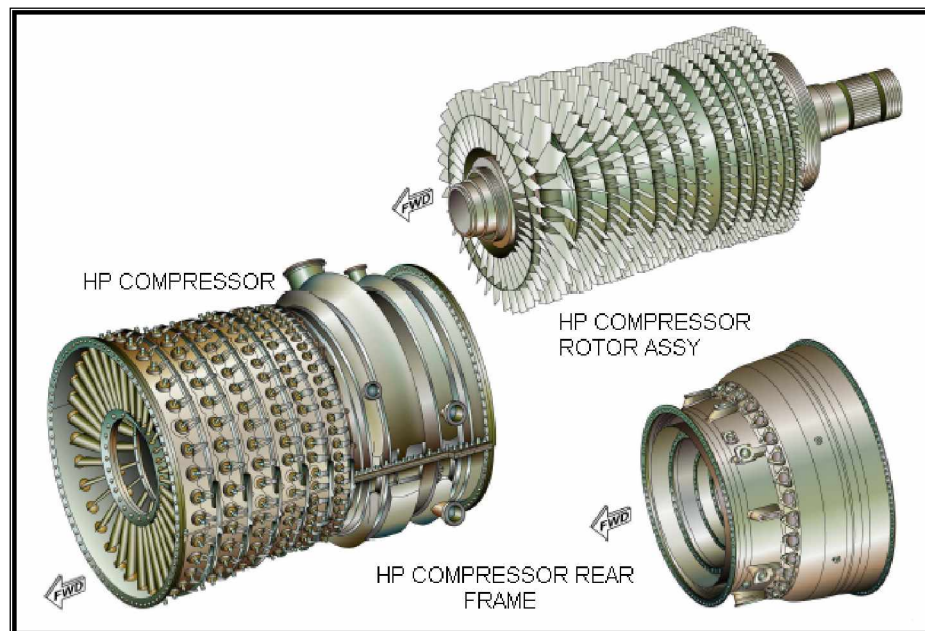
### I.2.1. Les compresseurs :

L'air extérieur est d'abord aspiré par le compresseur, qui peut être de deux sortes, centrifuge ou axial.

### I.2.1.1 Les compresseurs axiaux :

L'air traverse le compresseur en ligne droite. Il est constitué d'une succession de roues mobiles. Qui se présentent comme des tambours dont la périphérie est plantée d'une multitude d'aubes. Ces roues tournent à grande vitesse et sont appelées rotors.

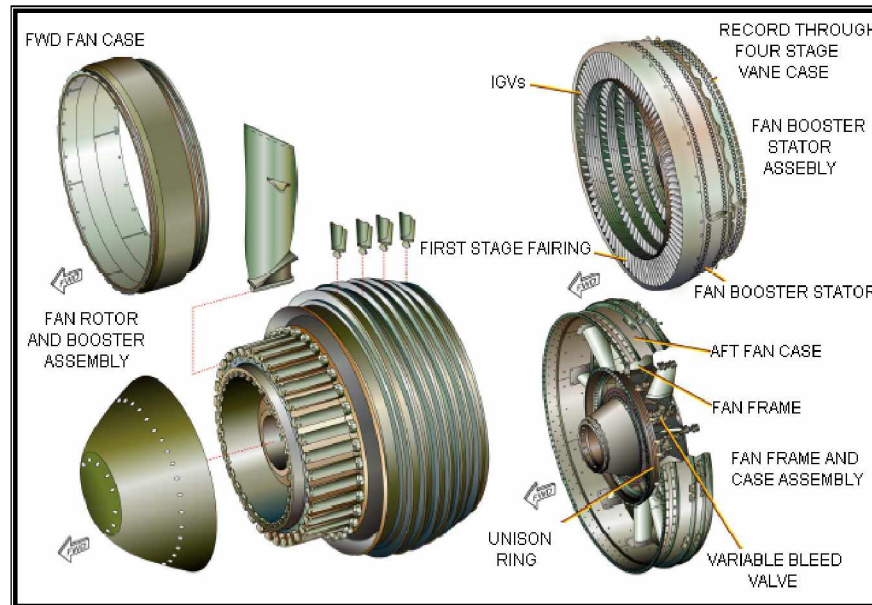
Entre ces rotors sur l'axe du réacteur sont attachées des couronnes d'aubes fixes appelées stators. Elles ont pour but de redresser l'écoulement d'air dévié par son passage dans les rotors. Chaque couple rotor et stator du compresseur constitue un « étage de compression ».



**Fig. I.8 :** Compresseur haut pressions

La compression de l'air augmente sa température et les compresseurs doivent supporter des écarts de température élevés. L'air extérieur qui entre dans le réacteur de **12 000 m** d'altitude est à environ **-50°C**. Lorsqu'il sort du compresseur, sa température est environ **300 à 500°C**.

Les aubes du compresseur sont donc fabriquées avec des alliages spéciaux en fonderie ou par matriçage avec un soin qui surprend, car la moindre petite impureté dans le métal peut provoquer une rupture sous efforts importants subis lors de la rotation.



**Fig. I.9 :** Le Compresseur basse pressions.

La demi-douzaine d'opérations de matriçage nécessaires pour transformer une barre de titane en aube ne dure que quelques minutes. Pourtant, il faut six mois pour fabriquer une par une la quarantaine d'aubes en titane d'une soufflante de réacteur à double flux, à cause des longues opérations de contrôle et de traitement de surface du métal

### **I.2.1.2. Le Compresseur centrifuge :**

Le compresseur centrifuge avait auparavant été étudié par le Prof. **Rateau (Mérigoux, 1999)**, qui fournit un certain nombre de réalisations. En termes de spécificité, le compresseur radial se distingue de son homologue axial par de plus forts taux de compression par étage, mais au prix d'un débit moindre ou d'un encombrement radial plus important. La différence est moins tranchée en ce qui concerne le rendement.



**Fig. I.10:** Le Compresseur centrifuge

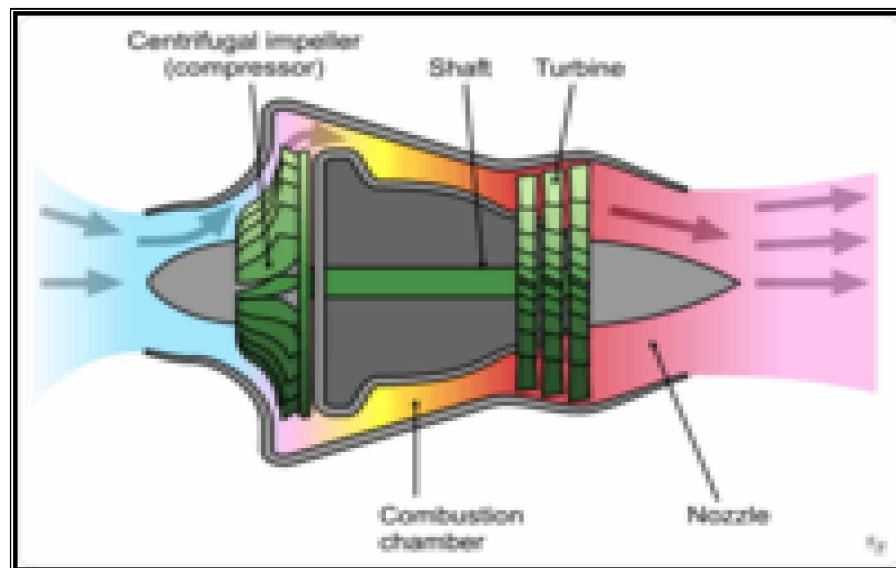
En effet, bien que les écoulements fortement tridimensionnels qui se développent dans les conduits étroits et courbes des roues de compresseurs centrifuges soient sources de pertes aérodynamiques importantes, la contribution des forces centrifuges permet d'obtenir des rendements comparables dans les deux cas. Cet "effet centrifuge" est une caractéristique des machines radiales.

Malgré une histoire déjà ancienne, le compresseur centrifuge reste un élément central dans de nombreuses applications : le turbopropulseur de faible poussée de l'ordre de **5 à 100 daN** (**Mec Achrome**, Micro turbo, **Williams**, **AMT**), la suralimentation automobile (**Honeywell-Garrett**, **IHI**), le conditionnement d'air (**LTS**, **Hamilton Sundanais**, **Honeywell**).



Les applications industrielles pour le gaz ou le pétrole (**Solar Turbines, Dresser Rand, Nuovo Pignone**). D'un point de vue scientifique, les écoulements dans les compresseurs centrifuges restent un sujet d'études variées, notamment sur :

- Ø Les aspects aérodynamiques vers les forts taux de compression (**Higashimori et al.2004, Ibaraki et al. 2003**).
- Ø la compréhension (**Ziegler, Gallus et Niehuis, 2003, Shum, Tan et Cumpsty, 2000**) et la modélisation (**Rochuon et Trébinjac, 2005**) des interactions rotor/stator.
- Ø le design direct (**Arnone et al.2002, Came et Robinson, 1999**), inverse (**Zangeneh et al.2004, Passrucker et Van Den Braembussche, 2000**) et l'optimisation "mathématique" (**Demeulenaere et Hirsch, 2005, Lee, Luo et Bein, 2001**).
- Ø l'augmentation de la plage de fonctionnement (**Skoch, 2003, Wernet, Bright et Skoch, 2001**).
- Ø sans oublier les aspects acoustiques (**Roger, 2004**), aujourd'hui essentiels.



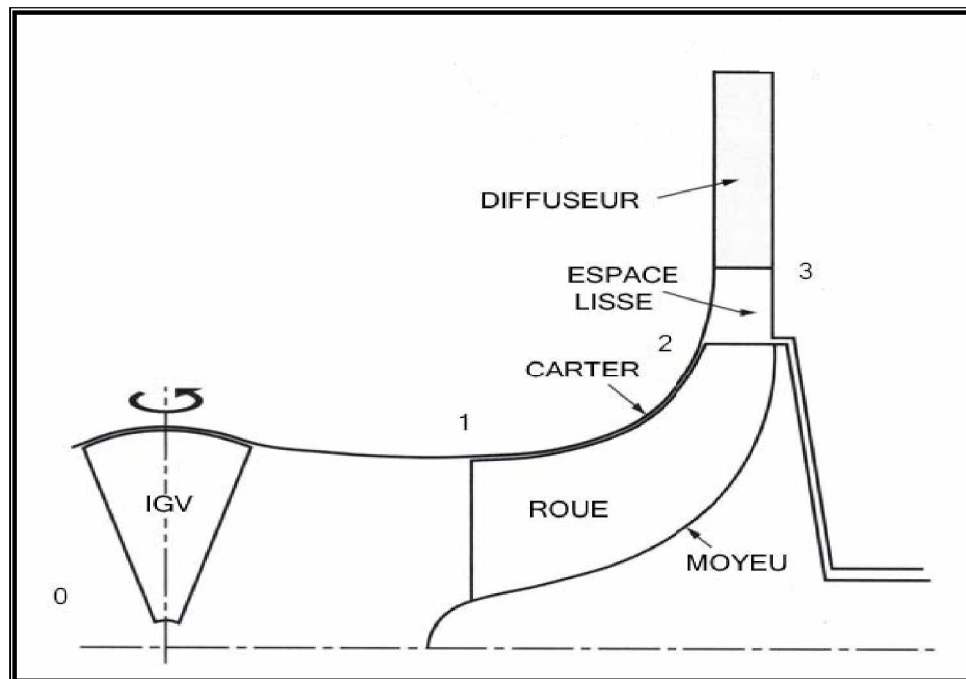
**Fig. I.11** : La Composition d'un compresseur centrifuge.

a. Etude technologique d'un compresseur centrifuge en coupe :

La **figure (I.12)** présente une vue schématique d'un étage complet de compresseur centrifuge, c'est-à-dire la juxtaposition

- Ø d'une partie amont.
- Ø d'une roue.
- Ø d'un diffuseur

Les numéros donnés sur la **figure (I.12)** correspondent à la convention de notation utilisée dans la suite pour représenter les différentes stations de l'étage.



**Fig. I.12 :** Vue schématique d'un étage de compresseur Centrifuge.

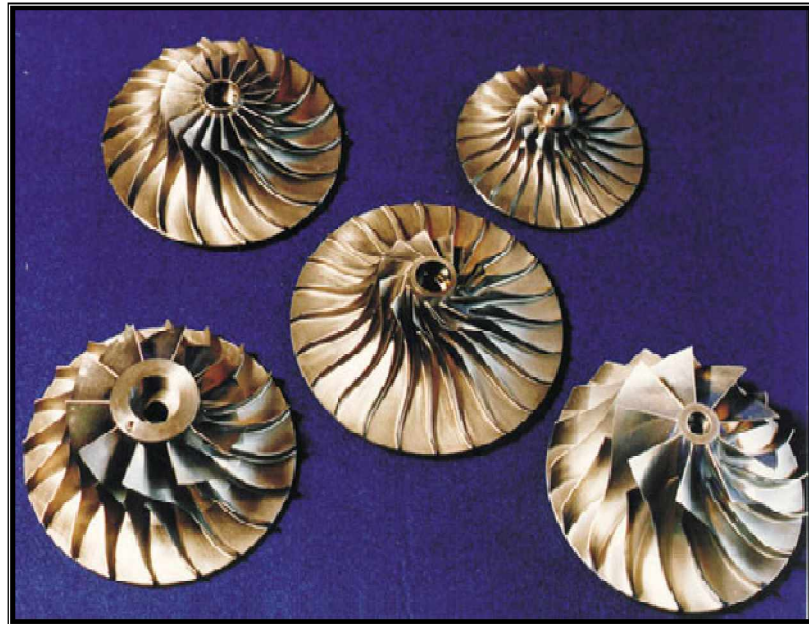
a.1 La partie amont :

Le rôle de la partie amont est d'amener l'écoulement jusqu'à la roue. On classe sous la dénomination générale de partie amont des éléments aussi divers que : des vannes de pré rotation (cas de la **figure (I.12)**) ; un canal de retour, un plenum d'alimentation ; ou un simple pavillon axial.

### a.2 La roue :

La roue est l'élément fondamental du compresseur, car elle fournit la totalité de l'échange de travail, il s'agit en effet du seul élément mobile de l'étage. La roue de la **figure (I.12)** comporte ce qu'on appelle une zone inductrice, c'est-à-dire que les pales commencent dans la partie axiale de la veine méridienne ; on considère que les roues de ce type ont des performances supérieures aux roues qualifiées de **2D**, dont le bord d'attaque est situé dans le virage axial-radial.

La **figure (I.13)** présente diverses morphologies de roues de compresseurs centrifuges.

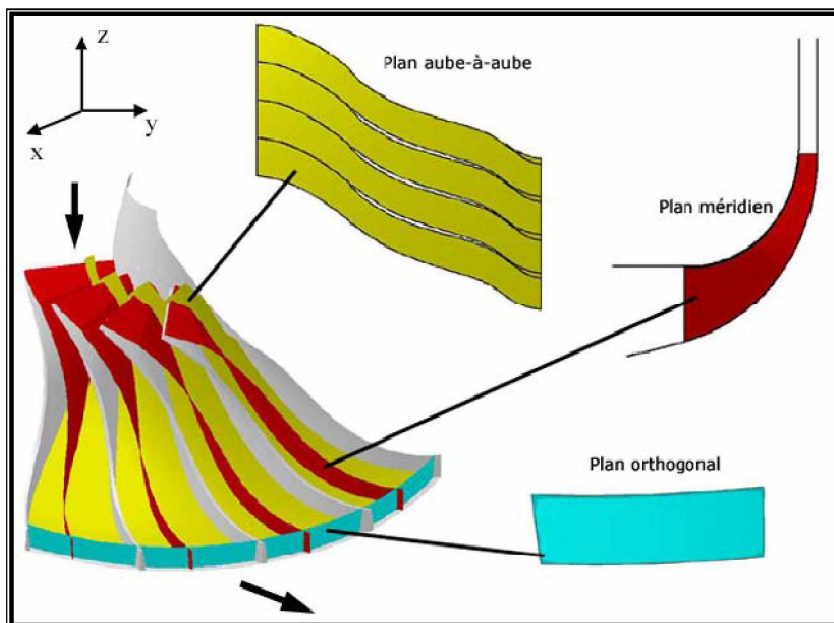


**Fig. I.13** : Les roues.

On remarquera notamment les différences entre ces roues en termes de nombre de pales, de hauteur des aubages et d'angle de couchage en sortie.

La complexité de ce type de géométrie pleinement tridimensionnelle nécessite l'introduction de surfaces de référence, qui rendent l'analyse des écoulements plus accessible (**Wu et Brown, 1951**). La **figure (I.14)** présente ces surfaces : les surfaces méridiennes sont obtenues par projection sur le plan  $r, z$ , les surfaces aube à aube sont généralement représentées par une transformation conforme dans le plan  $d/s, d\theta$  (ou  $s$  est l'abscisse curviligne), et les coupes orthogonales, qui peuvent être considérées comme quasi planes.

La **figure (I.14)** permet d'insister sur les courbures caractéristiques des canaux de compresseurs centrifuges : le virage axial-radial (vue méridienne) et les courbures du plan aube à aube. On distingue d'ailleurs plusieurs cas pour la sortie de roue, ou les pales peuvent être purement radiales ou couchées en arrière (cas de la **figure (I.14)**), ce qui ajoute une courbure spécifique.

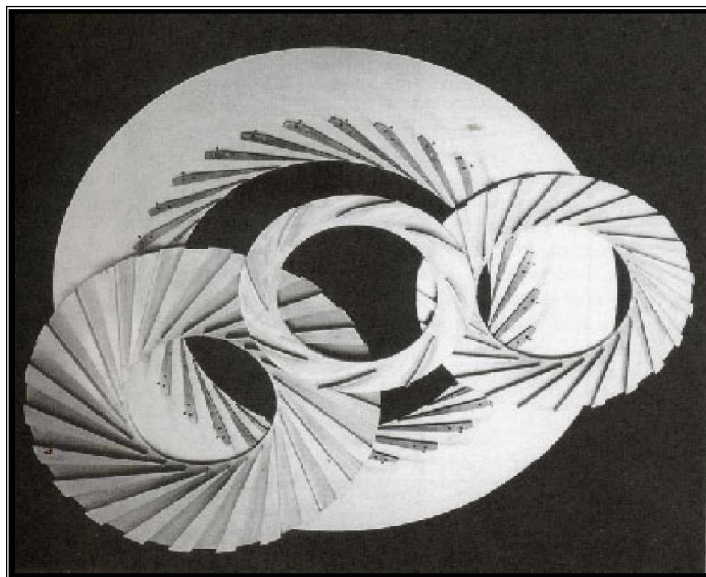


**Fig. I.14:** Surfaces de référence dans un compresseur centrifuge : projection méridienne, plan aube à aube et coupe orthogonale.

### a.3 Le diffuseur :

A la sortie du rotor, la pression statique de l'écoulement a augmenté, mais une partie de la pression totale apportée par la roue est présente sous forme d'énergie cinétique. Le rôle du diffuseur est alors de ralentir cet écoulement, car les pertes dans les conduits en aval dépendent fortement du nombre de Mach de l'écoulement.

Ce ralentissement permet de plus la conversion d'une part de l'énergie cinétique en pression statique. **La figure (L14)** présente différents types de diffuseurs : le diffuseur triangulaire, pour lequel une approche de l'écoulement "par canaux" est particulièrement adaptée ; le diffuseur aube à profils, dont on comprend mieux les caractéristiques par une approche "par aubages".

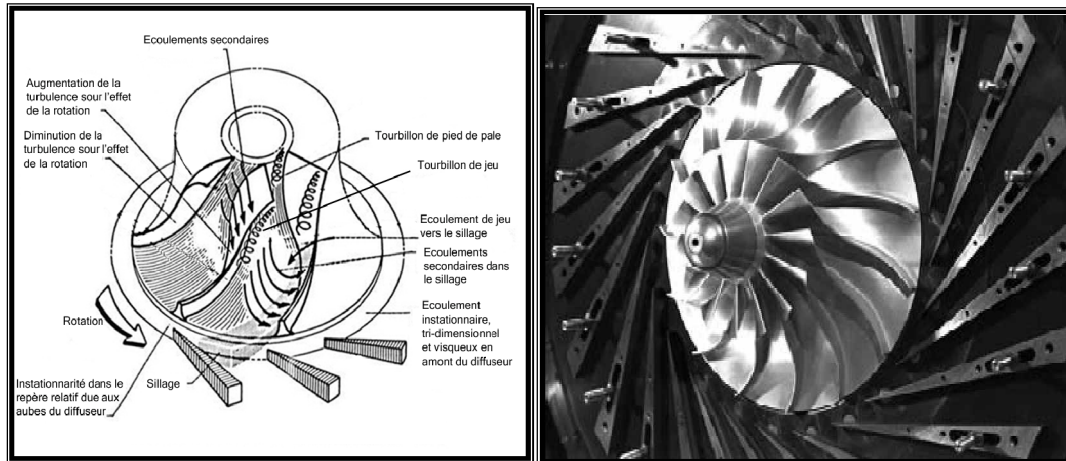


**Fig. L15:** Les diffuseurs.

Les diffuseurs à faible solidité reçoivent de plus en plus d'attention ; ils sont semblables aux diffuseurs aubes, mais se caractérisent par un faible nombre de pales, ce qui a pour conséquence l'absence de "col" géométrique<sup>1</sup>.

Ceci accroît la plage de fonctionnement de l'étage, mais généralement au prix de pertes légèrement plus importantes.

Il existe aussi des diffuseurs lisses, dépourvus de pales, souvent préconisés pour les applications où le taux de compression reste inférieur à 2.5.



**Fig. I.16:** Montage compresseur avec le diffuseur

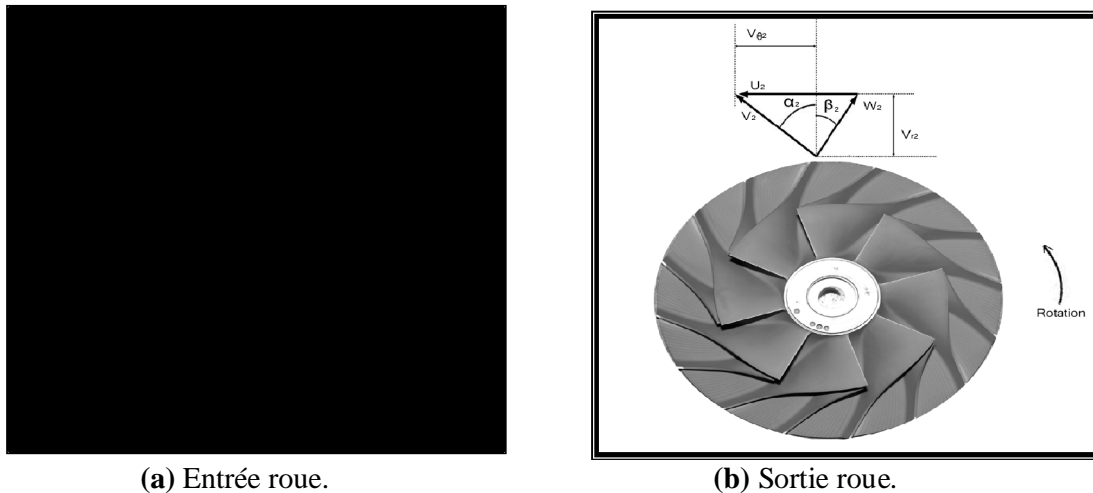
### b. Triangle des vitesses :

Le triangle des vitesses du compresseur centrifuge présenté dans la **figure (I.17)** repose sur la composition des vitesses relative et d'entraînement

$$\mathbf{V} = \mathbf{W} + \mathbf{U} \quad (1.1)$$

Où  $\mathbf{V}$ ,  $\mathbf{W}$  et  $\mathbf{U}$  sont respectivement les vecteurs<sup>2</sup> vitesse absolue, relative et d'entraînement.

La **figure (I.17)** donne les principales projections de ces vecteurs sur les directions  $r$ ,  $z$  et  $\theta$ . Les angles  $\alpha$  et  $\beta$  représentent respectivement les angles d'écoulement absolus et relatifs, correspondant aux différentes vitesses.



(a) Entrée roue.

(b) Sortie roue.

**Fig. I.17:** Triangle des vitesses (les indices 1 et 2 se referent aux stations dans la roue, voir figure (I.12)).

Notons que les composantes  $V_z$  en entrée et  $V_r$  en sortie sont directement reliées au débit qui traverse le compresseur. Le paragraphe suivant présente l'équation d'Euler, qui nous permettra de donner un sens aux projections tangentielles.

### 1.2.2. La chambre de combustion :

La chambre de combustion est conçue dans le but d'assurer la combustion du mélange air /carburant (transformation de l'énergie chimique du mélange en énergie calorifique).

La température des gaz de combustion ne doit pas dépasser la température structurelle admissible des parois de la chambre de combustion. Moins de **20%** du volume total de l'air admissible à la chambre de combustion est mélangé au carburant puis brûlé, le reste de l'air (air secondaire) est simplement chauffé car il a pour rôle de refroidir et de protéger les parois de la chambre de combustion des températures trop élevées de la combustion.

Le rapport carburant /air à l'intérieur de la chambre de combustion varie selon le type de moteur, il est de l'ordre de **1/30** à **1/60** en quantité de poids (gamme bien sur).

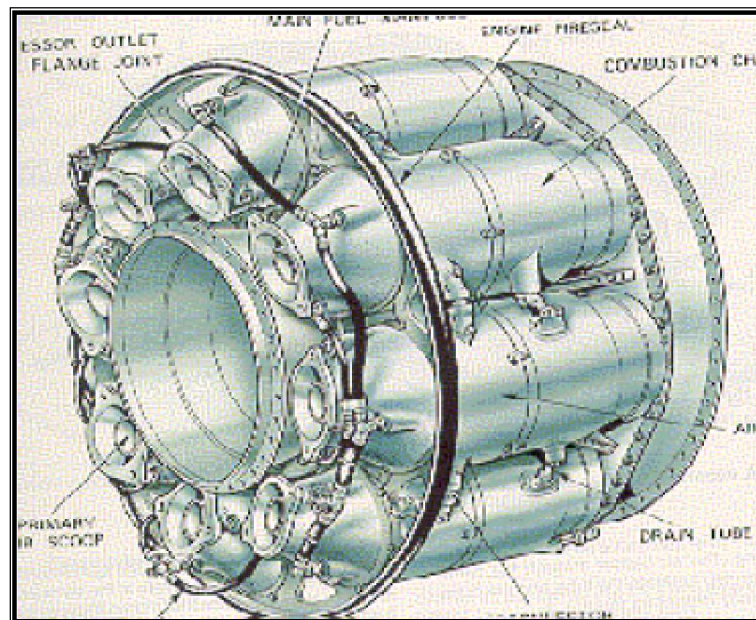
Le rapport moyen (carburant/air) admissible pour les nouveaux moteurs est approximativement de **1/40(gr)**, mais seulement **1/15** sont utilisés pour une combustion complète Parmi les types de chambres de combustion on peut citer

### **I.2.2.1 les différents types de chambre de combustion :**

#### **a. Les chambres de combustion individuelles ou tubulaires :**

Ce type de chambre de combustion **figure (I.18)** fut le premier à être adopté, vu la facilité de sa mise en point ainsi que son interchangeabilité. Elle est constituée de deux tubes concentriques, l'enveloppe interne et le tube à flamme.

Les chambres individuelles sont placées derrière le compresseur et réparties autour de l'axe longitudinal du réacteur. Elles sont reliées par une rampe d'intercommunication qui permet au démarrage la propagation de la flamme à toutes les chambres à partir des deux chambres disposant de bougies d'allumage.

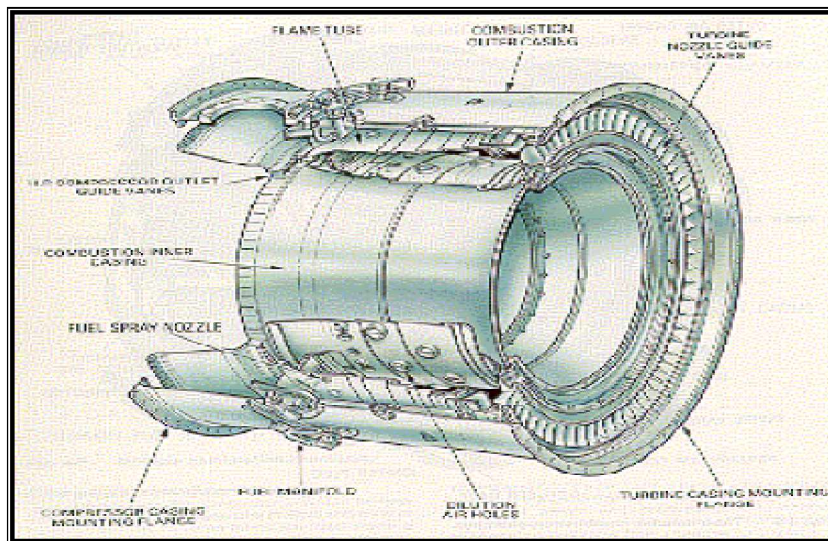


**Fig. I.18:** La chambre de combustion individuelle.



### b. Chambres de combustion annulaire :

Ce type de chambres de combustion **figure (I.19)** comme la précédente, comporte deux enveloppes; interne et externe, qui sont généralement des cylindres concentriques et leur axe longitudinal est confondue avec l'axe du réacteur .les injecteurs, chacun avec son tourbillonnaire, sont disposé sur la base de tube à flamme du coté compresseur. Ce type de chambre à un meilleur rendement, mais d'une mise au point extrêmement délicate

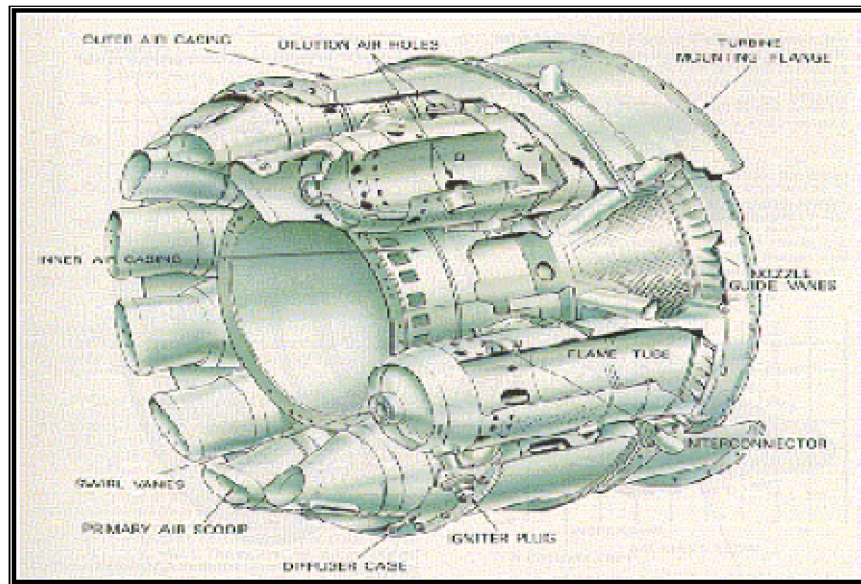


**Fig. I.19:** La Chambres de combustion annulaire.

Il est retenu par les motoristes français, **SNECMA**, et **TURBOMECA**, ainsi que par **Général Electric** pour le **CF6** et les **CFM**, aussi par **Pratt and Whitney** pour le **JT9** et le **JT8**.

