

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université SAAD DAHLEB de BLIDA
Faculté des sciences de l'ingénieur
Département Aéronautique



وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

جامعة سعد دحلب البليدة
كلية علوم الهندسة
دائرة علم الطيران

*MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLÔME
D'ÉTUDES UNIVERSITAIRES APPLIQUÉES EN AÉRONAUTIQUE*

OPTION : PROPULSION

Thème :

Réalisation d'aubes compresseur par procédé de moulage en coquille

Encadré par :

MR: BENTRAD HOCINE

Réaliser par :

MESSAOUDEN TAHAR

Promotion 2007-2008

REMERCIEMENTS

Remerciement

Au terme de cette étude, pour la réalisation de mon mémoire.

*Je remercie dieu de m'avoir donné la volonté et le
Courage d'achever mon travail dans des bonnes conditions.*

*Je tiens a exprimer mes vifs remerciements a mon
Promoteur Mr: 'BENTRAD HOSSINE' pour ses conseils
et ses orientations qui mon données une entière satisfaction sans
Oublier toute l'équipe de l'atelier de propulsion.
et particulièrement Mr: MOKHTARAI DJAMEL*

*Un chaleureux remerciement à tout le personnel
ALFEL (El-Harrach), particulièrement a l'équipe de l'atelier
modelage Générale et a MR BOURAOUI ABED EL LATIF
De l'aide que m'apporté. Et aussi a Mr: HASSEIN et
MOUHAMED le modeleur.*

*Je suis éternellement reconnaissant à ceux et celles de l'aide
Qui m'ont apporté, avec toute ma gratitude.*

Tahar

Dédicaces

Je dédie ce mémoire :

*A mes chers parents bien aimés pour tout leur sacrifice et
Qui mon soutenu pendant ce long parcours
A mon frères Ryad*



*Spécialement à l'âme de ma grande mère Mama Layla
Et à ma autre grande mère MANI, que j'aime très fort
A tous mes oncles et mes tantes spécialement
Ainsi qu'à tous mes cousines et cousins adorés
A tous mes amis : MAAMAR, Yacine, BILEL, MAHREZ ET MESKANJI,
SAID, ANIS, RABAH, LAZHER
.ET BIEN SUR
A tous les collèges de propulsion groupe 2 et leurs profs
Et je le dédie aussi à tous ceux qui méritent mes respects*

TAHAR.....

Sommaire:

INTRODUCTION GENERALE	1
Chapitre I : Le compresseur	2
1. Introduction	2
2. Le compresseur	2
3. Compresseur Centrifuge	3
3-1 Principe	3
3-2 Fonctionnement	4
4. Compresseur Axial	5
4.1 Type des compresseurs axial	6
a) Compresseur simple corps	6
b) Compresseur double corps	7
4.2 Définition d'un étage compresseur	8
5. Réalisation des compresseurs	10
5-1- Stator :	10
a) Aubages de pré rotation :	12
b) Stator à calage variable :	12
c) Vanne de décharge :	13
5-2- Rotor :	13
a) Description :	13
b) Aubes :	14
c) Fixation ailettes/disque :	14
❖ Puissance réelle fournie par le compresseur ou fluide	15
❖ Rendement du compresseur :	16
6. Vrillage d'une ailette rotor :	16
7. Le pompage :	17
❖ Cycle de pompage :	17
❖ Causes de pompages	17
8. Courbes caractéristiques de fonctionnement :	18
8-1- Généralités :	18
8-2- Ligne d'adaptation :	19
8-3- Ligne de pompage :	19
8-4- Limitations dues à la chambre de combustion	19
9. Efforts sur le compresseur :	19
10. Comparaison entre compresseur axial et Centrifuge :	20
10.1- Centrifuge	20
a) avantage :	20
b) inconvénients	20
10.2- Axial :	20
a) avantage :	20
b) inconvénients :	20

Chapitre II : Fonderie

I Principes de moulage	21
2 Méthode de moulage	21
▪ Moulage en sable.....	21
▪ Moulage de précision.....	22
▪ Moulage de coquille.....	22
3/ Méthode de moulage	23
A) Moulage en moule permanent	23
A.1/ type de moule en moule non permanent.....	23
1.MOULAGE AVEC MODÈLE PARTIEL	24
1.1. Moulage par troussage.....	24
1.2. Moulage avec modèles carcasses.....	24
1-3. Moulage avec modèles squelettes.....	25
Caractéristiques.....	25
2. MOULAGE AVEC MODÈLE PERMANENT	25
2-1. Dépouille.....	26
2-2. Modèles.....	26
❖ Modèles enlevés.....	27
❖ Modèles légers.....	27
❖ Modèles soignés.....	27
2-3. Fabrication du moule.....	27
2-4. Caractéristiques.....	28
3. MOULAGE AVEC PLAQUE-MODÈLE..	28
3-1. Classes des modèles.....	28
3-2. Types de plaque-modèle.....	29
❖ plaque-modèle simple.....	29
❖ Plaque-modèle double.....	29
❖ plaque-modèle double face.....	30
❖ plaque-modèle réversible.....	30
3-3. Moulage en châssis.....	31
3-4. Moulage en motte.....	32
3-5. V-process.....	32
Principe.....	32
Avantage.....	32
4. MOULAGE AVEC NOYAUX	32
❖ Conditions d'emploi.....	34
4-1. Moulage partiel avec noyaux.....	35
4-2. Moulage intégral avec noyaux.....	36
❖ Comparaison de gammes de moulage.....	37
5. MOULAGE EN SABLE ARGILEUX	38
5-1. Moulage en sable à vert.....	38
a) Le moulage à la main.....	38
b) Le moulage mécanique.....	39
5-2. Moulage en sable à vert séché, grillé, flambé.....	39
5-3. Moulage en sable étuvé.....	39
6. MOULAGE EN SABLE AGGLOMÉRÉ CHIMIQUEMENT	39
7. MOULAGE EN SABLE SANS LIANT	40
7.1 Moulage par dépression dans le sable (moulage sous vide).....	40
❖ Gamme de fabrication.....	40
❖ Avantages.....	41

