

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

UNIVERSITE « SAAD DAHLAB » BLIDA

Faculté des Sciences de l'Ingénieur

Département de l'Aéronautique.

NIVEAU : 5^{ème} année ingénieur

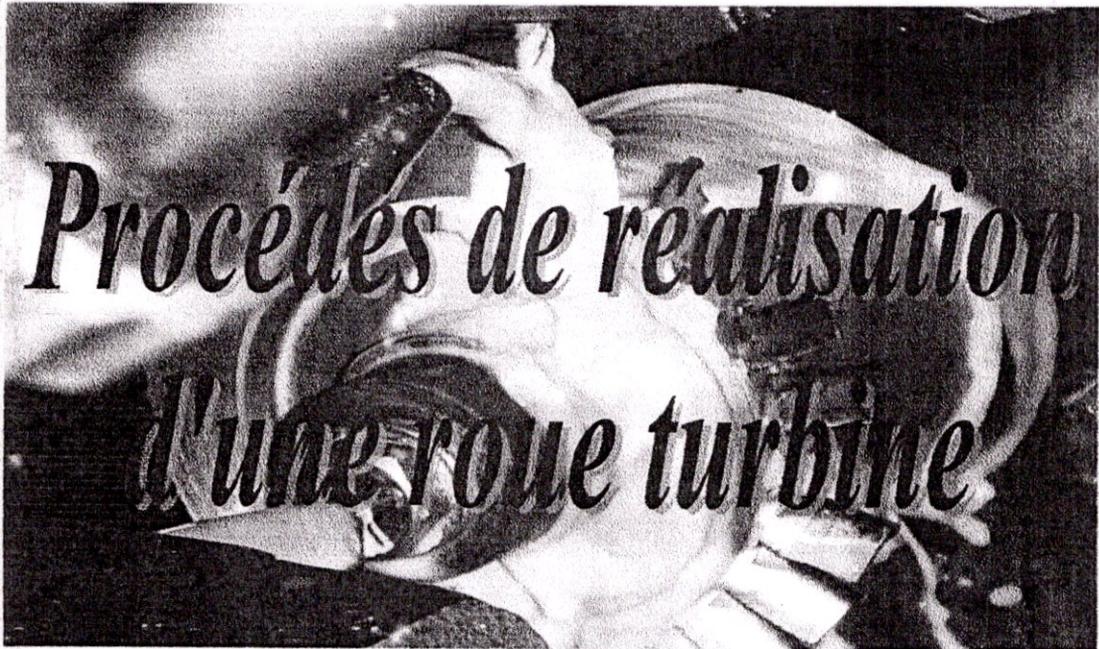
OPTION : Propulsion.

093/06



Projet de fin d'étude en vue
de l'obtention du Diplôme d'Ingénieur d'Etat

Thème:



Réalisé par :

M^{elle} MANSOURI ASMA

M^{elle} REMILI WAHIBA

Encadré par :

M^R BENTRAD HOCINE

Promotion : 2005 / 2006

Résumé :

Ce travail présente deux procédures de réalisation d'une roue turbine d'un micro turboréacteur de 100N de poussée.

En effet la première illustre l'élaboration d'un model de roue par usinage sur fraise numérique servira d'une empreint pour élaborer la boite à noyau pour le model de moulage en cire perdue.

Abstract :

This work presents two procedures of realization of a wheel harnesses of a micro turbojet of 100N of push. Indeed the first illustrates the development of a model of wheel by machining on numerical strawberry will serve as one impresses to work out limps it with core for the model of lost wax moulding.

المخلص

هذا العمل يقدم تقنيتين بغرض انجاز عجلة ت ريبين لمحرك مصغر بقوة دفع تبلغ 100 .
اول تقنية تتمثل في ريبين عن طريق الشطف و هاته العجلة تستخدم كقالب في التقنية الثانية المتمثلة في عملية القولبة عن طريق الشمع الضائع

Dédicaces

Je dédie ce travail à mon très cher Père et ma très chère Mère qui m'ont aidé et assisté moralement et financièrement, et qui m'ont encouragé durant toute ma scolarité.

A mes frères et mes sœurs et à toute ma famille de près ou de loin.

A mon binôme MANSOURI ASMA.

A tous mes amis fidèles.

WAHIBA . R

Remerciement

Tout d'abord, nous tenons à exprimer notre profonde gratitude en vers Dieu le tout puissant de nous avoir guidé dans la réalisation de ce travail.

Nous remercions très respectueusement tous les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner et de juger ce travail :

- **M^r BENTRAD HOUCINE** notre promoteur pour avoir attentivement dirigé ce mémoire et pour son aide et ses précieux conseils.
- **M^r HAMOUDA BEN SADOUK**, le chef d'atelier au sein du quel nous avons usiné la pièce par fraisage dans des meilleurs conditions.
- **M^r HALIM**, qui nous a beaucoup aidé.
- **M^r DEGOUA MOUSTAPHA**, qui nous a aidé à contacter la SNVI – Division modelage- pour réaliser le moule.
- **M^r MOUHAMED**, qui nous a dirigé lors de l'usinage de la roue par moulage.

Nous remercions très vivement tous nos anciens professeurs et tous le personnel de la SNVI et de l'atelier BEN SADOUK, qui nous ont aidé durant notre stage.

Enfin, nous remercions bien sincèrement toutes personnes qui nous a apporté aide et assistance durant notre cycle universitaire et particulièrement la phase de préparation de notre mémoire.

Sommaire

Remerciements	Page:
Dédicaces.	
Sommaire	
Liste des figures	
Résumé	
Introduction générale.	
<u>Chapitre I: Généralités sur les turboréacteurs.</u>	
1-/ principe de la propulsion.....	-1-
1-1/ La propulsion aérienne.....	-1-
2-/Les turboréacteurs.....	-3-
2-1-/Turboréacteur simple	-3-
2-1-1/ - Principaux organes.....	-3-
2-1-2/ Fonctionnement d'un turboréacteur simple flux:.....	-5-
2-2/ Turboréacteur à double flux ou turbofan:.....	-6-
2.2-1/ Principaux organes :.....	-7-
2-2-2/ Fonctionnement d'un turboréacteur double flux:.....	-8-
2-3-/Turbopropulseur:.....	-11-
2-3-1 Constitution d'un turbopropulseur:.....	-11-
2-3-2-/Fonctionnement de turbopropulseur:.....	-12-
3-/Description d'une turbine :.....	-13-
3-1/Rôle :.....	-13-
3-2/ compositions :.....	-13-
3-3/Type de turbine:.....	-15-
3-4/Variation des paramètres du gaz dans les éléments de l'étage turbine:.....	-17-
3-5/Fonctionnement:.....	-18-
3-6/Contraintes supportées par la turbine :.....	-19-
3-7/ Matériaux utilisés :.....	-20-
<u>Chapitre II: Les méthodes d'usinage.</u>	
1/ Introduction :	-21-

2/ Technique de fabrication par enlèvement de matière :.....	-21-
2.1/ fraissage :	-22-
2.1.1/ mode de fraissage :	-23-
2.1.2/ mode d'action de la fraise :	-23-
2.1.3/ vitesse de coupe :	-24-
2.1.4/ vitesse de coupe en fonction des matériaux :	-24-
2.1.5/ mouvement de coupe circulaire :	-25-
2.2/ tournage mécanique :	-25-
2.2.1/ principe du tournage.....	-26-
2.3/ usinage par electro-erosion :	-27-
2.3.1/ principe de l'electro- erosion.....	-28-
2.3.2/ l'étincelage :	-31-
2.3.3/ avantages de l'étincelage.....	-32-
2.3.4/ les inconvénients de l'étincelage.....	-33-
3/ technique de fabrication sans enlèvement de matière :	-33-
3.1/ technique de moulage :	-33-
3.2/ moules non permanents :	-34-
3.2.1/ moulage sable:	-35-
3.2.2/ moulage en cire perdue :	-35-
3.2.3/ moulage lost foam:	-36-
3.3/ méthode de la cire perdue :	-36-
3.4/ exemple des pièces faites par moulage en cire perdu :	-38-
3.5/ cas d'utilisation de chaque type :	-39-
<u>Chapitre III: L usinage de la roue par fraissage.</u>	
1-/Introduction.....	-41-
2-/présentation des résultats de l'étude	-41-
3/géométrie de la roue turbine	-45-
3-1/construction de la géométrie de l'aube	-45-
4-/ transfert de la géométrie sur machine :.....	-45-
5) exécution sur machine :.....	-47-
5-1/ tournage	-47-
5-1-1/dressage de face :	-48-

5-1-2-/chariotage et dressage.....	-49-
5-1-3-/perçage :	-50-
5-2/ le fraisage :	-51-
5-2-1-/ Les démarches suivies dans le fraisage :	-51-
5-2-2-/Les photos illustrant toutes les démarches de fraisage :	-54-

Chapitre IV: Moulage d'une roue turbine par la méthode de la cire

perdue

1-/Introduction.....	-57-
2-/ Les étapes de moulage.....	-57-
2-1/ Préparation du premier moule.	-57-
2-2 / Préparation du deuxième moule.	-63-
3-/ Conclusion.	-64-
Conclusion générale.	
Bibliographie.	

Liste des figure

	<u>Page</u> :
<i>Figure (1-1) Coupe annotée d'un turboréacteur.....</i>	-3-
<i>Figure (1-2) Compresseur centrifuge.....</i>	-4-
<i>Figure (1-3) Compresseur axial.....</i>	-4-
<i>Figure (1-4) schéma de fonctionnement d'un turboréacteur</i>	-6-
<i>Figure (1-5) Turboréacteur double flux.....</i>	-7-
<i>Figure (1-6) Coupe d'un turboréacteur à double flux.....</i>	-7-
<i>Figure (1-7) Soufflante de CFM 56.....</i>	-8-
<i>Figure (1-8) Aspiration et compression de l'air</i>	-8-
<i>Figure (1-9) Combustion de mélange air/carburant.....</i>	-9-
<i>Figure (1-10) Poussée vers l'avant exercée par les gaz de sortie.....</i>	-9-
<i>Figure (1-11) Les gaz de sortie font tourner la turbine</i>	-10-
<i>Figure (1-12) La turbine entraîne le compresseur.....</i>	-10-
<i>Figure (1-13) Turbopropulseur.....</i>	-11-
<i>Figure (1-14) Coupe d'un turbopropulseur et son hélice.....</i>	-12-
<i>Figure (1-15) les différentes composantes d'un turbopropulseur.....</i>	-12-
<i>Figure (1-16) Aubage distributeur de la turbine.....</i>	-14-
<i>Figure (1-17) Roue à aubes de la turbine.....</i>	-15-
<i>Figure (1-18) Rotor de la turbine.....</i>	-15-
<i>Figure (1-19) Schéma de la turbine centrifuge radiale.....</i>	-16-
<i>Figure (1-20) Schéma de la turbine centripète radiale.....</i>	-16-
<i>Figure (1-21) Le graphique de variation des paramètres du gaz dans les éléments de l'étage.....</i>	-17-
<i>Figure (1-22) La répartition de la pression sur le contour de l'aube.....</i>	-18-
<i>Figure (2-1) : Fraiseuse à commande numérique.....</i>	-22-
<i>Figure (2.2) : Commande numérique de la fraiseuse.....</i>	-23-
<i>Figure (2.3) : le tour mécanique.....</i>	-25-
<i>Figure (2.4) : Tournage à commande numérique.....</i>	-26-
<i>Figure (2.5) : dressage d'une pièce.....</i>	-27-
<i>Figure (2.6) : chariotage d'une pièce.....</i>	-27-

<i>Figure (2.7) : machine d'électroérosion.....</i>	<i>-27-</i>
<i>Figure (2.8) : le chemin d'un usinage par électro-érosion.....</i>	<i>-28-</i>
<i>Figure (2.9) : les principaux éléments de l'usinage par électroérosion.....</i>	<i>-29-</i>
<i>Figure (2.10) : un modèle d'électrode.....</i>	<i>-30-</i>
<i>Figure (2.11) : le processus d'usinage par étincelage.....</i>	<i>-32-</i>
<i>Figure (2.12) : moule en sable.....</i>	<i>-35-</i>
<i>Figure (2.13) : pièces faites en moulage en cire perdu avec différents métaux.....</i>	<i>-39-</i>
<i>Figure (3-1) dimension de la roue.....</i>	<i>-43-</i>
<i>Figure(3-2) le profil de l'aube.....</i>	<i>-45-</i>
<i>Figure(3-3) Tour conventionnel</i>	<i>-47-</i>
<i>Figure(3-4) montage de la pièce brute dans le tour.....</i>	<i>-48-</i>
<i>Figure (3-5) L'opération de dressage des faces.....</i>	<i>-48-</i>
<i>Figure (3-6) Le dressage des faces est fini.....</i>	<i>-49-</i>
<i>Figure (3-7) chariotage de diamètre 56mm.....</i>	<i>-49-</i>
<i>Figure (3-8) la finition de dressage et de chariotage</i>	<i>-50-</i>
<i>Figure (3-9) la roue percée et finie.....</i>	<i>-50-</i>
<i>Figure (3-10) la fraiseuse à commande numérique « HEIDEN HAIN ».....</i>	<i>-51-</i>
<i>Figure (3-11) le dispositif de fixation.....</i>	<i>-51-</i>
<i>Figure (3-12) le centrage de la pièce.....</i>	<i>-51-</i>
<i>Figure (3-13) L'ordinateur de HEIDEN HAIN.....</i>	<i>-52-</i>
<i>Figure (3-14) l'écran de l'ordinateur.....</i>	<i>-52-</i>
<i>Figure (3-15) injection de la valeur x.....</i>	<i>-52-</i>
<i>Figure (3-16) injection de la valeur y.....</i>	<i>-52-</i>
<i>Figure (3-17) le profil de l'aube dans l'écran de la machine.....</i>	<i>-53-</i>
<i>Figure (3-18) commencement de traçage des empreintes sur la roue.....</i>	<i>-54-</i>
<i>Figure (3-19) la fin du traçage des 24 empreintes sur la roue.....</i>	<i>-54-</i>
<i>Figure (3-20) commencement d'usinage de la première aube.....</i>	<i>-54-</i>
<i>Figure (3-21) l'usinage de la première aube est fini.....</i>	<i>-55-</i>
<i>Figure (3-22) l'usinage de la huitième aube.....</i>	<i>-55-</i>
<i>Figure (3-23) l'usinage de la dix-neuvième aube.....</i>	<i>-55-</i>

<i>figure (3-24) l'usinage de la vingtième aube</i>	<i>-56-</i>
<i>Figure (3-25) l'opération de l'usinage des aubes est finie.....</i>	<i>-56-</i>
<i>Figure (3-26) les deux vues de la pièce.....</i>	<i>-56-</i>
<i>Figure (4-1) : la première empreinte sur l'élastomère.....</i>	<i>-57-</i>
<i>Figure (4-2) : le caisson.....</i>	<i>-58-</i>
<i>Figure (4-3) : deuxième partie du moule en relief.....</i>	<i>-58-</i>
<i>Figure (4-4) : l'ajout de la pâte à modelé.....</i>	<i>-59-</i>
<i>Figure (4-5) assemblage entonnoir caisson.....</i>	<i>-59-</i>
<i>Figure (4-6) : mise de la couche de contact (résine blanche).....</i>	<i>-60-</i>
<i>Figure (4-7) : mise de la résine grise.....</i>	<i>-60-</i>
<i>Figure (4-8) : le master.....</i>	<i>-61-</i>
<i>Figure (4-9) : la mise de la couche de contact.....</i>	<i>-61-</i>
<i>Figure (4-10) : la mise de la résine grise.....</i>	<i>-62-</i>
<i>Figure (4-11) : enlèvement du caisson.....</i>	<i>-62-</i>
<i>Figure (4-12) : séparation des deux moules.....</i>	<i>-62-</i>
<i>Figure (4-13) : les deux parties du moule.....</i>	<i>-62-</i>

Liste des tableaux

<i>Tableau (3-1) propriété thermodynamique de la roue.....</i>	<i>41</i>
<i>Tableau: (3-2) propriété de l'élément.....</i>	<i>41</i>
<i>Tableau (3-3) propriété géométrique de la roue.....</i>	<i>42</i>
<i>Tableau (3-4) les paramètres du rotor.....</i>	42
<i>Tableau (3-5) l'angle de géométrie χ.....</i>	<i>42</i>
<i>Tableau (3-6) : Dimension de la roue.....</i>	43
<i>Tableau (3-7) : les coordonnées des segments.....</i>	47

Bibliographie

Site web :

www.onera.fr

www.avionslegendaires.net

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

www.moulage.com

www.techniquedemoulage.com

www.fonderie.com

www.fonderiedeprecision.com

les thèses :

- Mémoire : «réalisation et dimensionnement d'un micro-turboreacteur » (Promotion 2003).