### c. Chambres de combustion tubo-annulaire :

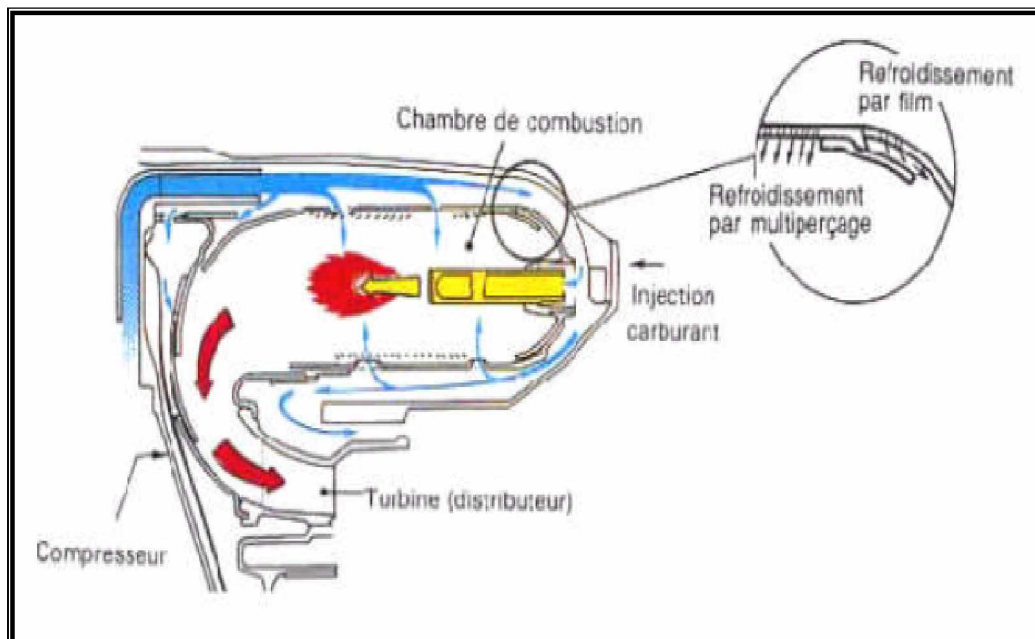
Cette disposition **figure (I.20)** présente les avantages des deux types précédents (mise au point plus facile, bonne utilisation du volume disponible)



**Fig. I.20:** Chambre de combustion tubo-annulaire.

**d. Les chambres annulaires à flux inversé :**

S'adaptent bien au cas où le dernier étage de compression est centrifuge. L'écoulement au travers de ce type de chambre subit l'effet de deux coudes à 180°, mais une telle géométrie diminue notablement la longueur de la machine.



**Fig. I.21 :** La chambre de combustion annulaire à flux inversé.

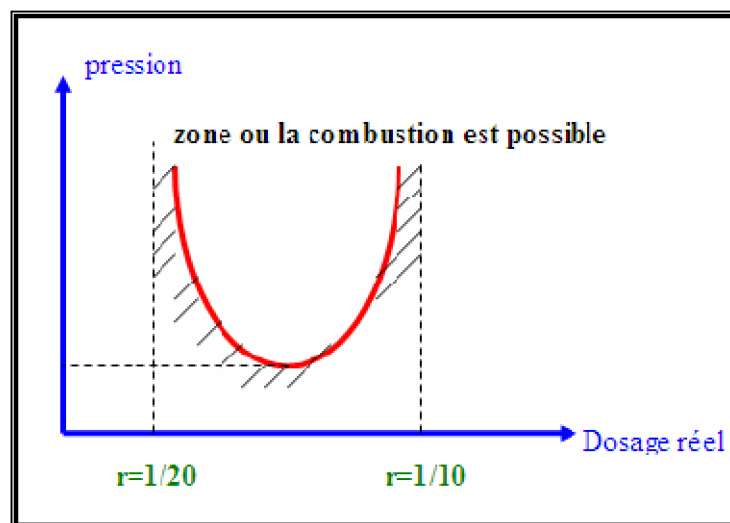
### **I.2.2.2 Conditions de fonctionnement d'une chambre de combustion :**

La richesse dépend de la température d'entrée et de la chambre, qui dépend elles-mêmes des conditions de vol. Elle est maximale au décollage, et diminuée en croisière. La valeur minimale est atteinte en régime transitoire. C'est pourquoi la combustion doit rester stable pour des valeurs de richesse descendant jusqu'à **0.003**.

D'autres parts, la chambre doit pouvoir se rallumer et avoir une plage de fonctionnement stable pour l'auto rotation après extinction en altitude. Après ré allumage, la combustion doit permettre l'accélération du moteur pour des altitudes variables de **7 000 à 12 000mètres** suivant le type d'avion.

#### **Ø Paramètres limitatifs de la combustion :**

La stabilité de la flamme dépend de deux facteurs essentiels qui sont la pression (ou température) et la vitesse. La combustion n'étant possible que dans une gamme de dosages réels, ces trois paramètres soient donc liés et apportent des limitations.



**Fig. I.22 :** paramètres limitatifs à la combustion

Cette courbe montre qu'il n'est possible d'enflammer le mélange qu'au – dessus d'une certaine pression minimale (pression de sortie compresseur pour les turbomachines ou pression de sortie diffuseur pour les statoréacteurs) et à l'intérieur d'une gamme de dosage réel comprise approximativement entre **1/10** et **1/20**.

#### Ø **Vitesse de l'écoulement** :

Pour que la combustion soit possible il faut que la vitesse de l'écoulement du fluide ne soit pas supérieure à la vitesse de propagation de la flamme, afin qu'elle soit entretenue, dans le cas contraire nous assisterons au soufflage de la flamme ou l'extinction.

#### Ø **Le temps** :

Le facteur temps est lié à la vitesse, car il faut laisser suffisamment du temps à la réaction chimique pour s'effectuer afin de la rendre plus complète.

#### Ø **La température** :

Il est nécessaire d'avoir une température élevée afin d'obtenir le rayonnement le plus intense possible, qui est lié à la richesse du mélange.

En effet, plus la richesse du mélange est plus élevée, plus la présence d'imbrûlés est importante.

#### Ø **Les turbulences** :

Afin d'avoir un bon mélange homogène (air/carburant) les constructeurs on recourt à des aubages de turbulences pour avoir un meilleur brassage du mouvement de l'air afin d'offrir le plus de contacts possibles avec les fines gouttelettes de carburant sans perturber le fonctionnement de la chambre de combustion. La combustion doit être maintenue pendant toute la gamme de vitesse aux différents régimes du moteur.

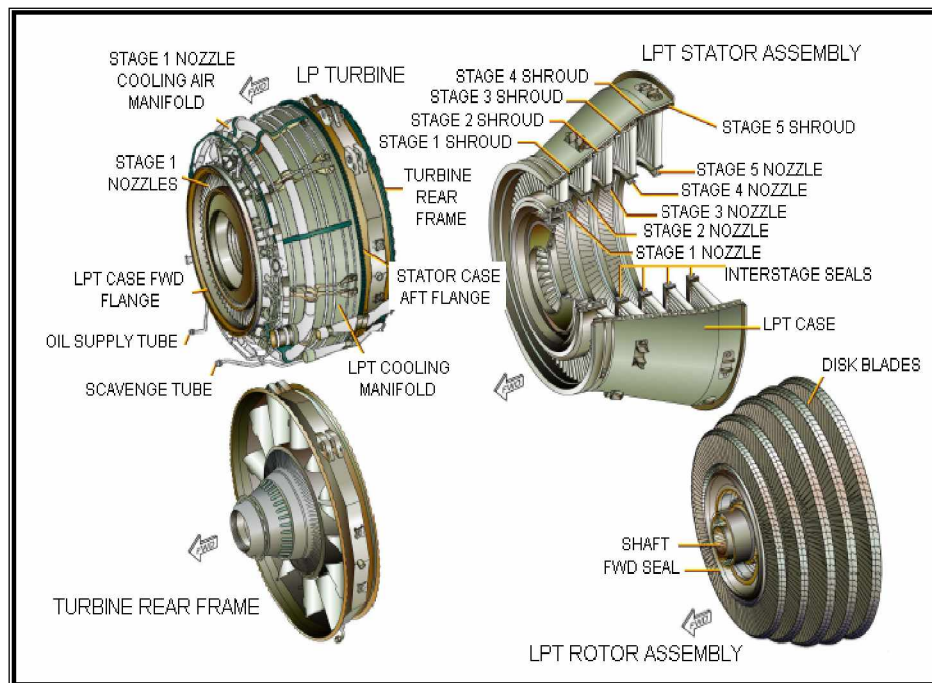
### **I.2.2.3 Qualités requises par une chambre de combustion :**

- Ø Faible poids, faible volume et surtout faible longueur. des qualités primordiales en aéronautique.
- Ø Répartition de la température à l'entrée de la turbine très homogène circumférentielle ment et de forme donnée radialement.
- Ø Pertes de charge la plus faible possible pour dégrader le moins possible l'énergie de l'écoulement.
- Ø Facilité d'entretien (visite, démontage, réparations).
- Ø Stabilité de combustion dans la gamme de richesse imposée.
- Ø Température des parois du tube à flamme acceptable.
- Ø Absence de fumée et réduction des oxydes d'azote au décollage.
- Ø Rendement de combustion élevé, peu d'imbrûlés au ralenti (taxiage).
- Ø Bonne endurance et fiabilité.
- Ø Répondre aux normes du respect de l'environnement.
- Ø Ré allumage en altitude sûr et rapide.
- Ø Prix acceptable.

Ces exigences étant visiblement contradictoires, la solution est un compromis adapté à la mission propre du moteur.

### **I.2.3 La Turbine :**

La turbine impose les limites de puissance de la turbomachine. Elle entraîne le compresseur et peut être constituée par un ensemble de plusieurs turbines, notamment dans le cas des réacteurs multi corps : turbine haute pression ou HP et turbine basse pression ou **BP**. La première est la plus proche du diffuseur de la chambre de combustion. Chacune peut comporter plusieurs étages.

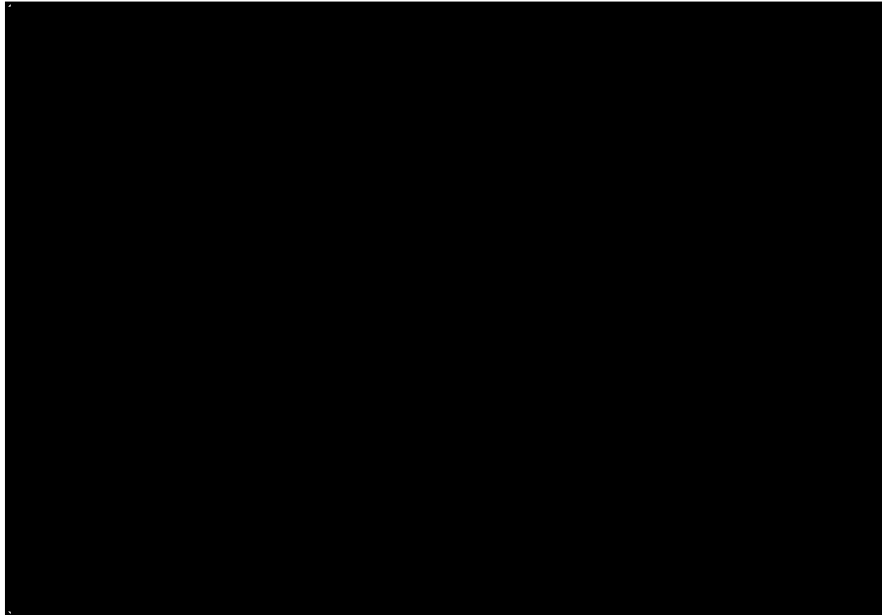


**Fig. I.23 :** compositions d'une turbine basse pression

Les aubes des turbines sont exposées d'une part à la température extrême des gaz chauds, et d'autre part à une force centrifuge de plusieurs tonnes dues à la rotation. Cette accélération tend à arracher les aubes du disque sur lequel elles sont implantées, elles supportent des efforts de trois tonnes et plus par centimètre carré. Ces efforts, qui s'ajoutent aux forces provoquant la rotation et aux vibrations, soumettent la turbine à d'énormes contraintes.

Des matériaux spéciaux doivent être sans cesse inventés pour construire des aubes capables de résister à des conditions de fonctionnement de plus en plus rudes. Au début, la plupart était en alliage à forte proportion de nickel, avec le gros avantage de bien résister au fluage, le lent allongement du métal étant provoqué par d'importants efforts en tension et température.

Beaucoup de métaux plus courants, chauffés à blanc de la même manière, résisteraient quelques minutes ou quelque heures tout au plus. Les allemands essayèrent les céramiques, qui résistent très bien à la chaleur, mais n'ont pas de résistance mécanique. Le titane est utilisé de plus en plus, pur ou en alliage, depuis que les difficultés de son usinage ont été résolues. Les progrès les plus nets sont obtenus en améliorant les traitements des métaux.



**Fig. I.24 :** compositions d'une turbine haute pression

Les aubes de turbines sont le siège de phénomènes aérodynamiques très complexes et très importants puisque leur rendement, sur les compresseurs comme sur les turbines, dépend en fait de leur comportement aérodynamique. Or comme elles sont très petites, la moindre altération de leur forme a des conséquences catastrophiques, c'est pourquoi elles sont fabriquées par moulage à la cire perdue avec une précision de l'ordre de **1/100** de **mm**, malgré la dureté des matériaux qui les composent.

Dans les **années 50**, **Rolls-Royce** étudia le refroidissement des aubes par liquide, mais en **1945**, les allemands avaient commencé à refroidir les turbines de leurs turboréacteurs avec de l'air circulant à l'intérieur d'aubes creuses fabriquées en tôle fine. Ce dernier procédé a été finalement adopté par l'ensemble des fabricants de réacteurs.

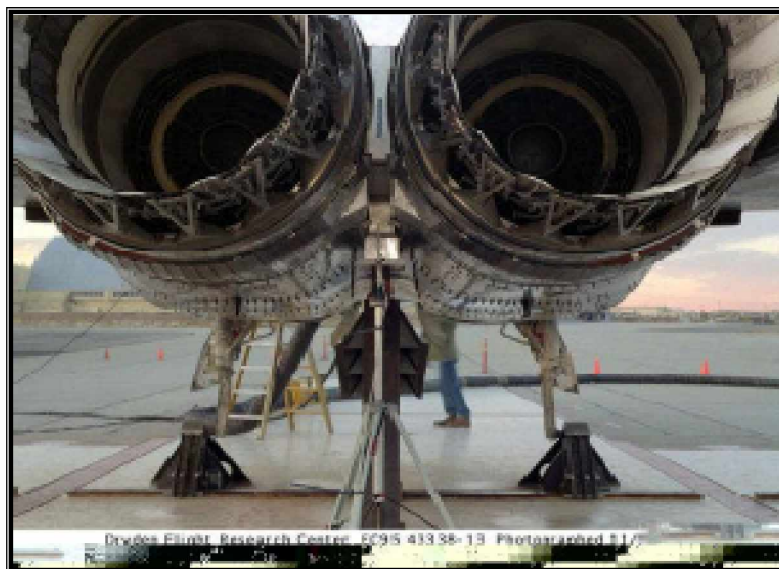
Les aubes des stators, comme celles des rotors, sont moulées par éléments de cinq à dix. Leur extrémité supérieure porte fréquemment une sorte de chapeau, ou cloison jointive avec celle des aubes voisines, de sorte que la turbine paraisse entourée d'un anneau plat.

Ce dernier a pour fonction d'empêcher les gaz chauds de s'échapper par l'extrémité supérieure des aubes. Il renforce en conséquence la turbine tout en augmentant son efficacité. Il a toutefois l'inconvénient de peser une certaine masse qui sous effet de la force centrifuge se transforme en contrainte mécanique supplémentaire.

Le compresseur et la turbine sont reliés par un arbre de transmission toujours creux, dont le diamètre peut atteindre celui du disque de l'étage le plus aval du compresseur. Dans le cas des réacteurs à double corps, les arbres qui relient turbine et compresseur basse et haute pression sont concentriques. L'air frais utilisé pour refroidir la ou les turbines, peut être acheminé par l'intérieur du ou des arbres.

#### **I.2.4 La Tuyère :**

La tuyère succède à la turbine. Les gaz provenant de la chambre de combustion s'y refroidissent et s'y détendent considérablement en accélérant : leur pression et leur température sont transformées en énergie cinétique. Cette transformation d'énergie produit la poussée utile. Il est donc important qu'elle soit aussi complète que possible. Elle serait parfaite dans un réacteur idéal d'où les gaz seraient éjectés à la température de l'air ambiant, toute leur chaleur ayant été transformée en vitesse dans la tuyère.



**Fig. I.25 : La tuyère**



La vitesse d'éjection des gaz est proportionnelle à la différence entre leur pression dans le moteur et la pression atmosphérique. Cet écart est d'autant plus grand que l'altitude est élevée, à condition que la pression à l'intérieur du moteur qui dépend de la température du flux puisse être maintenue en altitude.

La tuyère la plus simple n'est autre qu'un tuyau d'un diamètre approprié, appelé aussi veine de sortie. Autrefois, de petites variations des dimensions de l'ouverture permettaient d'accorder la tuyère avec le fonctionnement du moteur.

En fait, la réduction de l'ouverture de la tuyère provoque un accroissement de la vitesse d'éjection des gaz et donc de la poussée, mais jusqu'à une valeur limite au delà de laquelle la température s'élève à l'intérieur du moteur.

Les turboréacteurs allemands des années 40 et 50 possédaient à cet effet des carénages mobiles en forme de cône à l'intérieur de la tuyère ; les réacteurs modernes n'ont plus de tuyères à section variable, sauf s'ils sont pourvus de la réchauffe.

## **II.1 Présentation de l'entreprise POVAL - SPA :**

### **II.1.1 Historique :**

L'entreprise **POVAL-SPA (POMPES ET VANNES ALGERIENNE)** société par action est créée en date du **23 juillet 1997** et suite à la dissolution de la société mère ENPMH (entreprise nationale de production du matériel hydraulique). L'entreprise **POVAL** est composée par six unités de production.

- Ø L'Unité Fonderie de **Berrouaghia**      **UFB**
- Ø L'Unité Pompes de **Berrouaghia**      **UPG**
- Ø L'Unité Vannes de **Berrouaghia**      **U.V**
- Ø L'Unité Pompes de **Barraki**      **UPB**
- Ø L'Unité Pompes de **Rouïba**      **UPR**

La présente étude concerne l'Unité Fonderie de **Berrouaghia (UFB)**, dont les informations descriptives générales sont présentées comme suite :

### **II.1.2 Missions et Attribut de L'UFB :**

L'**UFB** a pour principale mission l'étude, la conception et la fabrication de toute pièce brute de fonderie dont les matières suivantes :

- Ø Fonte Grise Lamellaire **FGL/15/20/25/30**
- Ø Fonte Grise Sphéroïdale **FGS/40/50/60**
- Ø Acier **GC25**
- Ø Métaux non ferreux (diverses nuances de bronze et d'aluminium)

## **II.2 La Fonderie :**

### **II.2.1 Possibilités de la fonderie :**

La fonderie offre beaucoup de possibilités qu'il est nécessaire de rappeler avant d'aborder l'étude des techniques de fabrication, on peut citer entre autres.

#### **a. la Composition des alliages :**

Tous les alliages sont coulables c'est pourquoi la fonderie offre une gamme d'alliages pratiquement illimitée, parmi lesquels on peut noter :

- Ø les alliages ferreux courants (**fontes, aciers**).
- Ø les alliages non-ferreux (**aluminium, bronze, magnésium, zamac...etc.**).
- Ø les alliages spéciaux, **aciers inoxydables**, réfractaires, in usinables, difficiles à mettre en forme par d'autres procédés de fabrication.

Elle est le seul procédé qui permette d'adapter, avec la plus grande précision possible, l'alliage à la pièce et au service que l'on en attend.

#### **b. la Structure des alliages :**

Grâce aux traitements thermiques, on peut modifier la structure de certains alliages coulés. En outre pour une même pièce on peut obtenir des structures différentes dans certaines parties de celle-ci (par exemple arbres à cames de moteur à explosion avec le profil des cames trempé sur refroidisseur).

Il faut également noter que tout alliage moulé est isotrope.

**b.1 Les Pièces :**

- ∅ **Dessin :** On peut mettre la matière où cela est nécessaire en fonction des contraintes subies par la pièce, mais en respectant les règles du tracé des pièces.
- ∅ **Formes :** On peut concevoir des pièces monoblocs, plus compliquées intérieurement et extérieurement que celles obtenues avec d'autres procédés, pour leur permettre d'intégrer plusieurs fonctions et pour supprimer des raccords .
- ∅ **Précision dimensionnelle :** Grâce aux progrès considérables accomplis dans les dernières décennies dans les techniques de fabrication, notamment en moulage-noyautage, la précision dimensionnelle des pièces de fonderie s'est très nettement améliorée, et l'on peut souvent parler d'une précision de quelques dixièmes de millimètre en moulage traditionnel ; cette précision dépend d'un certain nombre de facteurs parmi lesquels on peut citer les procédés de moulage-noyautage et les machines pour les mettre en œuvre, le dessin, la forme et la dimension des pièces, l'alliage choisi, le nombre de pièces à exécuter, le coût admissible pour la fabrication de la pièce, sachant que la grande précision coûte cher.
- ∅ **Aspect superficiel :** La surface de la pièce (appelée aussi : *peau de pièce*) présente des qualités d'aspect et des caractéristiques de surface (rugosité) liées à la nature des matériaux de moulage employés ; aux alliages utilisés ainsi qu'aux conditions de coulée et de refroidissement mises en œuvre.
- ∅ **Masse unitaire des pièces :** Il n'existe théoriquement aucune limite dans ce domaine. En pratique, on a produit des pièces dont la masse unitaire allait de moins de 1 g à plusieurs centaines de tonnes.

## **II.2.2 Méthodes de fabrication et processus industriel :**

### **II.2.2.1 Méthodes :**

L'étude et la définition des méthodes de fabrication sont la première phase du processus industriel, qui permet de définir les alliages et les procédés de fabrication à employer, les matériels et machines à installer éventuellement, les gammes de production à respecter et les outillages à fournir (**modèles et boîtes à noyaux...**).

Mais avant toute chose, il faudra mettre au point le cahier des charges et le dessin de la pièce avec le client, et si nécessaire avec l'usineur, pour que la pièce puisse être fabriquée dans toutes les règles de l'art, de la façon la plus économique. L'ensemble de ce travail de préparation permettra de bien définir le dossier de fabrication de la pièce avant tout lancement de la production.

### **II.2.2.2 Processus industriel :**

Les procédés de fabrication sont très nombreux dans toutes les techniques mises en œuvre en fonderie. Nous les étudierons en détail dans les paragraphes suivants.

Nous avons choisi, pour illustrer le schéma de la fabrication d'une pièce de fonderie, la technique de moulage en sable vert (c'est-à-dire non étuvé) en châssis, qui est la plus répandue dans la très grande majorité des fonderies (**figure II.1**).

À partir du dossier de la pièce et des outillages, le processus de production peut se résumer ainsi :

- ∅ fabrication des demi-parties du moule en sable réfractaire, sable silico-argileux vert dans cet exemple, sur machines à mouler.
- ∅ préparation des noyaux destinés à *faire venir* les évidements de la pièce, généralement fabriqués en sable siliceux avec résine durcie par catalyseur.

- ∅ remmoulage de ces noyaux dans la demi-partie inférieure du moule et fermeture de celui-ci par l'autre demi-partie retournée.
- ∅ élaboration des alliages dans les appareils de fusion (cubilots, fours électriques...).
- ∅ coulée du métal dans les moules.
- ∅ refroidissement des moules après coulée.
- ∅ décochage des moules, c'est-à-dire cassage des moules, récupération du sable décoché et renvoi à la sablerie pour régénération.
- ∅ récupération des pièces et des systèmes de coulée.
- ∅ refroidissement des pièces, séparation des systèmes de coulée qui retournent à la fusion.
- ∅ puis nettoyage des pièces par grenailage dans la majorité des cas et finition par meulage et découpe des bavures.
- ∅ et enfin contrôle des pièces et livraison.

Pour suivre ce processus industriel, et quelles que soient leurs spécialités, les fonderies comportent toujours un certain nombre d'ateliers qui réalisent ces différentes opérations nécessaires à la production des pièces et qui sont :

- ∅ le moulage-noyautage.
- ∅ la fusion et la coulée.
- ∅ le décochage, souvent intégré dans les chantiers de moulage.
- ∅ le grenailage, l'ébarbage et la finition et des services prestataires comme par exemple :
  - un laboratoire, pour les contrôles des sables et de la métallurgie.
  - un atelier de modelage pour entretenir et fabriquer tout ou partie des outillages de moulage-noyautage.
  - un service de contrôle-qualité.
  - un atelier de maintenance, etc.

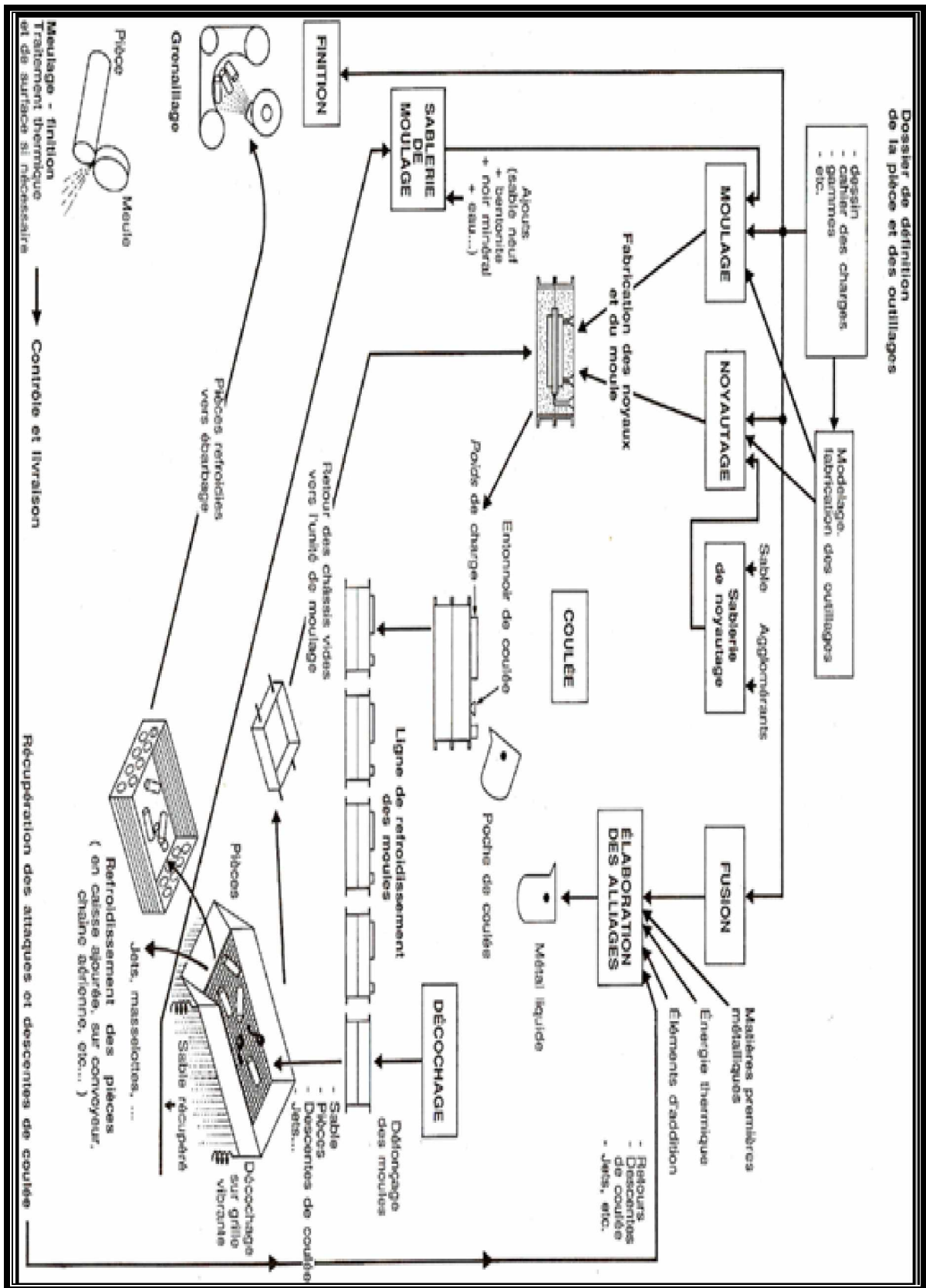


Fig. II.1 : Schéma de principe de la fabrication de pièces de fonderie.