7.2 <u>Moulage avec modèle gazéifiable (lost foam)</u>	42
❖ <u>Principe</u>	42
❖ <u>Avantage</u>	42
8. MOULAGE PAR CENTRIFUGATION.....	43
❖ <u>Caractéristiques</u> :	43
9. MOULAGE AVEC INSERTIONS.....	44
❖ <u>Caractéristiques</u>	44
10. MOULAGE EN CARAPACE.....	45
❖ <u>Cycle de moulage</u> (avec machine à retournement).....	45
11. MOULAGE EN MOULE CÉRAMIQUE.....	46
❖ <u>Durcissement du moule</u>	46
12. MOULAGE AVEC MODELE NON PERMANENT.....	48
❖ <u>Conditions générales d'emploi</u>	49
❖ <u>Tableau des possibilités technique</u>	51
A.2/ <u>Outillage</u>	53
1. <u>Les chassis</u>	53
2. <u>MODÈLES ET PLAQUES-IMODÈLES</u>	54
2-1 <u>La planche à trousser</u>	54
2-2 <u>La carcasse et le squelette</u>	54
2-3 <u>Le modèle destructible</u>	54
2-4 <u>Le modèle au naturel</u>	54
2-5 <u>Le modèle monté sur plaque</u>	55
2-6 <u>La plaque-modèle monobloc</u>	55
3. <u>MACHINES A MOULER</u>	56
3-1 <u>Serrage sous basse pression</u>	56
3-2 <u>Serrage sous moyenne et haute pression</u>	57
4. <u>LES BOITES A NOYAUX</u>	58
5. <u>MACHINES DE NOYAUTAGE</u>	58
b) <u>Moulage en moule permanant</u>	59
1. <u>Moule par coquille</u>	59
❖ <u>Principe du procédé</u>	60
3-1 <u>Mise en œuvre</u>	60
3-2. <u>Avantages</u>	60
3-3. <u>Propriétés des matériaux</u>	61
2. <u>Moulage basse pression</u>	61
2.1- <u>Mise en œuvre</u>	61
2-2.- <u>Intérêt du procédé</u>	62
2.3- <u>Avantages</u>	62

c) Caractéristique et choix des alliages de fonderie	62
1. Généralité	62
2. ÉLABORATION DE L'ALLIAGE	63
3. COULABILITÉ	63
3-1. Aptitude de l'alliage de fonderie à remplir l'empreinte du moule	63
3-2. Essai de coulabilité	63

Chapitre III : Etude Technologique

1. Introduction	64
2. Processus technologique de fabrication de la pièce	65
2.1. Modelage	66
2.2. Disposition de la pièce dans le moule	66
2.3. Le plan de joint	67
2.4. Surépaisseur d'usinage	67
2.5. Les dépouilles	67
2.6. Le retrait	68
2.7. Choix du procédé de moulage	68
2.8. Choix du procédé de serrage	68
2.9. Choix et dimensions du châssis	69
3. Choix et calcul des systèmes de coulée et d'alimentation	69
3.1. Choix du système de coulée et d'alimentation	69
A. Entonnoir	69
B. Descente de coulée	70
C. Chenal	70
D. Attaques de coulée	71
E. Les événements	71
F. La masselotte	71
4. Calcul de système de coulée et d'alimentation	72
A. Dimension de la section de l'attaque	73
B. Dimension de la section du chenal	74
C. Dimension de la section de la descente	74
D. Dimension de l'entonnoir	75
E. Détermination du temps de remplissage	76
F. Conclusion	76

Chapitre 4 :

1. introduction.....	77
2. la conception sur ordinateur.....	77
3. Etapes de réalisation.....	78
3-1 études de la pièce.....	78
3-2 Conceptions sur ordinateur.....	80
3-3 Confection d'un modèle.....	81
a) Réalisation sur bois (le modèle)	81
B) coulée en fonte	88
3-4 Procédé de coulage	90
a) Préchauffage de la coquille.....	90
b) Elaboration du métal (AL-CU).....	91
c) coulée du métal dans la coquille	91

INTRODUCTION GENERALE

Les moteurs à réaction sont des moteurs à cycle thermique constitués d'entrées d'air compresseur, de chambres de combustion, de turbines et parfois d'une cuillère d'injection.

Un groupe d'étudiants dont j'ai fais partie a voulu étudié de près la constitution et les caractéristiques aéronautique d'un moteur.

Ce dernier, entreposé dans un atelier du département aéronautique de notre école a fait l'objet d'une étude; après observation nous avons constaté que la partie compresseur constituée de 384 pièces était dans un état défectueux.

Le présent travail a consisté à la reproduction de ces aubes, en utilisant un métal plus résistant et ce, par procédé de moulage en coquille.

CONCLUSION

Cette étude m'a permis de se rapprocher des procédés de fonderie et d'enrichir mes connaissances sur le plan théorique que pratique.

J'espère que ce moule, servira d'outil pédagogique aux futurs techniciens et leur donne le moyen de réaliser des travaux pratiques, beaucoup plus fructueux.

Aussi, je suggère aux futurs candidats d'insister sur la méthode de serrage du moule, qui leur permettra d'améliorer son système et ce, pour une qualité du moulage (bavures) et enfin un gain de temps.

1. INTRODUCTION

Tous les moteurs équipant les avions civils sont des moteurs thermiques. La combustion du carburant y est essentiellement utilisée pour accélérer une veine d'air.

La poussée fournie par le moteur n'est autre que la force dirigée vers l'avant résultant de cette accélération, force transmise par les attaches à la structure de l'avion.

Il existe trois types de moteurs à réaction, les turbo réacteurs, les turbopropulseurs et les turbofan, 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 le combustible présent dans la chambre. Les gaz de combustion entraînent alors des turbines qui actionnent le compresseur et le rotor du moteur.

Les éléments de base d'un moteur à réaction sont :

- Le compresseur
- La chambre de combustion
- La turbine
- La tuyère
- La gear box

On s'intéresse dans ce mémoire au Compresseur et ses éléments.

2) Le compresseur

C'est le premier élément après l'entrée d'air il a pour rôle d'augmenter la pression de l'entrée à la sortie pour garantir un bon mélange air-carburant dans la chambre de combustion pour récupérer une énergie utile selon un cycle thermodynamique.

Il est constitué d'une partie mobile appelée **ROTOR** et d'une partie fixe dite **STATOR**. Le rôle du rotor est de fournir de l'énergie cinétique au fluide, le stator transformant cette énergie en énergie de pression.

Il existe différents types de compresseur

- le compresseur centrifuge
- le compresseur axial (simple corps et double corps)

3) Compresseur Centrifuge

Le compresseur centrifuge est constitué de deux éléments: une roue mobile et un redresseur radial plus un redresseur axial.