Les livres :

Technique de l'ingénieur tom1 ; usinage par fraisage volume BM7082

usinage par tournage BM 7086

Machine à commande numérique ; usinage spécialisé

Introduction :

La turbine est un organe de turbomachine permettant de récupérer de l'énergie mécanique à fin d'actionner un compresseur.

En effet elle est composée d'une grille d'aubes fixe « stator » et d'une grille mobile « rotor ». Les aubes de la turbine sont des profils aérodynamiques garantissant un canal convergent ou le fluide sera détendu.

En réalité la roue turbine est un sujet d'efforts combinés de contraintes thermiques et mécaniques, c'est pourquoi elle doit être conçue de manière à fonctionner dans les conditions de travail et garantir une durée de vie optimale.

Dans ce mémoire nous avons présenté deux procédés d'élaboration d'une roue de turbine d'un micro turboréacteur de 100N de poussée. En effet le premier procédé de réalisation est par usinage et le second par moulage en cire perdue qui est le plus utilisée pour ce genre de micromoteur.

Le mémoire a comporté quatre chapitres ou nous avons présenté des généralités sur le turboréacteur et la turbine dans le premier.

Tandis que dans le deuxième on a introduit les différents modes de fabrication d'une roue turbine à savoir l'usinage, l'électroérosion et le moulage.

Enfin les chapitres trois et quatre développent la réalisation de la roue par usinage sur fraise numérique et l'illustration des étapes à entreprendre pour l'élaboration de la roue de la turbine par moulage en cire perdue.

1- / PRINCIPE DE LA PROPULSION :

Tout système de propulsion repose sur l'application du principe de l'égalité de l'action et de la réaction, quel que soit le milieu dans le quel il doit fonctionner.

Suivant ce principe, toute action d'un corps sur un autre s'accompagne d'une réaction qui lui est directement opposée et égale.

Lorsqu'il s'agit d'un corps en mouvement, il faut distinguer deux cas suivant la nature de l'appui qui fournit la réaction :

- **réaction d'un appui fixe :**

Ce cas se présente dans la marche à pied ou pour la propulsion des automobiles. La réaction du sol est indispensable dans ces deux exemples comme le démontre l'impossibilité de se déplacer sur un sol parfaitement verglacé.

- **réaction d'un appui mobile :**

Ce cas se rencontre lors de déplacement dans l'eau ou l'air et plus généralement lorsqu'un corps en mouvement envoie de la matière vers l'arrière, prenant en quelque sorte appui sur cette matière.

1-1/ LA PROPULSION AERIENNE :

Contrairement à ce que peut laisser croire la dénomination courante de propulsion par réaction, tout système propulsif d'engin aérien fait appel à la réaction sur appui mobile (air ambiant et gaz éjecté, ou seulement gaz éjectés à très grande altitude), qu'il s'agisse de l'hélice, du turboréacteur ou de la fusée.

Si l'on excepte le moteur fusée, tous les autres organes communiquent à une masse d'air prélevée à l'avant une vitesse plus ou moins grande dirigée vers l'arrière.

Dans le cas de l'hélice, quelque soit le mode d'entraînement de cette dernière (moteur à piston ou turbine à gaz), le débit d'air mis en mouvement est très important, mais l'augmentation de vitesse qu'il reçoit est limitée.

Au contraire, dans un turboréacteur, le débit d'air est plus faible, mais la vitesse du flux gazeux qui s'échappe de la tuyère est élevée.

Dés lors, si l'on désigne par \dot{m} le débit en masse de fluide intéressé et par V_0 et V_1 les vitesses avec lesquelles le système de propulsion l'absorbe (entrée) et le rejette (sortie), l'application du théorème des quantités de mouvement permet d'écrire que la poussée est égale à :

$$F = \dot{m}(V_1 - V_0) + A_1(P_1 - P_0) \quad (1-1)$$

La puissance propulsive est le produit de la poussée et de la vitesse de déplacement de l'avion qui n'est autre que V_0 , s'écrit alors :

$$\dot{w}_p = F \cdot V_0 = \dot{m} V_0 (V_1 - V_0) \quad (1-2)$$

Mais la puissance utile correspond à l'augmentation de l'énergie cinétique du fluide, c'est-à-dire à :

$$\dot{w} = \frac{1}{2} \dot{m} (V_1^2 - V_0^2) \quad (1-3)$$

On peut alors définir le rendement de propulsion du moteur qui est le rapport de la puissance propulsive à la puissance utile, soit :

$$y_p = \frac{\dot{w}_p}{\dot{w}} = \frac{2V_0}{V_0 + V_1} \quad (1-4)$$

Toutes ces formules sont théoriquement applicables à tous les modes de propulsion. Cependant, dans le cas de la propulsion à hélice, les grandeurs \dot{m} et V_1 sont difficiles à caractériser.

On peut en déduire que le rendement est d'autant plus élevé que la vitesse d'éjection du fluide est plus proche de la vitesse de vol. de plus, dans ces conditions, la formation de zones tourbillonnaires entre le jet et l'ambiance est minimisée.

C'est ainsi que la propulsion à hélice se trouve bien adaptée au vol à faible vitesse, alors que le rendement du turboréacteur croît avec cette vitesse de vol.

2-/ LES TURBOREACTEURS :

2-1-/ TURBOREACTEUR SIMPLE :

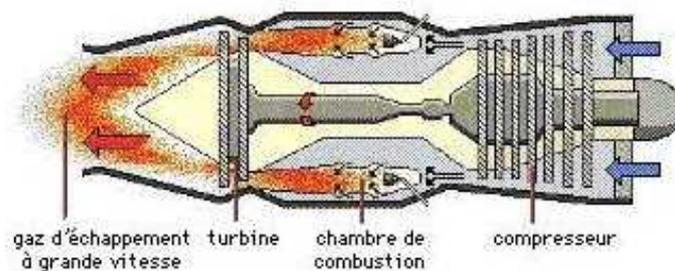


Figure (1-1) : Coupe annotée d'un turboréacteur.

2-1-1/ - Principaux organes :

a/-Entrée d'air :

L'entrée d'air convertit l'énergie cinétique de l'air en énergie de pression. Lorsque l'avion avance, l'air pénètre par ce conduit en fournissant l'air requis au compresseur. Sa conception doit en outre être parfaite au niveau aérodynamique pour :

- ne pas affecter les performances de l'avion c'est à dire éviter le phénomène de traînée.
- diriger l'air uniformément dans le compresseur, en évitant au maximum les turbulences.

b/-Compresseur :

Le compresseur fournit la quantité maximale d'air sous pression qui puisse être chauffée dans l'espace limité de la chambre à combustion. Il est composé d'un disque entouré d'ailettes formant le rotor. En tournant, les ailettes aspirent l'air.

Un stator, formé d'ailettes fixes permet de stabiliser le flux. Le compresseur devra en outre fournir une quantité d'air suffisante pour:

- refroidir les parties les plus chaudes du moteur.
- pressuriser les joints d'étanchéité.
- permettre les servitudes de l'avion comme le dégivrage ou la pressurisation.
- alimenter la chambre de combustion en comburant.

Le moteur, pour un meilleur rendement, est constitué de plusieurs compresseurs dont les ailettes, de tailles différentes, tournent à des vitesses différentes pour assurer une compression progressive du flux d'air. On distingue donc généralement:

- Un compresseur basse pression ou le rotor est de grande taille mais tourne lentement.
- Un compresseur haute pression où le rotor est de petite taille mais tourne à grande vitesse.
- Un compresseur moyenne pression ayant un rotor de taille et de vitesse intermédiaire peut, sur certain réacteur, s'intercaler entre les deux étages.

Il existe aussi deux types de compresseur :

- Compresseur centrifuge
- Compresseur axial

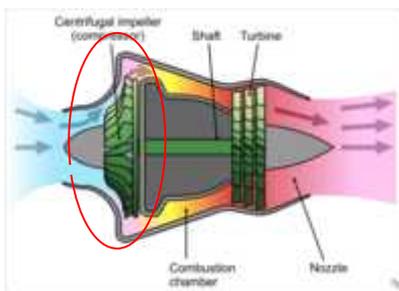


Figure (1-2) : Compresseur centrifuge.

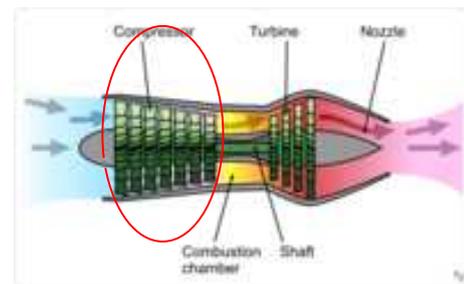


Figure (1-3) : Compresseur axial.

c-/ La chambre de combustion :

La chambre de combustion sert à transformer l'énergie chimique du carburant en énergie calorifique. Une fois que l'air est bien comprimé, il est dirigé dans la chambre de combustion. Plus il y a d'air et plus on peut y injecter du carburant en fonction de la stœchiométrie.

Le mélange air-carburant s'enflamme, la chaleur produite provoque une forte dilatation de ce mélange et donc produit une très grande poussée.

d-/ Turbine :

La turbine transforme l'énergie cinétique et thermique des gaz en énergie mécanique. La turbine est reliée au compresseur par un axe central. Lorsque la turbine tourne à cause des gaz d'échappements qui frappent ses ailettes, le compresseur tourne également afin de compresser de l'air.

Le principal rôle de la turbine est donc de faire tourner le compresseur. Il y a donc plusieurs turbines pour assurer la rotation des différents compresseurs.

e-/ Tuyère :

La tuyère convertit la pression des gaz en énergie cinétique. Il doit avoir la forme requise pour que la pression des gaz à la sortie du moteur soit la plus faible possible et qu'il soit rejeté à la vitesse la plus grande possible.

Le scientifique suisse Daniel Bernoulli a découvert au XVIII^{ème} siècle que plus un fluide se déplace rapidement, plus sa pression diminue.

Le canal d'admission et d'échappement sont fabriqués selon cette loi, donc dans la tuyère, l'espace étant plus petit, la vitesse des gaz va augmenter en faisant diminuer sa pression.

2-1-2/ Fonctionnement d'un turboréacteur simple flux:

Après l'admission de l'air dans le moteur, un ou plusieurs compresseurs, axiaux ou centrifuges, augmentent la pression de l'air, puis ce dernier pénètre dans la chambre de combustion, où il est mélangé avec le combustible vaporisé et ensuite brûlé.

L'énergie nécessaire au fonctionnement du compresseur est fournie par une turbine placée entre la chambre de combustion et la tuyère.

En sortant de la chambre de combustion, les gaz atteignent les aubes d'une ou de plusieurs turbines et sont alors ralentis. Ils sont ensuite détendus essentiellement dans la tuyère terminale, ce qui engendre une poussée propulsant l'avion.

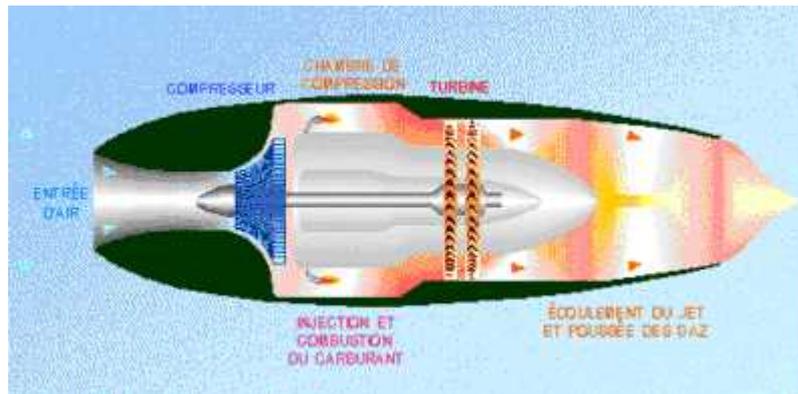


Figure (1-4) : schéma de fonctionnement d'un turboréacteur.

2-2/ TURBOREACTEUR A DOUBLE FLUX OU TURBOFAN :

Le réacteur à turbofan est une version améliorée du turboréacteur. Seule une partie de l'air qui pénètre dans le moteur est comprimée et ensuite détournée vers une enveloppe extérieure.

Cet air est ensuite mélangé avec les gaz très chauds sortant de la turbine, avant d'atteindre la tuyère. Un turbofan a une plus grande poussée pour le décollage et l'ascension, et une efficacité accrue; la dérivation refroidit le moteur et diminue son niveau sonore.