### **II.2.3 Matériaux de moulage :**

Pour la fabrication des moules et des noyaux, la fonderie utilise de nombreux matériaux et produits dont les plus importants sont cités ci-après.

#### **II.2.3.1 Sables de base :**

##### **a. Sables siliceux :**

Ils sont composés essentiellement de grains de silice  $\text{SiO}_2$  ; c'est le matériau le plus universellement employé pour la confection des moules et des noyaux. Parmi toutes les variétés on citera :

- les sables silico-argileux naturels, utilisés à l'état brut ;
- les sables blancs extra-siliceux de carrière, très souvent traités par lavage, classement granulométrique et séchage avant livraison.

##### **b. Sables spéciaux (chromite, olivine, zircon, silico-alumineux) :**

Tous ces produits doivent présenter des caractéristiques bien définies, comme par exemple :

- la répartition granulométrique ou la forme des grains ;
- des propriétés chimiques en accord avec celles des liants ;
- des propriétés physiques à froid (perméabilité) et à chaud (réfractarité, dilatation, capacité et conductivité thermiques, mouillage par le métal liquide).

##### **c. Moulage aux sables restant plastiques :**

Ce sont les procédés de moulage les plus universels et les plus couramment employés, et qui restent toujours très compétitifs avec d'autres procédés plus modernes.



Ils permettent de couler aussi bien de grosses pièces unitaires, que de petites et moyennes pièces en série, sur chantiers de moulage mécanisés, quel que soit l'alliage.

### **II.2.3.2 Sables de moulage :**

#### **1. Matières de base :**

On utilise soit du sable silico-argileux naturel, soit du sable synthétique formé d'un mélange de grains de silice et d'argile, 5 à 10 % suivant les alliages moulés, humidifiée pour former un lait d'argile qui enrobe les grains en les agglomérant entre eux et de divers adjuvants.

∅ On peut distinguer trois grandes familles de sables :

- les **sables naturels** (peu utilisés maintenant).
- les **sables étuvés**, surtout pour le moulage à l'unité de pièces importantes.
- les **sables synthétiques, sables verts**, utilisés directement après leur préparation, éventuellement grillés ou flambés en surface pour en augmenter la résistance à l'action du métal.

∅ On peut reprocher au **sable vert** :

- la présence d'humidité dans le sable créant des risques de défauts de piqûres sur les pièces coulées.
- le manque de dureté des empreintes, surtout dans les parties verticales, en faible dépouille.
- la chute possible de sable dans les empreintes au moment de la pose des noyaux, de la fermeture des moules, et l'entraînement de sable au moment de la coulée.
- le manque de résistance au rayonnement thermique du métal liquide dans les parties en plafond de l'empreinte au moment du remplissage du moule, risquant de provoquer l'apparition de gales.
- la difficulté d'obtenir des cotes précises, des parois minces, etc.

Tous ces défauts sont maîtrisables après mise au point de la fabrication. Mais il faut contrôler rigoureusement tous les stades de production du sable et de sa mise en œuvre. De la qualité du sable et, par conséquent, de sa bonne préparation, de sa régénération correcte et du bon réglage de ses caractéristiques, dépendra en finale, et pour une très grande partie, la qualité des pièces fabriquées. C'est tout l'art du fondeur.

Ø À l'avantage de ce sable vert, il faut noter :

- son très bon prix de revient.
- sa très grande souplesse d'utilisation et de mise en œuvre.
- un bon état de surface des pièces, des détails bien venus et des *coutures* de moulage peu apparentes.
- le faible risque de crique dans les pièces au moment du retrait du métal pendant son refroidissement, le sable étant compressible.
- la possibilité de recycler la quasi-totalité du sable après décochage, réduisant les problèmes d'évacuation et de décharge.

Ces problèmes existent bien entendu, mais ils proviennent essentiellement des surplus de sable apportés dans le circuit par les noyaux au moment du décochage, et qu'il faudra évacuer à l'extérieur.

En conclusion, on peut constater, avant d'aborder dans l'étude des procédés de moulage proprement dits, que le moulage en sable silico-argileux, et notamment en sable vert, grâce aux progrès considérables accomplis dans les techniques de préparation du sable et de sa mise en œuvre, résiste avec succès aux procédés plus modernes employant des sables durcis à prise chimique ou thermique, mais toujours d'un prix de revient plus élevé, qui les font préférer, dans la très grande majorité des cas, pour la confection des noyaux.

## **2. Préparation du sable :**

### **a. Caractéristiques des sables de moulage :**

Dans le passé, la fonderie utilisait beaucoup les sables silicoargileux naturels, mélanges de sables siliceux et d'argile utilisables à l'état tel, après humidification.

Ces sables sont maintenant de moins en moins employés, remplacés par des sables synthétiques, à base de sable siliceux et d'argile pure, utilisés exclusivement dans tous les procédés de moulage dits en *sable vert*, c'est-à-dire en sable gardant une certaine humidité interne, par opposition aux sables étuvés.

Un sable synthétique est un mélange de divers constituants :

- sable siliceux de granulométrie appropriée.
- bentonite (variété d'argile particulièrement active).
- noir minéral.
- et divers autres produits suivant les besoins ; le tout additionné d'un certain pourcentage d'eau.

Les teneurs de ces différents constituants et leurs caractéristiques sont adaptées aux procédés de moulage, aux alliages coulés et aux pièces à fabriquer.

### **b. Sableries :**

La préparation et la régénération des sables récupérés après décochage se font dans des installations appelées sableries où les sables sont tamisés, d'émottés, concassés, déferrés, dépoussiérés et refroidis (dans certains cas avant d'être malaxés et mélangés dans les broyeurs avec les apports d'eau et d'adjuvants, bentonite, noir minéral, etc.), pour être ensuite envoyés aux machines à mouler.

Le refroidissement du sable s'impose dans les gros chantiers de moulage mécanisés, où le sable tourne vite, et où le rapport masse de métal coulé/masse de sable mis en œuvre est trop élevé (**1 à 10 – 1 à 12** : rapports limites pour des chantiers de pièces en fonte), entraînant des échauffements importants du sable en circuit.

La température doit être abaissée à des valeurs d'environ **10 à 20 ° C** au-dessus de l'ambiante avant l'entrée dans les broyeurs.

Les (**figures II.2 et II.3**) représentent le schéma synoptique et l'ensemble des matériels et appareils de manutention, stockage et traitement des sables de moulage.

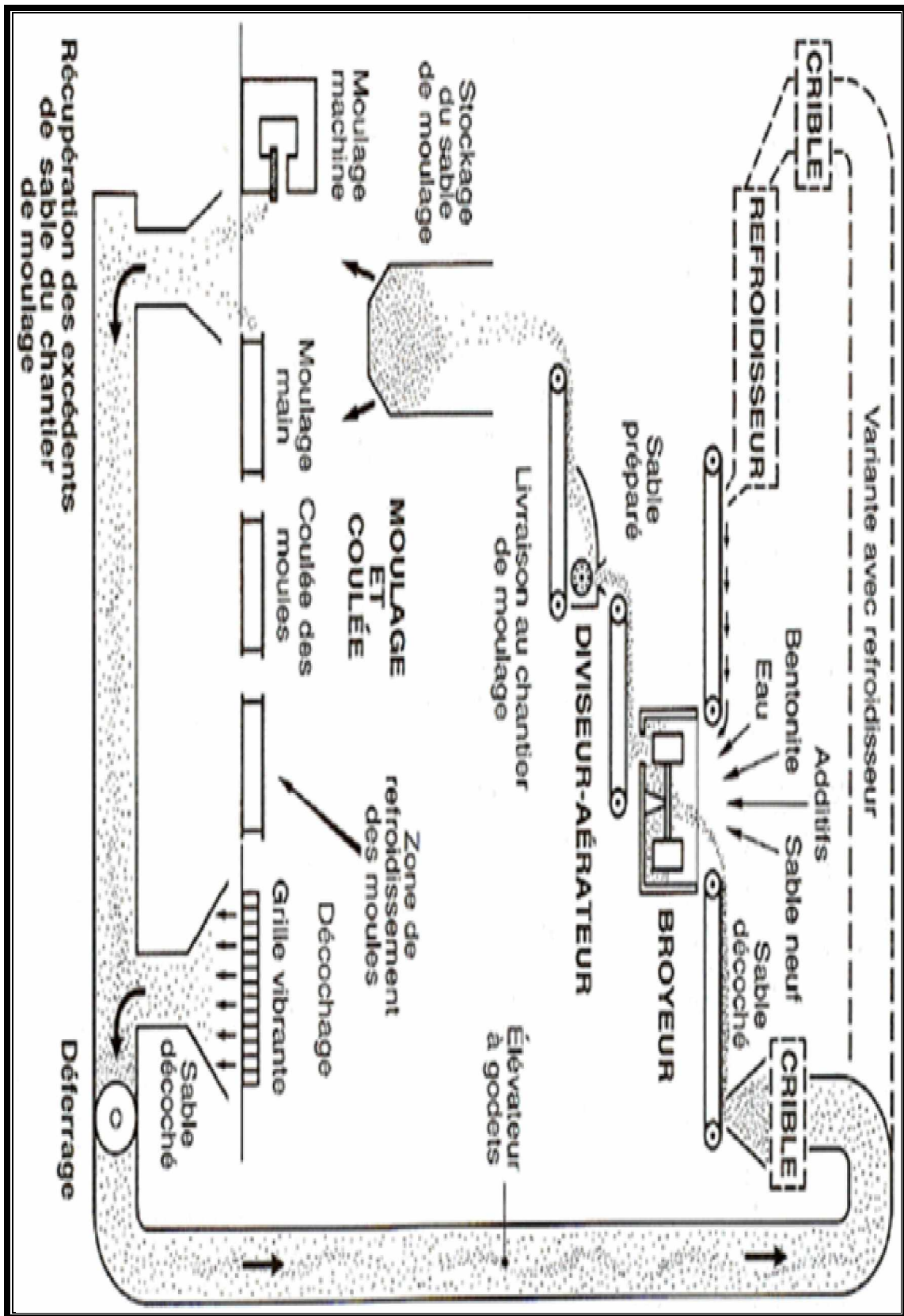
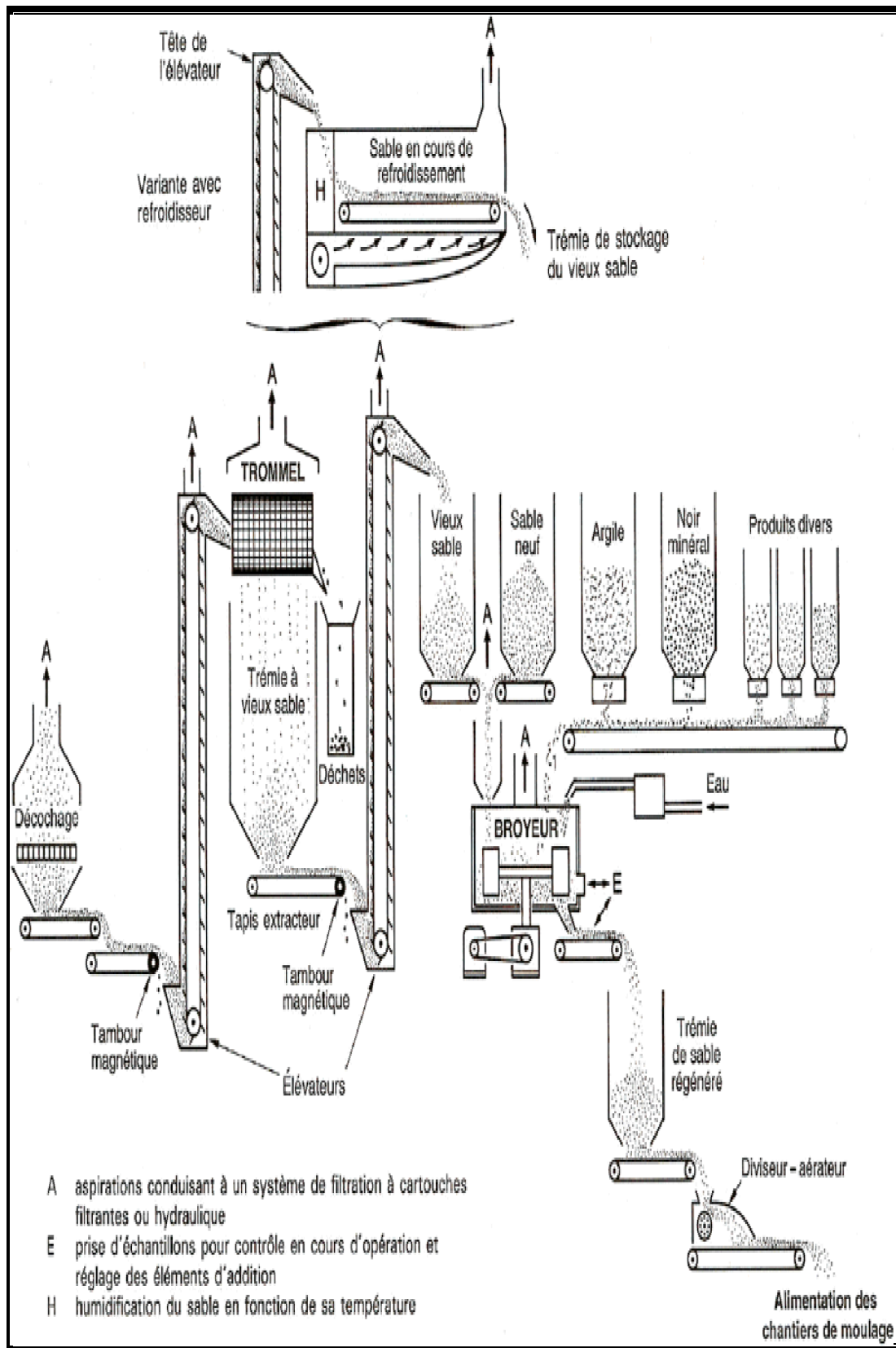


Fig. II.2 : Schéma de principe d'une sablerie.



**Fig. II.3 :** Croquis synoptique des systèmes de manutention et de stockage d'une sablerie.

#### **II.2.4 Procédés de moulage :**

Le moulage est la plus importante opération de fabrication en fonderie, c'est elle qui détermine les caractéristiques principales de la pièce et qui influe dans une très large proportion sur son niveau de qualité.

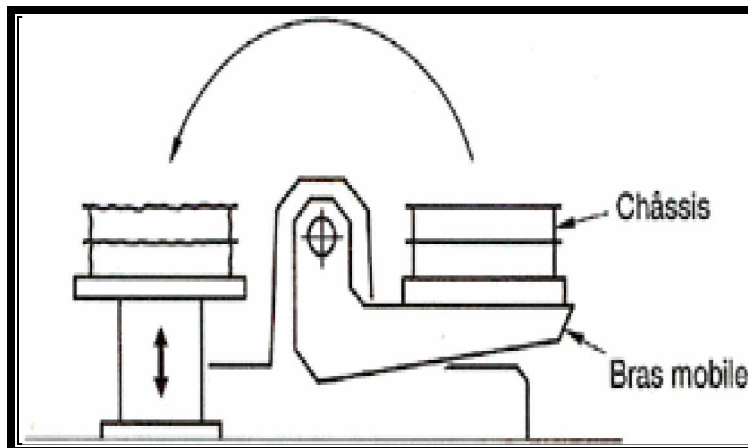
Pour satisfaire les exigences sans cesse croissantes des utilisateurs au niveau des performances et de la qualité, les procédés de moulage en sable plastique, et tout particulièrement en sable vert, ont évolué, depuis le moulage main, vers des moulages machines à basse pression puis à moyenne et haute pressions pour améliorer la précision dimensionnelle des pièces produites, la constance de leur masse et leur état de surface, sans toutefois que le serrage haute pression ne dépasse certaines limites, un excès de serrage pouvant produire d'autres défauts, dus à des perméabilités insuffisantes par exemple.

Pour étudier les différents procédés de moulage utilisant des sables silico-argileux, nous les avons classés suivant le mode de serrage employé, principal critère à fixer pour une fabrication et qui détermine, par conséquent, toutes les installations de production des moules, moulage main, moulage machine et moulage mécanisé.

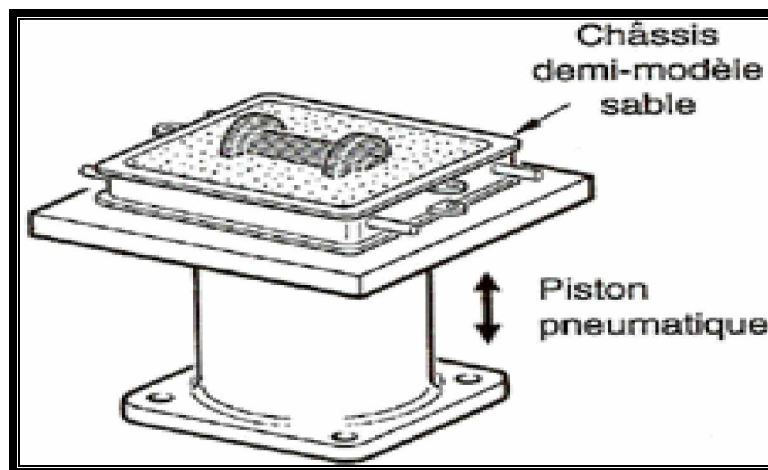
##### **II.2.4.1 Moulage a main :**

C'est le mode de moulage le plus anciennement utilisé dans toutes les fonderies. Avec le développement du machinisme et de la mécanisation, adaptés à des productions de masse, il a peu à peu régressé pour être surtout employé aujourd'hui dans les ateliers de fabrication de pièces unitaires de tous tonnages ou de très petites séries, ne justifiant pas, dans ce cas, des coûts d'outillage type machine trop élevés.

Certes la modernisation se poursuit pour améliorer la qualité, la précision et le prix de revient des pièces. De nouveau moyens apparaissent [gros secoueurs à moules (**figure II.5**), grosses démouleuses (**figure II.4**)], de nouveaux sables, également, préparés en continu dans des mélangeurs à vis, des modèles en polystyrène dont le développement simplifie les opérations de moulage et améliore la compétitivité de la fonderie.



**Fig. II.4** : Machine à retourner et à démouler



**Fig. II.5** : Secoueurs à moule.

Pour la réalisation de telles fabrications, le personnel doit avoir une excellente qualification, et c'est dans les ateliers de moulage main que l'on trouve les meilleurs professionnels mouleurs.

### 1. Principe :

On peut mouler une pièce d'après un modèle réalisé habituellement en bois, ce modèle pouvant être parfois simplifié (modèles carcasses ou squelettes, trousseau...).



Le modèle est généralement séparé en deux parties suivant un plan de joint, une demi-partie servant à faire le moule de dessous, l'autre demi-partie, le moule de dessus.

Pour les plus gros moules, chaque partie de modèle peut être posée directement sur des marbres, à même le sol de l'atelier.

Toutes les parties en creux de la pièce qui ne se démoulent pas sont fabriquées dans les boîtes à noyaux pour être ensuite positionnées dans des parties prévues sur le modèle et reproduites en creux dans le moule.

L'apparition des modèles en polystyrène et des sables auto durcissant a permis de simplifier toutes ces opérations et d'apporter des gains de manutention considérables.

On peut aussi, en moulage à main, surmouler une pièce irréparable que l'on utilise comme modèle pour fabriquer une pièce de remplacement.

## **2. Matériaux et sables utilisés :**

Pour ces moulages, on utilise des sables silico-argileux avec **5 à 10 %** d'humidité qu'on peut classer en trois catégories.

Ø **Le sable vert (dit aussi à vert) :** Réservé à la fabrication des petites et moyennes pièces, on lui ajoute parfois un peu de silicate de sodium ou de mélasse pour donner au sable un peu plus de consistance ou *corps*.

Ø **Le sable vert grillé :** Pour éliminer l'humidité superficielle, on peut pulvériser un enduit réfractaire sur la surface des empreintes et le sécher ensuite à la flamme ou au rayonnement infrarouge, ce qui élimine toute trace d'humidité et accroît la dureté des moules, tout en diminuant le gradient thermique du métal au contact du moule.

Ø **Le sable étuvé :** Pour le moulage des grosses pièces unitaires, on utilise souvent des sables à plus gros grains de silice avec une teneur en argile plus élevée qui sont ensuite séchés à cœur dans une étuve où ils sont portés à des températures de **350 à 400 ° C** pendant une dizaine d'heures.

Si le moule n'est pas transportable, on le sèche sur place avec des fours sècheurs mobiles.

Le moule, ainsi durci, résiste mieux aux pressions du métal liquide sur ses parois, mais il se prête aussi moins bien au retrait du métal, et des précautions doivent être prises pour éviter la formation de criques : utilisation par exemple, dans certaines parties du moule, de sables plus compressibles ou de certains artifices permettant un refroidissement plus rapide de ces endroits plus délicats (refroidisseurs, nervures additionnelles, etc.).

Le passage du moule au séchage occasionne souvent, à la surface de l'empreinte, des gerçures qu'il faut réparer soigneusement, d'où la nécessité d'une main-d'œuvre très qualifiée.

D'autres sables plus réfractaires sont utilisés en moulage main suivant les alliages coulés, la dimension des pièces, etc. On peut citer principalement les sables à la chamotte, au zircon, à la chromite et à l'olivine.

- ✓ **Sable à la chamotte** : Il est préparé avec un mélange en masse de **88 %** de chamotte (provenant de la cuisson d'argile à moins de 40 % d' $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), **5 %** de sable siliceux et **7 %** d'argile naturelle et de bentonite, additionné d'agglomérant divers à base d'huile ou de mélasse.

C'est un procédé de moulage intéressant qui évite l'érosion du moule par la coulée de l'acier, voire de la fonte, lorsque la quantité de métal coulé est importante (suppression de certains défauts dus à l'entraînement de grains de sable), mais la rigidité du moule le réserve à la coulée de certaines pièces non sujettes aux criques provoquées par l'incompressibilité du sable lors du retrait du métal liquide.

- ✓ **Sable au zircon** : Il ne présente pas de transformations allotropiques par élévation de température (contrairement à la silice) et son faible coefficient de dilatation permet une meilleure précision dimensionnelle des pièces. Sa conductivité thermique élevée permet de l'utiliser dans les endroits d'un moule où la pièce présente de fortes épaisseurs pour en accélérer le refroidissement et homogénéiser la structure.

En raison de sa finesse et de sa résistance aux chocs thermiques, le sable au zircon donne aux pièces un excellent aspect superficiel, sans rugosité ni pénétration du métal liquide dans le sable, permettant d'obtenir des détails d'une grande finesse.

L'utilisation de ce sable est intéressante pour l'obtention de pièces de quelques kilogrammes à **100 tonnes** et plus en fonte en aciers, alliés ou fortement alliés.

La farine de zircon (mélangée à de l'argile, du sucre et de l'eau) sert également d'enduit réfractaire pour certains gros noyaux.

Malheureusement le prix de ce sable est assez élevé et sa récupération difficile, ce qui en limite l'emploi malgré ses grandes qualités.

- ✓ **Sable à la chromite** : C'est une matière excellente pour la production de grosses pièces en acier, notamment sous forme de sable de contact grâce à ses excellentes propriétés à chaud (la chromite fond à **2 000 ° C** environ) qui donnent au moule une grande rigidité et favorisent la solidification dirigée, évitant les criques dans les pièces.

On lui ajoute **3 %** en masse d'argile (bentonite de préférence) pour améliorer ses propriétés de moulage (serrage plus facile). Sa basse température de grésage (**1 400 ° C**) produit, lors de la coulée du métal liquide, une couche superficielle résistante et étanche d'où un bel aspect de la peau des pièces.

En raison de son inertie thermique, le sable à la chromite présente une faible réactivité vis-à-vis des oxydes métalliques. Il convient donc, de ce fait, particulièrement bien à la coulée des pièces en acier austénitiques au manganèse, aciers spéciaux, aciers alliés, même fortement alliés, aciers réfractaires, inoxydables, et pièces de fonte.

Grâce à son excellente conductivité thermique on peut l'utiliser comme sable de contact pour la coulée de très grosses pièces en acier.

C'est également un produit moins coûteux que le zircon qu'il tend à remplacer dans la majorité des cas.

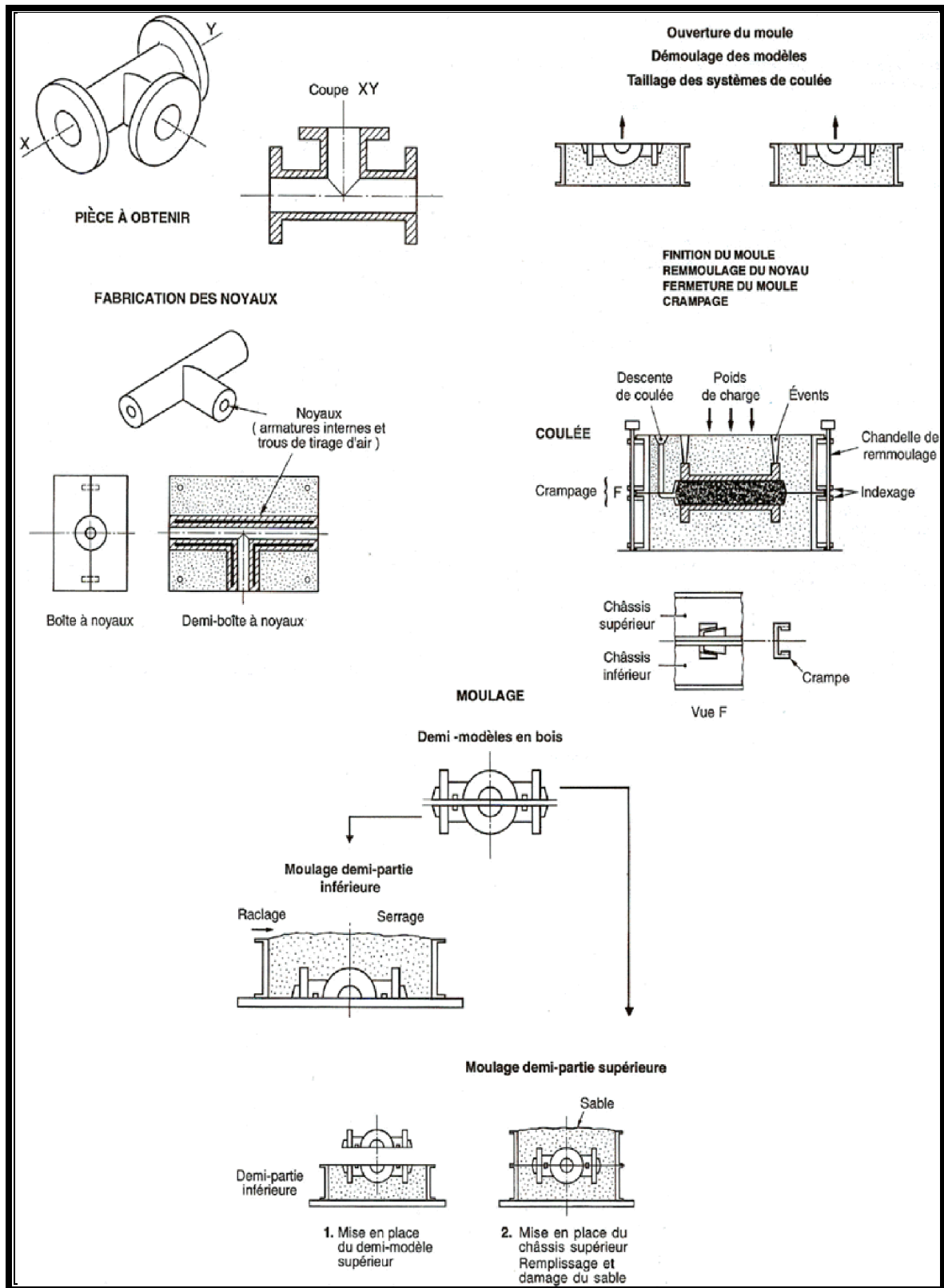
- ✓ **Sable à l'olivine (de couleur verte d'où son nom) :** Les grains argileux de ce sable nécessitent un serrage plus énergique pour le moulage, et un peu plus de liant pour le noyautage. En moulage il est additionné de **3 à 5 %** d'argile (bentonite) et parfois d'un peu de dextrine pour améliorer sa résistance à chaud, notamment dans les angles des empreintes.

Le sable à l'olivine a une conductivité thermique moyenne. Étant légèrement basique, il ne donne pas de réaction avec les oxydes de manganèse, d'où son emploi assez généralisé pour l'obtention de pièces en aciers austénitiques au manganèse.