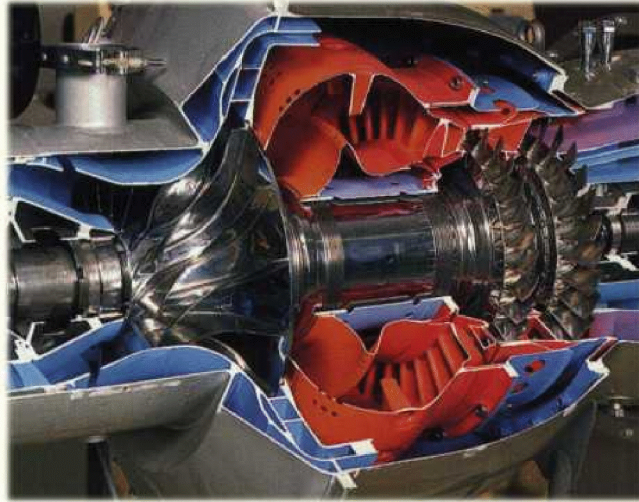


FIG (1-1): Ecorché d'un réacteur: compresseur centrifuge, chambre de combustion annulaire, turbines.

❖ Principe:

L'air est admis dans le compresseur suivant l'axe et sera rejeté radialement puis ramener vers la chambre de combustion. Le rouet est généralement obtenue par procédé de moulage très avancée il est composé de deux partie ou d'un seul bloc.



FIG (1-2): prise de vue d'un compresseur centrifuge

L'entée de la roue est appelé l'aspirateur tandis que la roue de sortie est dite l'extracteur. La roue comporte un ensemble d'aubes formant un espace divergeant l'un à coté de l'autre.

Généralement un compresseur centrifuge tourne a une vitesse atteignant les **4000tr/min** selon le diamètre il traite une quantité d'air de l'ordre $\leq 10 \text{ KG/ S}$ tandis que le rapport de compression est d'environ $\sigma = [0,68—0,78]$ au maximum.

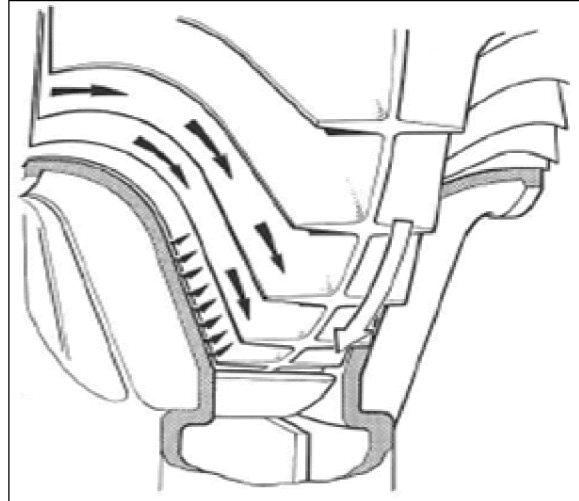


FIG (1-3):écoulement d'air dans le diffuseur

Le diffuseur est un élément fixe, lui aussi contient des aubes formant un divergeant ou il peut être sous une forme de cloche divergente aussi. Elle est placée juste à proximité de la roue. Tant dis que le redresseur axial est une canalisation en coudé permettant de réaliser la jonction entre le compresseur et la chambre de combustion.

❖ Fonctionnement:

La roue en tournant a grande vitesse induit de l'air en continue et lui procure une énergie cinétique servant à augmenter son enthalpie et son énergie de pression du fait que les aubes formant un canal divergeant entre elles.

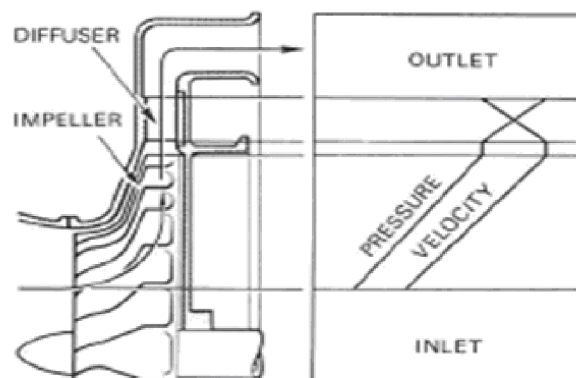


FIG (1-3):rapport vitesse, pression dans le compresseur centrifuge

Aussi une fois dans le diffuseur l'air sera décéléré à 90 m/s où on assiste à une augmentation de pression statique. Généralement la compression est partagée en moitié, une partie dans le rouet et une autre dans le diffuseur.

4) Compresseur Axial:

Un compresseur axial est un compresseur d'ont l'écoulement parcourt la machines parallèlement à l'axe de rotation de l'entrée à la sortie.

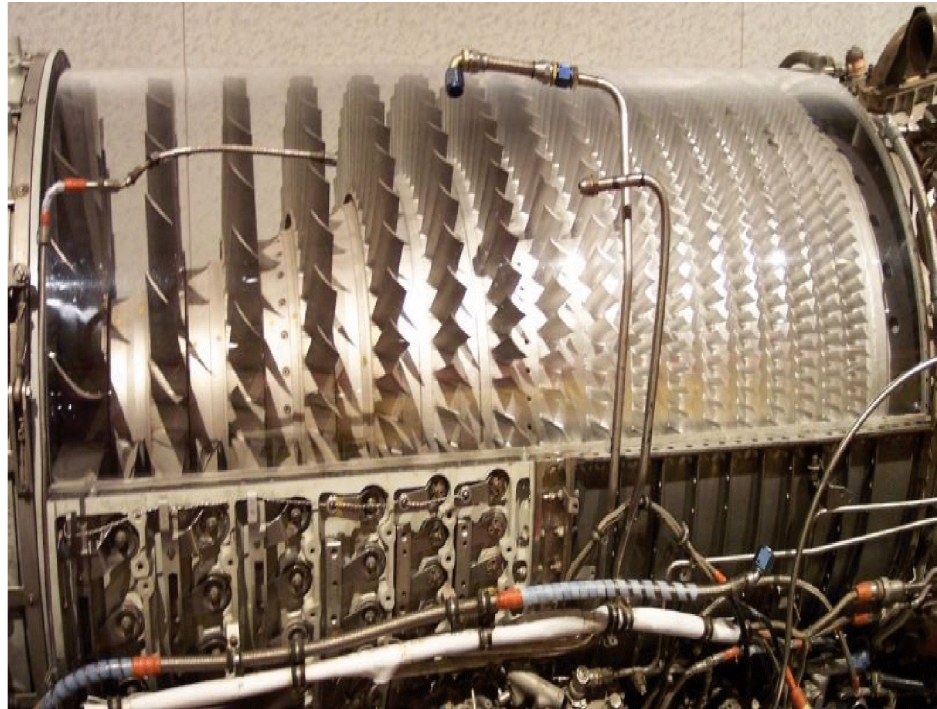


Fig. (1-4.)-Compresseur axial GE-J79

Similairement au compresseur centrifuge, il est constitué d'une partie mobile et d'une partie fixe, généralement le compresseur axial est composée d'une succession de grilles qui commence par une mobile suivit d'une fixe, L'ensemble de grille mobile et fixe forme un étage du compresseur.