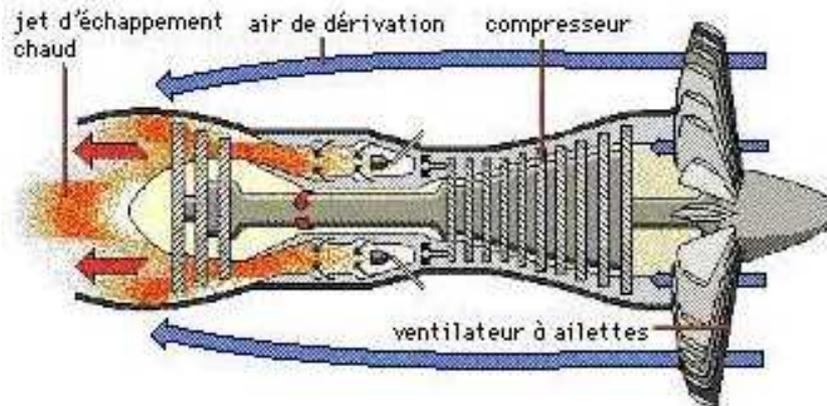


Figure (1-5) : Turboréacteur double flux.

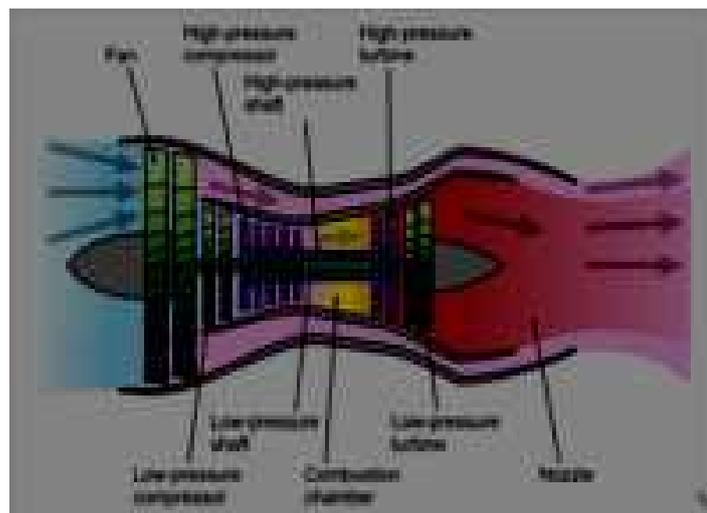


Figure (1-6) : Coupe d'un turboréacteur à double flux.

2.2-1/ Principaux organes :

a-/Le turbocompresseur (la soufflante) :

Le turboréacteur à double flux n'est qu'un turboréacteur auquel on aurait ajouté un compresseur supplémentaire de grande taille, la soufflante.



Figure (1-7) : Soufflante de CFM 56.

2-2-2/ Fonctionnement d'un turboréacteur double flux:

Etape1 :

La soufflante aspire de l'air dans le propulseur. Cet air est comprimé par les ailettes du compresseur.

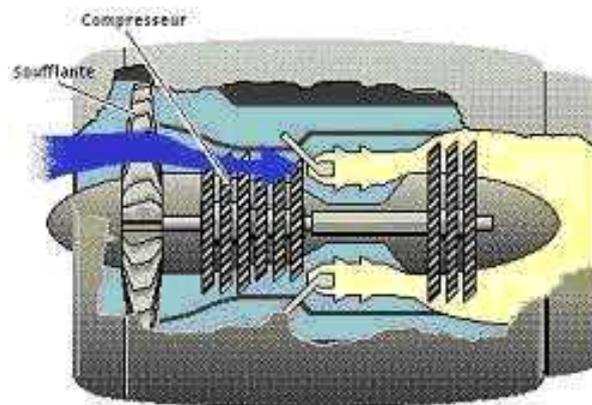


Figure (1-8) : Aspiration et compression de l'air .

Etape2 :

Les pompes expulsent le carburant par les gicleurs pour former un mélange avec l'air dans la chambre de combustion. Ce mélange entre en combustion et propulse des gaz en expansion rapide.

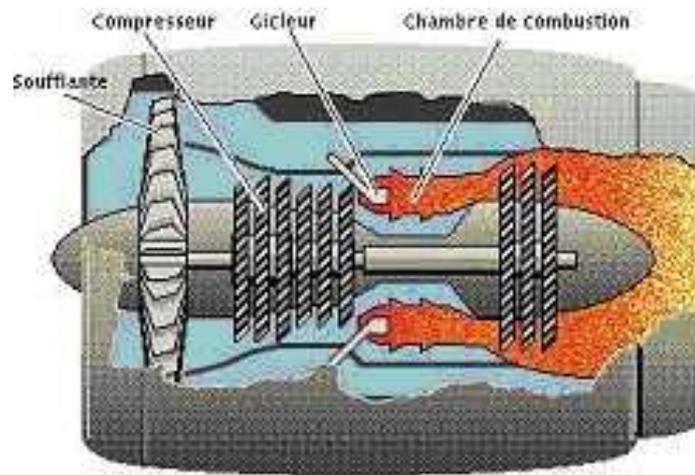


Figure (1-9) : Combustion de mélange air/carburant.

Etape3 :

La poussée vient en partie de la pression exercée par les gaz de sortie sur la paroi avant du propulseur. Mais le gros de la poussée provient, dans un turbofan, de la soufflante.

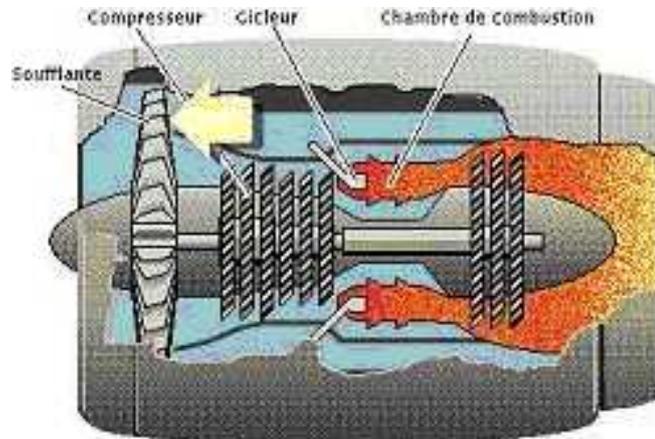


Figure (1-10) :Poussée vers l'avant exercée par les gaz de sortie.

Etape 4 :

Les gaz de sortie font tourner une turbine qui entraîne la soufflante et le compresseur.

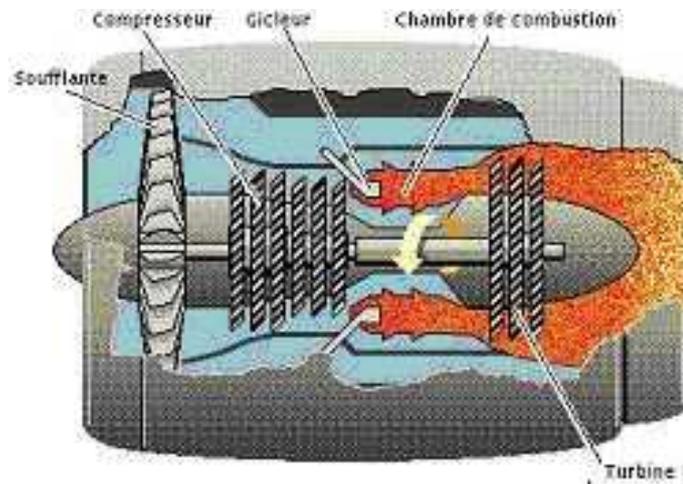


Figure (1-11) : Les gaz de sortie font tourner la turbine.

Etape 5 :

La grande partie aspirée par la soufflante contourne le turbomoteur.

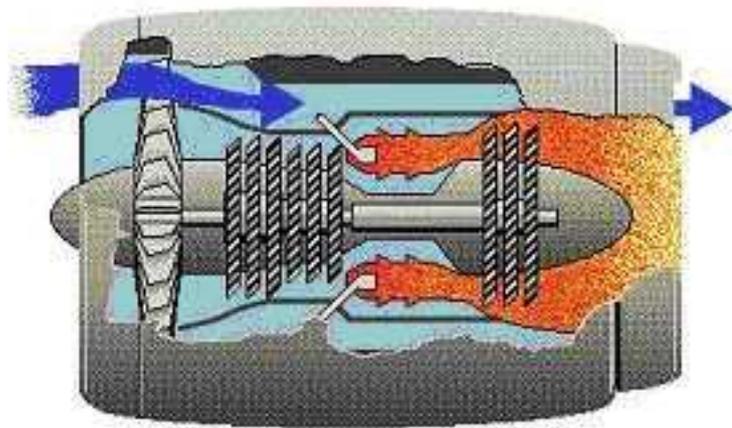


Figure (1-12) : La turbine entraîne le compresseur.

2-3-/TURBOPROPULSEUR :

2-3-1/ Principaux organe :

Comme les turboréacteurs à double flux, le turbopropulseur est structuré de la même façon qu'un turboréacteur. Comme lui, il comprend un diffuseur d'entrée, un compresseur, une chambre de combustion, une turbine, et une tuyère d'éjection. il y a de plus une hélice et un réducteur

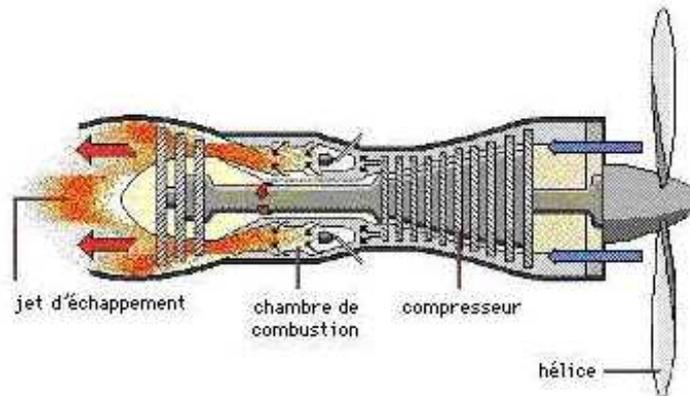


Figure (1-13) : Turbopropulseur.

a-/L'hélice :

L'arbre entraîné par la turbine entraîne à son tour non seulement le compresseur mais aussi une hélice placée en avant du diffuseur d'entrée. C'est elle qui fournit la principale poussée.

b-/Le réducteur :

Comme la vitesse angulaire de la turbine est trop forte pour alimenter une hélice, de masse et de diamètre bien trop important, un réducteur de vitesse est intercalé entre l'arbre de la turbine et celui de l'hélice qui diminue bien sûr la vitesse de cette dernière, mais surtout augmente le couple qui lui est appliqué.

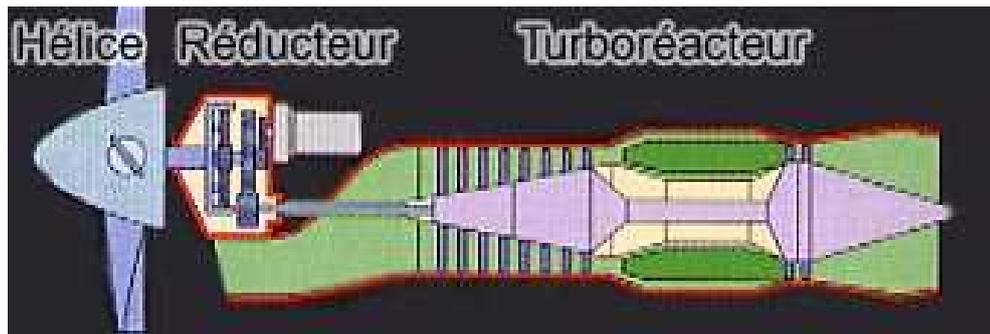


Figure (1-14) : Coupe d'un turbopropulseur et son hélice.

2-3-2-/Fonctionnement de turbopropulseur :

Un turbopropulseur est un réacteur qui entraîne une hélice multi pale via un réducteur. Il est particulièrement performant pour les avions lourds de transport

L'hélice pré comprimé l'air admis dans les entrées d'air. L'énergie cinétique libérée par les gaz de la chambre de combustion est utilisée de trois façons. Elle sert à :

- actionner les turbines qui entraînent les compresseurs et les génératrices électriques
- actionner les turbines qui entraînent l'hélice placée devant via le réducteur (et qui transforme la vitesse élevée à faible couple en vitesse faible à fort couple).
- propulser l'avion par la vitesse cinétique des gaz d'échappement dans la tuyère.

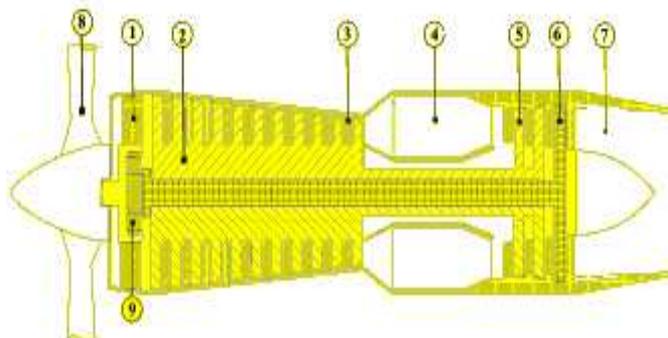


Figure (1-15) : les différentes composantes d'un turbopropulseur.

- 1-entrées d'air.
- 2-compresseur basse pression.
- 3- Compresseur haute pression.
- 4-la chambre de combustion.
- 5-turbine haute pression.
- 6-turbine basse pression.
- 7-la tuyère.
- 8-l'hélice.
- 9-le réducteur.

3-/ DESCRIPTION D'UNE TURBINE :

3-1/LE ROLE DE LA TURBINE :

Elle transforme l'énergie cinétique et thermique des gaz en énergie mécanique. Elle est reliée au compresseur par un axe central.

Lorsque la turbine tourne par le mécanisme des gaz d'échappements qui frappent ses ailettes, le compresseur tourne également. Le principal rôle de la turbine est donc de faire tourner le compresseur. Il résulte de ce constat, qu'il y a, dans un moteur; autant de turbine que de compresseur.

3-2 COMPOSITIONS DE LA TURBINE:

La turbine se compose de deux parties principales :

- le rotor
- le stator.

a-/ Le stator :

La partie principale du stator est l'aubage distributeur (Fig.1.16). Ce dernier se compose des aubes (1) disposées radialement, fixées par les couronnes externe (2) et interne (3).

Chaque aubage distributeur est attaché dans le corps du moteur devant le rotor correspondant.

L'aubage distributeur sert à transformer l'énergie potentielle du gaz en énergie cinétique dans le but d'augmenter la vitesse du flux, qui agit sur les aubes du rotor. Il assure en même temps l'orientation nécessaire du flux pour entrer dans les aubes mobiles.