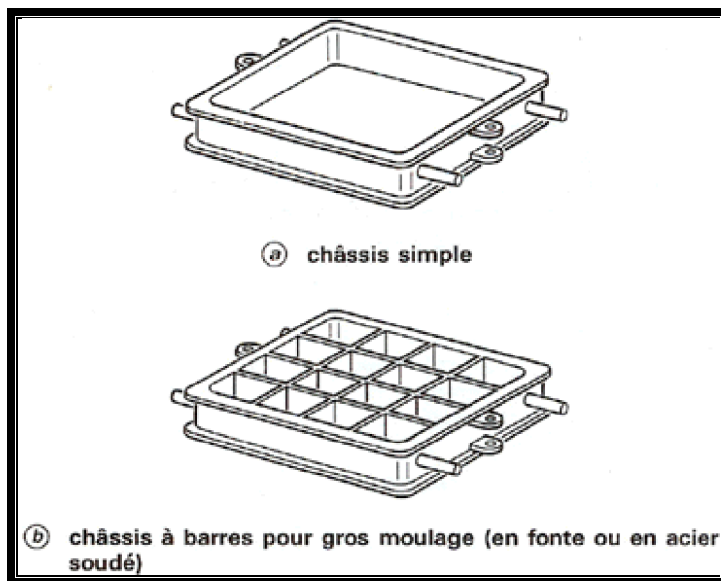
Un tel sable est utilisé pour les pièces en fonte et en aciers (surtout alliés) de masses modestes ou élevées, devant présenter un bel aspect superficiel. Il présente également l'avantage, par rapport au sable zircon ou à la chromite, de pouvoir être réutilisé plusieurs fois ou même récupéré en grande partie (jusqu'à **80** ou **95 %**) par calcination.

### **3. Description du procédé:**

La (**figure II.6**) illustre la fabrication d'une pièce de moyenne importance à partir d'un modèle en bois en deux demi-parties avec châssis de moulage (**figure II.7**).



**Fig. II.6 :** Fabrication d'un élément de tuyauterie par moulage a main.



**Fig. II.7** : Châssis pour moulage main

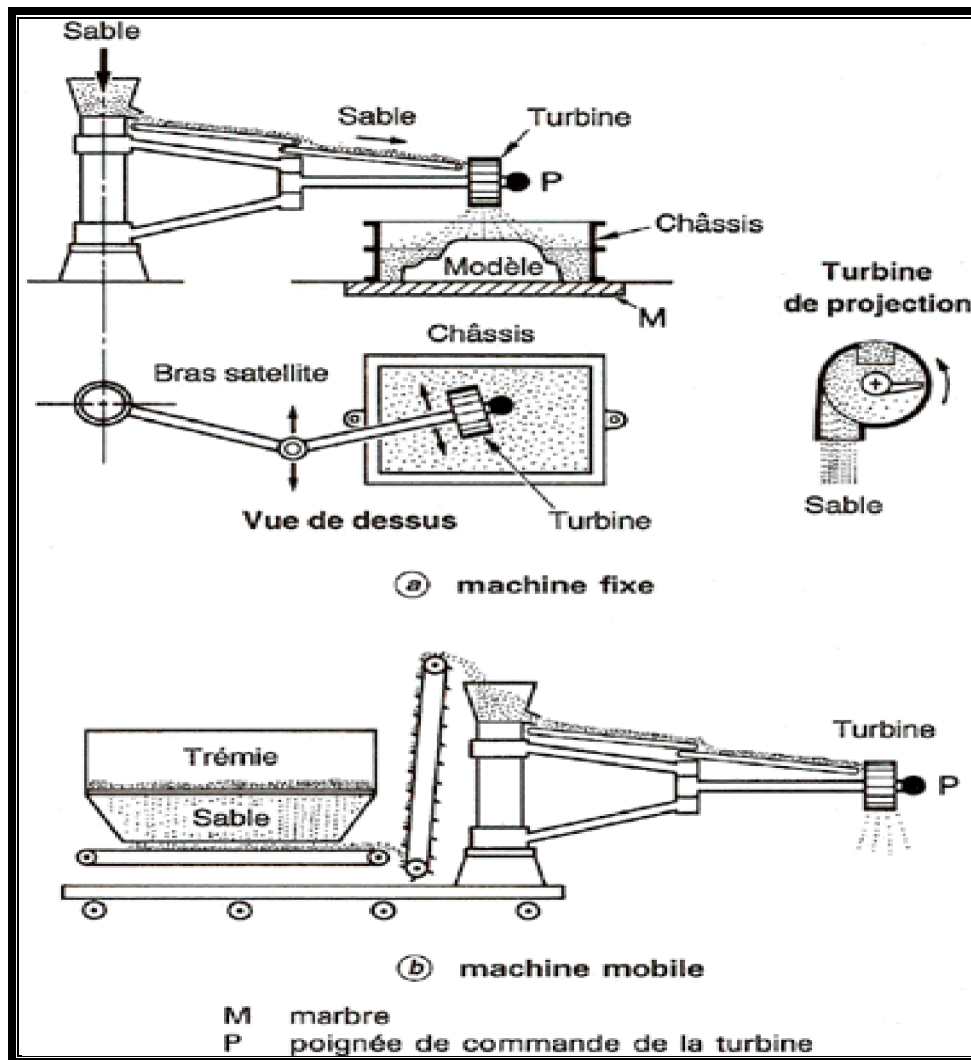
- Ø Moulage de la demi-partie inférieure.
- Ø Talcage du plan de joint pour éviter le collage.
- Ø Indexage du demi-modèle supérieur sur le demi-modèle inférieur.
- Ø Indexage du châssis supérieur sur le châssis inférieur.
- Ø Moulage de la demi-partie supérieure.
- Ø Ouverture du moule pour extraire les deux demi-modèles.
- Ø Finition du moule : descente de coulée, événements, tirages d'air, attaques, enduirage éventuel de l'empreinte (graphite par exemple), séchage, flambage, soufflage pneumatique pour éliminer toute trace de sable).
- Ø Remmoulage des noyaux dans la partie inférieure.
- Ø Fermeture du moule par les systèmes d'indexage ou de goujonage.
- Ø Pose de masses de charge (*poids* de charge) sur la partie supérieure ou crampage.
- Ø Coulée.

#### 4. Machine :

Bien qu'il s'agisse de techniques et de procédé de moulage main, on utilise dans les fonderies de moyennes et grosses pièces des machines spéciales pour aider au remplissage et au serrage des gros moules ou comme assistance pour certaines opérations, comme le démoulage des modèles par retournement.

Pour le **serrage des moules**, on peut utiliser :

- des machines à projection de sable (*Piper*) (**figure II.8**) fixes ou mobiles, projetant le sable de moulage par l'intermédiaire d'une turbine à palette.



**Fig. II.8 :** Machine à projection de sable (Piper)

Mais le sable, projeté violemment sur les modèles bois, les érode, d'autant plus qu'il n'est pas toujours bien débarrassé de toutes les petites particules métalliques provenant des pièces et de la coulée du métal.

Le serrage avec ces machines, correct sur le plan de joint et sur les parties horizontales, n'est pas parfait sur les parties verticales. Ce sont des machines bruyantes, assez difficiles à manier et dont l'efficacité n'est pas excellente. Elles tendent à disparaître au profit des moulages en sables auto durcissant.

Les démouleuses à retournement : facilitent le démoulage des modèles en remplaçant la classique opération d'extraction au palan après retournement des moules.

Pour la mise en œuvre des nouveaux procédés de moulage au sable auto durcissant, on utilise des mélangeurs à vis qui mélangent le sable sec avec les résines et les catalyseurs juste avant leur utilisation (Sables à durcissement chimique).

### 5. Outillages :

Dans les ateliers de moulage main, on utilise généralement, suivant les procédés :

- des **planches de profil** pour le moulage au trousseau de pièces circulaires, hélicoïdales ou rectilignes qui peuvent être moulées par ce procédé économique.
- des **modèles et boîtes à noyaux en bois**.
- des **modèles en polystyrène** que l'on emballe dans des sables auto durcissant.
- **des châssis de moulage**, cadres rigides en acier coulé, fonte, ou profilés métalliques, disposés autour du modèle, adaptés aux dimensions du moule, pour contenir le sable de moulage et permettre son serrage. Ils peuvent être simples ou avec des barres pour les grands moules, en général carrés ou rectangulaires, et quelquefois de formes spéciales adaptées à la pièce à fabriquer (**figure II.7**).



- des outils de serrage du sable, pilettes, fouloirs manuels ou pneumatiques.
- et les **outillages individuels** des mouleurs (spatules...).

#### **II.2.4.2 Moulage machine :**

Le développement de la mécanisation et de l'automatisation en fonderie a toujours été un problème difficile à résoudre, compte tenu de l'agressivité d'un milieu particulièrement hostile à ce genre de matériel. La présence de silice, de métal en fusion, de poussières, une ambiance thermique élevée, comme à certains postes de coulée ou de décochage, des manutentions brutales, créent des conditions d'emploi très éprouvantes pour la mécanique et pour les matériels électriques et électroniques.

Il a donc fallu que les constructeurs innovent dans tous ces domaines pour que le développement mécanique et automatique des installations de fonderie soit possible et devienne particulièrement fiable. Il n'est pas rare maintenant de voir des chantiers de moulage fortement automatisés qui, après mise au point, ont des rendements supérieurs à **0,8-0,9**.

#### **1. Moulage machine avec châssis. Serrage basse-pression :**

##### **Ø Pression simple**

On peut serrer le sable dans le châssis en exerçant simplement un effort de serrage. Dans ce cas les efforts de compression sont uniformément répartis sur la surface du moule, mais les parties verticales sont mal serrées. Il faut réserver ce principe simple pour des modèles à très faible relief (figure II.9).

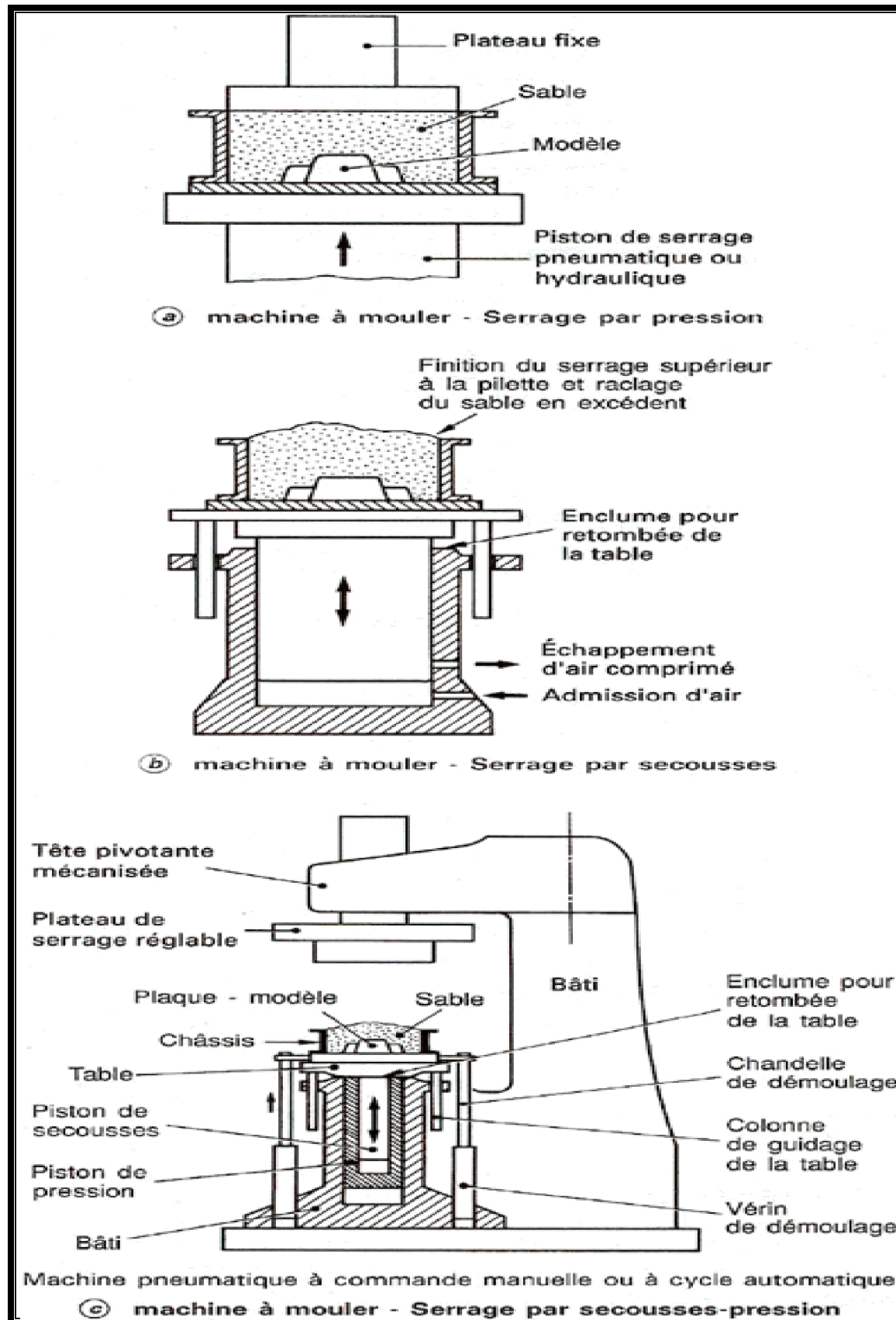


Fig. II.9 : Moulage machine – Serrage basse pression.

### Ø Serrage par secousses

Serré par inertie, le sable s'écoule mieux dans le châssis et tout autour de l'empreinte ; l'aptitude des secousses est de **5 à 20** mm avec une cadence jusqu'à **350** coups/min (**figure II.9**). Les duretés des parties horizontales et verticales sont plus homogènes que par simple pression.

### Ø Serrage secousses-pression

C'est la machine la plus répandue dans les fonderies classiques (**figure II.9**). Elle possède une table à secousses-pression équipée de chandelles de démoulage avec vibreur pour faciliter la séparation du moule terminé et du modèle. La tête de serrage est pivotante, souvent mécanisée, et s'efface pour permettre le remplissage du châssis avec le sable.

Il s'agit, en général, de machines pneumatiques à commande manuelle ou intégrée dans des cycles automatiques.

Les dimensions des châssis sont, en moyenne, de l'ordre de **600 × 800 mm**, les forces de serrage vont de **0,1 à 0,2 MN** et les cadences, fonctions du cycle de moulage et de l'aménagement du poste de travail, sont d'environ **120 à 180** moules à l'heure.

### Ø Serrage par projection de sable (**figure II.8**)

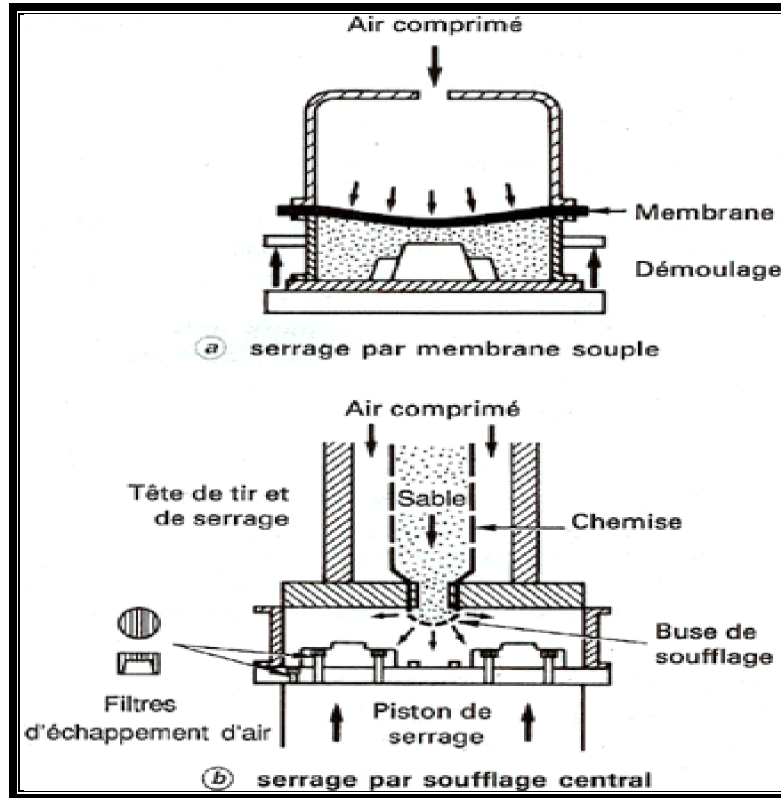
Réservé maintenant au moulage des grosses pièces unitaires, il est très concurrencé par les procédés plus modernes utilisant des sables auto durcissant et se trouve en voie de régression.

## **2. Moulage avec châssis. Serrage moyenne et haute pression :**

Les machines à secousses-pression ont été sans cesse perfectionnées pour augmenter leur puissance et leur taux de serrage. Quelques autres procédés ont également été développés, par exemple : le serrage par membrane souple, le soufflage du sable mais sans pouvoir véritablement atteindre les hautes pressions de serrage procurées par des machines à pistons multiples ou à impact.

## Ø Domaine des moyennes pressions

### § Le serrage à membrane souple (figure II.10)



**Fig. II.10** : Moulage machine – Serrage moyenne pression.

L'application de la pression de serrage à l'aide d'une membrane souple permet une bonne répartition de l'effort de serrage sur toute la surface du sable, mais les parois verticales ne sont pas très bien serrées. C'est un procédé simple qui permet de grandes cadences (**200 moules/h** et plus).

### § Le serrage par soufflage (figure II.11)

La machine comporte une tête de soufflage, avec arrivée de sable dans une chemise cylindrique avec fentes de passage de l'air comprimé. Celui-ci chasse le sable dans le moule par l'intermédiaire d'une buse, et le mouvement vertical du piston inférieur complète le serrage du sable. Pour faciliter le remplissage du châssis et le serrage du sable, il faut prévoir des filtres d'évacuation d'air sur les modèles et sur le marbre.

## II. 3 Tournages :

En tournage on réalisera toutes les surfaces de révolution, y compris les plans lorsque la trajectoire du point générateur est situé dans un plan perpendiculaire à l'axe de rotation.

### II.3.1 Les machines de tournage:

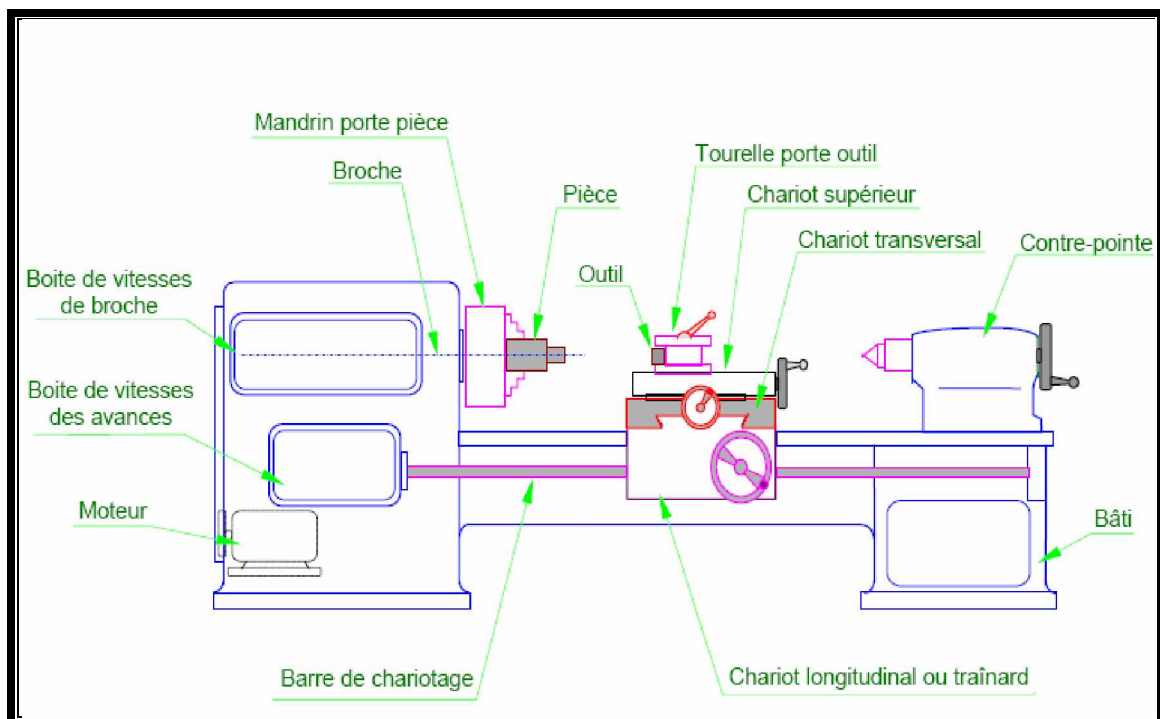
Les machines outils les plus courantes utilisées pour le tournage sont:

#### 1. Les tours parallèles à charioter et à fileter:

Ces machines sont utilisées pour les travaux unitaires ou de petites et moyennes séries sur des pièces très simples.

Ces tours sont peu flexibles.

Seules les surfaces dont les génératrices sont parallèles ou perpendiculaires à l'axe de la broche sont réalisables en travail d'enveloppe.



**Fig. II.11 :** Toure parallèle

## **2. Les tours à copier:**

Ils permettent l'usinage de pièces par reproduction, à partir d'un gabarit, grâce à un système de copiage hydraulique qui pilote le déplacement du chariot transversal.

C'est une machine assez flexible qui peut convenir pour des travaux de petites à grandes séries.

La génératrice des surfaces de révolution peut être quelconque.

## **3. Les tours semi-automatiques:**

Ce sont des tours équipés d'un traînard semblable à celui d'un tour parallèle avec une tourelle hexagonale indexable munie de 6 postes d'outils animée d'un mouvement longitudinal contrôlé par des butées.

Les outillages spécialement conçus pour la machine permettent des opérations simples et précises.

La commande de ces tours peut être manuelle ou en partie automatique. La flexibilité de ces machines est très limitée. On les utilisera pour des travaux de moyenne série.

## **4. Les tours automatiques:**

Plusieurs outils sont montés tangentiellement à la pièce. Les mouvements sont obtenus par des cames qui donnent la vitesse d'avance et la course de chaque outil. Une came est spécifique à une opération et à une pièce. Ces tours sont entièrement automatiques.

Ces machines n'ont aucune flexibilité. Elles conviennent pour les très grandes séries.

### **5. Les tours automatiques multibroches:**

Ce type de tour comportera par exemple huit broches. Huit outils soit un par broche travaillent en même temps et effectuent une opération différente. Ce sont les broches qui tournent d'un huitième de tour pour présenter la pièce devant l'outil suivant. Lorsque les broches ont effectuées un tour complet la pièce est terminée.

Il est possible de travailler dans la barre.

Sur ce type de tour les réglages sont longs et le temps de passage d'une série à l'autre immobilise la machine. Ce tour sera réservé pour les grandes et très grandes séries à des pièces de dimensions réduites à cause de l'espacement entre les broches.

### **6. Les tours à commande numérique:**

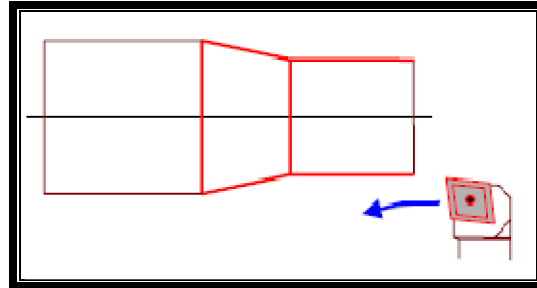
Comme en copiage la génératrice de la pièce peut être quelconque mais ici la trajectoire de l'outil est obtenue par le déplacement simultané de deux axes dont les positions successives sont données par un calculateur travaillant à partir d'un programme propre à la pièce. Ces tours sont équipés d'un magasin d'outils et éventuellement d'un système de chargement des pièces.

La flexibilité de ces machines est très grande et particulièrement bien adapté pour le travail unitaire ou les petites séries répétitives.

### II.3.2 Définitions des opérations de tournage:

#### 1. Chariotage:

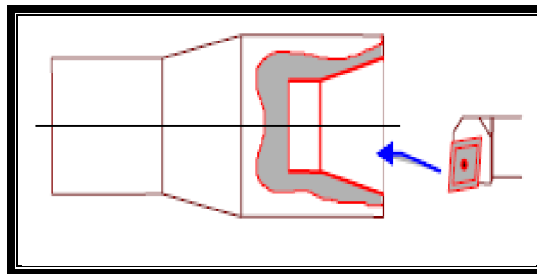
Opération qui consiste à usiner une surface cylindrique ou conique extérieure.



**Fig. II.12 :** Opération de chariotage.

#### 2. Alésage:

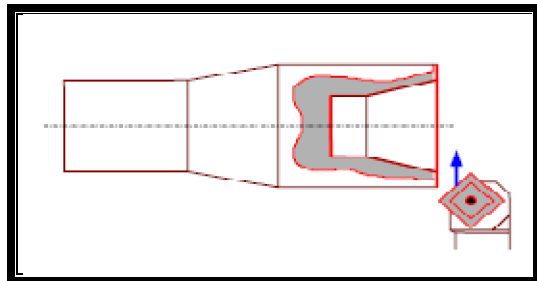
Opération qui consiste à usiner une surface cylindrique ou conique intérieure.



**Fig. II.13 :** Opération d'alésage.

#### 3. Dressage:

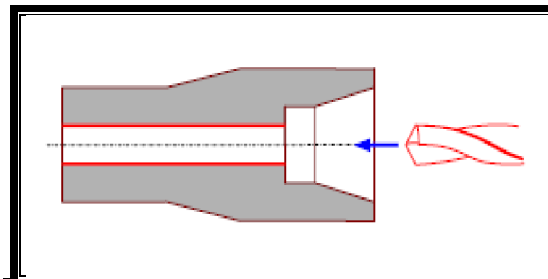
Opération qui consiste à usiner une surface plane perpendiculaire à l'axe de la broche extérieure ou intérieure.



**Fig. II.14 :** Opération de dressage.

#### 4. Perçage:

Opération qui consiste à usiner un trou à l'aide d'un forêt.

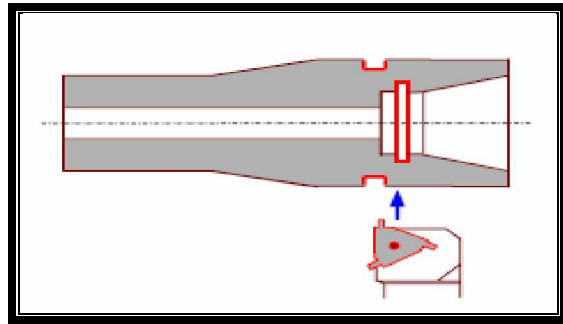


**Fig. II.15 :** Opération de perçage.



### 5. Rainurage:

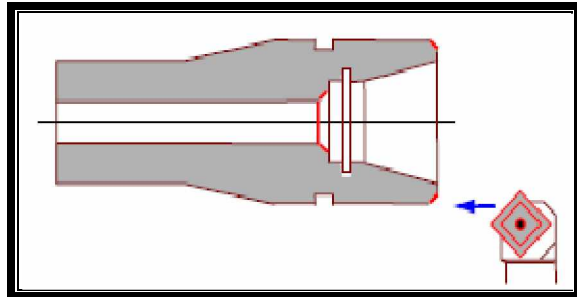
Opération qui consiste à usiner une rainure intérieure ou extérieure pour le logement d'un circlips ou d'un joint torique par exemple.



**Fig. II.16 :** Opération de rainurage

### 6. Chanfreinage:

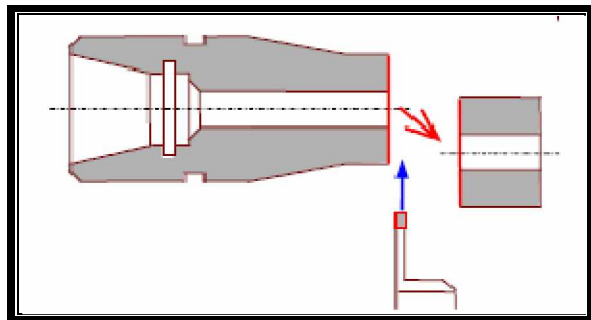
Opération qui consiste à usiner un cône de petite dimension de façon à supprimer un angle vif.



**Fig. II.17 :** Opération de chanfreinage.

### 7. Tronçonnage:

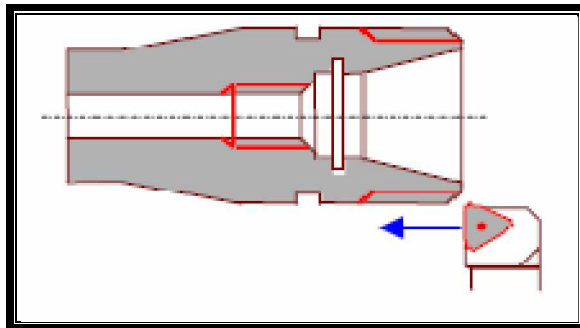
Opération qui consiste à usiner une rainure jusqu'à l'axe de la pièce afin d'en détacher un tronçon.



**Fig. II.18 :** Opération de tronçonnage.

### 8. Filetage:

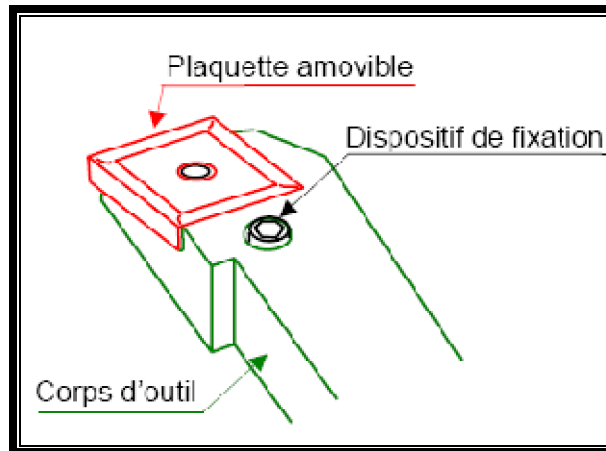
Opération qui consiste à réaliser un filetage extérieur ou intérieur.