La succession d'étages peut aller dans un turboréacteur jusqu'à 10 étages ou plus. La compression augmente d'un étage à l'autre, dans la majorité des cas, ce dernier réalise un taux de compression de [1,23--2], d'une part et d'autre part, on constate que la section diminue de l'entrée vers la sortie.

Les compresseurs axiaux au départ offraient des rendements pauvres, et de nombreux articles disaient qu'il serait impossible de voyager avec un avion équipé d'un réacteur. Cela changea lorsque Alan Arnold Griffith écrit un article ce nommant **Théorie aérodynamique pour la conception d'une turbine** ("An Aerodynamic Theory of Turbine Design") en 1926, notant que le mauvais rendement des compresseurs venait de la géométrie plate des aubes qui provoquait un décrochage aérodynamique (**Pompage**). Il prouva qu'avec l'utilisation d'aubes profilées, le rendement augmentait, au point de constater que le voyage par avion équipé d'un réacteur devenait possible. Il conclut son article avec un diagramme d'un moteur équipé d'une deuxième turbine qui était connectée à une hélice.

4.1 TYPE DES COMPRESSEURS AXIAL

Il ya différents type de compresseurs axial :

a) Compresseur simple corps

L'ensemble des étages forment un seul bloc et porté sur un même arbre unique avec l'ensemble turbine.

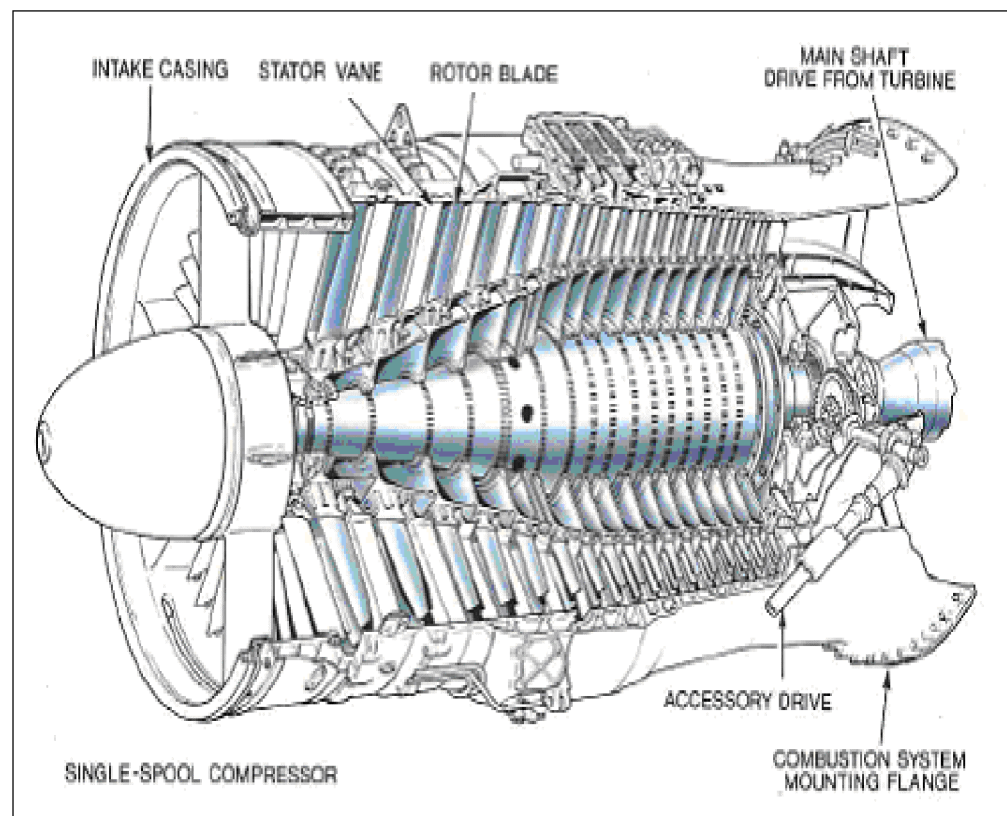


Fig. (1-5.)-Compresseur axial simple corps

Il est constitué de :

- Un rotor formé par un empilage de disques à la périphérie desquels sont fixées des ailettes, deux disques consécutifs sont séparés par virole,
- Un stator formant le carter du compresseur et à l'intérieur duquel implantée des anneaux recevant des ailettes,
- Chaque disque du rotor équipé de ses aubes forme une grille d'aubes rotor,
- Chaque anneau du stator avec ses ailettes constitue une grille d'aubes stator.

b) Compresseur double corps

L'ensemble est composé de deux compresseurs mono-corps montés en série, chacun étant entraîné par son ou ses étages de turbine. Le rotor constitué des derniers étages de l'ensemble est appelé compresseur HP (Haute pression), celui situé en amont est appelé compresseur BP (basse pression).

Cette disposition permet d'obtenir deux vitesses de rotation différentes surtout dans les bas régimes.