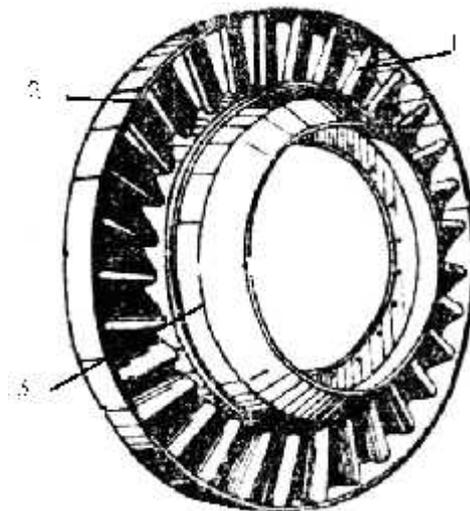


Figure (1-16) : Aubage distributeur de la turbine.

b-/ le rotor :

Le rotor se compose de l'arbre et de la roue mobile, . Elle se compose du disque(1) et des aubes mobiles(2), fixées sur la couronne Fig. (1-17). L'élément principal du rotor est la roue à aubes(1), Les aubes mobiles avec l'arbre(2) forment le rotor de la turbine. Fig.(1-18).

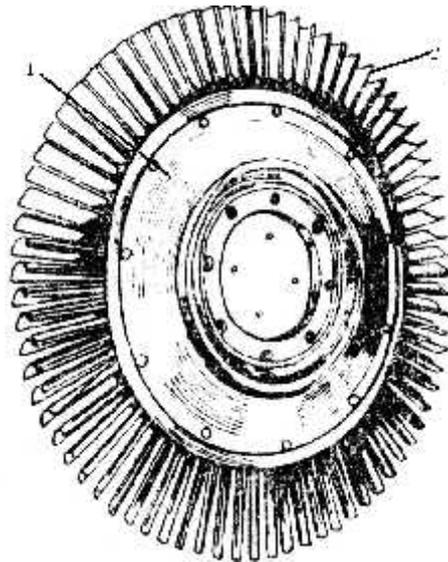


Figure (1-17) : Roue à aubes de la turbine.

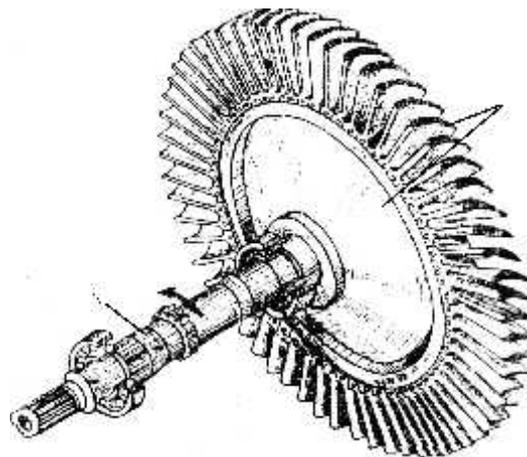


Figure (1-18) : Rotor de la turbine.

3-3/ TYPE DE TURBINE :

Selon la direction générale du mouvement du fluide moteur, les turbines se répartissent en axiales et radiales. Dans la turbine axiale, le sens principal du mouvement du gaz - le long de l'axe de rotation du rotor.

Dans la turbine radiale, le flux gazeux se déplace dans le sens perpendiculaire à l'axe de la machine , du centre vers la périphérie ou inversement.

En cas du mouvement du gaz du centre vers la périphérie, la turbine radiale est appelée centrifuge.

Si ce même flux gazeux se déplace de la périphérie vers le centre, la turbine est donc appelée centripète. La représentation schématique de ces turbines est représentée par les Fig. (1-19) et Figure (1-20).

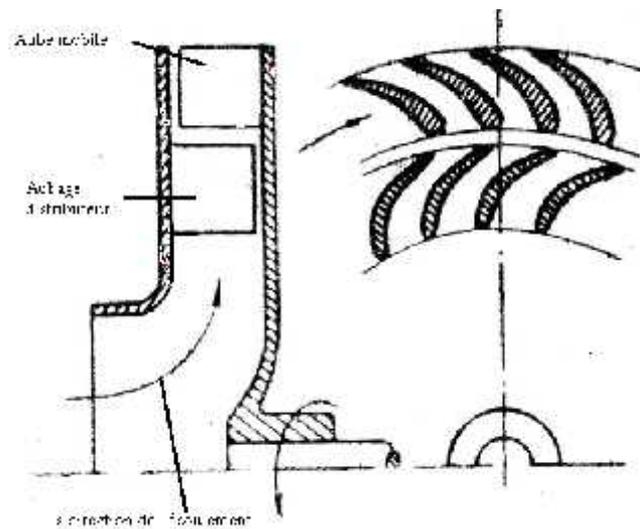


Figure (1-19) : Schéma de la turbine centrifuge radiale.

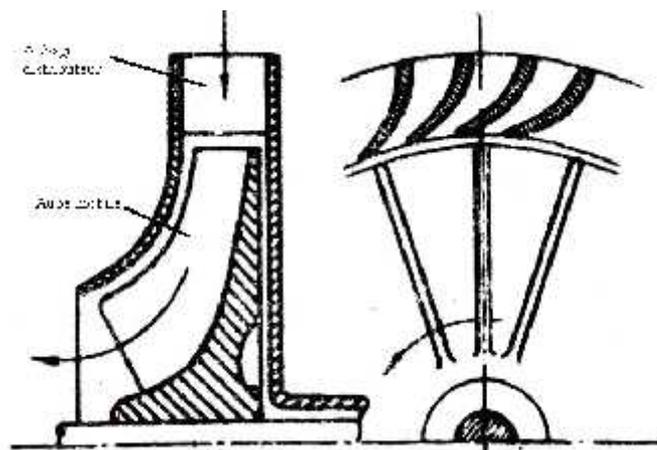


Figure (1-20) : Schéma de la turbine centripète radiale

On trouve aussi turbine à action et à réaction

Dans la turbine à action, toute la détente est effectuée dans le stator, la température des gaz sera donc la plus faible possible, mais nous obtenons à l'entrée rotor une vitesse V_B très grande, limitée aux phénomènes sonique, le débit réduit est maximal et que toute augmentation du débit carburant se traduirait par une obstruction thermique.

Rappelons que la turbine à action, même vitesse circumferentielle, développe une puissance double de celle dont le degré de réaction est $\frac{1}{2}$ mais la composante aérodynamique ne donnant naissance à aucune composante axial, le mobile est alors fortement tiré vers l'avant, d'où la nécessité de décharger le palier avant, En se rappelant que cela nécessite une circulation d'air interne, donc un prélèvement sur le débit d'air, cela génère une perte de poussé, en pratique le degré de réaction pour les moteurs civils est voisin de 0.5

3-4/VARIATION DES PARAMETRES DU GAZ DANS LES ELEMENTS DE L'ETAGE TURBINE :

Dans l'aubage distributeur, la pression du gaz diminue de P_1 à P et sa vitesse, dans ce cas, augmente de V_1 à V . Conformément à la chute de pression, la température du gaz diminue aussi de T_1 à T . Dans le rotor, la pression et la température du gaz continuent de diminuer, respectivement, de P , T à P_2 , t_2 .

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

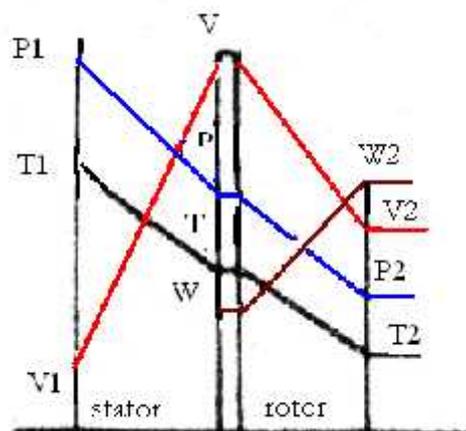


Figure (1-21) : Le graphique de variation des paramètres du gaz dans les éléments de l'étage.

3-5/ FONCTIONNEMENT :

Le principe de fonctionnement de l'étage réside dans ce qui suit, le flux de gaz, en passant dans l'aubage distributeur avec la vitesse V_1 , la pression P_1 et la température T_1 , acquière une réserve déterminée d'énergie potentielle et cinétique.

Dans le processus de détente du gaz dans les claires-voies des aubes de l'aubage distributeur, une partie de son énergie potentielle (énergie de pression) se transforme en énergie cinétique d'où, il résulte que la vitesse de l'air augmente considérablement lors de son déplacement dans l'aubage distributeur.

A la sortie de l'aubage distributeur, le jet de gaz, qui possède une grande vitesse, passe sur les aubes du rotor.

Lors de l'écoulement des aubes, apparaissent des forces de mécanique des fluides, identiques à la portance de l'aile.

La vitesse locale du gaz au niveau de la surface convexe de chaque aube devient plus importante que sur son côté concave. Il en résulte que la pression du gaz sur la surface concave dépasse la pression sur le côté convexe de l'aube Figure (1-22).

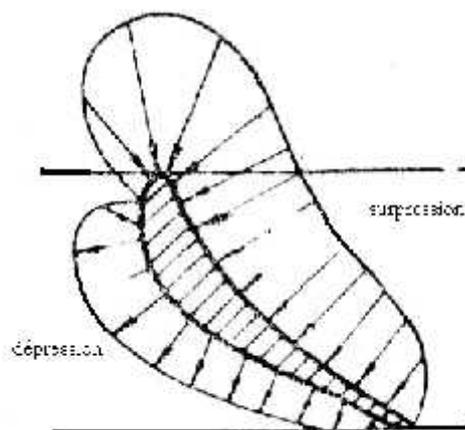


Figure (1-22) : La répartition de la pression sur le contour de l'aube.

La composante circulaire de la force aérodynamique totale forme le moment de rotation sous l'action duquel se produit la rotation du rotor et la réalisation du travail mécanique.

Les turbines permettent d'obtenir de très grandes puissances, un poids faible et un rendement élevé du processus. Ces particularités importantes ont même déterminé le large emploi des turbines dans l'aviation.

3-6/ CONTRAINTES SUPPORTEES PAR LA TURBINE :

Les turbines et en particulier les aubes, sont soumises à des contraintes mécaniques importantes du fait de la force centrifuge et à des très hautes températures.

Il est nécessaire de limiter ces contraintes à fin d'éviter les détériorations des aubes. En effet si les contraintes sont très fortes, il peut se produire un allongement des aubes. Ce phénomène s'appelle le fluage et il est important d'éviter son apparition en fonctionnement.

Le fluage a des conséquences très graves car l'allongement des aubes de la turbine implique leurs contacts dans le carter ou même un blocage et par conséquent une chute de rendement turbine.

En outre les réactions chimiques sont favorisé par l'élévation de la température ou les carburant contiennent un certain pourcentage d'impureté ,comme le soufre et le phosphore qui en se combinant à haute température avec le métal constituant un métal moins résistant .

Donc on peut dire que les turbines subissent des contraintes de trois ordres :

1. contraintes mécaniques.
2. contraintes thermiques.
3. contraintes chimiques.

3-7/ MATERIAUX UTILISES :

La turbine est un élément qui travaille dans les conditions les plus sévères telles que :

- les hautes températures à la sortie de la chambre de combustion
- les efforts centrifuge importants
- atmosphère oxydante
- des contraintes thermique élevées en cas d'une extinction de la chambre de combustion.

Il est important donc de choisir judicieusement les matériaux constituant les aubes du distributeur et de la roue.

Généralement le disque de la turbine est constitué à partir d'un acier spéciale à base de chrome, molybdène et quelque trace de vanadium alors que les matériaux utilisés pour construire la roue qui travaille dans les conditions les plus sévère sont des matériaux réfractaire.

Ces matériaux contiennent tous du nickel, du cobalt (k) qui améliore la tenue thermique du matériau et du chrome pour la résistance à la corrosion.

1/ INTRODUCTION :

La fabrication d'une pièce ou une famille des pièces est un problème complexe du fait de la multiplicité des techniques disponibles, la grande variété des spécifications des pièces et des propriétés des matériaux pour cela les constructeurs cherchent toujours à trouver les meilleurs techniques de fabrication en tenant compte la satisfaction des besoins techniques, économiques et humaines pour avoir la méthode de production la plus économique en assurant la meilleure qualité possible.

Ces techniques peuvent se diviser en deux groupes :

- Technique de fabrication par enlèvement de matière.
- Technique de fabrication sans enlèvement de matière.

2/ TECHNIQUE DE FABRICATION PAR ENLEVEMENT DE MATIERE :

L'usinage est une famille de techniques de fabrication de pièces mécaniques. Le principe de l'usinage est d'enlever de la matière de manière à donner à la pièce brute la forme voulue, à l'aide d'une machine-outil. Par cette technique, on obtient des pièces d'une grande précision.

Lors de l'usinage d'une pièce, l'enlèvement de matière est réalisé par la conjonction de deux mouvements relatifs entre la pièce et l'outil : le mouvement de coupe (vitesse de coupe) et le mouvement d'avance (vitesse d'avance).

De nos jours, des machines à commandes numériques, c'est-à-dire asservies par un système informatique, permettent d'automatiser partiellement ou totalement la procédure.

Dans notre étude on exposera seulement trois méthodes qui sont comme suit :

- Fraisage.
- Tournage (dressage, chariotage).
- Electro-érosion.

2.1/ FRAISAGE :

Le Fraisage est un procédé d'usinage par enlèvement de matière. Il se caractérise par le recours à une machine-outil : la fraiseuse. L'outil classiquement utilisé est la fraise.

En fraisage, l'enlèvement de matière - sous forme de copeaux - résulte de la Combinaison de deux mouvements : rotation de l'outil de coupe d'une part, et Avance de la pièce à usiner d'autre part.

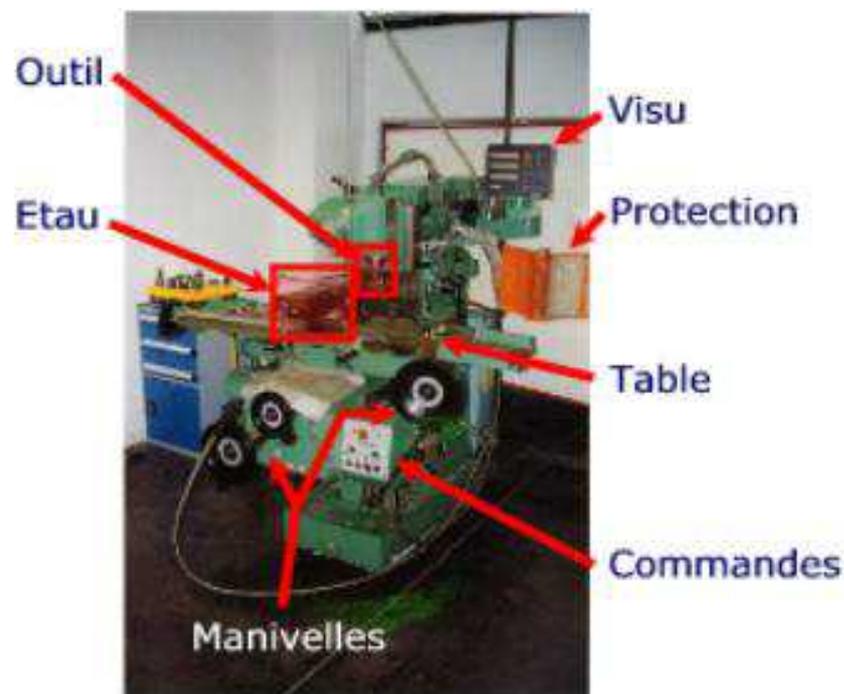


Figure (2-1) : Fraiseuse à commande numérique.