**Fig. II.19 :** Opération de filetage.

### II.3.3 Les plaquettes d'outils:

Les outils les plus répandus sont constitués d'une plaquette amovible montée sur un corps d'outil.



**Fig. II.20** : Outils de coupe.

#### 1. Les plaquettes:

Les formes de la plaquette définissent les angles  $\beta$ ,  $\epsilon_r$  et le rayon de bec  $r_z$

Pour une meilleure résistance de la plaquette, le rayon de bec  $r_z$  et les angles  $\beta$  et  $\epsilon_r$  seront maximum.

- Angle de pointe :  $\epsilon_r$ .
- Angle de taillant :  $\beta$ .

#### 2. Le corps d'outil:

La position de la plaquette sur le corps d'outil détermine les angles  $\alpha$ ,  $\gamma$ ,  $\lambda_s$  et  $K_r$

- Angle de dépouille :  $\alpha$ .
- Angle de coupe :  $\gamma$ .
- Angle d'inclinaison d'arête :  $\lambda_s$ .

Matière à usiner	Outil en ARS		Outil carbure	
	a	g	a	g
Fonte(Ft20)	6	10	4	10
Acier(A60)	6	30	4	20
Acier(XC48)	6	18	4	10
Alliage cuivre	5	10	4	10
Alliages alu	8	40	6	25
plastiques	10	-5	X	X

**Tab II.1** : Les angles des outils.

### 3. Les différentes formes de plaquettes:

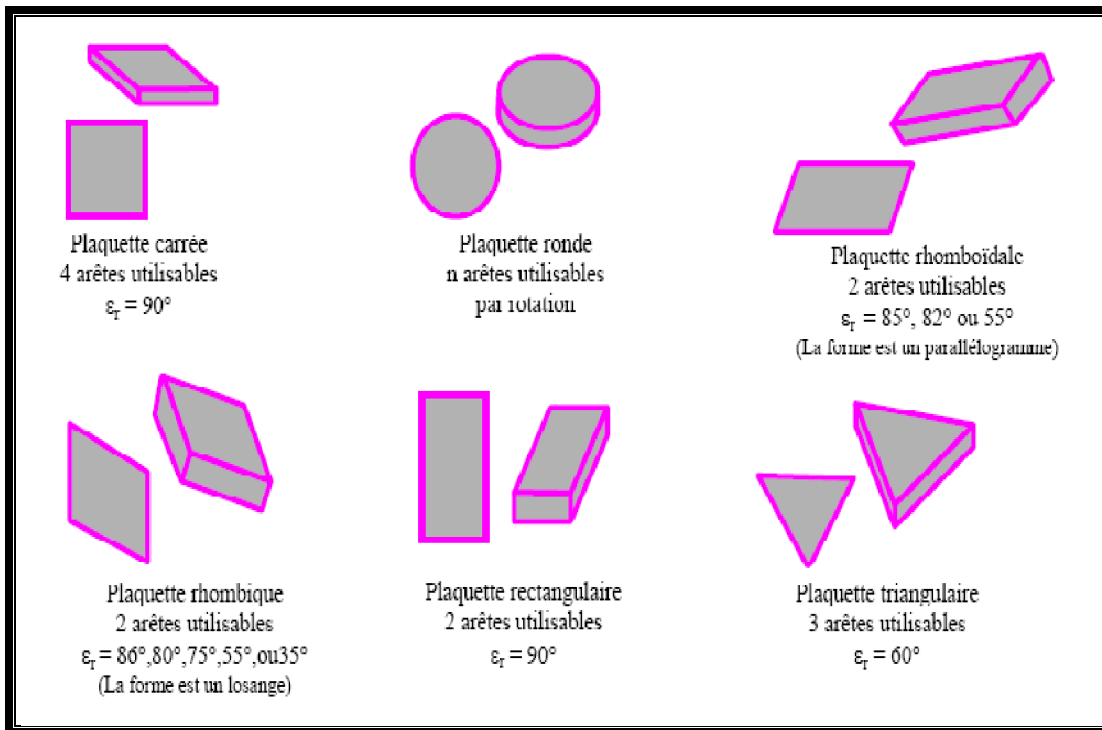
On utilise principalement des plaquettes de formes carré, ronde, rectangulaire, rhombique, rhomboïdale, triangulaire.

La forme de la plaquette est choisie en fonction des surfaces à obtenir et du cycle de travail.

Si plusieurs formes conviennent on choisira celle qui donne la meilleure résistance mécanique ( $\epsilon_r$  maximum).

Si le critère résistance n'est pas prépondérant, on choisira la plus économique, c'est-à-dire celle qui permet de disposer du maximum d'arêtes utilisables (plaquette carrée).

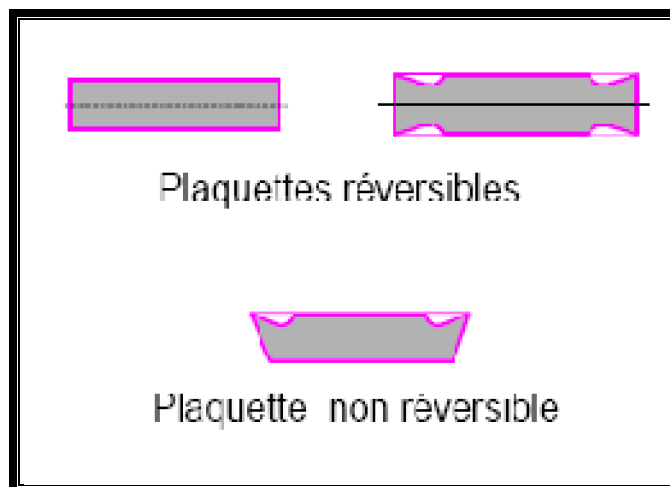
Il existe également des plaquettes de formes hexagonale, octogonale et pentagonale.



**Fig. II.21** : les dérivantes plaques.

**4. Les plaquettes réversibles:**

Une plaquette est dite réversible si elle présente un plan de symétrie parallèle à ses deux faces les plus importantes. Elle peut alors être retournée sur son corps d'outil et voit le nombre de ses arêtes doublé, ce qui la rend particulièrement intéressante du point de vue économique. Ainsi une plaquette carrée passe de 4 à 8 arêtes utilisables.



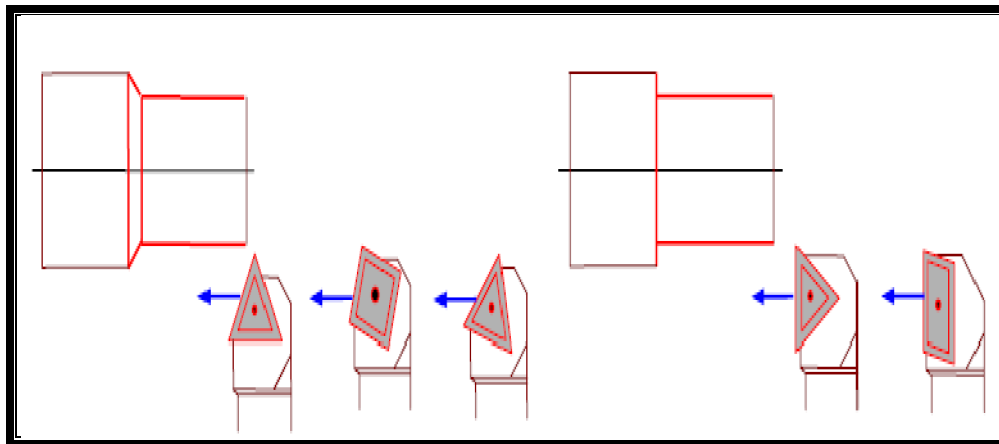
**Fig. II.22** : Les plaquettes réversibles et non réversibles

### II.3.4 Les outils de tournage:

Désignation, mode d'action et cycle de travail. Pour la réalisation des diverses opérations de tournage on dispose des outils suivants:

#### 1. Les outils à charioter:

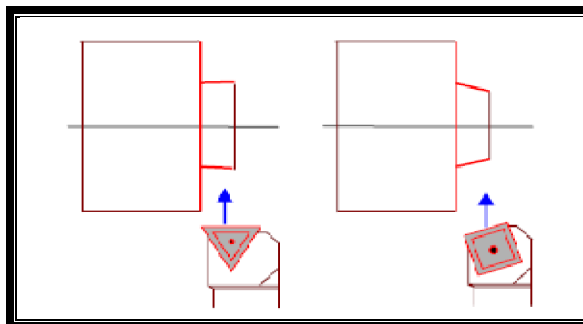
Une seule direction de travail possible pour la réalisation de cylindres ou de cônes extérieurs. Si la pièce comporte un épaulement on obtient une surface en travail d'enveloppe et une surface en travail de forme.



**Fig. II.23** : direction des outils.

#### 2. Les outils à dresser:

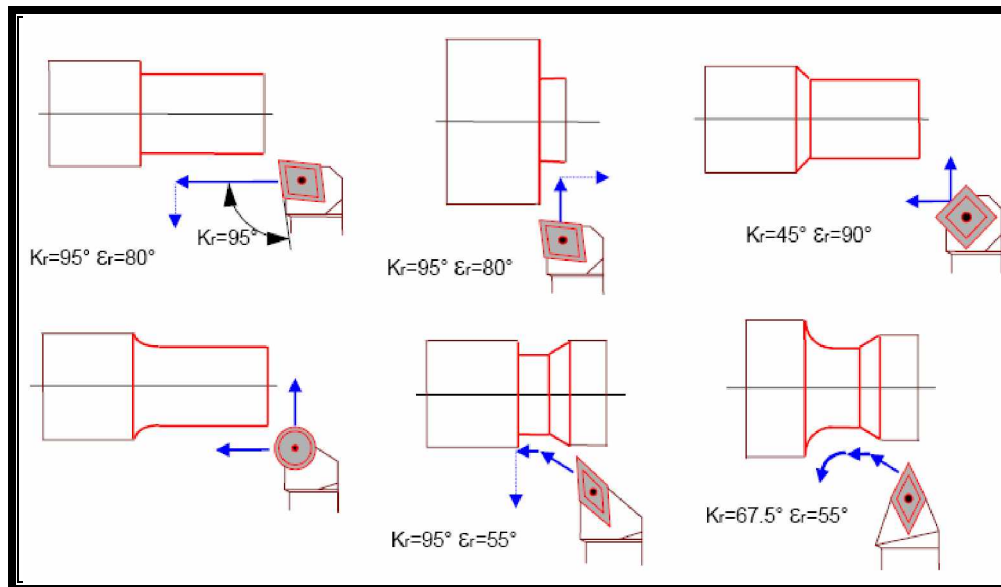
Une seule direction de travail possible perpendiculaire à l'axe de la pièce pour la réalisation de surfaces planes extérieures. Si la pièce comporte un épaulement on obtient une surface en travail d'enveloppe et une surface en travail de forme.



**Fig. II.24** : direction des outils dressage.

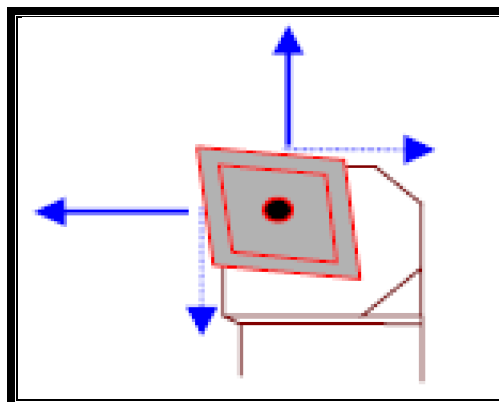
### 3. Les outils à charioter - dressé:

Au minimum deux directions possibles de travail permettant à ces outils d'effectuer des opérations de chariotage et de dressage de surfaces extérieures en travail d'enveloppe.



**Fig. II.25** : direction des outils dressage ou chariotage.

Les flèches en traits interrompus  $\leftarrow$  indiquent une direction de coupe pour laquelle il convient d'observer des précautions: longueur de surface réduite et faible profondeur de passe. Ce sens de travail est à éviter si l'on peut procéder autrement.

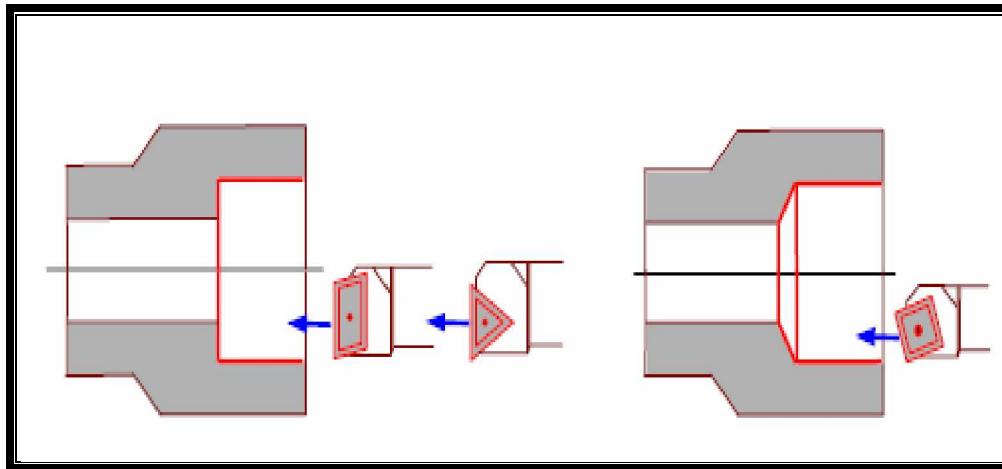


**Fig. II.26** : direction d'outil dressage ou chariotage.

**Pour les opérations d'alésage on retrouve les mêmes principes que pour les outils d'extérieurs.**

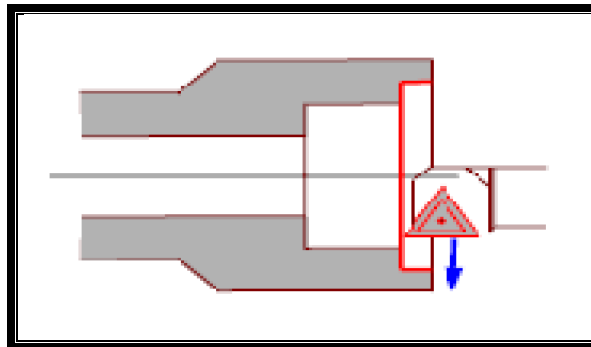
#### 4. Les outils à aléser:

Une seule direction de travail possible pour la réalisation de cylindres ou de cônes intérieurs.



**Fig. II.27** : direction des outils d'alésage charioté.

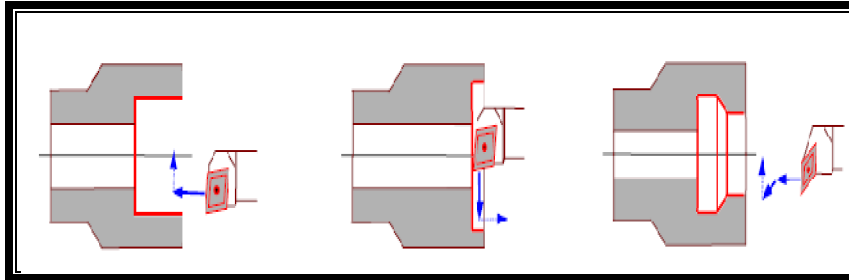
Opération de dressage d'un cylindre intérieur. Une seule direction d'avance possible pour l'outil.



**Fig. II.28** : direction des outils d'alésage dressé.

### 5. Les outils à aléser - dressé:

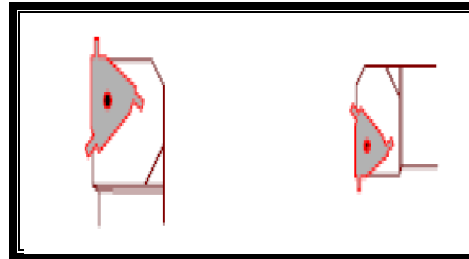
Au minimum deux directions possibles de travail permettant à ces outils d'effectuer des opérations d'alésage et de dressage de surfaces intérieures.



**Fig. II.29** : direction des outils d'alésage dressé.

### 6. Les outils rainurés:

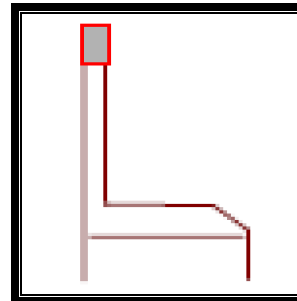
Pour la réalisation des opérations de rainurage.



**Fig. II.30** : Outils De Rainure.

### 7. Les outils à tronçonner:

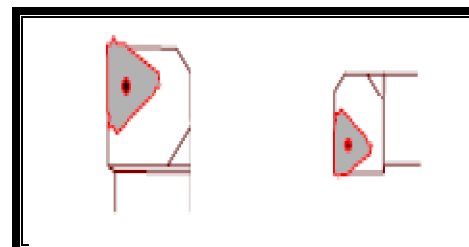
Pour la réalisation des opérations de tronçonnage.



**Fig. II.31** : Outils De tronçonnage.

### 8. Les outils à fileter:

Pour la réalisation des opérations de filetage.



**Fig. II.32** : outils de filetage.



### II.3.5 Conditions de coupe:

**ATTENTION:** Les valeurs ci-dessous sont des ordres de grandeur donnés à titre indicatif pour les travaux unitaires.

#### ✓ Vitesses de coupe:

$$= \frac{V_c}{D} \quad \begin{array}{l} n: \text{ fréquence de broche en tours/min} \\ V_c: \text{ vitesse de coupe en m/min} \\ D: \text{ diamètre usiné en m} \end{array}$$

#### ✓ Vitesses de coupe indicatives pour un outil en acier rapide:

∅ aciers courants:	<b>20 à 25 m/min en ébauche</b> <b>25 à 30 m/min en finition</b>
∅ fontes grises	<b>18 m/min</b>
∅ cuivre	<b>35 m/min</b>
∅ aluminium et alliages	<b>80 m/min</b>
∅ bronzes et laitons	<b>40 m/min</b>

Pour le tronçonnage, le rainurage et l'alésage réduire la vitesse d'un tiers.

#### ✓ Vitesses de coupe indicatives pour un outil carbure:

De **80 à 1000** m/min (on devra limiter la vitesse de coupe à 140 m/min environ à cause du manque de puissance et de rigidité de nos machines universelles).

#### ✓ Vitesses d'avance:

**f** est exprimé en mm/tour de broche. Valeurs indicatives:

∅ pour un outil en acier rapide:	<b>0,1 à 0,3</b> en ébauche <b>0,05 à 0,2</b> en finition
∅ pour un outil carbure:	<b>0,2 à 0,4</b> en ébauche <b>0,1 à 0,2</b> en finition.

### II.3.6 Les portes pièces:

1. **Les portes pièces standards:** Ils font partie de l'équipement standard des tours. Ce sont:

- ✓ **Les mandrins à serrage par mors:**

Ils comportent **2, 3** ou **4** mors. Ces mors peuvent être à serrage concentriques ou indépendants.

On peut monter des mors durs ou des mors doux. Les mors doux sont des mors non trempés afin de permettre à l'utilisateur de les usiner pour adapter leurs formes à celles de la pièce ou pour réaliser une coaxialité plus précise qu'avec des mors durs.

La prise de pièce en mandrin peut se faire par l'extérieur ou par l'intérieur des mors

- ✓ **Les mandrins expansibles:**

Ils assurent à la fois la mise en position et le maintien en position par l'intérieur ou par l'extérieur de pièces courtes ou longues. On utilise pour leurs constructions une ou plusieurs pièces déformables. Le type le plus classique est le mandrin à pinces que l'on retrouve comme support d'outils pour des fraises à queue cylindrique.

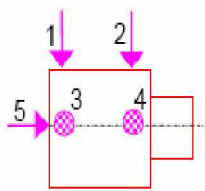
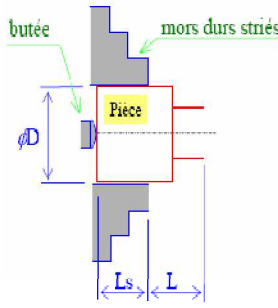
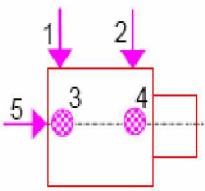
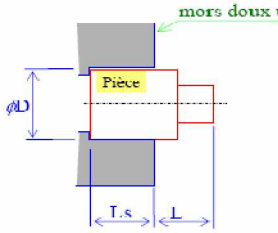
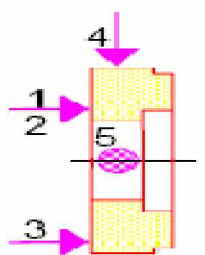
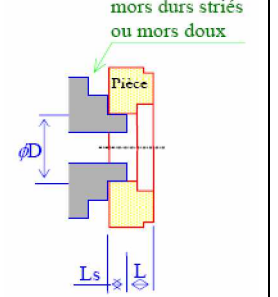
2. **Les portes pièces dédiées:**

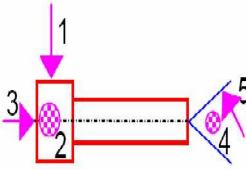
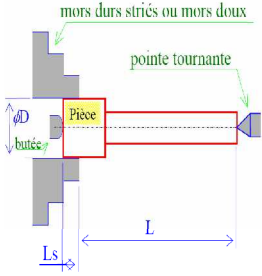
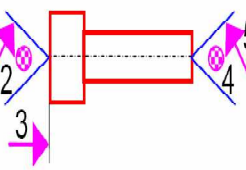
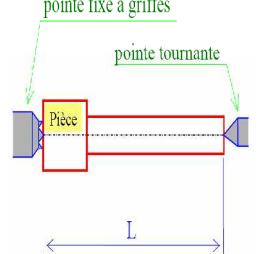
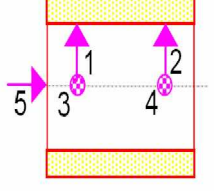
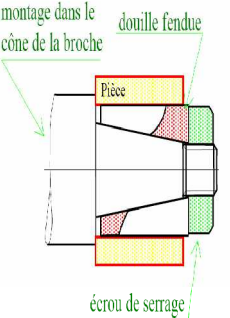
Il s'agit de montages de reprise spécialement étudiés et réalisés pour une phase d'usinage.

Ils se montent soit à la place du mandrin en utilisant les mêmes surfaces de référence que lui soit sur le plateau lisse (appareillage standard du tour). Dans ce dernier cas le montage pourra être installé sur n'importe quel tour ce qui n'est pas le cas de la solution précédente: La liaison mandrin-broche étant différente d'un modèle de tour à l'autre

**3. Réalisation et caractéristiques des montages portes pièces:**

Il s'agit des différents montages que l'on peut réaliser à l'aide des équipements standards du tour.

Type de montage	Modélisation de la liaison	Schéma du montage	Accessoires utilisés	Erreur de reprise (coaxialité)
Montage en l'air	 <p>Pour le respect de la liaison <math>L_s</math> ne doit pas être inférieure à <b><math>0,7 D.L_s &gt; D</math></b> souhaitable</p>		<p>Mandrin 3 mors <b>durs</b> à serrage concentrique + butée</p> <p>L doit être limité en fonction des efforts de coupe et du diamètre de la pièce</p>	0,01 maxi
Montage en l'air	 <p>Pour le respect de la liaison <math>L_s</math> ne doit pas être inférieure à <b><math>0,7 D</math></b>. <b><math>L_s &gt; D</math></b> souhaitable</p>		<p>Mandrin 3 mors <b>doux</b> à serrage concentrique</p> <p>L doit être limité en fonction des efforts de coupe et du diamètre de la pièce</p>	0,05maxi
Montage en l'air (prise de pièce par intérieur)			<p>Mandrin 3 mors <b>durs ou doux</b> à serrage concentrique</p> <p>L doit être limitée en fonction des efforts de coupe et du diamètre de la pièce</p>	<p>0,1maxi (m.durs)</p> <p>0,05maxi (m.doux)</p>

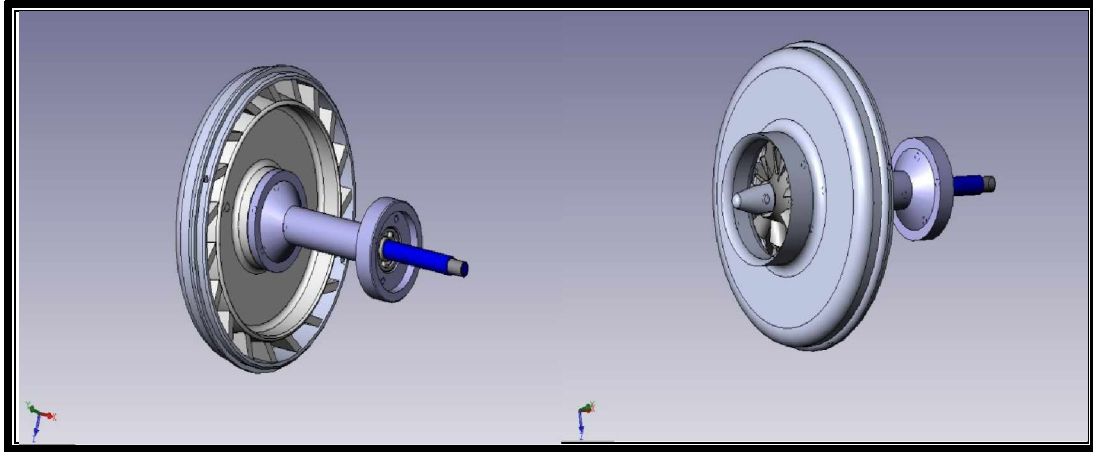
<p>Montage mixte</p>			<p>Mandrin à serrage Concentrique (3 mors durs +butée) ou (3 mors doux) + pointe tournante</p> <p>L doit être limité en fonction des efforts de coupe et du diamètre de la pièce</p>	<p>0,1maxi (m.durs) 0,05maxi (m.doux)</p>
<p>Montage entre pointes</p>			<p>Pointe fixe à griffes Pour assurer l'entraînement de la pièce+pointe tournante</p> <p>L doit être limité en fonction des efforts de coupe et du diamètre de la pièce</p>	<p>0,01maxi</p>
<p>Mandrin expansible</p>		 <p>Exemple de mandrin expansible</p>	<p>Mandrin expansible à douille fendue monté dans le cône de la broche du tour</p>	<p>0,01maxi</p>

**Tab. II.2 : l'isostatique des pièces.**

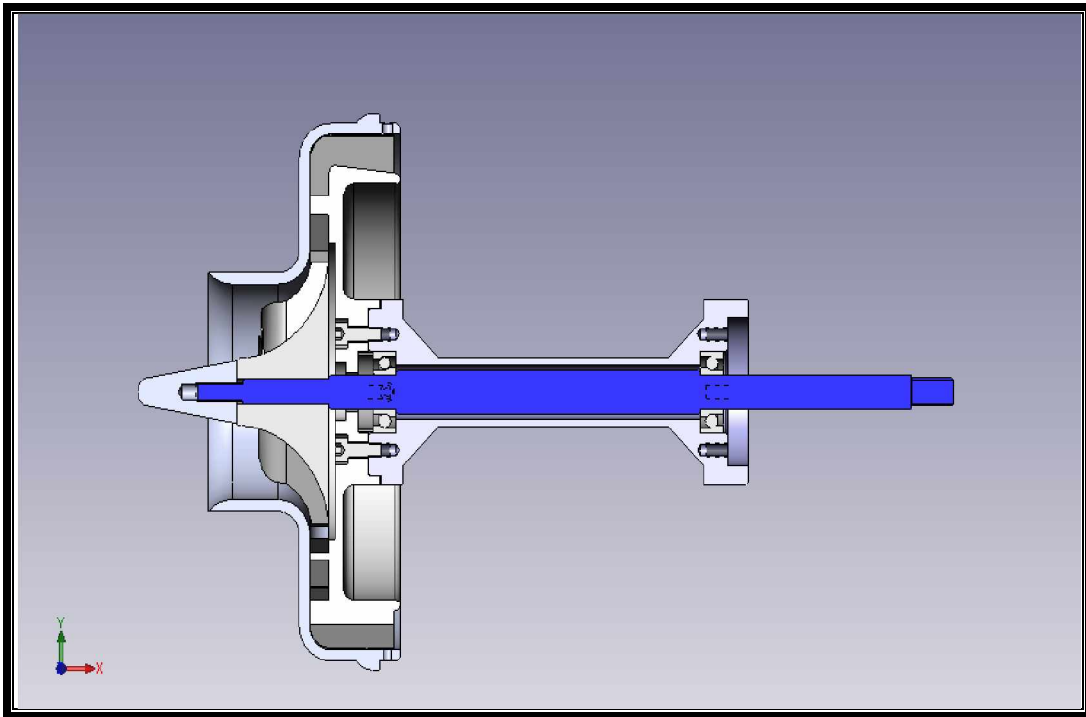


### III.1 Présentation Du Micro Turboréacteur :

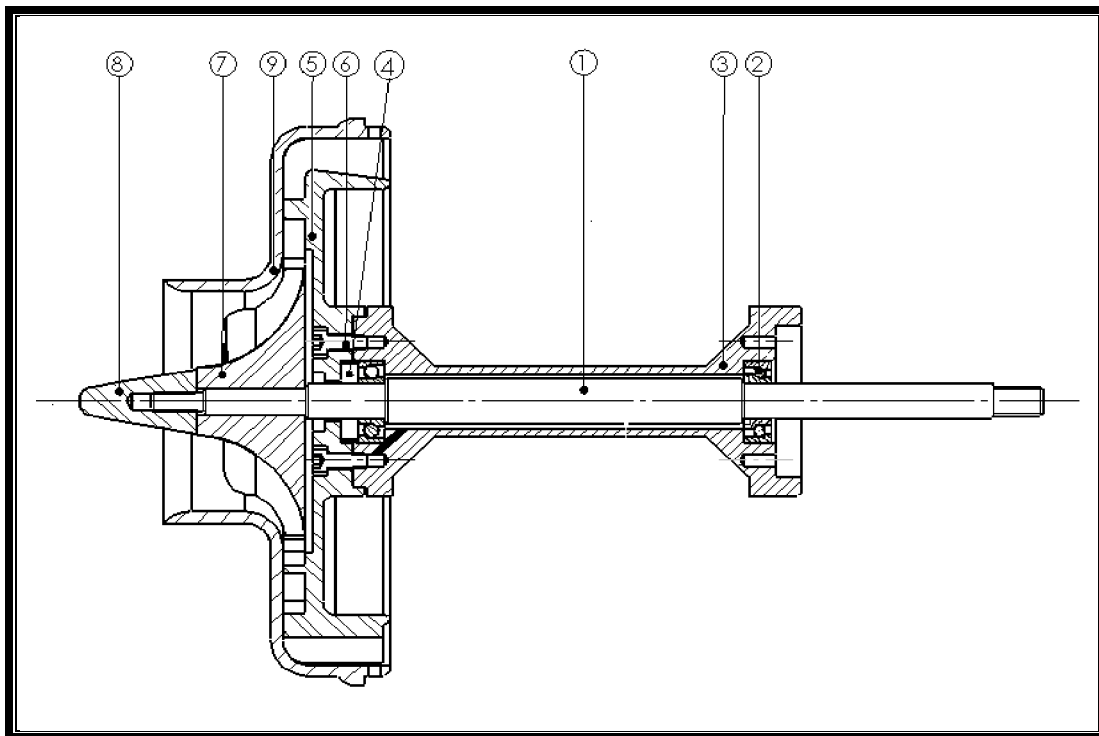
Étant donné que le but de ce travail est la réalisation d'une partie d'un micro turboréacteur, un logiciel de dessin industriel « **SOLIDWORKS** » nous a été d'une grande aide, et cela en nous permettant la concrétisation graphique des pièces a réalisés en trois dimensions.