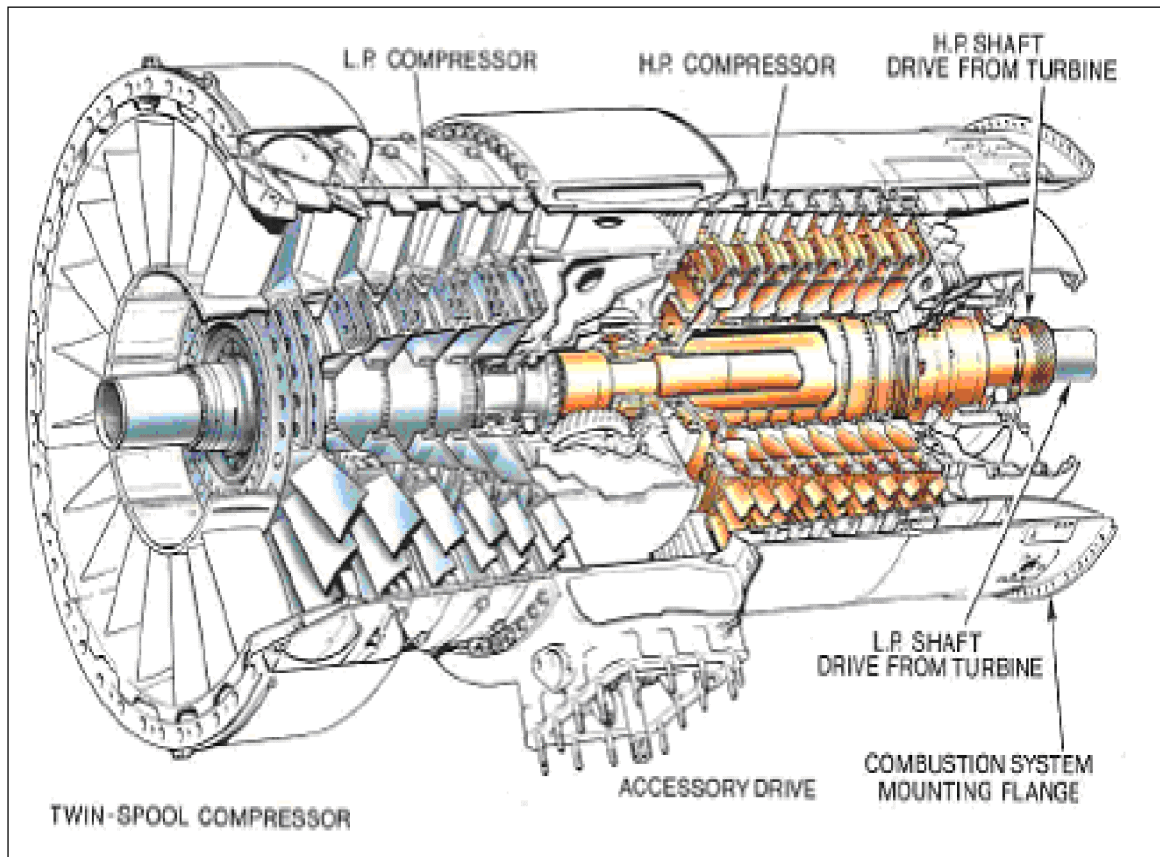


Fig. (1-6)-Compresseur axial double corps

Bien que de conception et d'usinage plus délicats (donc plus onéreux) le compresseur double corps présente les avantages suivant :

- Démarrage du réacteur plus facile car on entraîne en rotation simplement le mobile HP, le mobile BP étant entraîné par l'écoulement du fluide au niveau des turbines BP,
- Accélérations et décélérations plus rapides car moins d'inertie,
- Poussée de ralenti plus faible (Voir stabilité aux faibles régimes),
- Meilleur rendement de compression aux faibles régimes.

4.2 DEFINITION D'UN ETAGE COMPRESSEUR

Un étage de compresseur axial est constitué d'une grille d'aubes rotor suivie d'une grille d'aubes stator.

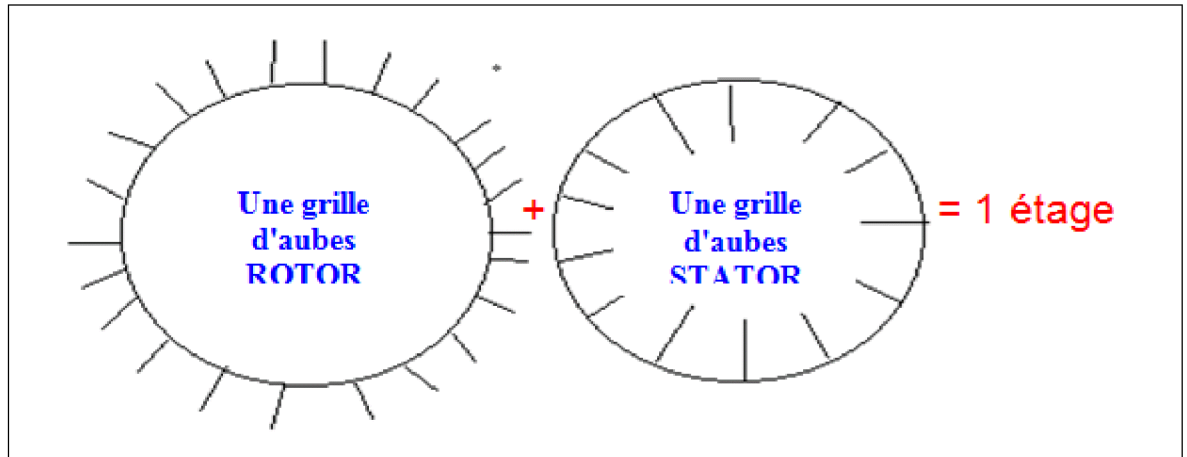


Fig. (1-7)-constitution d'un étage

Un compresseur commence toujours par un rotor plus précisément par une grille d'aubes rotor, les aubages directeurs (ou aubages de pré rotation).

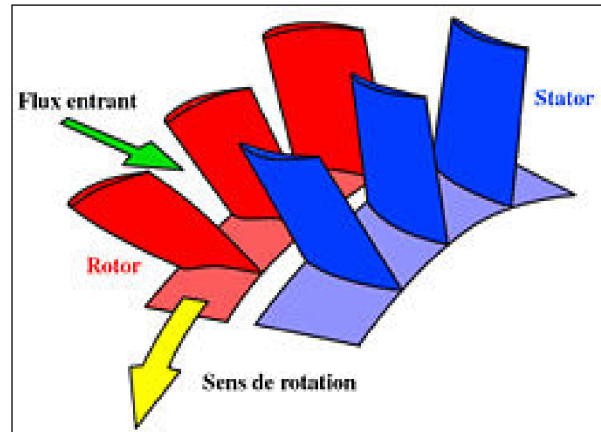


Fig. (1-8)-fonctionnement d'un étage

La section entre rotor et stator est plus grande à la rentrée du compresseur qu'à la sortie. Cela vient d'un choix de départ; en effet, écrivons l'équation de conservation du débit masse entre les sections 1 et 2 relatives à l'entrée et sortie compresseur. Nous avons:

$$\rho_1 \cdot S_1 \cdot V_1 = \rho_2 \cdot S_2 \cdot V_2 \quad (1-1)$$

La compression entraîne $\rho_2 > \rho_1$. Pour des raisons de construction (profil des ailettes) le constructeur maintient la vitesse axiale d'écoulement constante; nous avons alors $V_1 = V_2$, l'équation n'est alors satisfaite qu'avec $S_1 < S_2$.