La fraiseuse est particulièrement adaptée à l'usinage de pièces prismatiques et permet également, si la machine est équipée de Commande Numérique, de réaliser tout type de formes mêmes complexes.

Les fraiseuses actuelles sont fréquemment automatisées (fraiseuses à commande numérique et centres d'usinage).

La programmation numérique de ces machines nécessite le recours à des interfaces logicielles, pour une part embarquées sur la machine elle-même (Directeur de Cde Numérique), et

pour une autre part, extérieure à la machine (PC + logiciels de fabrication assistée par ordinateur 2D et 3D) .

Dans l'industrie, les ouvriers fraiseurs qualifiés effectuent fréquemment des travaux de tournage complémentaires.



Figure (2.2) : Commande numérique de la fraiseuse.

2.1.1/ Mode de fraisage :

Les principales méthodes de fraisage pratiquées sont :

- Le fraisage de profil (dit « en roulant » ou « de forme ») ,
- Le fraisage en bout (dit « d'enveloppe »)
- Le fraisage combiné (en bout et de profil).

2.1.2/ Mode d'action de la fraise :

D'autre part, le fraisage peut s'effectuer :

- En opposition : l'effort de coupe tangentiel de la fraise s'oppose à l'avance de la pièce à fraiser (à mettre en oeuvre sur machine conventionnelle afin de neutraliser les jeux de transmission de mouvement).

- En concordance (dit « en avalant ») : l'effort de coupe tangentiel accompagne-la pièce à fraiser dans son déplacement : c'est la méthode utilisée sur les machine à Cde Numérique (pas de jeu à compense.

2.1.3/ Vitesse de coupe :

En usinage, la vitesse de coupe v_c est une vitesse exprimée en mètre par minute. Elle dépend de la matière usinée, du type d'opération, de l'outil, de l'état de surface souhaité, etc. Ainsi a été développé une technique qui permet de déterminer la vitesse de coupe, la profondeur de passe et l'avance par dent en recherchant le minimum de la pression spécifique. On appelle cela le Couple Matière (COM) Outil. Elle est utilisée pour déterminer la fréquence de rotation.

2.1.4/ Vitesse de coupe en fonction des matériaux :

La vitesse de coupe est fonction à la fois de la matière à usiner et de la matière de l'outil. Il existe une méthode nommée Couple outil matière qui permet de déterminer la vitesse de coupe correcte pour usiner le matériau. La vitesse de coupe est supérieure quand il y a lubrification que lorsque la coupe se fait à « sec ».

Vitesse de coupe pour différents matériaux (outil en acier rapide)	
Matériau	mètre par minute
Acier (résilient)	15 - 18
Acier doux	30 - 38
Fonte (moyenne)	18 - 24
Bronze	24 - 45
Laiton (recuit)	45 - 60
Aluminium	75 - 400
Titane	30 - 120 (acier rapide - WC)

Tableau (2.1) : les vitesses de coupe pour différents matériaux.

2.1.5/ Mouvement de coupe circulaire :

Lorsque le mouvement de coupe est circulaire, par exemple pour le tour ou la fraiseuse, la fréquence de rotation n en tour par minute (tr/min) est déterminée par la formule :

$$n = \frac{v_c \cdot 10^3}{\pi \cdot d_e}$$

n : fréquence de rotation en tours/minute

v_c : vitesse de coupe en m/min.

: constante : 3.14159.

d_e : diamètre de la pièce à usiner (tour) ou diamètre de la fraise ou de l'outil de coupe (fraiseuse).

2.2/ TOURNAGE MECANIQUE :

Le tournage est un procédé de fabrication mécanique par coupe (enlèvement de matière) mettant en jeu des outils à arête unique, il est fondé sur l'utilisation d'un tour.

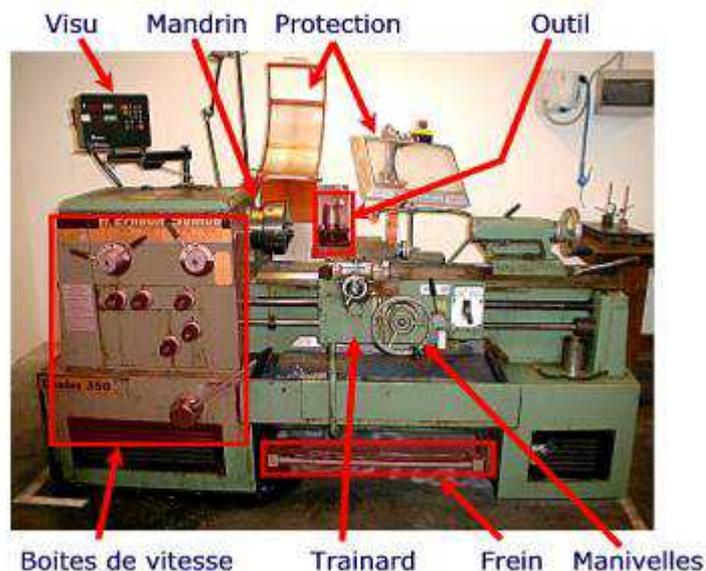


Figure (2.3) : le tour mécanique.

Un tour sert principalement à usiner des pièces de révolution. La pièce est fixée dans le mandrin. Celui-ci est mis en rotation par le moteur de broche.

L'outil suit une trajectoire qui interfère avec la pièce. L'outil est muni d'une arête coupante, il en résulte un enlèvement de matière : les copeaux. Ces petits éléments de matière sont appelés les copeaux.



Figure (2.4) : Tournage à commande numérique.

2.2.1/ Principe du tournage :

En tournage extérieur, on peut souvent dissocier les pièces complexes en profils de coupe élémentaires pour le choix des outils et des paramètres de coupe.

Pour faciliter le choix du type d'outil, on peut considérer qu'il existe, en tournage, deux opérations de base:

- tournage longitudinal, ou chariotage (1) ;
- dressage (2) ;

a- En chariotage :

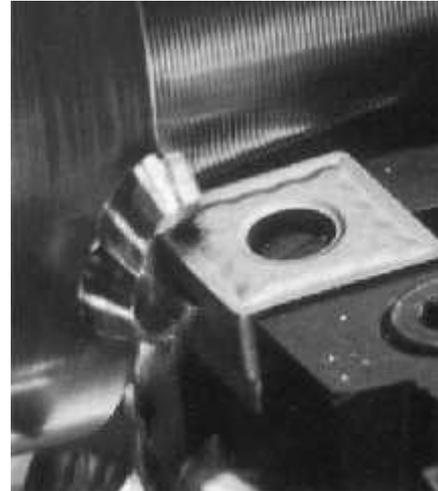
Le mouvement d'avance (mouvement de l'outil) est une translation rectiligne parallèle à l'axe de révolution de la pièce, et cet usinage aura pour effet de réduire le diamètre de la pièce

b- En dressage :

Le mouvement d'avance est une translation rectiligne de l'outil perpendiculaire à l'axe, ce qui diminue la longueur de la pièce et génère un plan orthogonal à l'axe.



**Figure (2.5) : dressage d'une
Pièce.**



**Figure (2.6) : chariotage d'une
pièce.**

2.3/ USINAGE PAR ELECTROEROSION :

L'usinage par électro-érosion est une méthode en vertu de laquelle le métal est enlevé sous l'effet de courtes décharges électriques produites par un courant haut intensité entre l'outil et la pièce.



Figure (2.7) : machine d'électroérosion.

La méthode qui s'appelle également étincelage, a fait preuve de sa supériorité dans l'usinage de matières extra-dures, bonnes conductrices de l'électricité.

2.3.1/ Principe de L'électro- Erosion :

L'électro-érosion est une méthode d'enlèvement contrôlé du métal. Elle fait appel à une étincelle électrique pour couper la pièce et lui donner la forme opposée à celle de l'outil de coupe ou électrode.

L'électrode est fait d'une matière conductrice d'électricité, généralement du graphite. L'électrode façonnée de manière à épouser la forme du creux qu'elle aura à pratiquer, ainsi que la pièce, sont tous deux plongées dans un fluide diélectrique, soit une huile de graissage légère.

Le fluide diélectrique ne devrait pas conduire l'électricité. Un mécanisme d'asservissement assure un écart constant d'environ 0.02mm entre l'électrode et la pièce afin qu'il n'y ait jamais contact entre elles.

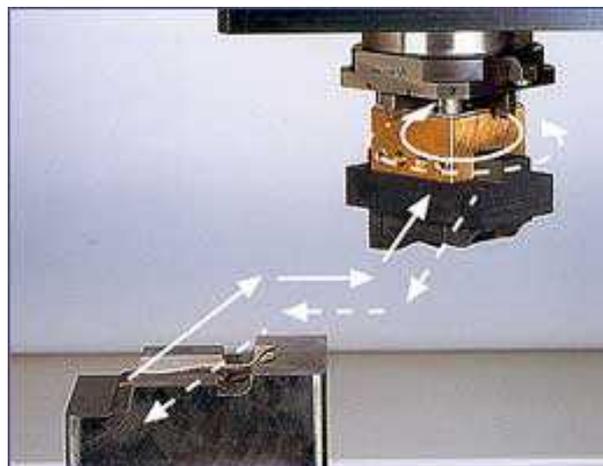


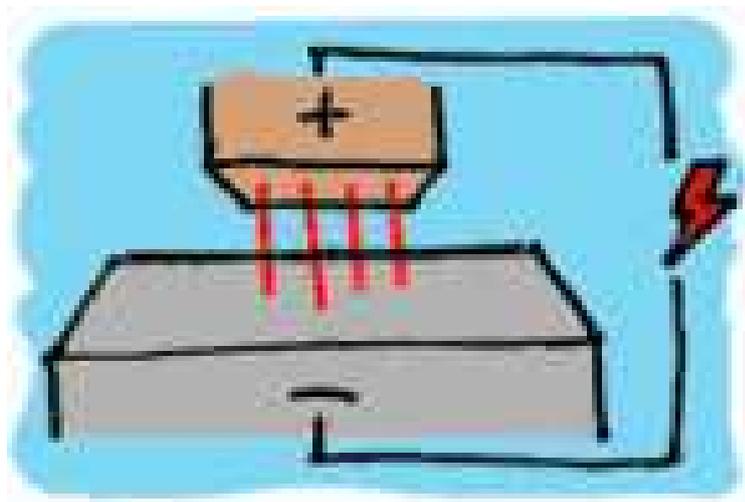
Figure (2.8) : le chemin d'un usinage par électro-érosion.

Un courant continu basse tension et haute intensité, vient alimenter l'électrode à raison d'environ 20000Hz. Ces impulsions se traduisent par un étincelage qui franchit l'écart entre l'électrode et la pièce, à travers le fluide diélectrique.

La zone d'étincelage devient très chaude, le métal fond et une particule infinitésimale de métal en fusion se détache de la pièce. Le fluide diélectrique, continuellement en circulation, emporte les particules détachées et dissipe la chaleur engendrée par l'étincelage.

Pour usiner par électroérosion quatre éléments sont nécessaires :

- Une électrode.
- Une pièce.
- Un fluide diélectrique.
- De l'électricité.



	Une électrode
	Une pièce
	D u dielectrique
	De l'électricité

Figure (2.9) : les principaux éléments de l'usinage par électroérosion.

a/ L'électrode :

L'électrode de l'étincelage épouse la forme du creux qu'elle est appelée à pratiquer. Comme pour l'usinage classique, certaines matières possèdent de meilleures qualités de coupe et de résistance à l'usure que d'autres.

La matière dont on fabriquera l'électrode doit donc posséder les caractéristiques suivantes :

- Etre bonne conductrice de l'électricité et de la chaleur
- Etre facile à façonner sans coût de main-d'œuvre exagéré
- Bien enlever le métal de la pièce à usiner
- Résister à la déformation au cours de l'étincelage
- Offrir une bonne résistance à l'usure en tant qu 'électrode.

Les expériences visant à produire une bonne électrode d'étincelage, faite de matière économique, ne se comptent plus. Les carbures de tungstène, de cuivre et d'argent, le laiton jaune, le cuivre, les métaux chromés, le graphite et les alliages de zinc se sont tous révélés efficaces comme matière à électrodes ne sert à toutes les fins puisque chaque genre d'usinage exige l'emploi d'une électrode aux qualités distinctes.



Figure (2.10) : un modèle d'électrode.

b/ Le fluide diélectrique :

Le fluide diélectrique dont on se sert pour l'étincelage à plusieurs fonctions :

- Il aide à provoquer l'étincelage entre l'électrode et la pièce.
- Il enferme l'étincelle dans un étroit canal.

- Il sert d'isolant entre l'outil et la pièce.
- Il chasse les particules pour prévenir le court-circuitage.
- Il agit comme agent refroidisseur de l'électrode et de la pièce.

A ce jour, les fluides les plus efficaces sont des produits du pétrole comme les huiles de graissage légères, les huiles à base de silicium et le kérosène.

En étincelage la matière diélectrique joue un rôle de premier plan puisque de ses qualités dépend le régime d'enlèvement du métal et d'usure de l'électrode.

2.3.2/ L'étincelage :

Lorsqu'un courant suffisamment puissant franchit l'écart entre l'électrode « cathode » et la pièce « anode », le fluide diélectrique qui les sépare se change en gaz pour conduire, le long de cette voie ionisée, une forte décharge électrique qui va frapper la pièce.

L'énergie développée par décharge provoque la vaporisation et la décomposition du fluide diélectrique qui enserre le canal conducteur d'électricité.

A mesure que la conduction se poursuit, le canal gagne en diamètre le courant s'intensifie. La chaleur engendrée entre l'électrode et la surface de la pièce provoque la formation d'une minuscule flaque de métal en fusion. La rupture du courant, qui ne dure que quelques microsecondes, permet la solidification du métal en des particules qui sont emportées par le fluide diélectrique.

Les décharges se suivent au rythme de 20000Hz à 30000Hz et chacune fait sauter une infinitésimale quantité de métal enlevé et proportionnel à la charge entre l'électrode et la pièce.

Pour l'enlèvement rapide du métal il faut donc un courant de haute intensité dont les décharges se suivent à un rythme accéléré pour faire fondre aussi rapidement que possible une quantité maximale du métal. Il en résulte cependant des cratères assez grands pour que la surface de la pièce soit rugueuse.