**Fig. III.1 :** La Vues 3D De des éléments a réalisés.



**Fig. III.2 :** vues en coupe 3D.



**Fig. III.3 :** dessin en 2D.

Légende :

N°	Nom de pièce	Matière	Fabrication
1	Arbre	Acier (X 30)	Tournage
2	Roulement	7202 CBTB	Acheté
3	Cache arbre	Acier (X 30)	Tournage
4	Des Cales	Bronze	Acheté
5	Deviser	Alpax (AL-Si 15)	Coulage et tournage
6	Ecrou	CHC	Acheter
7	Roue	Duralumin	Acheter
8	Conne	Aluminium	Tournage
9	Cache diffuseur	Aluminium	Coulage et tournage

**Tab. III.1 :** Tableau de déferent élément.

### III .2 Etude de l'arbre :

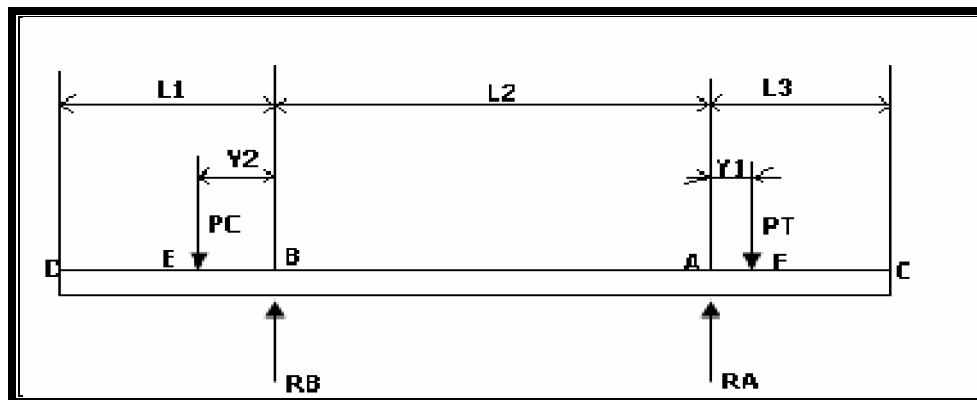
#### III.2.1 Introduction :

Chaque étude de conception, quel que soit son domaine d'utilisation, une étude **R.D.M** s'impose, et cela pour vérifier la fiabilité des éléments à construire et celle de leur assemblage.

En ce qui concerne la construction mécanique, cette étude est plus rigoureuse et plus approfondie quand il s'agit d'un ensemble tournant va que les risques de déformation ou de rupture de l'élément en statique s'amplifient considérablement en dynamique.

Dans ce cas nous allons vérifier la fiabilité de notre ensemble ; arbre de transmission, roue compresseur et roue turbine.

Pour bien spécifier les différentes longueurs et les différents diamètres de notre arbre, une esquisse est représentée ci dessous :



**Fig. III.4 :** Longueurs De Chaque Tronçon.

Notre arbre se divise en trois zones différencées par leurs longueurs et leurs diamètres. Les trois zones représentant des cylindres de diamètres  $d$  et de longueurs  $L$ .



**III.2.2 Etude Statique :**

Pour l'étude statique on suppose que les poids de la roue compresseur et celle de la roue turbine sont appliqués aux centre de gravité de celles ci, et que le poids de l'arbre est considéré comme une charge répartie tel que :

**1. Calcul des réactions aux appuis :**

A l'équilibre des forces on a :

$$\sum \rightarrow \quad (3.1)$$

Donc on a :

$$R_A + R_B = m_c \cdot g + m_t \cdot g \quad (3.2)$$

$$\sum \rightarrow = \rightarrow \quad (3.3)$$

$$P_c \cdot Y_2 - P_t \cdot (y_1 + l_2) + R_A \cdot L_2 = 0 \quad (3.4)$$

On trouve  $R_A$  et  $R_B$

$$= \frac{(\quad)}{\quad} \quad (3.5)$$

$$= \quad + \quad - \quad (3.6)$$

✓  $R_A = 1.84387 \text{ N}$

✓  $R_B = 1.12737 \text{ N}$

**2. Calcul de l'effort tranchant et du moment fléchissant :**

En appliquant la somme des forces et celle des moment pour chaque zone, on trouve les efforts tranchants et les moment fléchissant appliqués le long de la poutre, ainsi on détermine l'effort max et le moment max ,cela pour estimer la contrainte de torsion de notre arbre et vérifier quelle est bien inférieur a la contrainte max relative a la nuance du matériau de notre arbre en utilisant l'expression suivante :

$$t = \frac{M_t}{W_t} \leq \tau \tag{3.7}$$

Sachant que  $I_0$  est le moment d'inertie polaire de l'arbre tel que :

$$W_t = \frac{I_0}{r} \tag{3.8}$$

- Ø  $M_t$  : moment de torsion.
- Ø  $\tau$  : La contrainte maximale à la torsion.
- Ø  $W_t$  : Module de torsion.
- Ø  $r = \frac{d}{2}$  (avec d le diamètre de l'arbre).
- Ø  $\tau_{adm}$  : résistance pratique au cisaillement

· **Donc :**

$$\tau = \frac{M_t}{W_t} \leq \tau_{adm} \tag{3.9}$$

· **Ce la implique :**

$$y \geq \frac{M_t}{\tau_{adm} \cdot W_t} \tag{3.10}$$

- **Le moment idéal de torsion est :**

$$= \quad + \quad (3.11)$$

D'après le diagramme des moments en tire la valeur de moment.  
Et pour calculer le moment de torsion de turbine est calculé d'après la relation suivante.

$$= \quad (3.12)$$

- Le rendement mécanique est estimé à **0.98**

D'après les calculs on trouve les valeurs des moments illustré dans le tableau suivante :

- **Tableau des valeurs des moments :**

<b>Moment de flexion</b>	<b>28.55 N.mm</b>
<b>Moment de torsion de turbine</b>	<b>21737.79 N.mm</b>
<b>Moment idéal</b>	<b>21737.81N.mm</b>

**Tab. III.2 :** valeurs des moments.

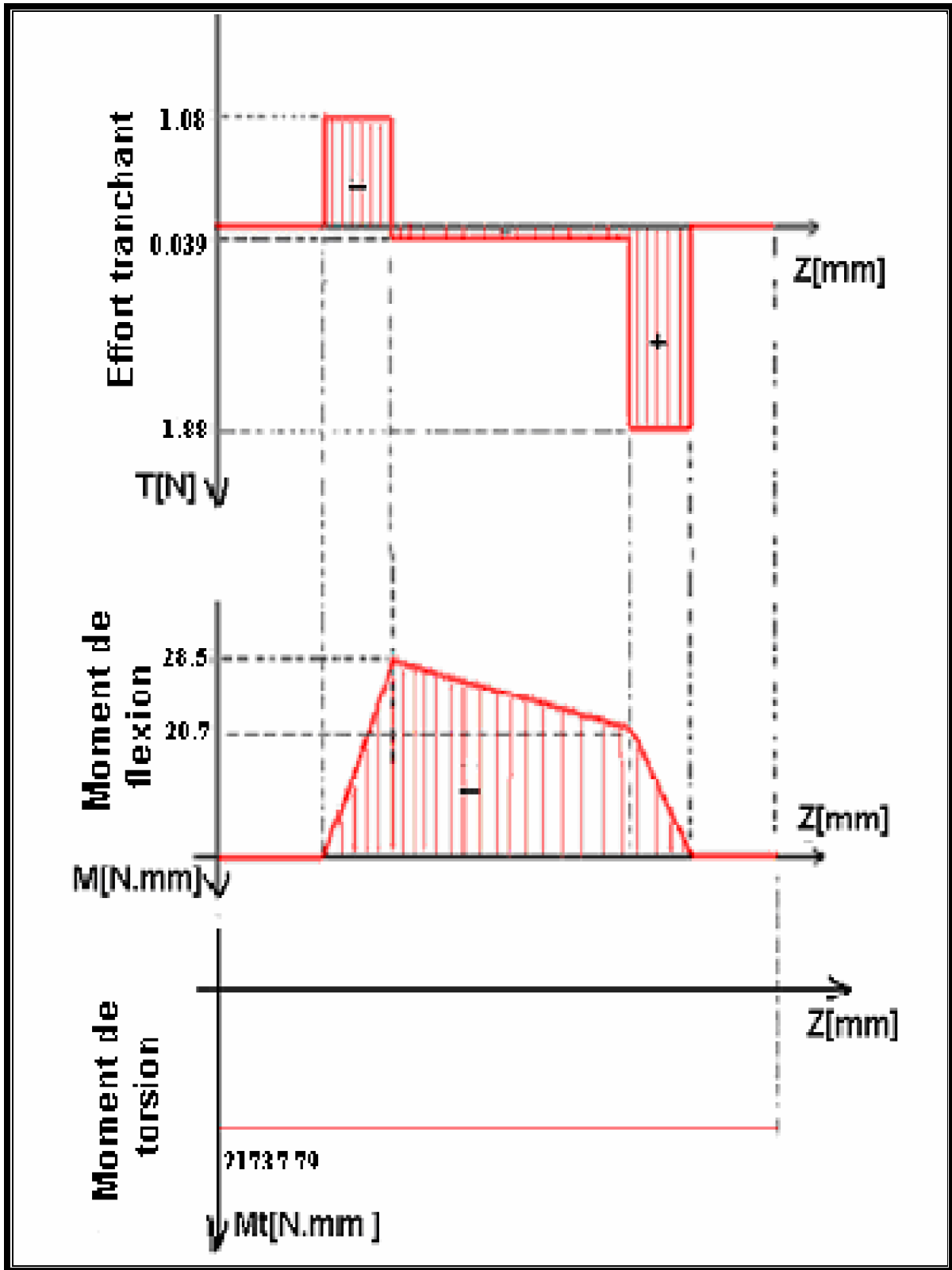


Fig. III.5 : Diagramme du moment tranchant et le moment fléchissant et de torsion.

- **Estimation du diamètre de l'arbre :**

D'après la formule suivante on tire le diamètre de l'arbre minimal

$$d \geq \frac{\dots}{\dots} \quad (3.13)$$

- **Donc :**

$$d \geq 12\text{mm}$$

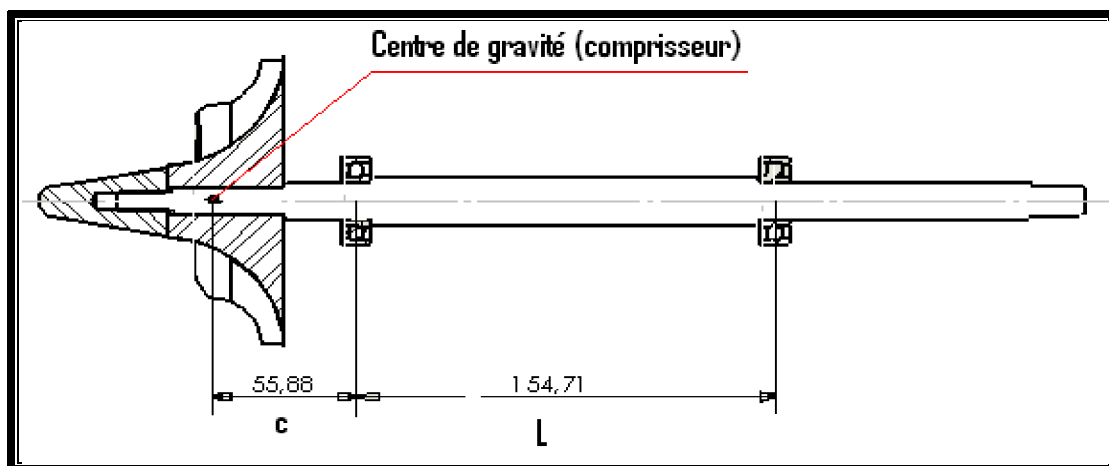
On prend le diamètre minimal de l'arbre  $d_{\min} = 15 \text{ mm}$

### III.2.3 Etude Dynamique :

Dans ce qui suit, on va estimer la pulsation critique de notre ensemble tournant, pour cela on va devoir calculer le régime critique de chaque élément indépendamment et déterminer par la suite de l'assemblage.

#### 1. Compresseur :

La pulsation critique de la roue compresseur est donnée par l'expression suivante :

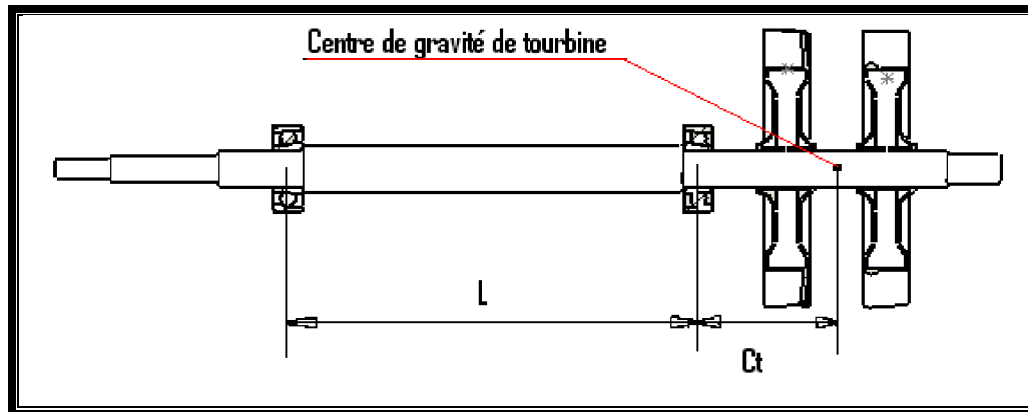


**Fig. III.6 :** Centre De Gravité De Compresseur.

$$= \frac{\dots}{\dots} \quad (3.14)$$

**2. Turbine :**

D'une manière identique à la roue compresseur on a :

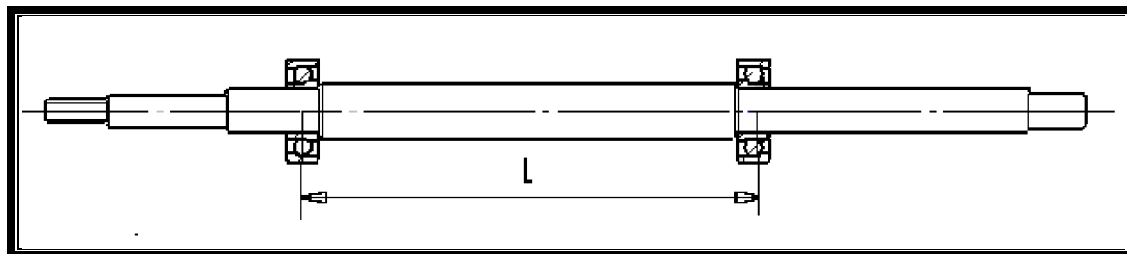


**Fig. III.7 :** Centre De Gravité De Turbine.

$$= \frac{\dots}{\dots} \quad (3.15)$$

**3. L'arbre :**

La pulsation critique de l'arbre est estimée par la formule suivante :



**Fig. III.8 :** L'arbre.

$$= \frac{\dots}{\dots} \quad (3.16)$$

**4. Ensemble :**

On estime la pulsation critique de l'ensemble en utilisant une formulation similaire à celle de l'assemblage des capacités électrique .en d'autres termes :

$$\frac{1}{I} = \frac{1}{I_1} + \frac{1}{I_2} + \frac{1}{I_3} \tag{3.17}$$

· Cela implique que :

$$I = \frac{I_1 I_2 I_3}{I_2 I_3 + I_1 I_3 + I_1 I_2} \tag{3.18}$$

· Avec :

$$I = \frac{1}{\frac{1}{I_1} + \frac{1}{I_2} + \frac{1}{I_3}} \tag{3.19}$$

· Résultats :

	C, L(mm)	I (N/m <sup>4</sup> )	E (N/m)	D (mm)	M(g)	c (rd/s)	c (tr/mn)
Arbre	197.6	5.15 <sup>E</sup> -9	2.413 <sup>E</sup> 8	12	330	29475147	281466920.6
Turbine	11	2.22 <sup>E</sup> -6	2.413 <sup>E</sup> 8	56	192	250714.4	2394146.928
Compresseur	26.25	2.32 <sup>E</sup> -6	7.583 <sup>E</sup> 8	58	110	3258831.3	3258831.33
Ensemble : arbre turbine compresseur						202044.3472	1929381.39

**Tab. III.3 :** Tableau Des Pulsations Critiques.

Le régime de fonctionnement de notre moteur est au voisinage de **68630tr/mn**, qui est très loin de la valeur critique de notre ensemble, qui est de **1929381.39 tr/mn**, donc notre machine peut fonctionner en toute sécurité, car le risque de détérioration des pièces tournantes par la vitesse élevée est pratiquement nul.

### III.2.4 Choix des roulements :

Le diamètre interne des roulements nous a été imposé par celui de la roue compresseur de ce fait , le choix du diamètre externe à été arbitraire .on fonction bien sur des dimensions normalisées ; sachant que les paliers subissent aucun effort axial , on a opte pour le type de roulement à une ranger de bille **15BT02** , ce la dit , il faut comme même vérifier que la charge dynamique équivalente de notre système (**C**) est inférieur à la charge dynamique de base (**C admissible** ) correspondante au type de roulement choisi ,la méthode de calcul et la suivante :

- **Calcul :**

La charge dynamique équivalente **P** est donné par :

$$P = X \cdot F_r + Y \cdot F_a \quad (3.20)$$

- **Talque :**

Ø  $F_r$  : la charge radiale.

Ø  $F_a$  : la charge axiale.

Notre palier ne supporte aucun effort axial, donc :

$$Y=1 \text{ et } X=0$$

- **Ainsi :**

$$P =$$

Les efforts axiaux qui subissent nos paliers sont ceux des réactions aux appuis **R<sub>A</sub>** et **R<sub>B</sub>**.

- **Donc :**

$$P = \text{MAX} ( \quad , \quad ) \quad (3.21)$$



- Ainsi :

$$P = 1.843N$$

Nous voulons que notre roulement ait une durée de vie  $LH = 10000$  h, la charge dynamique de notre système  $C_p$  à l'expression suivante :

$$C = P \frac{LH}{10^6} \quad (3.22)$$

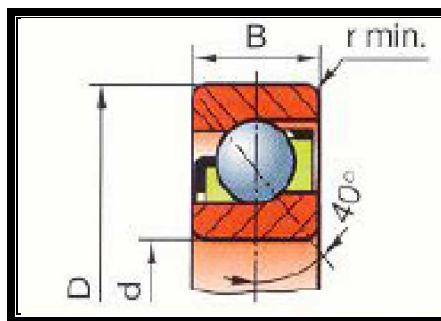
- Tel que :

- Ø N : le régime de fonctionnement du moteur ( $N = 68630$  RPM).
- Ø Roulement à bille donc  $k = 3$ .

- On trouve :

$$C \geq 63.6711 N$$

La détermination du diamètre et de la série des cotes est en fonction de la valeur de (C) et de la vitesse de rotation, en utilisant le tableau des roulements suivant :



**Fig. III.9** : Démontions de roulement.

Démontions						Capacité de charge de base		Vitesse de rotation limite pour lubrification		Désignation de roulements	Dimension d'in				poids
d	D	B	r <sub>0</sub> min	s <sub>0</sub> min	a	Dynamique C <sub>a</sub>	Statique C <sub>r</sub>	A la graisse	A l'huile		d	d <sub>0</sub> min	D <sub>0</sub> min	R <sub>0</sub>	
mm						K N		tr/min			mm				
10	30	9	0.6	0.3	6	3.1	1.18	60000	89000	B7200CBTB	10	14	26	0.6	0.027
	30	9	0.6	0.3	6.5	5.62	3.04	42000	63000	B7200CATB		14	26	0.6	0.028
12	32	10	0.6	0.3	7	3.41	1.34	56000	84000	B7201CBTB	12	16	28	0.6	0.035
	32	10	0.6	0.3	7.5	6.68	3.48	38000	56000	B7201CATB		16	28	0.6	0.036
	32	10	0.6	0.3	10.5	6.19	3.16	33000	50000	B7201AATA		16	28	0.6	0.036
15	35	11	0.6	0.3	7.5	4.06	1.66	50000	75000	B7202CBTB	15	19	31	0.6	0.042
	35	11	0.6	0.3	8	7.64	3.91	33000	50000	B7202CATB		19	31	0.6	0.043
17	40	12	0.6	0.3	8.5	4.92	2.04	45000	67000	B7203CBTB	17	21	36	0.6	0.060
	40	12	0.6	0.3	9	9.81	4.92	28000	42000	B7203CATB		21	36	0.6	0.061
20	47	14	1	0.6	10	6.07	2.7	40000	60000	B7204CBTB	20	25	42	1	0.098
	47	14	1	0.6	10.5	13.3	6.81	25000	38000	B7204CATB		25	42	1	0.100
25	52	15	1	0.6	11	8.25	3.8	33000	50000	B7205CBTB	25	30	47	1	0.119
	52	15	1	0.6	11.5	14.4	7.64	22000	33000	B7205CATB		30	47	1	0.122
	52	15	1	0.6	11	13.6	6.94	20000	30000	B7205AATB		30	47	1	0.124
30	62	16	1	0.6	12	10.8	5.2	28000	42000	B7206CBTB	30	35	57	1	0.184
	62	16	1	0.6	13	20	11	20000	32000	B7206CATB		35	57	1	0.189
	62	16	1	0.6	19	18.6	10	17000	25000	B7206AATB		35	57	1	0.192
35	72	17	1.1	0.6	13	13.3	6.8	25000	38000	B7207CBTB	35	42	65	1	0.268
	72	17	1.1	0.6	14	26.2	16.5	16000	24000	B7207CATB		42	65	1	0.275
40	80	18	1.1	0.6	14	15.8	8.15	22000	33000	B7208CBTB	40	47	73	1	0.337
	80	18	1.1	0.6	15.5	35.5	21.5	13000	20000	B7208CATB		47	73	1	0.347

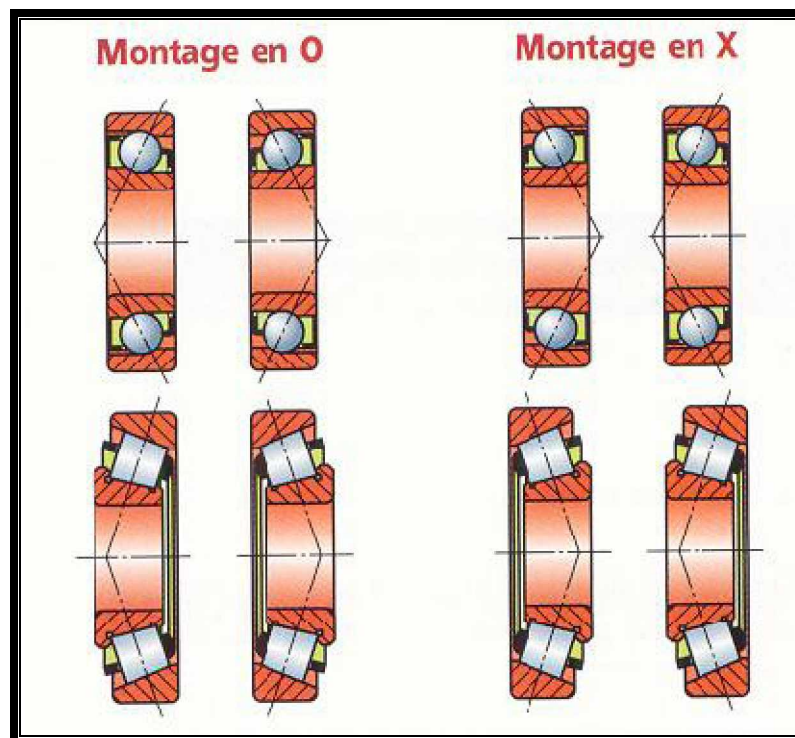
**Tab. III.4 :** Les Roulements Pour La Fréquence De Rotation Elevée

Ces roulements sont habituellement utilisés par paires montés en opposition. La position axiale de l'arbre est déterminée par les deux roulements. Les conditions de montage obéissent à des règles particulières.

Pour les cas usuels, on distingue deux principaux types de montage :

- Le montage en **X** (il est habituellement utilisé dans le cas d'un arbre tournant)
- Le montage en **O** (il est habituellement utilisé dans le cas d'un logement tournant)

Le montage de ces roulements nécessite un réglage du jeu de fonctionnement. Il doit être effectué en agissant sur les bagues coulissantes des roulements.

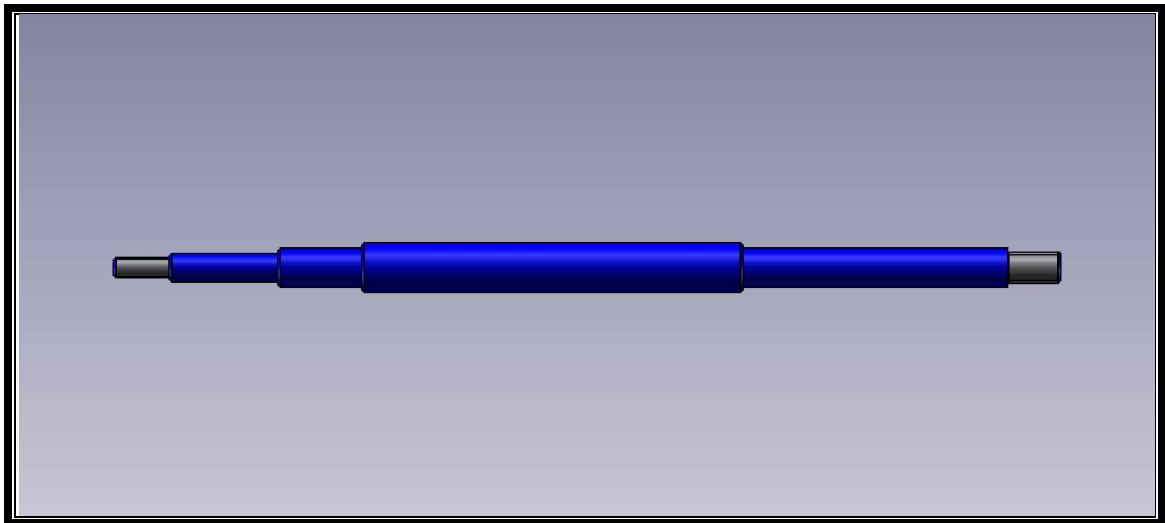


**Fig.III.10 :** Les Différents Montages Des Roulements.

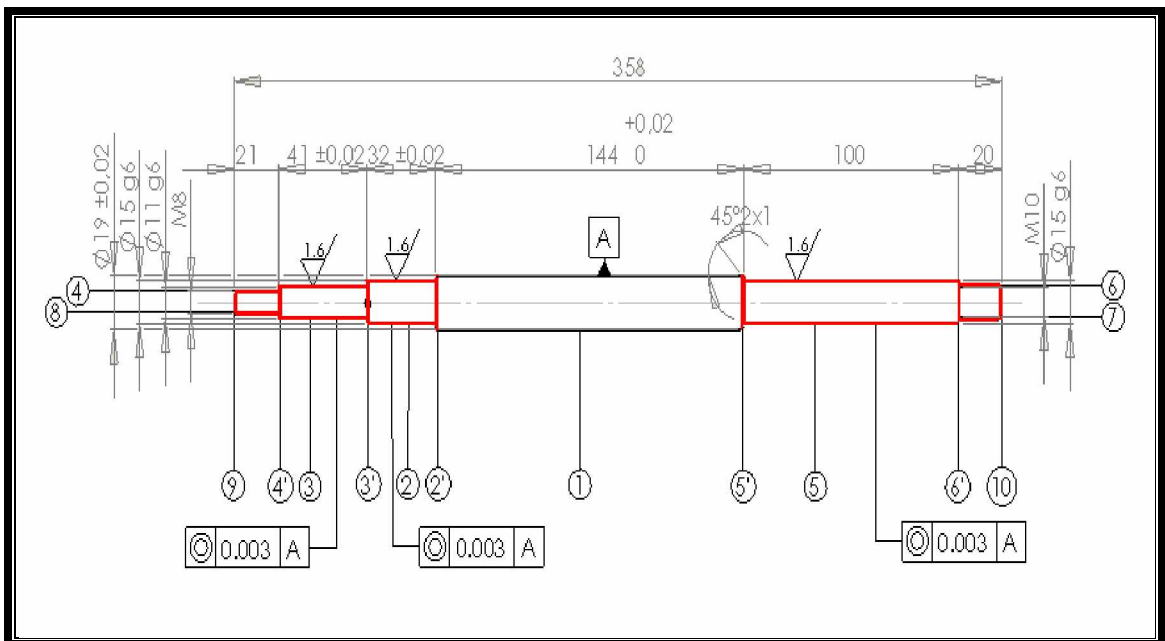
### III.3 Bureau Méthode :

C'est un service technique qui est chargé de quand ce voir les produit s.il étudie et interprète les contraintes contenues dans le cahier de charge pour les traduire un produit entière fini.