Afin d'obtenir cette variation de section, plusieurs solutions sont réalisées; parmi elles ont cite:

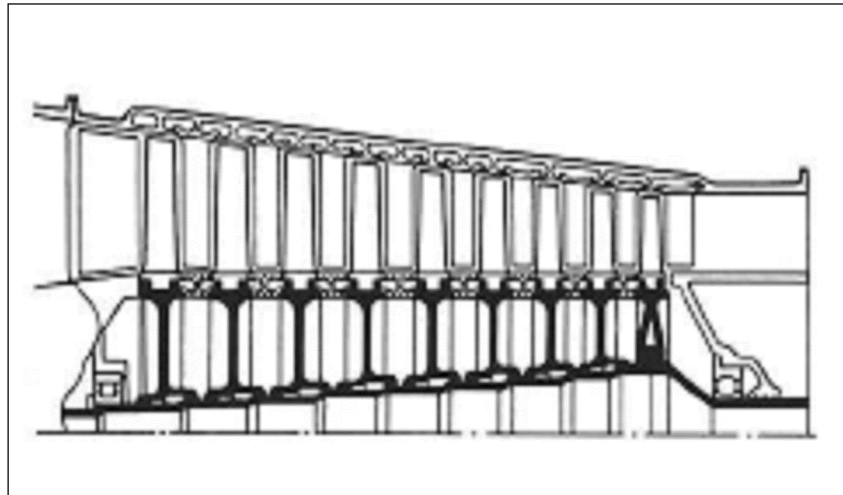


Fig. (1-9)- Rotor et stator Cylindro-conique (Solution Hybride)

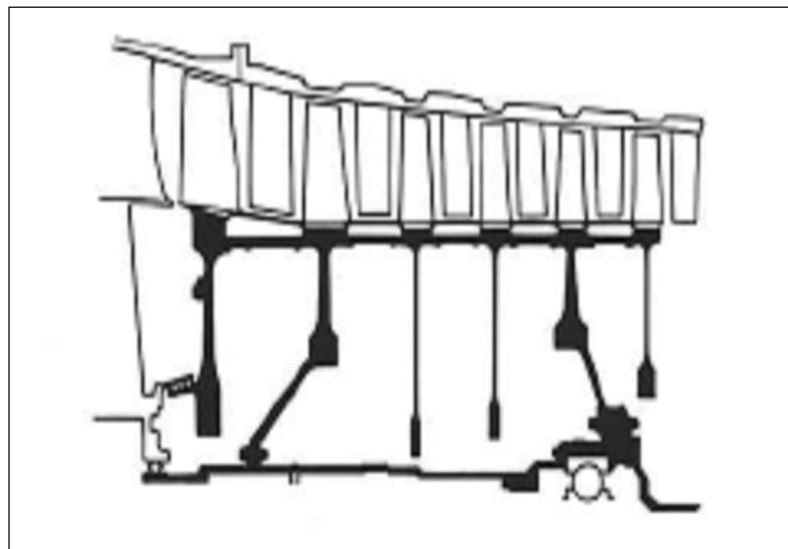


Fig. (1-10)-Rotor cylindrique et stator conique

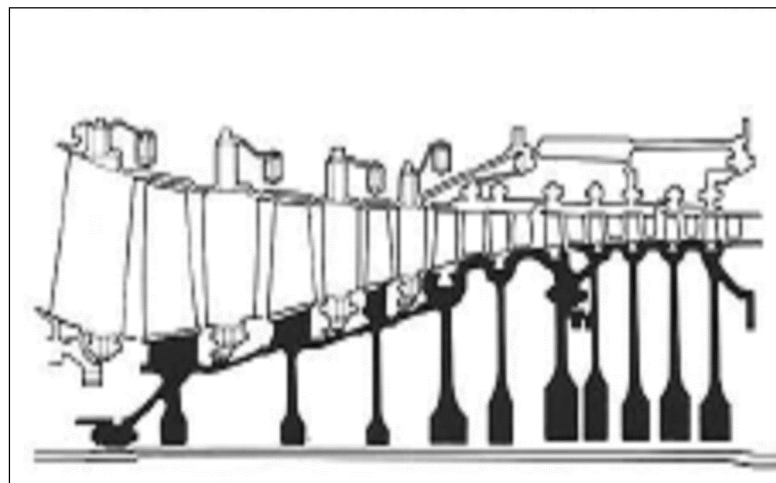


Fig. (1-11)-Rotor conique et stator cylindrique

5) REALISATION DES COMPRESSEURS

5-1-Stator:

Le stator se présente sous la forme de deux demi-coquilles, constituant le carter compresseur et recevant à l'intérieur les ailettes stator.

Le carter est en général en alliage d'aluminium ou de magnésium et est obtenu par fonderie.