Pour que les cratères de l'usinage soient plus petits et que par conséquent, la surface soit mieux finie, il faut réduire l'intensité du courant. Si l'intensité du courant demeurait la même, mais quand augmentait le nombre de fréquence, on obtiendrait également une surface mieux finie puisque les cratères seraient plus petits. L'état de surface et fonction du nombre du fréquence par seconde.

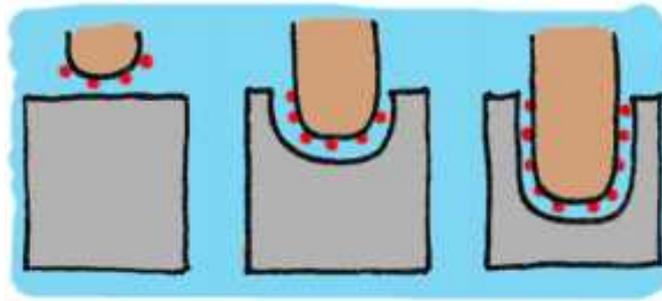


Figure (2. 11) : le processus d'usinage par étincelage.

2.3.3/ Avantages de L'étincelage :

Comparé à l'usinage classique, l'étincelage comporte de nombreux avantages :

Peu importe son degré de dureté, toutes matière qui conduits l'électricité peut être usinée par étincelage.

- L'étincelage permet l'usinage des matières trempées, d'ou disparition du risque de déformation inhérent à la trempe.
- Les tarauds ou forets brisés sont faciles à extraire des pièces.
- La pièce ne subit ni tensions ni contraintes puisque l'électrode n'y touche jamais.
- L'étincelage ne laisse pas de bavures.
- Les pièces minces et fragiles peuvent être usinées sans risquer la déformation.
- L'étincelage, pour la plupart des pièces, fait disparaître le besoin de la finition secondaire.
- L'usinage est automatique du fait que les mécanismes d'asservissement commandent la progression de l'électrode dans la pièce à mesure que la matière est enlevée.
- Un seul conducteur peut s'occuper de plusieurs machines d'usinage par électroérosion.

- Les formes complexe, impossible à réaliser par les moyens classiques, sont faciles à tailler à même la masse.
- Les poinçons et matrices usinés par électroérosion sont plus précis et coûtent moins cher.
- Le poinçon peut servir d'électrode pour le transfert de sa forme dans la masse en vue de l'obtention de la matrice, rapidement et avec précision.

2.3.4/ les inconvénients de l'étincelage:

Malgré ses nombreuses applications et son immense popularité, l'étincelage est assujéti à certaines limites :

- L'usinage est relativement lent.
- La matière à usiner doit bien conduire l'électricité.
- Les creux pratiqués sont légèrement coniques.
- Pour certaines applications l'électroérosion peut devenir très coûteux en raison de l'usure rapide de l'électrode.
- Les électrodes de moins de 0.007mm de diamètre se prêtent mal à l'étincelage.
- La surface de la pièce est endommagée sur une profondeur de 0.005mm, défaut qui n'est pas irréparable.

3/ TECHNIQUE DE FABRICATION SANS ENLEVEMENT DE MATIERE :

3.1/ TECHNIQUE DE MOULAGE :

C'est un des procédés de formage des métaux qui consiste à couler un métal ou un alliage liquide dans un moule pour reproduire, après refroidissement, une pièce donnée (forme intérieure et extérieure) en limitant autant que possible les travaux ultérieurs de finition.

Les techniques employées dépendent de l'alliage fondu, des dimensions, des caractéristiques et des quantités de pièces à produire.

C'est une industrie de sous-traitance très dépendante des secteurs acquéreurs : automobile, sidérurgie, matériel de manutention, équipement industriel, matériel électrique, aéronautique, etc.

On distingue principalement la fonderie effectuée avec des moules dits non-permanents, ou "moules perdus", généralement en sable et la fonderie avec des moules permanents en métal, qu'on appelle aussi "coquilles".

Sauf dans les cas de moulage à modèle perdu (Lost foam ou cire perdue), le moule de fonderie de base est constitué de deux demi-moules assemblés au niveau du *plan de joint*.

Ce moule de base peut être complété, suivant la complexité de la pièce, par un ou des "noyau(x)" en sable, ou bien une ou des broches (ou "poignard(s)") pour le moulage coquille.

Notre étude va se basée sur le cas de moulage avec des moules non permanent.

3.2/ MOULES NON-PERMANENTS :

Un moule non-permanent est un moule qui ne sert qu'une seule fois, pour réaliser une pièce. Pour chaque pièce brute de coulée produite, le moule est détruit.

La fonderie à partir de moules non-permanents se divise en deux catégories :

- Le moulage traditionnel pour lequel chaque moule est fabriqué à partir d'un modèle permanent;
- le moulage par modèle perdu pour lequel on réalise autant de modèles que de moules.

Pour la fonderie traditionnelle, chaque moule est réalisé en "sable" ; il peut s'agir de sable silico-argileux (traditionnellement utilisé en fonderie) ou de silice liée par des résines (procédé plus récent dit "sable à prise chimique").

Pour le moulage en cire perdue, appelé aussi "fonderie de précision" chaque moule est réalisé en un matériau céramique.

3.2.1/ Moulage sable:

Technique qui utilise des moules en sable lié avec de l'argile et de l'eau. La précision des pièces obtenues par cette technique varie de moyenne à bonne.

Les principaux avantages de cette méthode résident dans la rapidité de moulage et le taux de récupération très élevé du sable.



Figure (2.12) : moule en sable.

3.2.2/ Moulage en cire perdue :

Les modèles sont en cire ou matière synthétique coulés dans des formes métalliques (on moule donc les modèles). Ces modèles peuvent être constitués de plusieurs parties assemblées.

Pour fabriquer les moules de fonderie, on monte les modèles en grappes puis on les trempe dans une céramique liquide. Cette opération est répétée plusieurs fois jusqu'à obtention d'une couche de sept millimètres d'épaisseur au minimum.

La cire est ensuite liquéfiée par chauffage et évacuée, puis on coule le métal dans les formes encore chaudes.

Le principal avantage de ce procédé consiste en la réalisation de pièces avec des angles aigus et une surface très lisse. Après refroidissement il suffit d'éliminer la céramique par vibration ou au jet d'eau.

La précision obtenue par cette technique est excellente.

3.2.3/ Moulage Lost Foam:

Ce type de moulage dit PMP (Procédé par Modèle Perdu) est apparu dans les années 80, il consiste à utiliser un modèle en polystyrène expansé qui restera dans le moule et se vaporisera à la coulée.

3.3/ METHODE DE LA CIRE PERDUE :

Méthode de la cire perdue est une façon de changer une sculpture faite d'argile douce en un matériau plus dur. Changer de l'argile en métal implique deux moules pour chaque sculpture.



Argile original



Le moule principal couvre l'argile. Le caoutchouc liquide versé autour de l'argile durcit. Le plâtre garde le caoutchouc en place

Le premier moule (fait de plâtre et de caoutchouc) produit un coulage de la sculpture en cire. Le versement à main détermine l'épaisseur et donc le poids du métal final.

Immerger le moule de cire dans un matériel en céramique liquide forme la base du deuxième moule. Une fois durci, le matériel peut résister à la haute température du métal fondu.



de l'argile est enlevée, créant l'espace vide. Le caoutchouc capture détails sculptés dans l'argile



de la cire chaude est versée dans le moule, capturant les détails que le caoutchouc a déposé dans l'argile



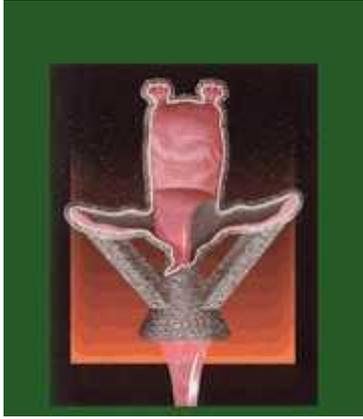
une fois refroidie, la cire durcie est enlevée du moule



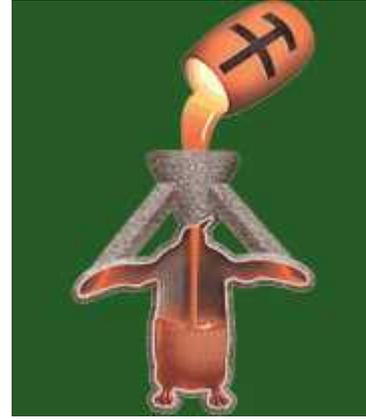
le deuxième moule en céramique couvre la cire et durcit

Ensuite, le moule est chauffé jusqu'à ce que la cire s'évapore complètement ou disparaisse. Puisque la cire disparaît, elle devient de la « cire perdue » d'où le nom du processus.

L'espace vide résultant laissé par la cire perdue dans le deuxième moule forme ainsi « un seau » totalement conforme à la sculpture.



Au four, la cire s'évapore pour
Devenir de la cire perdu



le métal fondu est versé dans le
le moule en céramique

Le métal fondu est alors versé dans l'espace laissé par la cire fondue. Après le refroidissement, le moule est soigneusement séparé au marteau pour exposer le moulage en métal

Le moule est cassé et définitivement perdu pour sortir la pièce



pièce réalisée

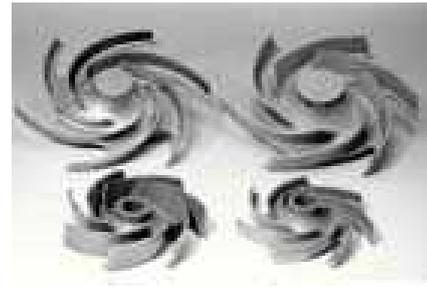
La finition consiste à enlever les jets de coulée, nettoyer la pièce puis polissage ou patine selon le rendu désiré.

3.4/ EXEMPLE DES PIÈCES FAITES PAR MOULAGE EN CIRE PERDU :

Le procédé de moulage à cire perdue permet de réaliser des pièces complexe dans tous types d'alliage pour tous les domaines industriels tels que l'électronique, l'électrotechnique, l'aéronautique, l'automobile, la construction des machines et autres .



Alliage réfracteur



Bronze



Acier



Inconel

Figure (2.13): pièces faites en moulage en cire perdu avec différents métaux.

3.5/ CAS D'UTILISATION DE CHAQUE TYPE :

Le moulage sable est principalement employé dans les fonderies de fontes et d'aciers, mais aussi dans les fonderies d'aluminium, pour la réalisation de prototypes et petites séries (aéronautique et armement, notamment) .

Dès que la taille des séries le justifie, on préfère l'utilisation de moules permanents pour le moulage de pièce en alliages d'aluminium (coût de l'outillage beaucoup plus élevé, mais cadences importantes d'où un coût global de la pièce plus faible).

Le moulage en cire perdue est plus onéreux que le moulage sable, mais il permet d'obtenir des pièces fines et une grande précision dimensionnelle. De multiples nervures ou gorges sont réalisables de même tous types de détails complexes.

Entre autres applications sont fabriqués des pièces de structure pour l'industrie aérospatiale, mais le procédé cire perdue peut s'appliquer aussi à la fonderie d'art.

Le *Lost foam* est un procédé récent qui est notamment utilisé pour la production en série de certaines pièces d'automobiles. Ce procédé ne doit pas être confondu avec le moulage de pièces prototype à partir de modèle "poly", qui reste du moulage sable traditionnel au niveau de la réalisation du moule.

1-/INTRODUCTION :

L'élaboration de la roue turbine par usinage sur fraise numérique nécessite la connaissance préalable des grandeurs géométrique définissant la roue de la turbine.

Le dimensionnement de la turbine est une partie qu'a été entreprise par un binôme ingénieur REF Mémoire : «réalisation et dimensionnement d'un micro turboréacteur » (Promotion 2003). Ou ils ont réalisé une étude de conception leur permettant de définir les dimensions et la géométrie des aubes.

La roue une fois réalisée va servir de model pour l'élaboration de la boite à noyau pour le procédé de moulage en cire perdue.

2-/PRESENTATION DES RESULTATS DE L'ETUDE :

Un programme a été déroulé et a permis de donner une forme précise de la turbine, en tenant compte de toutes les contraintes de conception et avoir aussi un meilleur compromis dans le choix des paramètres de manière à avoir une forme géométrique réalisable et un bon rendement.

a) présentation des résultats :

propriétés	hub	mean	tip
T1(k)	837.96	837.96	837,96
Pt(kpa)	139.9	139.9	139.9
T(k)	802.29	802.29	802.29
P(kpa)	115.87	115.87	115.87
M	0.544	0.544	0.544
V(m/s)	298.01	298.01	298.01
u(m/s)	287.85	287.85	287.85
v(m/s)	81.71	77.13	73,03
r(m)	0.04	0.042	0.044
	12.79	15	14.23

Tableau (3-1) : propriété thermodynamique de la roue.

ω_r (m/s)	ω (rd/s)	N (mn)	R_h° (mm)	R_m° (mm)	R_t° (mm)
317.510000	7559.762000	72190.470000	0.536	0.521	0.526

Tableau: (3-2): propriété de l'élément

ψ		h	A	Z_r (c _x /s)
1.637661	1.113265	1213557E-02	1243248E-03	9229322E-01

Tableau (3-3) : propriété géométrique de la roue

b) les paramètres du rotor sont :

Niveau	rayon	solidité	espacement	Nombre d'aube	Corde axiale
Tip	0.0439	0.9132	0.0061	24.4472	0.0026
Mean	0.0420	0.9132	0.0060	24.0834	0.0026
Hub	0.0401	0.9628	0.058	23.8207	0.0026

Tableau (3-4) : les paramètres du rotor

La corde du rotor $c = 3.388554E-03$

Ainsi le vrillage de l'aube turbine donnée par le calage géométrique de l'emplanture au sommet (Aux hub, tip et mean sont)

$$\theta_h = -69.09647$$

$$\theta_m = -52.09262$$

$$\theta_t = -52.37239$$

Et l'angle de géométrie γ au bord de fuite est:

γ_h (°)	γ_m (°)	γ_t (°)
21.187450	22.041170	21.187450

Tableau (3-5) : l'angle de géométrie χ

c) les Dimension de la roue:

les aubes de la roue sont portées par la jante qui maintien leur mouvement de rotation exposées à des contraintes dues aux efforts des aubes et la contrainte centrifuge.