#### 1. L'arbre :



**Fig.III.11 :** Dessin D'arbre En 3D.



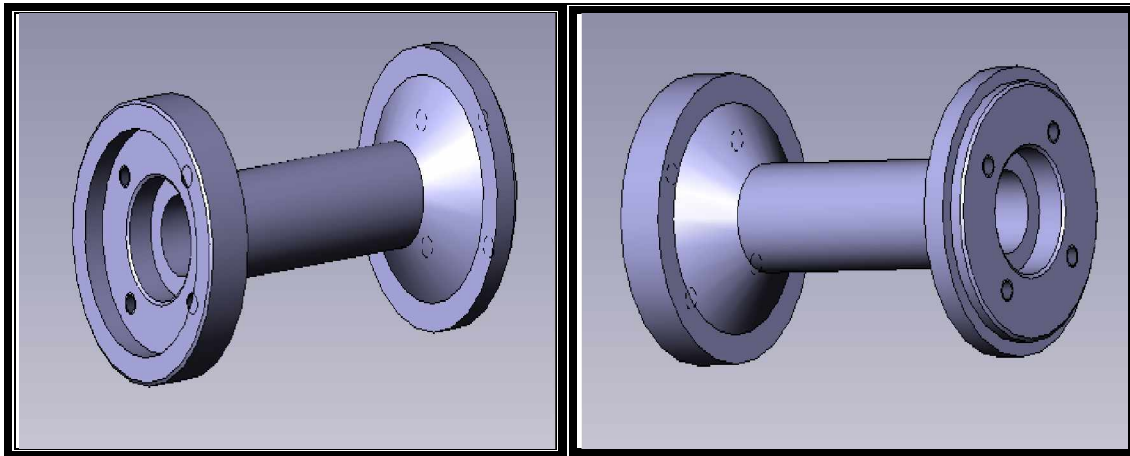
**Fig. III.12 :** Les Surfaces Usinées De L'arbre.

- Ø Nombre de pièce : **1** (unitaire).
- Ø Matière : acier **X30**.
- Ø Sur épaisseur **2mm**.
- Ø Obtention du brute (lingot **Ø20 x 362 mm**).
- Ø Parc machine (machine pour petites série).

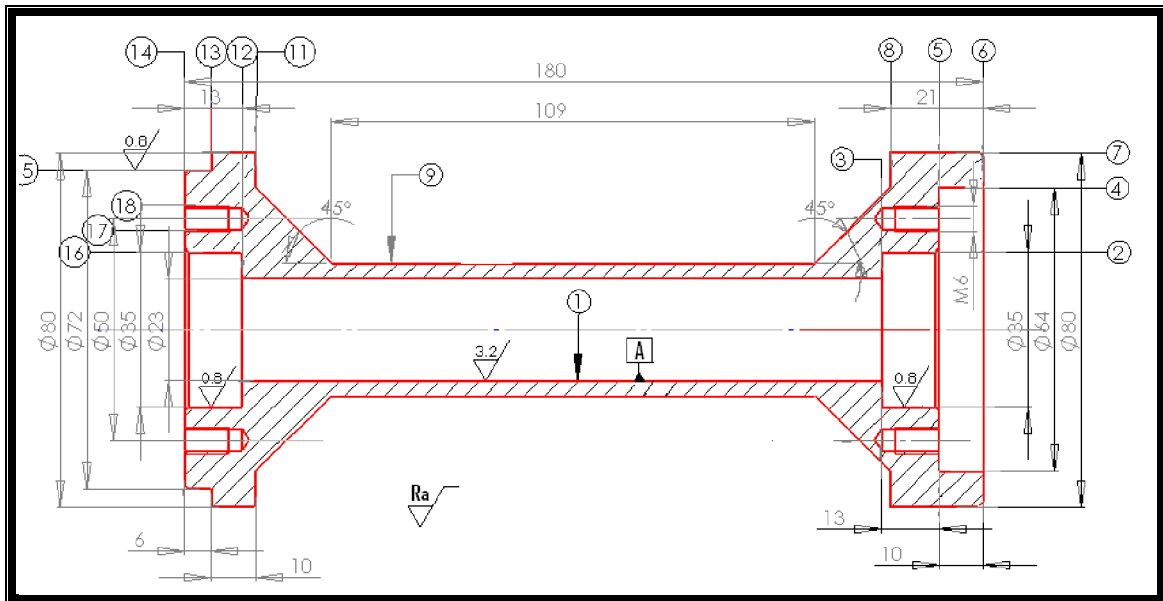
Phase	Sou phase	Les surfaces associées	Opération	Outils	machine
<b>100</b>		Contrôle du brut	contrôle	Pie coulisse	Atelier de contrôle
<b>200</b>	<b>A</b>	<b>9</b>	dressage	Outil de dressage 45°	Tournage
	<b>B</b>	<b>2, 2', 3, 3', 4, 4'</b>	chariotage	Outil de chariotage 90°	
<b>300</b>	<b>A</b>	<b>10</b>	dressage	Outil de dressage 45°	Tournage
	<b>B</b>	<b>5, 5', 6, 6'</b>	chariotage	Outil de chariotage 90°	
<b>400</b>		<b>7. 8</b>	filetage	Filière	Filetage A main
<b>500</b>		La pièce	Contrôle	PC	Atelier de control

**Tab. III.5 :** Les Etapes D'usinage De L'arbre.

**2. Le Cache arbre :**

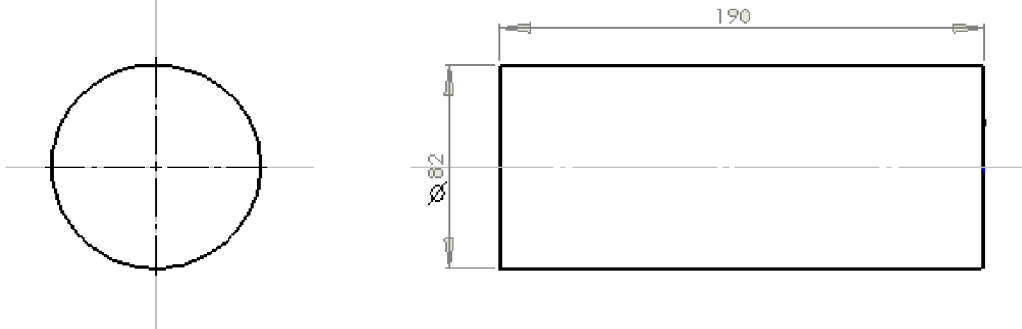


**Fig. III.13 :** Le Dessin De Cache Arbre En 3D.



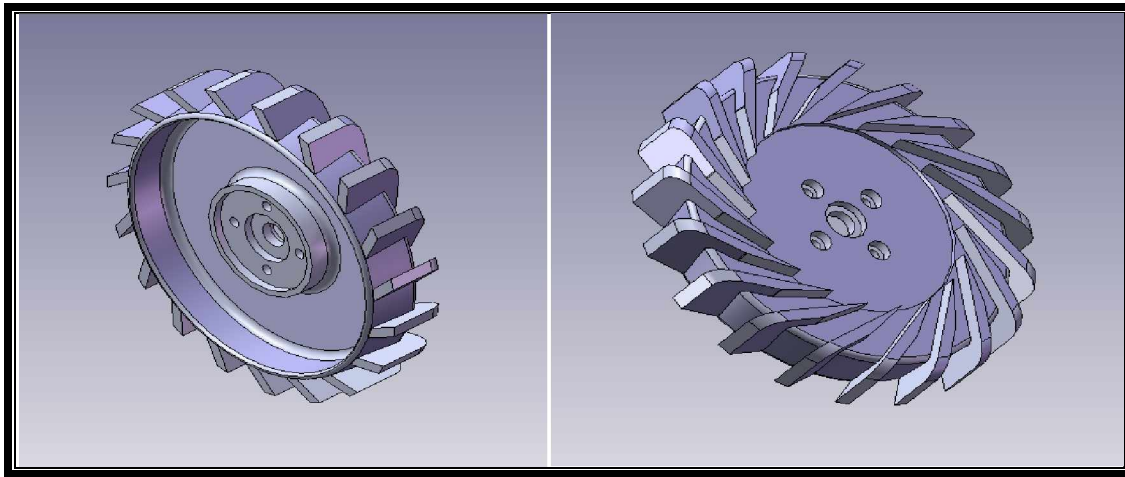
**Fig.III.14 :** les surfaces usinent de cache arbre.

- Ø Nombre de pièce **1** (unitaire)
- Ø Matière : acier **X30**.
- Ø Sur épaisseur **2mm**.
- Ø Obtention du brute (lingot diamètre **Ø82x190mm**).
- Ø Parc machine (machine pour petites série).

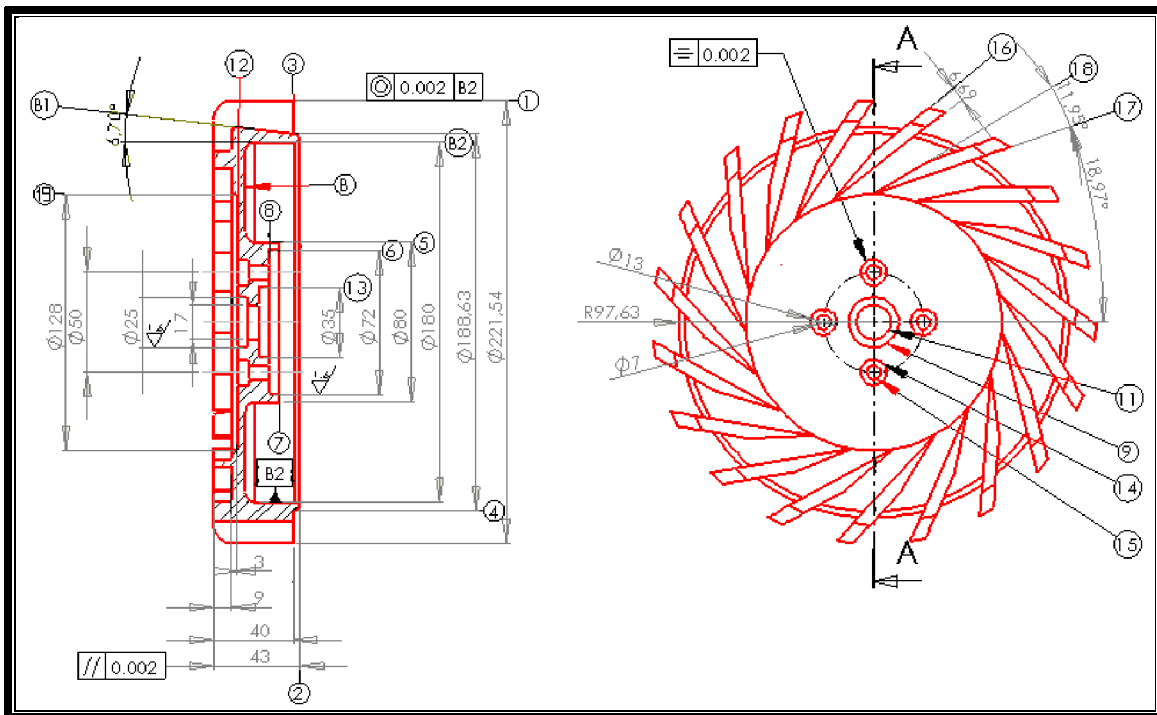
Phase	Sou phase	Les surfaces associées	Opération	Outils	machine
100		Contrôle du brut	contrôle	Pie coulisse	Atelier de contrôle
					
200	A	14,7	Dressage 14 et chariotage 7	Outil de dressage 45°	Tournage
	B	15,13	chariotage	Outil de chariotage 90°	
	C	11, 8, 9	chariotage	Outil de tronçonnage et chariotage 90°	
	D	19	chariotage	Outil de chariotage 45°	
300	A	1	perçage	Foré Ø 20	Tournage
	B	1, 12, 16	Alésage	Outil d'alésage 90°	
400	A	6	Dressage	Outil de dressage 45°	Tournage
	B	3, 2	Alésage	Outil d'alésage 90°	
500		17x8	perçage	Foret Ø 4.8	perçage
600		18	Taraudage	Taraud M6	Filetage a main
700			Contrôle	PC, Tampon	Atelier de control

**Tab. III.6 :** Les Etapes D'usinage De Cache arbre.

**3. Le diffuseur :**



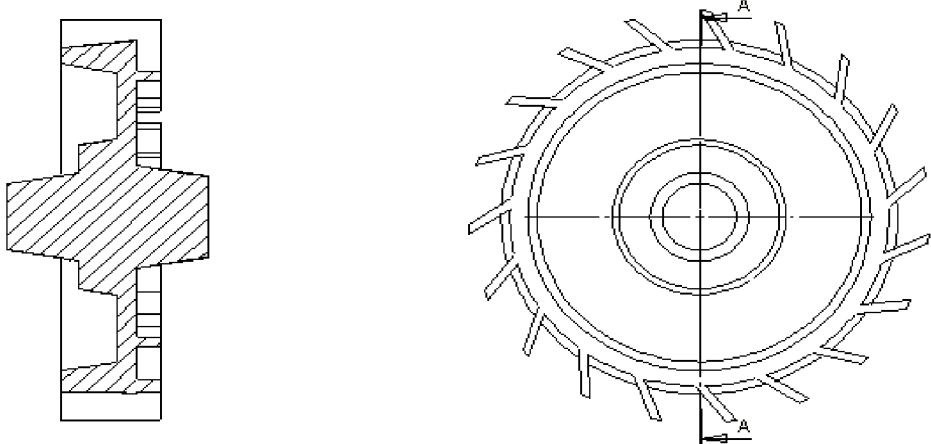
**Fig. III.15:** Le Dessin De Diffuseur En 3D.



**Fig.III.16:** les surfaces usinent de diffuseur.

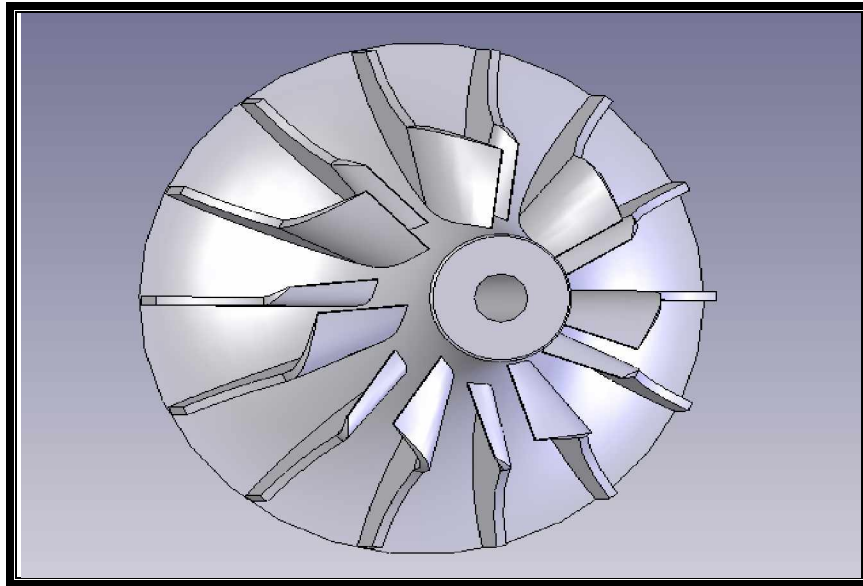


- Ø Nombre de pièce 1 (unitaire).
- Ø Matière : alpax **Al-Si 15**.
- Ø Obtention du brute (moulage au sable).  
Sur épaisseur **3mm**.
- Ø Parc machine (machine pour petites série).

Phase	Sou phase	Les surfaces associées	Opération	Outils	machine
100		Contrôle du brut	contrôle	Pie coulisse	Atelier de contrôle
					
200	A	1, 2, 7, 3. 4	Dressage 2, 7,3, 4 et chariotage 1	Outil de dressage 45°	Tournage
	B	11	Perçage	Foré Ø 17	
	C	5, 6, 8, 13	Alésage 6 et 13 dressage 5.8	Outil d'alésage 90°	
300	A	10	Dressage	Outil de dressage 45°	Tournage
	B	19, 12, 9, 20	Alésage 19, 9 et dressage 12, 20	Outil d'alésage 90°	
400		21	Forme	Outil de forme R 10	Tournage
500		14,15	perçage	Foré Ø 7	perçage
600		16, 17, 18 22,23	limage	La limes	limage a main
700		Contrôle de la pièce	Contrôle	PC, Tampon	Atelier de control

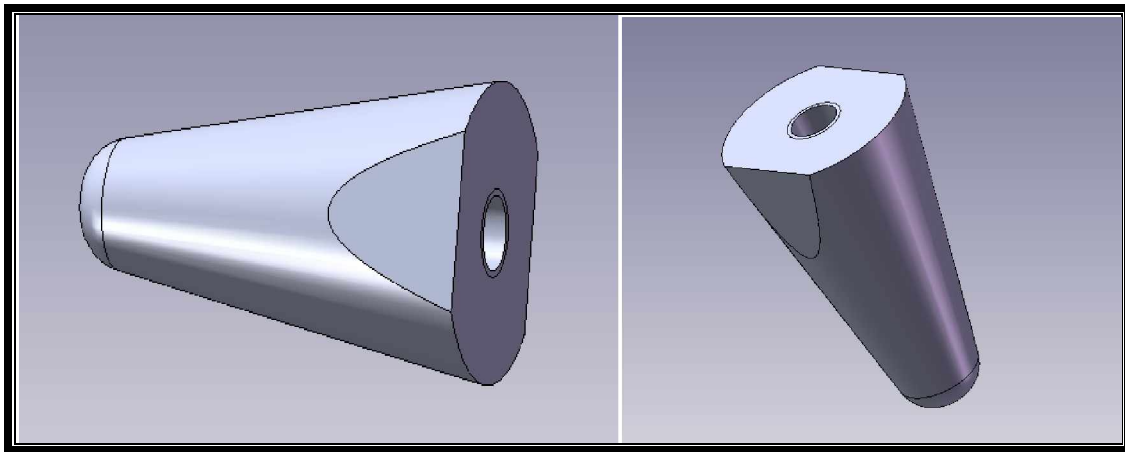
**Tab. III.7 :** Les Etapes D'usinage De Diffuseur.

4. La roue :

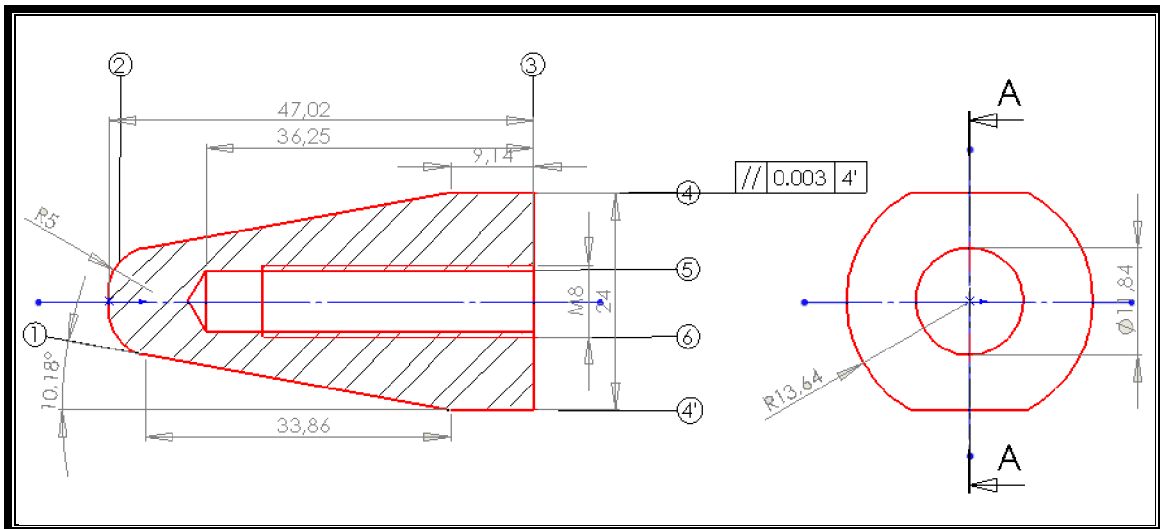


**Fig. III.17:** Le Dessin De La Roue En 3D.

5. Le Cône :



**Fig. III.18 :** Le Dessin De Cône En 3D.



**Fig.III.19 :** les surfaces usinent de Cône.

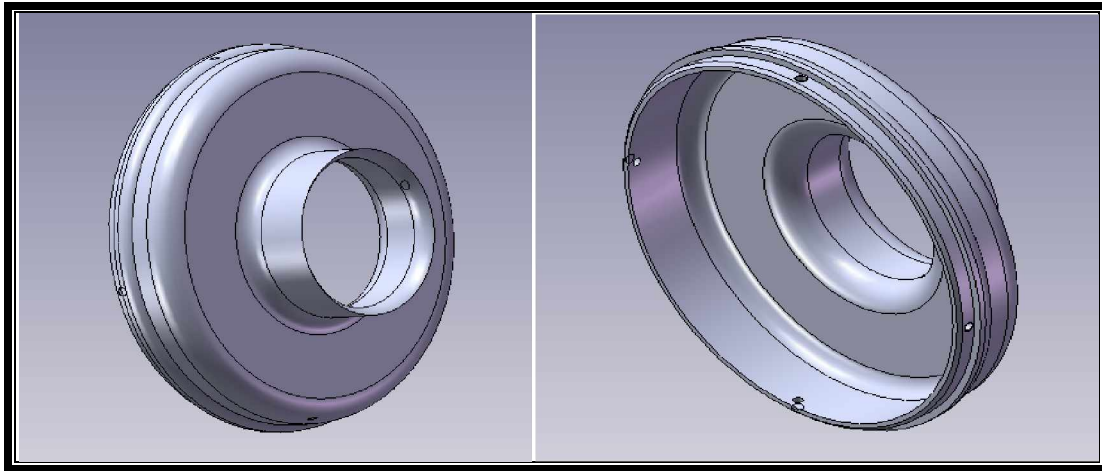
- Ø Nombre de pièce **1** (unitaire).
- Ø Matière : **Al-Si 15**.
- Ø Sur épaisseur **3mm**.
- Ø Obtention du brute (lingot diamètre **Ø30x70mm**).
- Ø Parc machine (machine pour petites série).

Phase	Sou	Les surfaces	Opération	Outils	machine
-------	-----	--------------	-----------	--------	---------

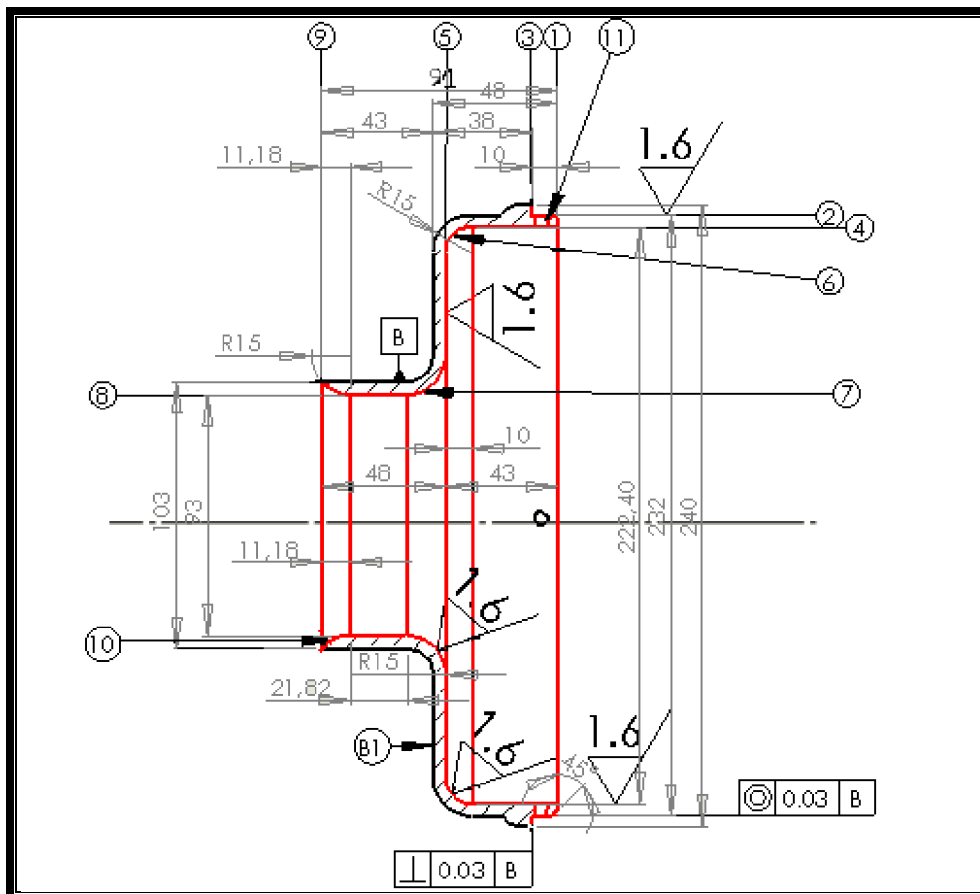
	phase	associées			
100		Contrôle du brut	contrôle	Pie coulisse	Atelier de contrôle
200	A	5	perçage	Foré Ø 6.4	Tournage
300	A	1	chariotage	Outil de chariotage	Tournage
	B	1, 12, 16	Forme	Outil de forme R5	
400	A	4, 4'	Surfaçage	Fraise mair complexe	Frisage
500		3	tronçonnage	Outil de tronçonnage	tournage
600		6	Taraudage	Taraud M8	Filetage a main
700		Contrôle de la pièce	Contrôle	PC, Tampon	Atelier de control

**Tab. III.8 :** Les Etapes D'usinage De Conne.

## 6. Le Cache Diffuseur :



**Fig. III.20 :** Le Dessin De Cache Diffuseur En 3D.



**Fig.III.21 :** les surfaces usinent de cache diffuseur.

Ø Nombre de pièce 1 (unitaire).

- Ø Matière : alpax Al-Si 15.
- Ø Sur épaisseur 3mm.
- Ø Obtention du brute (moulage au sable).
- Ø Parc machine (machine pour petites série).

Phase	Sou phase	Les surfaces associées	Opération	Outils	machine
100		Contrôle du brut	contrôle	Pie coulisse	Atelier de contrôle
200	A	1	Dressage	Outil de dressage 45°	Tournage
	B	2,3	chariotage	Outil de chariotage 90°	
	C	4, 6, 5	Alésage	Outil d'alésage plaquette ronde R 15	
	D	8	Alésage	Outil d'alésage	
	E	7	Forme	Outil de forme R 15	
300	A	9	dressage	Outil de dressage 45°	Tournage
	B	10	Forme	Outil de forme R 15	
400		11	Perçage	Fore Ø 3.2mm	perçage
400		Contrôle de la pièce	Contrôle	PC, Tampon	Atelier de control

**Tab. III.9 :** Les Etapes D'usinage De Cache Diffuseur.

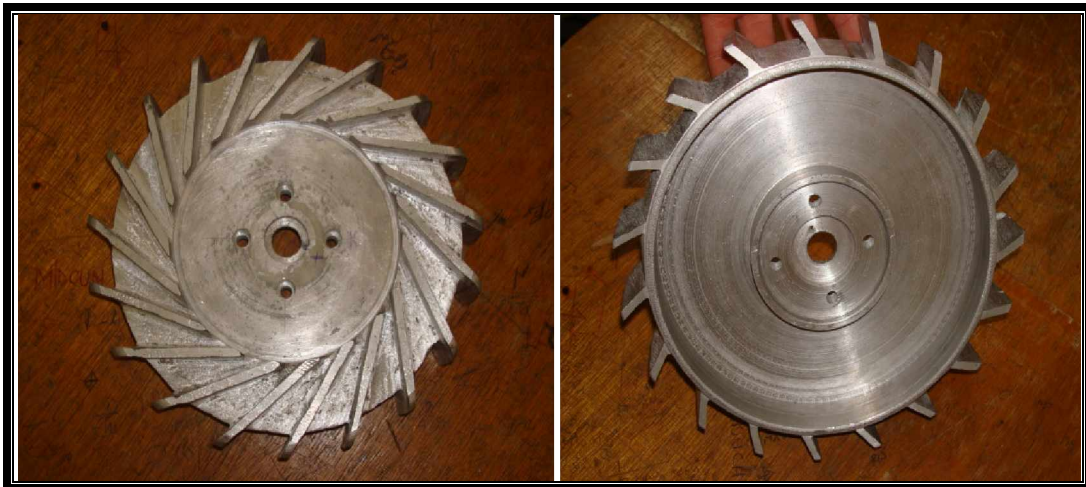
#### IV. Introduction :

Dans ce chapitre nous avons présenté les différentes étapes l'ors de la réalisation des pièces motrices d'un micro turboréacteur à savoir :

- Ø **Le diffuseur** : réalisé en utilisant le procédé de la fonderie et le tournage.
- Ø **Le cache** : en utilisant les mêmes procédés (fonderie et tournage).
- Ø **L'arbre** : en utilisant le tournage.
- Ø **Cache arbre** : en utilisant le tournage.
- Ø **Le cône** : en utilisant le tournage.