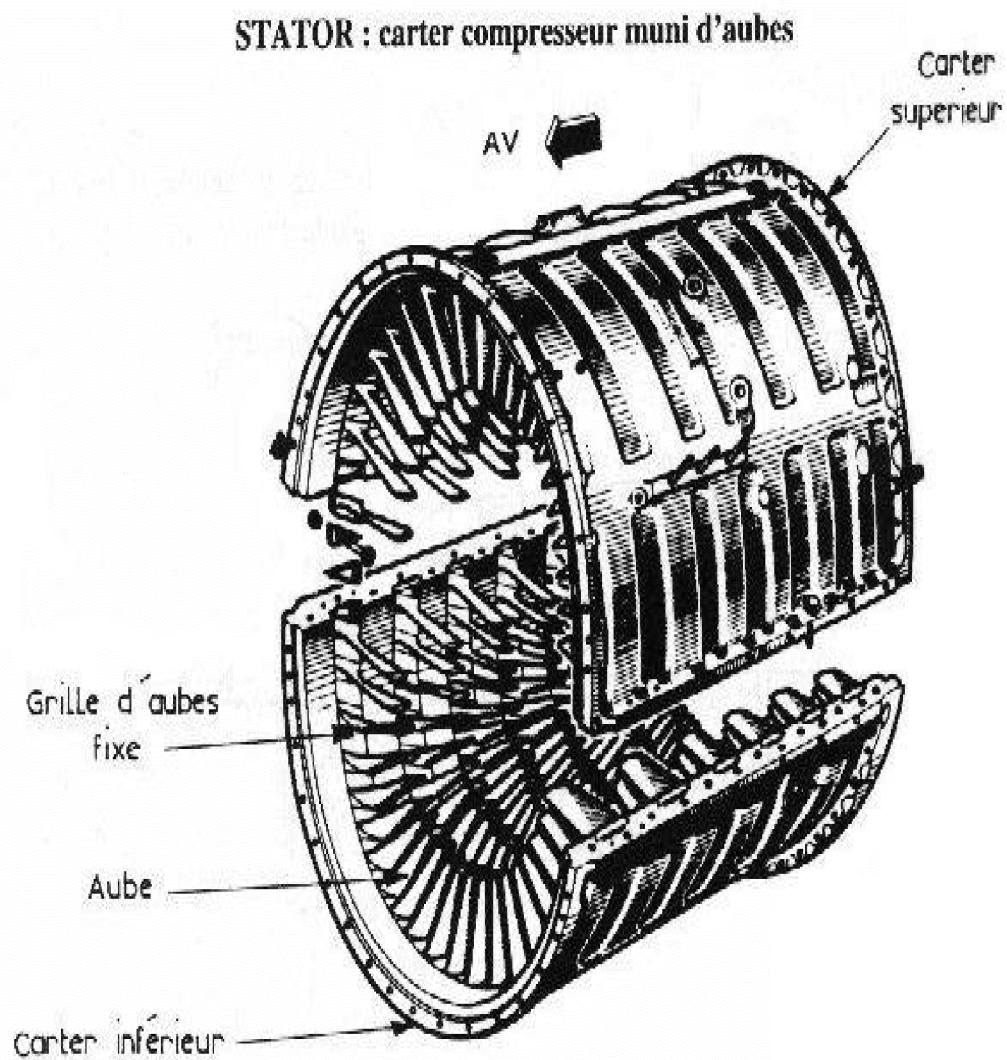


Fig. (1-12)-carter compresseur (demi-stator)

Les ailettes des premiers stators sont en général en alliage d'aluminium ou titane, les derniers en acier ou en titane. Les ailettes sont montées dans des anneaux généralement en acier (Afin de faciliter l'interchangeabilité et éviter les détériorations de contact de deux matériaux différents); les demi-anneaux étant rapportés dans des logements appropriés dans les demi-stators.

En général, la fixation ailette/glissière est du type queue d'aronde (fig. 1) ou en T (fig. 1). Du fait de la longueur des ailettes des premiers stators, ceux-ci sont souvent rassemblés trois par trois et soudés sur une virole, ou rassemblés par demi-stator comme une montre. Ceci est important, car en cas de rupture, les deux morceaux de l'ailette restent fixes, l'un dans le carter, l'autre dans la virole intérieure, évitant des dégâts plus importants.

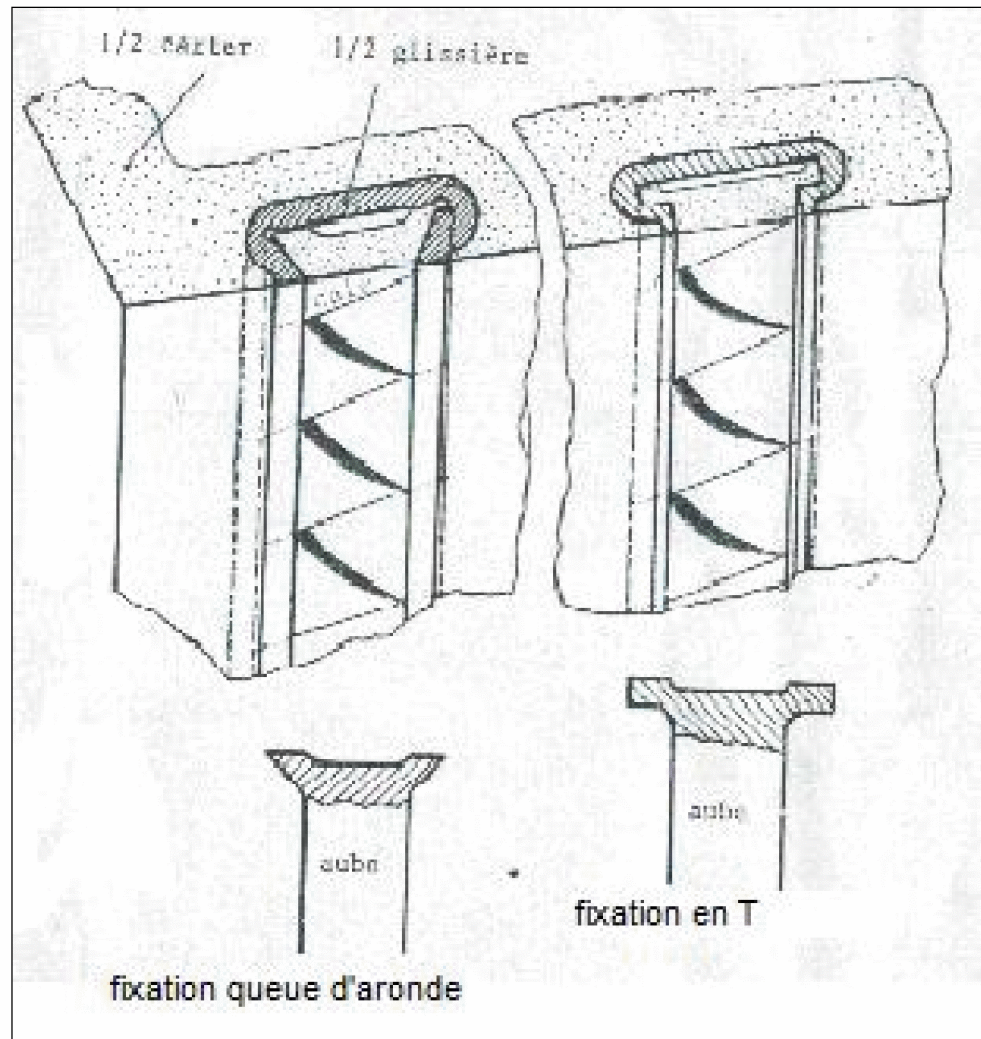


Fig. (1-13)-fixation ailettes glissière

Le compresseur axial est constitué des éléments suivants :

a. Aubages de pré rotation:

Ces aubages, comme nous l'avons vu, constituent une grille interposée entre la manche à air et le premier étage rotor, et équipe généralement tous les moteurs simple flux.



Fig. (1-14) --aubes Fan

Ils doivent résister aux impacts (glace, graviers, oiseaux) les aubages sont en acier inoxydable.

b. Stator à calage variable:

Utilisés sur les moteurs double flux, ceux-ci remplacent l'aubage de pré rotation (Un double flux débute toujours par le fan (rotor)).