La géométrie de la roue est présentée par Ce schéma comme suit:

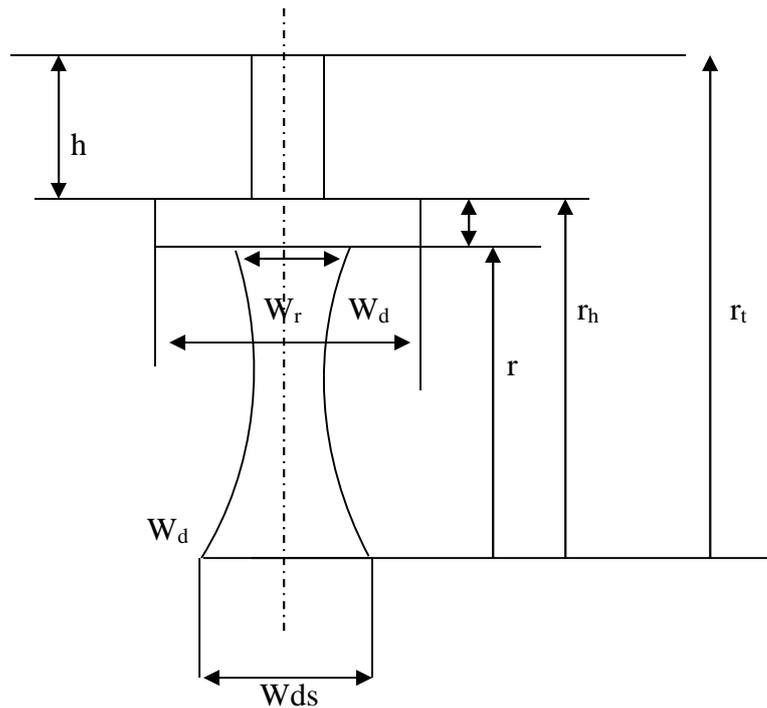


Figure (3-1) : Dimension de la roue

Les dimensions de la roue déterminées selon l'étude Ref (Mémoire : «réalisation et dimensionnement d'un micro turboréacteur » (Promotion 2003). sont présentées ici sur le tableau ci-dessous :

H (mm)	W_r (mm)	W_{dr} (mm)	W_{ds}	r_h	r_t	W_d
12.5	4	2	12	28	40	6

Tableau (3-6) : Dimension de la roue

Le dessin de définition basé sur ces valeurs est présenté dans l'annexe

3/GEOMETRIE DE LA ROUE TURBINE :

A partir du calcul thermodynamique définissant les états de la turbine .la géométrie de la roue sera essentiellement reliée au débit, le rapport corde /hauteur et le rayon moyen.

Selon la conservation du débit la section de passage sera exprimée par :

$$A = \frac{m\sqrt{T_t}}{P_t(\cos r)MFP(M)} \quad (3-1)$$

Où r représente l'angle d'attaque

Ce qui nous permettra de définir ainsi la hauteur de l'aube selon la formule ci-dessous :

$$h = \frac{A}{2f r_m} \quad (3-2)$$

L'écoulement de la base au sommet de l'aube varie et nous impose une variation selon la géométrie, chose qui détermine les paramètres à trois niveaux : le sommet, l'emplanture et le rayon moyen, définie par :

$$\begin{cases} r_t = r_m + \frac{h}{2} \\ r_h = r_m - \frac{h}{2} \end{cases} \quad (3-3)$$

Les composantes de la vitesse se détermineront ainsi :

$$\begin{cases} v_h = v \cdot \frac{r_m}{r_h} \\ v_t = v \cdot \frac{r_m}{r_t} \end{cases} \quad (3-4)$$

Et en conséquence le vrillage de l'aube sera donné par :

$$\begin{cases} r_h = tg^{-1} \frac{v_h}{u} \\ r_t = tg^{-1} \cdot \frac{v_t}{u} \end{cases} \quad (3-5)$$

$$\begin{cases} S_h = tg^{-1} \frac{v_h + \check{S}r}{u} \\ S_t = tg^{-1} \cdot \frac{v_t + \check{S}r}{u} \end{cases} \quad (3-6)$$

3-1/CONSTRUCTION DE LA GEOMETRIE DE L'AUBE :

Avant de passer à la machine numérique la géométrie du profile doit être définit correctement avec ses angles de géométrie au bord d'attaque et au bord de fuite.

Sur solide Works nous commençons à dessiner sur la surface supérieur de la jante la ligne moyenne du profile tangent à droite ayant pour angle de géométrie $\gamma_1 = 80^\circ$ $\gamma_2 = 34^\circ$

Puis les courbures de l'intrados et l'extrados sont ainsi définit selon **une distribution**

La figure ci-dessous montre les étapes à suivre pour arriver au profil.

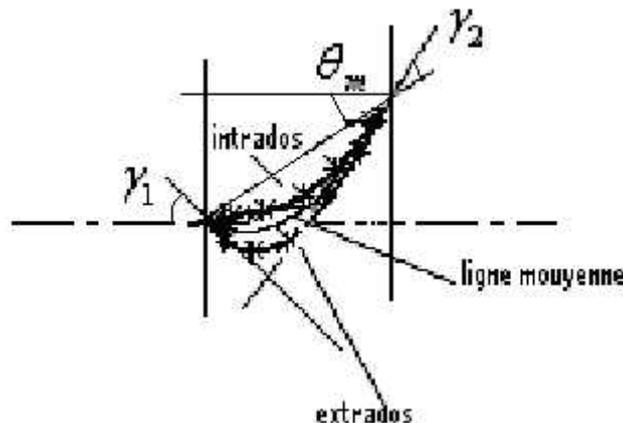


Figure (3-2) : le profil de l'aube

4-/ TRANSFERT DE LA GEOMETRIE SUR MACHINE :

Pour permettre à la machine de réaliser cette forme géométrique compliquée. Il faut que l'ensemble de la courbure soit représenté par un ensemble de petit segment que la machine interprète en mouvement rectiligne de l'outil fin et définit à la fin la courbure des aubes à quelque finition près.

La subdivision en un ensemble de segment est réalisée sur Solid- Works ou sur Auto-CAD. Le tableau ci-dessous englobe l'ensemble de coordonnées géométrique de la totalité des segments définissant le profil de l'intrados et l'extrados

X	Y	X	Y
$x_1=-0.01$	$y_1=-0.03$	$x_{13}=0.16$	$y_{13}=-0.09$
$x_2=0.00$	$y_2=-0.03$	$x_{14}=0.16$	$y_{14}=-0.07$
$x_3=0.00$	$y_3=-0.03$	$x_{15}=0.08$	$y_{15}=-0.03$
$x_4=0.01$	$y_4=-0.04$	$x_{16}=0.20$	$y_{16}=-0.05$
$x_5=0.02$	$y_5=-0.05$	$x_{17}=0.20$	$y_{17}=-0.03$
$x_6=0.02$	$y_6=-0.05$	$x_{18}=0.23$	$y_{18}=-0.01$
$x_7=0.03$	$y_7=-0.05$	$x_{19}=0.13$	$y_{19}=0.000$
$x_8=0.07$	$y_8=-0.10$	$x_{20}=0.27$	$y_{20}=0.03$
$x_9=0.16$	$y_9=-0.17$	$x_{21}=0.26$	$y_{21}=0.05$
$x_{10}=0.06$	$y_{10}=-0.06$	$x_{22}=0.26$	$y_{22}=0.08$
$x_{11}=0.16$	$y_{11}=-0.13$	$x_{23}=0.24$	$y_{23}=0.10$
$x_{12}=0.08$	$y_{12}=-0.05$	$x_{24}=0.12$	$y_{24}=0.06$

X	Y	X	Y
$x_{25}=0.33$	$y_{25}=0.21$	$x_{37}=0.03$	$y_{37}=0.06$
$x_{26}=0.29$	$y_{26}=0.24$	$x_{38}=0.00$	$y_{38}=0.02$
$x_{27}=0.20$	$y_{27}=0.20$	$x_{39}=0.00$	$y_{39}=0.01$
$x_{28}=0.30$	$y_{28}=0.34$	$x_{40}=-0.01$	$y_{40}=-0.01$
$x_{29}=0.41$	$y_{29}=0.55$	$x_{41}=-0.01$	$y_{41}=-0.01$
$x_{30}=0.69$	$y_{30}=0.97$	$x_{42}=-0.01$	$y_{42}=-0.02$
$x_{31}=0.27$	$y_{31}=10.40$	$x_{43}=-0.02$	$y_{43}=-0.02$
$x_{32}=0.44$	$y_{32}=0.71$	$x_{44}=-0.07$	$y_{44}=-0.09$
$x_{33}=0.48$	$y_{33}=0.84$	$x_{45}=-0.39$	$y_{45}=-0.59$
$x_{34}=0.31$	$y_{34}=0.57$	$x_{46}=-0.23$	$y_{46}=-0.34$
$x_{35}=0.25$	$y_{35}=0.48$	$x_{47}=-0.46$	$y_{47}=-0.62$
$x_{36}=0.02$	$y_{36}=0.03$	$x_{48}=-0.42$	$y_{48}=-0.50$

Tableau (3-7) : les coordonnées des segments

X	Y	X	Y
x ₄₉ =-0.50	y ₄₉ =-0.54	x ₅₉ =-0.25	y ₅₉ =-0.03
x ₅₀ =-0.41	y ₅₀ =-0.40	x ₆₀ =-0.69	y ₆₀ =-0.09
x ₅₁ =-0.51	y ₅₁ =-0.43	x ₆₁ =-0.28	y ₆₁ =-0.04
x ₅₂ =-0.41	y ₅₂ =-0.28	x ₆₂ =-0.15	y ₆₂ =-0.03
x ₅₃ =-0.43	y ₅₃ =-0.22	x ₆₃ =-0.14	y ₆₃ =-0.04
x ₅₄ =-0.30	y ₅₄ =-0.12	x ₆₄ =-0.10	y ₆₄ =-0.04
x ₅₅ =-0.15	y ₅₅ =-0.05	x ₆₅ =-0.07	y ₆₅ =-0.04
x ₅₆ =-0.30	y ₅₆ =-0.09	x ₆₆ =-0.03	y ₆₆ =-0.02
x ₅₇ =-0.15	y ₅₇ =-0.04	x ₆₇ =-0.02	y ₆₇ =-0.02
x ₅₈ =-0.29	y ₅₈ =-0.06	x ₆₈ =-0.02	y ₆₈ =-0.03
x ₅₉ =-0.14	y ₅₉ =-0.02	x ₆₉ =-0.01	y ₆₉ =-0.03

Tableau (3-7) : les coordonnées des segments

5) EXECUTION SUR MACHINE :

5-1/ TOURNAGE :

La première étape faite est l'opération de tournage qui est destinée à régler les cotes de la roue.

Pour accomplir la tâche de tournage on utilise un tour conventionnel figure (3-3)



Figure (3-3) : Tour conventionnel.

Donc les opérations incluses dans le tournage sont :

- le dressage ;
- le chariotage ;
- le perçage ;

5-1-1/ Dressage des faces :

Au début on place la pièce dans le mandrin et on la serre par les trois mors figure (3-4) à la suite on monte l'outil de dressage sur le chariot et on commence le dressage de face en gardant l'épaisseur maximale de 9.6mm (figure 3-5)

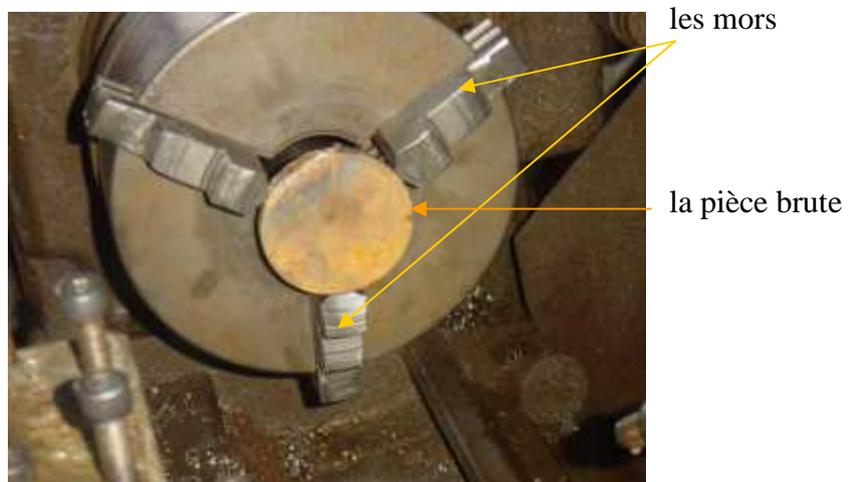


Figure (3-4) : montage de la pièce brute dans le tour



Figure (3-5) :L'opération de dressage des faces.



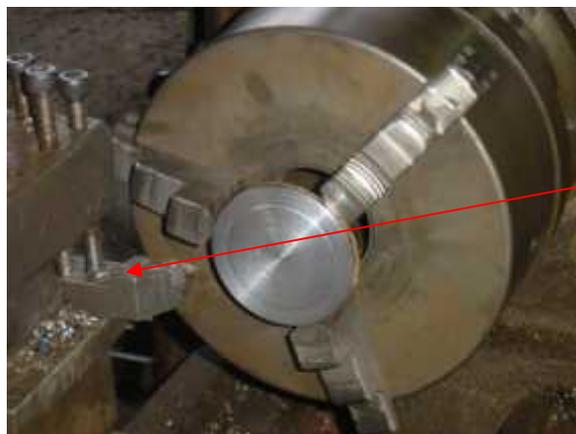
Figure (3-6) : Le dressage des faces est fini.

5-1-2-/ Chariotage et dressage :

Maintenant on fait deux opérations en même temps le chariotage et le dressage ;

Le chariotage est destiné à fixer les diamètres et le dressage destiné à fixer les épaisseurs.

Pour cela on utilise un outil mixte c'est à dire il dresse et chariote ; premièrement on chariote la pièce pour obtenir le diamètre extérieur de 79.2mm puis on chariote et on dresse au même temps et ça pour fixer un diamètre de 56 mm et une épaisseur de 7mm figure (3-7) ; en suite on fait un chariotage intérieur de 51mm au diamètre 11mm avec une conicité (figure 3-7), cette conicité sert à alléger la pièce.



L'outil mixte

Figure (3-7) : chariotage de diamètre 56mm.**Figure (3-8) : la finition de dressage et de chariotage.****5-1-3-/ Le Perçage :**

Le perçage est destiné à faire le trou où se place l'arbre ; ce trou est de 8mm donc pour faire cette opération on monte une foret à centrer dans le mandrin, ce dernier est placé sur la poupée, et ça pour faire le centrage du trou) puis on monte un outil de 7.5mm à la place de la foret à centrer pour faire un trou de 7.5mm

À la fin on monte un alésoir de 8mm pour finir le perçage par un trou de 8mm.

**Figure (3-9) : la roue percée et finie.**

5-2/ Le fraisage :

Après avoir terminé le tournage on passe maintenant au fraisage, ou le fraisage est destiné à usiner les aubes de la roue donc à fin d'accomplir cette tâche on a utilisé une fraiseuse numérique qui s'appelle HEIDEN HAIN.



Figure (3-10) : la fraiseuse à commande numérique « HEIDEN HAIN ».