#### IV.1 Réalisation de diffuseur :

Étant donné la complexité de la forme de diffuseur et son rôle primordiale dans un micro turboréacteur (**voir chapitre 1**), plusieurs étapes sont nécessaires pour sa mise au point.



**Fig. IV.1** : Le Diffuseur (Pièce Finie).

### IV.1.1. Mouilage :

#### 1. Le Dessin Technique :

Avant d'entamer tous travaux pratiques il est important de réaliser un dessin technique détaillé des pièces à réaliser afin de se faire une idée claire des difficultés et des dimensions à prendre en compte lors de la réalisation.

Pour réaliser le schéma de diffuseur nous nous sommes inspirés d'un diffuseur déjà réalisé au cours d'un projet récemment étudié (voir figure IV-2) et qui a présenté certains problèmes lors de sa mise en pratique, en proposant des modifications (afin d'éviter ces problèmes et obtenir un diffuseur fiable) :

- Ø nouvelles aubages, changement de l'angle de vrillage des aubes.
- Ø Création de l'emplacement d'un joint spi.
- Ø Changement de remplacement des roulements (se reporter au chapitre 3).



**Fig. IV.2 :** L'ancien Diffuseur.



## **2. Confection du modèle :**

Selon la technologie de modelage expliqué dans le **chapitre 3** et en utilisant le bois comme matière première nous avons procédé au modelage de modèle présenter dans la figure ci-dessous.



**Fig. IV.3 :** Le Modèle.

## **3. Confection Boite Noyau :**

Le but essentiel de cette opération est d'obtenir les formes extérieures de notre diffuseur.

Pour ce la il est important de la concevoir d'une façon a se que lors de démoulage le noyau garde l'empreinte. Il est important que la boite noyau soit conçue d'un assemblage d'éléments de simple géométrie assemblés d'une façon simplement démontable et qui donne la forme de diffuseur.



**Fig. VI.4 :** La boîte noyau.

Chaque élément est réalisé par les matières premières suivantes :

Matière	Rôle
<b>Boit</b>	Réaliser les pièces de grands démentions
<b>Bakélite</b>	Réaliser les pièces de petites démentions
<b>Epylox</b>	Collage des pièces
<b>Mastique</b>	raffinement des surfaces des pièces
<b>Goujons</b>	Indexage des parties des pièces

**Tab. IV.1 :** Les Matières Première.

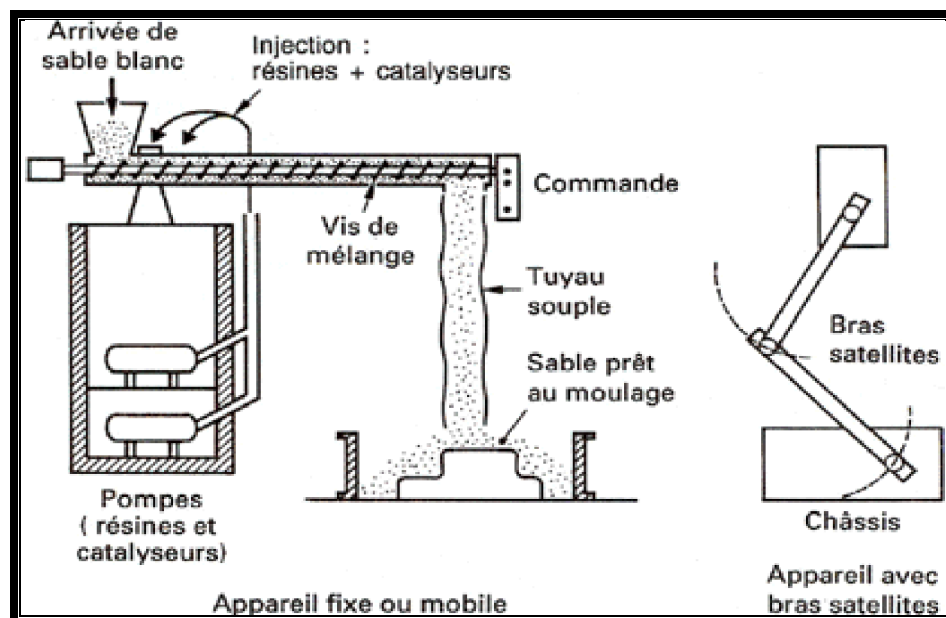
## VI.1.2 La coulée des pièces :

### 1. noyautage :

Avant de procéder à la coulée, la préparation et le choix du sable est une étape importante.

Les sables peuvent être préparés en malaxeurs discontinus, mais plus généralement (comme dans notre cas) ils sont des mélanges continus, à vis, l'injection des résines et catalyseurs se faisant par des pompes doseuses.

Ces appareils peuvent comporter un ou plusieurs bras satellites en fonction de la surface des zones de moulage à desservir.



**Fig. IV.4** : Schéma D'un Mélangeur Continu.

L'image ci-dessous représente le noyau.



**Fig. IV.5 :** Noyau.

Après enduirage et séchage (dans une chambre chaude) on obtient le noyau final.



**Fig. VI.6 :** noyau après l'enduirage et séchage.

## 2. le moulage à main :

Ce mode de moulage est le plus convenable pour notre projet vu que ce n'est pas une production en série et que nos pièces comportes des petites dimensions pour la réalisation de notre fabrications nous avons suivis les étapes suivantes :

- Ø poser le moule a l'intérieur de demi-châssis inferieure.



**Fig. IV.7 :** Le moule a l'intérieur de demi-châssis inferieure.

- Ø Moulage de la demi-partie inferieure.



**Fig. IV.8 :** Moulage de la demi-partie inferieure.

- Ø Talcage du plan de joint pour éviter le collage.
- Ø Indexage du châssis supérieur sur le châssis inférieur.



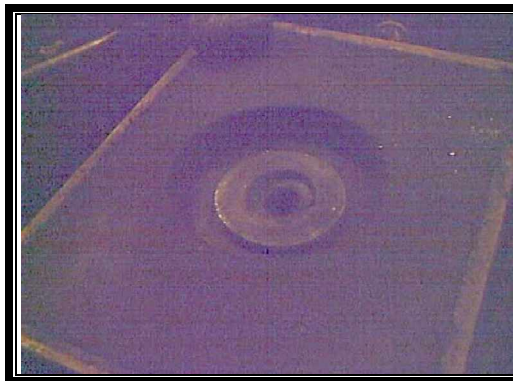
**Fig. IV.9 :** Talcage et indexage du châssis.

- Ø Moulage de demi-partie supérieure.



**Fig. IV.10 :** moulage de demi-partie supérieur.

- Ø Ouverture du moule pour extraire le modèle.
- Ø Remoulage du noyau dans la partie inférieur.



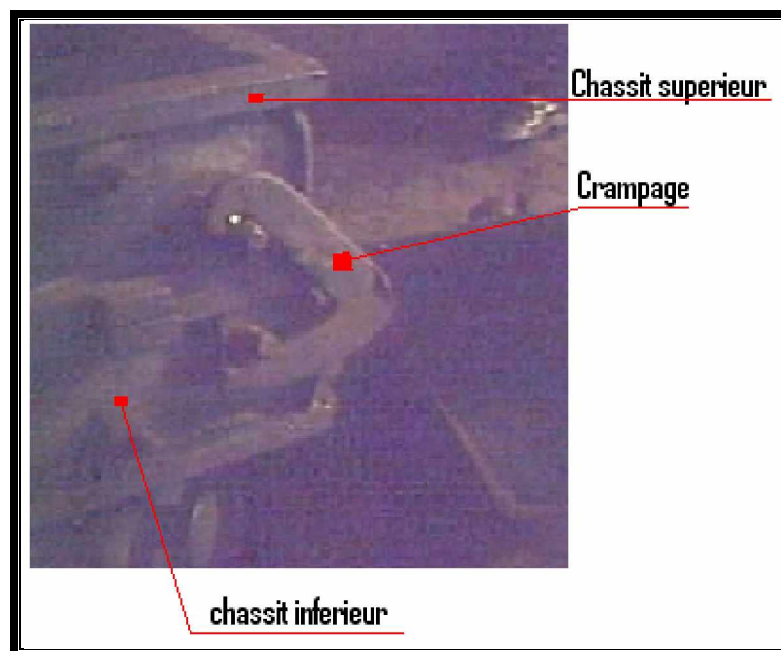
**Fig. IV.11 :** ouverture du moule.

- Ø Finition du moule : descente de coulé, trous de tirage d'air, enduirage de l'empreinte, soufflage pneumatique pour éliminer toute trace de sable.



**Fig. IV.12** : enduirage de l'empreinte.

- Ø Fermeture du moule par le système d'indexage (goujons).
- Ø Crampage des châssis supérieur et inférieur.



**Fig. IV.13** : Crampage des châssis.

### 3. la coulée :

1. en utilisant un alliage d'aluminium (**Alpax Al-Si 15**), fusionné dans le four a une température de **785° C**, on procède a la coulée.



Lingots de matière première



Creusé



Fourre



La couler

**Fig. IV.14** : La fusion.



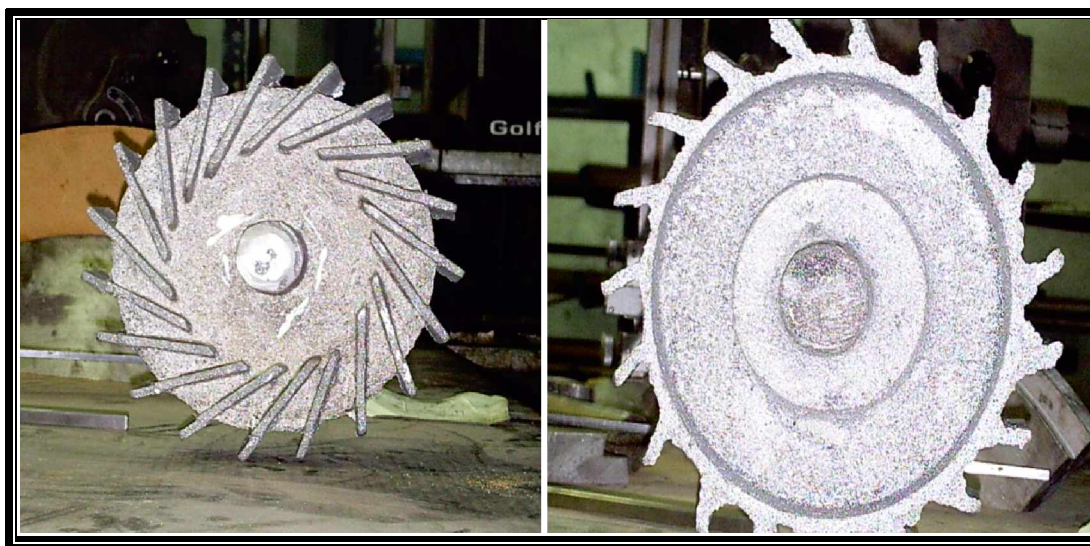
#### 4. Décochage : enlèvement du sable résident.



**Fig. IV.15 :** Décochage

#### 5. Barbage :

Enlèvement du métal de la descente du coulé. Le résultat obtenu après la fonderie est représenté dans l'image ci-dessous :



**Fig. IV.16 :** La pièce brute

## IV.2 réalisation du cache du diffuseur (entrée d'air) :

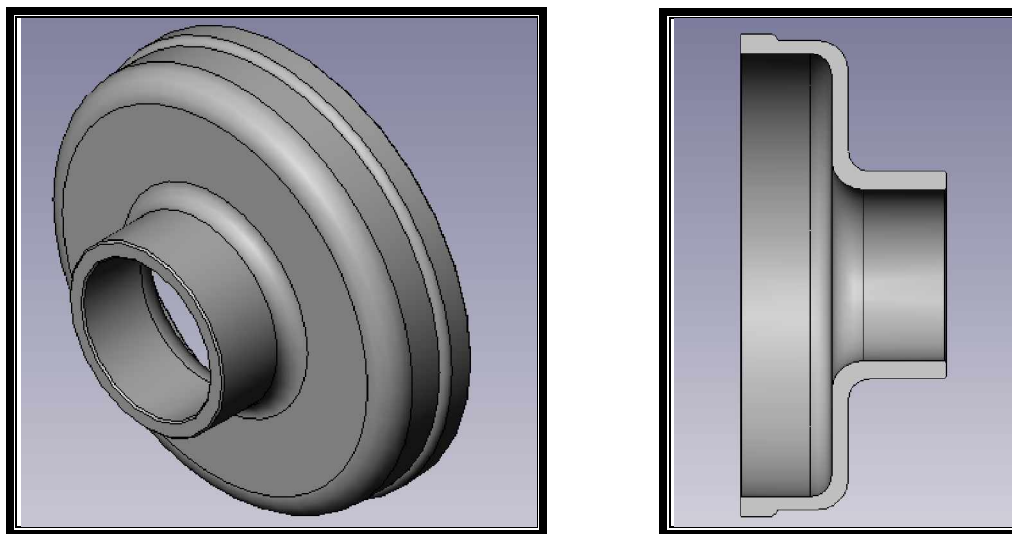
Le cache de diffuseur devant être principalement réalisé en suivant le même procédé de fonderie ; en réalisant toutes les différentes étapes suivis pour la mise au point du diffuseur.

Étant donnée qu'un bloc l'alliage d'aluminium (**ALPAX « AL-SI 15 »**) été en notre possession, nous avons opté pour le procédé de tournage puisque celui-ci nous offre d'obtenir le même résultat et les mêmes dimensions en moins de temps et de couts.

Il est important de signaler que ce choix a été fait après une mure réflexion, et les causes principale de ce choix sont les suivant :

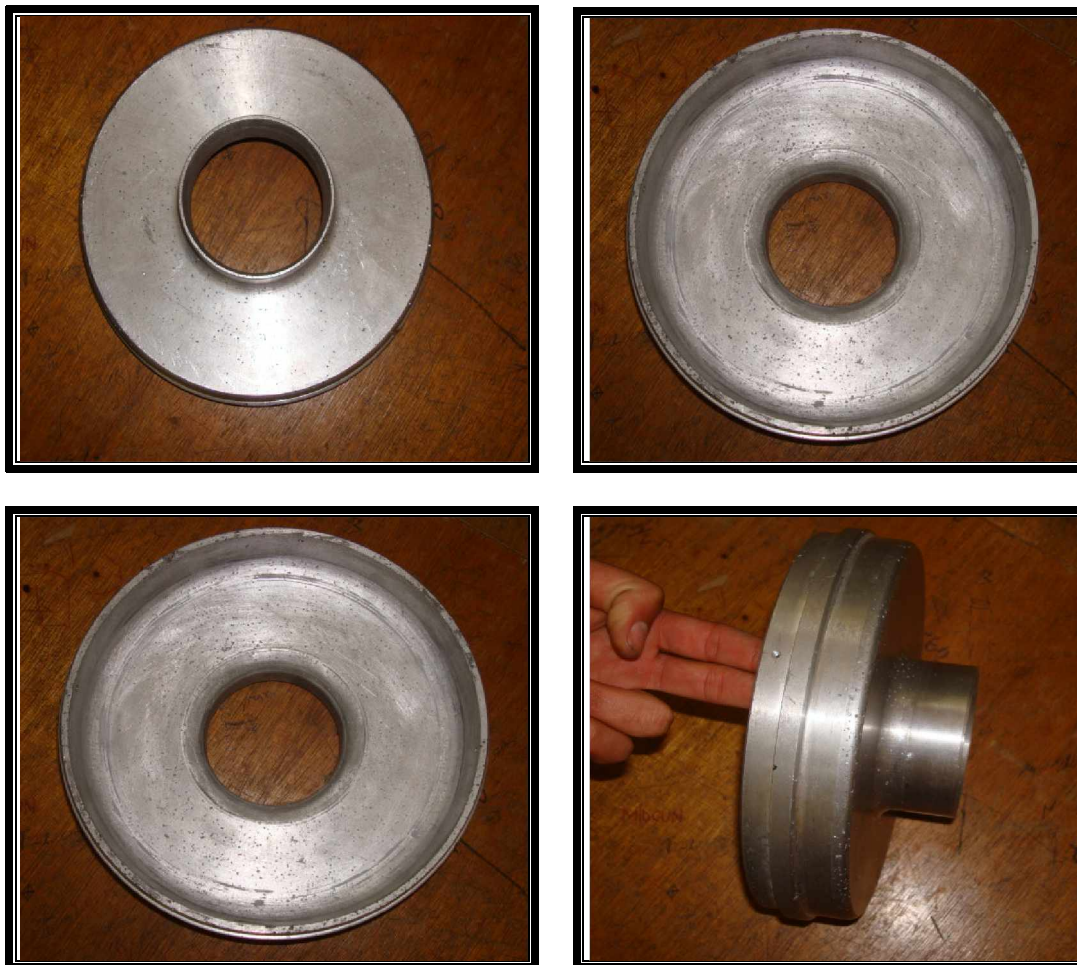
- Ø la pièce à usiner est unique, ce qui nous permet de ne pas tenir compte de la quantité de la matière perdue.
- Ø un gain de temps important, par rapport au procédé de fonderie.
- Ø le résultat est le même pour des couts moindres.

En se basant sur les dimensions d'usinage citées dans le chapitre III ; nous avons réalisé une représentation en trois dimensions de la pièce a réalisé :



**Fig. IV.17** : représentation 3D du cache diffuseur sous « **solidworks** ».

La figure ci-dessous représente la pièce finale après tournage du bloc d'aluminium (se rapporter au chapitre III pour les détails d'usinage).



**Fig. VI.18** : Le cache diffuseur.

### IV.3 réalisation du l'arbre moteur :

En prenant en compte des différentes dimensions et étapes d'usinage présentées dans le chapitre III, on réalise l'arbre moteur représenté dans la figure ci-dessous, à partir d'un bloc en aluminium.

Le bout de l'arbre est soigneusement fileté à l'aide d'une filière afin de recevoir de cône du moteur.

Les modifications que nous avons apportées à l'arbre moteur sont les suivantes :

- Ø modification du diamètre (voir chapitre III).
- Ø modification des emplacements destinés à recevoir les roulements.
- Ø usinage de l'arbre afin qu'il puisse recevoir deux étages de turbine à la place d'une seul.



**Fig. IV.19** : L'arbre moteur.

#### IV.4 réalisation du cache arbre :

Le cache arbre est la pièce maitresse qui joue le rôle du support et assure la co-axialité des autres organes du moteur; ce qui nous a incité à le modifier de façon à recevoir les roulements moteur ; il permet aussi de couvrir l'arbre moteur afin de permettre la lubrification des roulements.

Nous avons réalisé ce cache à partir d'un bloc d'acier X30, et en se basant sur les dimensions présentés dans le chapitre III, et par le procédé de tournage.



**Fig. IV.20** : Le cache arbre.

#### IV.5 le cône moteur :

Le cône moteur a pour principale but de diriger les filets d'air afin d'assurer une meilleur alimentation en air au compresseur, dans notre cas en plus il permet la fixation de roue (le rotor) avec l'arbre moteur par serrage. Les détails de la réalisation du cône sont présentés au **chapitre III**.



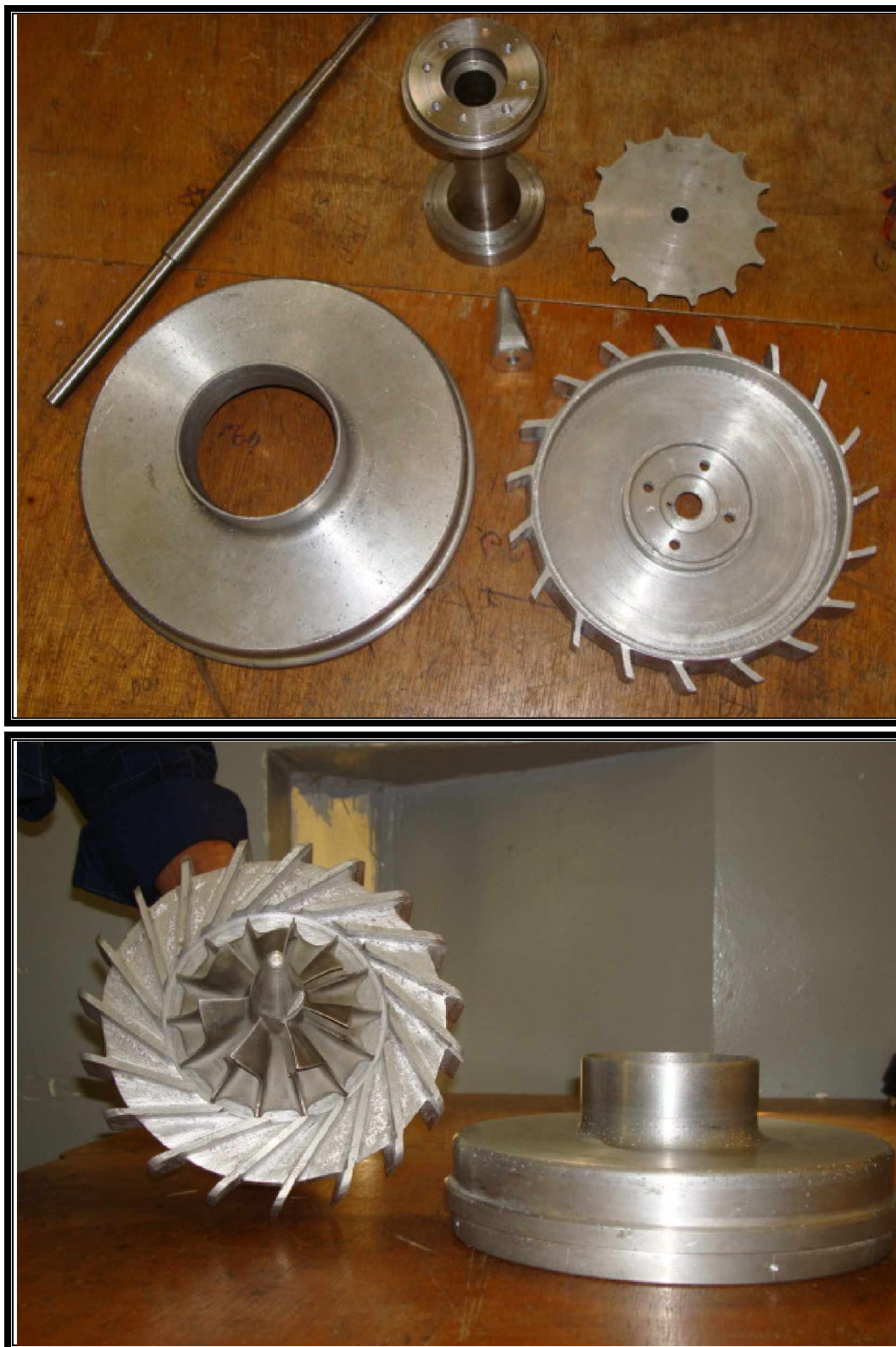
**Fig. IV.21** : Le cône moteur.

#### IV.6 la roue :

Cette roue a été utilisée dans la réalisation de notre micro turboréacteur, vue la complexité de sa forme géométrique et la forme spécifique de son aubage il nous a été difficile de la construire, car son usinage nécessite un moule a coquille et un moulage par injection ce qui n'est pas a notre porté.



**Fig. IV.22**: La roue (rotor).

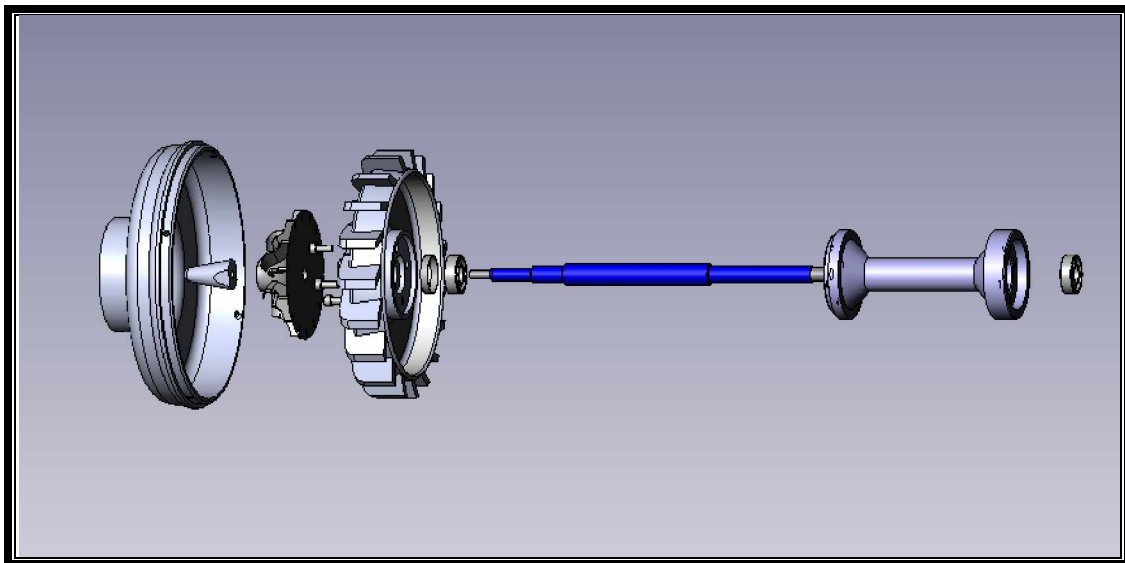


**Fig. IV.23:** Vue d'ensemble des pièces réalisées.

#### IV.7 le montage :

Pour procéder au montage des différentes pièces réalisées, on suit les étapes suivantes :

- Ø tout d'abord on monte le roulement avant sur l'arbre moteur à l'aide d'une presse. (montage de roulement en **X**).
- Ø on procède au montage du cache arbre sur les deux éléments déjà assemblés.
- Ø en suite, et a l'aide d'une presse on fait monter le roulement arrière sur l'ensemble.
- Ø on dépose une cale sur le roulement qui va recevoir de diffuseur afin de s'assurer du serrage du montage en **X**.
- Ø on procède à la fixation du diffuseur sur le cache arbre par écrou CHC (**M6x15**).
- Ø on insère la roue dans l'arbre.
- Ø on procède au montage du cône sur l'arbre qui permet le renforcement de la fixation de la roue sur l'arbre (par filetage).
- Ø finalement on place le cache diffuseur qui sera fixé sur le reste d'élément du moteur.



**Fig. IV.24 :** Le Montage avec « SolidWorks » en 3D.



Après le montage des différentes pièces on obtient l'assemblage représenté sur la figure ci-dessous :



**Fig. IV.25:** L'assemblage des différents éléments réalisés.

## **Conclusion :**

A l'issue de ce modeste travail qui fait partie d'un projet de réalisation d'un micro turboréacteur, nous nous sommes concentrés sur l'étude technologique et la réalisation d'un ensemble d'éléments de ce micro réacteur, à savoir ; l'arbre moteur, le cache arbre, le diffuseur, le cache diffuseur et le cône moteur.

Cette étude technologique avait pour but un choix judicieux des matériaux et le choix des roulements a utilisé pour assurer un fonctionnement sûr lors de la mise la pratique de notre micro turboréacteur.

Le logiciel « SolidWorks » de dessin industriel qu'il a fallu maîtriser nous a été d'une grande aide afin de procéder au dimensionnement et la concrétisation en trois dimensions des pièces a réalisées.

En suite nous nous somme familiarisez avec les procédés d'usinages qui nous ont permet cette réalisation : la fonderie et Le tournage.

Finalement nous espérons que ce travail apportera un plus au futur études du département aéronautique de Blida et qu'il sera une référence pour eux.

## BIBLIOGRAPHIE

Les livres :

[1]- R Varisellez

- Elément de conception et de réalisation
- Edition 1987. Département D'Aéronautique.

[2]- André Chevalier

- Chevalier (Guide de dessinateur industriel)
- Edition 2004. Département D'Aéronautique.

Les thèses :

[1] – mise en plans de réalisation d'un micro-turboréacteur « Sahel Sofiane / Rouag Sofiane » 2004/2005. Département D'Aéronautique.

Les sites :

[www.Technique de l'ingénieur.com](http://www.Technique de l'ingénieur.com)

[www.wedoo.com](http://www.wedoo.com)

[www.duyp.net](http://www.duyp.net)

[www.aviation.fr](http://www.aviation.fr)

Les Logicielle :

SolidWorks 2007 SP0.0