5-2-1-/ Les démarches suivies dans le fraisage :

Au début on fabrique un dispositif de fixation dans le tour qui s'appel simbleau figure(3-11) pour bien fixer la pièce à la suite on fait le centrage de la pièce figure(3-12) .

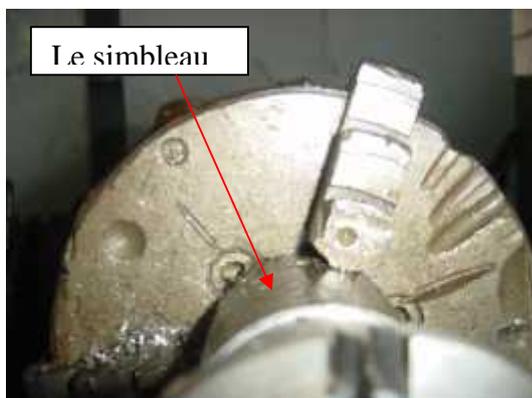


Figure (3-11) : le dispositif de fixation**Figure (3-12) : le centrage de la pièce.**

Dans l'écran de la fraiseuse numérique on injecte toutes les coordonnées du tableau (3-5).

**Figure (3-13) :L'ordinateur de HEIDEN HAIN. Figure (3-14) : l'écran de l'ordinateur.****Figure (3-15) : injection de la valeur x.****Figure (3-16) : injection de la valeur y.**

Puis on observe le passage de l'outil par tous les points enregistrés dans le programme pour que le profil soit complet figure (3-17).



Figure (3-17) : le profil de l'aube dans l'écran de la machine.

Après avoir le profil exact nous avons réglés :

- La vitesse de coupe à 1000tr/mn,
- L'avance à 40mm/mn,
- Les passes à 1mm,
- Le nombre d'aubes à 24 aubes.

Il reste maintenant à régler le diviseur manuel car le diviseur numérique était en panne, ce diviseur manuel est de 1/40 c'est à dire pour que la pièce fait un tour il faut que le diviseur fait 40 tour donc on a divisé 40 sur 24 puis on a divisé le reste qui est 16 sur 40 pour obtenir les intervalles exactes.

Maintenant tout est prêt, il ne reste que lancer la machine et commencer le fraisage par la fraise de 4mm qui est monté sur la porte fraise de telle façon la fraise suit automatiquement les points constituant le périmètre du profil pour avoir l'empreinte juste .

3-2-2-/Les photos illustrant toutes les démarches de fraisage :

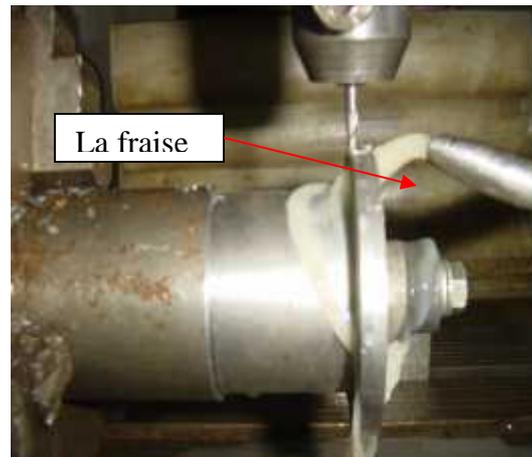


Figure (3-18) : commencement de traçage des empreintes sur la roue.

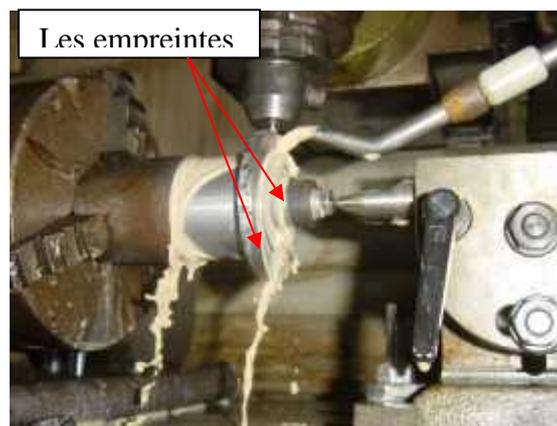


Figure (3-19) : la fin du traçage des 24 empreintes sur la roue.



Figure (3-20) : commencement d'usinage de la première aube.



Figure (3-21) : l'usinage de la première aube est fini.



Figure (3-22) : l'usinage de la huitième aube.



Figure (3-23) : l'usinage de la dix-neuvième aube.



Figure (3-24) : l'usinage de la vingtième aube.



Figure (3-25) : l'opération de l'usinage des aubes est finie.



a- vue de face



b- vue d'arrière

Figure (3-26) : les deux vues de la pièce.

1/ INTRODUCTION :

Comme on a déjà dit dans le deuxième chapitre, le moulage est la technique qui consiste à former un objet à l'aide d'un moule et sans enlèvement de matière.

La méthode la plus utilisée dans l'industrie et spécialement dans l'aéronautique est la méthode de la cire perdue.

Dans ce chapitre nous allons illustrer les étapes nécessaires que nous devons les suivre pour réaliser une pièce avec la méthode précédente ; La pièce qu'on doit l'utiliser comme modèle est la roue de turbine qui était déjà usiné par fraisage.

2/ LES ETAPES DE MOULAGE :

Les principales étapes suivies pour obtenir une roue de turbine avec la méthode de la cire perdue sont :

2-1/ PREPARATION DU PREMIER MOULE :

- Sur une plaque en bois on creuse le diamètre de la pièce de manière que la pièce logée dans ce creux soit au même niveau avec le joint de moulage.
- On coule la résine rouge ou l'élastomère sur la pièce logée dans le creux pour avoir une partie de la pièce surmoulée sur l'élastomère ; l'élastomère doit prendre 10H à 12 heures à l'air libre pour qu'il soit prêt à être démoulé figure (4-1).



Figure (4-1) : la première empreinte sur l'élastomère.

- Entre temps et avec du bois on prépare un caisson qui comporte les mêmes dimensions de la plaque en bois pour l'utiliser à chaque coulé figure (4-2). On loge la plaque du

bois ou la pièce et une partie de cette pièce étaient surmoulé sur l'élastomère dans le caisson on cire-le tous avec une couche de matière isolante appelée cire 103 à l'aide d'un pinceau pour que la matière coulé ne colle pas sur les parois de caisson et la pièce et aussi pour que le démoulage soit facile, cette opération doit se répéter avant chaque coulé.

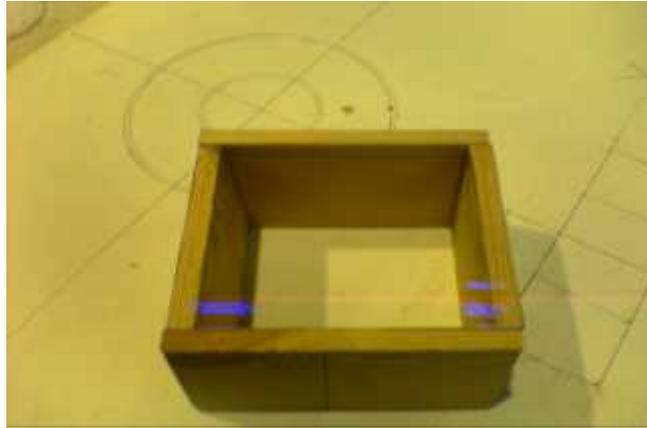


Figure (4-2) : le caisson.

- Pour avoir la deuxième partie du moule en relief, on mélange le mastic avec son propre durcisseur et de l'alcool pour qu'il soit un peu liquide, on le coule dans le caisson.
- Après 20 minutes environ le mastic va se durcir, on le démoule, la deuxième partie du moule est prête figure (4-3).



Figure (4-3) : deuxième partie du moule en relief

- Ces deux parties du moule s'appellent les fausses parties car le retrait de la cire perdue et de l'acier n'est pas pris en considération, pour cela on ajoute sur les parois des

aubes et avec la pâte à modelé un épaisseur de 1 mm ; ces modifications sont faites sur la partie en relief du moule figure (4-4).

- On enlève tous les surplus surmoulés sur cette partie avec une lime pour avoir une bonne finition.



Figure (4-4) : l'ajout de la pâte à modelé.

- On remonte le master qui se compose de caisson plus une partie du moule avec le modèle.
- Pour les jets de coulées on réalise avec du bois un entonnoir de forme conique figure (4-5), utilisé comme descente de coulée. La forme doit être conique pour faciliter l'extraction de l'empreinte, on place l'entonnoir au milieu de la pièce.



Entonnoir

Figure (4-5) assemblage entonnoir caisson

- On fait couler une ou deux fois le mastic avant de couler la résine pour éliminer tous les défauts qui peuvent apparaître sur le moule pour avoir une bonne finition de la pièce finale.
- On mélange 50g de la résine blanche avec 6g de durcisseur propre à cette résine et avec un pinceau propre on met une couche de contact de cette résine sur la partie du moule en relief où se loge la pièce figure (4-6).



Figure (4-6) : mise de la couche de contact (résine blanche).

- Entre temps, on prépare la deuxième résine qui s'appelle la résine grise, on mélange 100g de cette résine avec 100g de son propre durcisseur puis on ajoute une quantité de siure ; on remplit le master avec ce mélange. Cette résine soit prête à être démoulée après 10 à 12 heures figures (4-7).



Figure (4-7) : mise de la résine grise.

- Après le démoulage, on obtient la première partie du moule en résine.
- Pour avoir la deuxième partie du moule, on remonte le master figure (4-8), mais cette fois la première partie du moule est utilisée comme modèle ; on passe avec un pinceau la couche de contact de la résine blanche avec les mêmes ingrédients utilisés dans la première partie du moule figure (4-9), après on remplit le master avec l'autre résine figure (4-10).



Figure (4-8) : le master.



Figure (4-9) : la mise de la couche de contact.



Figure (4-10) : la mise de la résine grise.

- Après durcissement de la résine, on casse le caisson figure (4-11), on sépare les deux parties de la résine figure (4-12), où le modèle est surmoulé pour obtenir le premier moule.

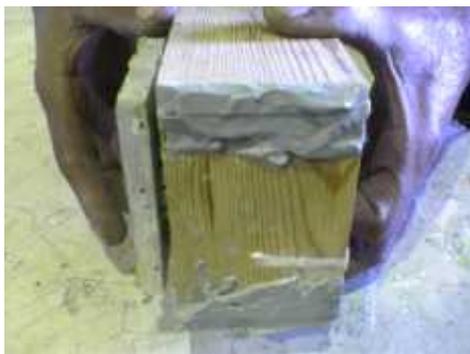


Figure (4-11) : enlèvement du caisson



Figure (4-12) : séparation des deux moules.

On assemble les deux parties du modèle obtenu figure (4-13).

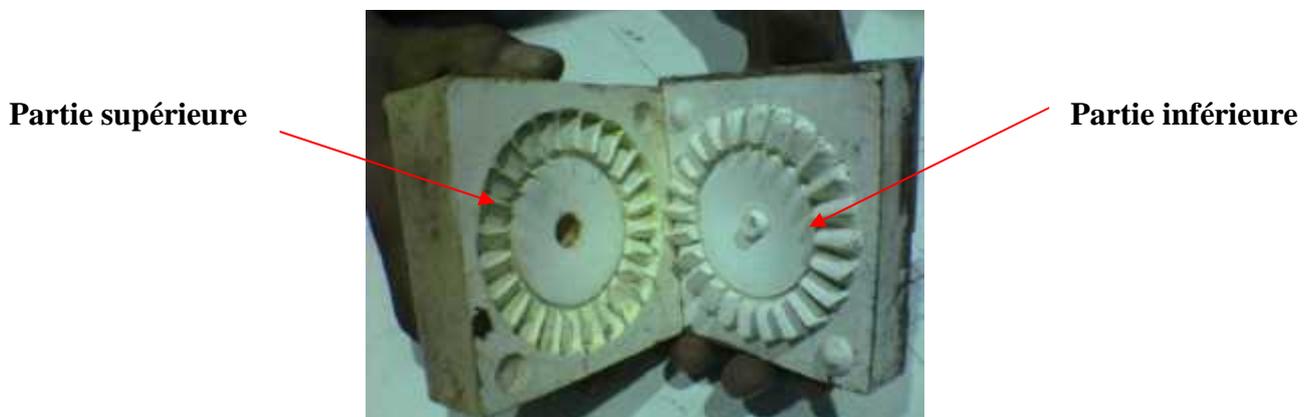


Figure (4-13) : les deux parties du moule.

- On coule la cire perdue dans le moule de résine.
- On attend la solidification de la cire perdue puis on démoule pour avoir le modèle en cire perdue qui sera utilisée pour avoir le deuxième moule en céramique.

2-2/ PREPARATION DU DEUXIEME MOULE :

- On enrobe-le modèle de la cire perdue dans le céramique liquide (le réfracteur) pour former le deuxième moule.
- Une fois le céramique durcit le deuxième moule soit prête à l'utilisation, il peut résister à la haute température du métal fondu.
- On chauffe le deuxième moule jusqu'à ce que la cire s'évapore complètement et disparaît.
- L'espace vide laissé par la cire perdue est totalement conforme au modèle.
- On fait fondre l'acier dans un four à une température de 1600°C puis on verse le métal fondu dans le deuxième moule pour occuper l'espace laissé par la cire perdue.
- On laisse le temps suffisant pour le refroidissement et le durcissement du métal fondu.
- On casse le moule pour sortir la pièce brute.
- On enlève le jet de coulée, et on nettoie la pièce.

3/ CONCLUSION :

Le manque des moyens et du temps nous ont empêché à accomplir tout le procédé du moulage.

Nous avons arrivé à la réalisation du moule avec la finition souhaitée et à partir duquel nous pouvons usiner une série de roues identiques à celle obtenue par le procédé du fraisage.

Conclusion générale

Le travail que nous avons effectué nous a aidé à approfondir et améliorer nos connaissances théorique et pratique dans plusieurs domaines: métallurgie, l'usinage (fraisage, tournage, électroérosion) et moulage, et il a contribué à la bonne maîtrise de notre formation en aéronautique et au domaine de la construction mécanique.

Dans ce modeste travail, on a confronté à plusieurs difficultés, comme la difficulté d'accès aux structure industrielles, la non disponibilité des matériaux et aux dimensions réduites de la turbine comme l'épaisseur des aubes qui est trop petit et qui a causé une difficulté à l'usinage par fraisage et à la réalisation de premier moule en moulage.

Ces obstacles ont causé une perte de temps qui nous a empêché de réaliser la deuxième partie de moulage qui est le modèle en cire perdu et le moule en céramique dans lequel l'acier est coulé.

Enfin nous espérons que ce modeste travail peut servir comme outil pédagogique pour les étudiants et que d'autres étudiants peuvent suivre la tâche pour réaliser la partie de moulage restante qu'on a pas pu la terminé.