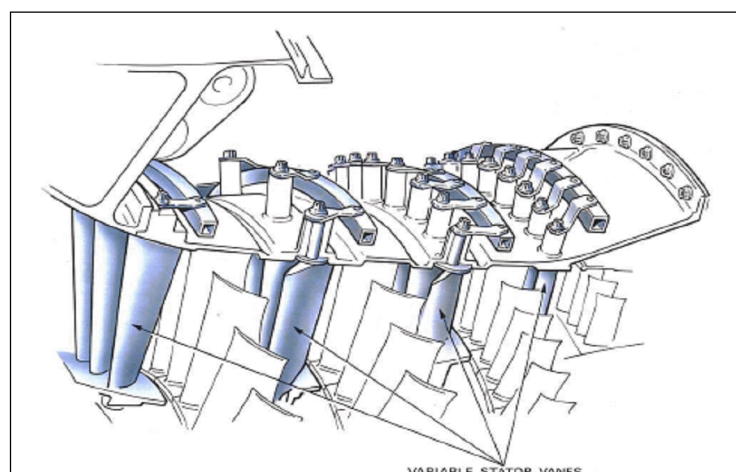


Fig. (1-14) --stator à calage variable

Leur positionnement est en fonction du régime moteur et est commandé par la régulation.

c. Vanne de décharge:

L'air est prélevé au niveau des ailettes. Si elles sont assez épaisses, elles sont alors creusées et rejettent à l'extérieur l'air dans un collecteur (en général, le carter lui-même). ce collecteur est obturé par une vanne "tout ou rien", la fermeture étant assurée par un tiroir en carbone commandé par la régulation.

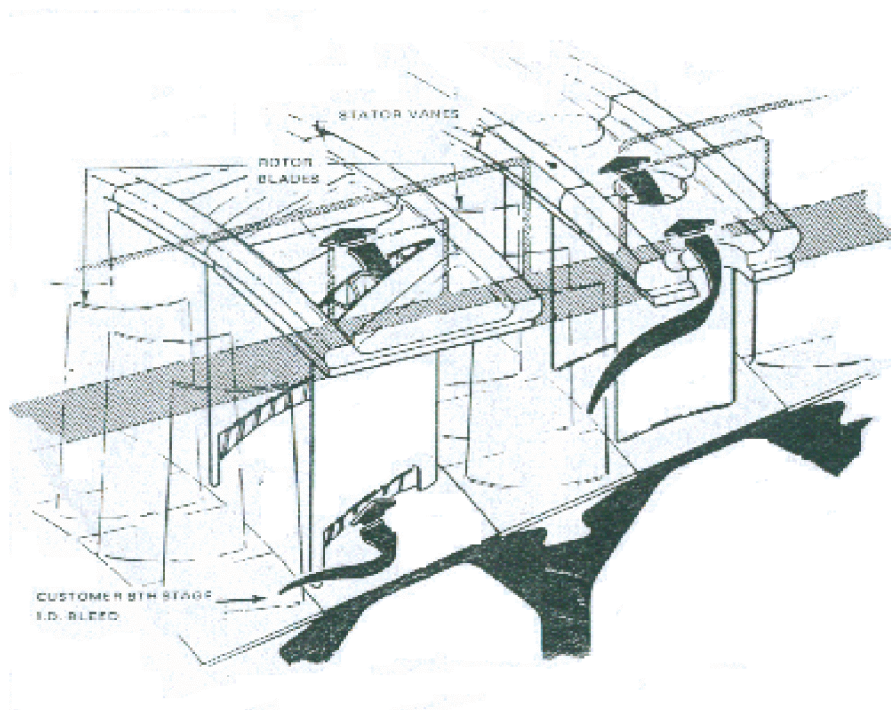


Fig. (1-15) – vannes de décharge

Lorsque les ailettes ne sont pas creusées, le prélèvement en regard de ceux du carter. On profite souvent de la réunion de plusieurs aubages stators sous forme de secteur pour ménager entre les ailettes un orifice d'extraction.

5-2-Rotor:

a. Description:

Le rotor est constitué d'un empilage de disques recevant à leur périphérie, les empreintes de fixation des ailettes .chaque disque est séparé par une entretoise, l'étanchéité entre les ailettes stator et le rotor est assurée par une virole. Le disque amont supporte généralement l'arbre qui tourillonne par l'intermédiaire du roulement avant dans le carter d'entrée d'air.

Le disque arrière reçoit quant à lui, le roulement arrière qui se centre dans le carter chambre de combustion. En général, le tourillon arrière est équipé d'un arbre cannelé externe permettant la liaison avec l'arbre de turbine par l'intermédiaire d'un manchon d'accouplement.

b. Aubes:

En général, les ailettes sont de la même nature que les disques sur lesquels elles sont fixées. Les disques sont soit en acier spécial (Z 12 C 13 ou A 286) ou en titane. On rencontre aussi des montages disque acier spécial et aubages en alliage aluminium (AU 2 GN).

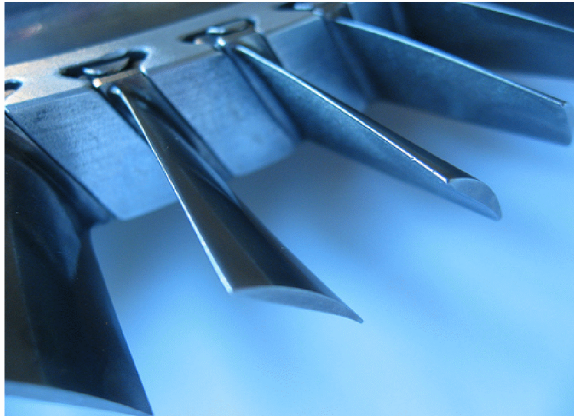


Fig. (1-16.)-Aubes ROTOR

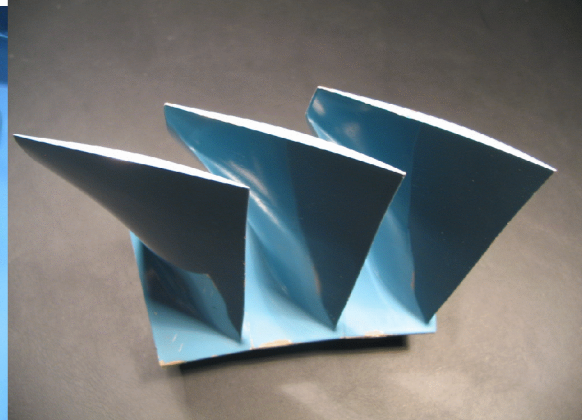


Fig. (1-17.)-Aubes STATOR

c. Fixation ailettes/disque:

Les aubes sont fixées sur la roue mobile par différents moyens, une aube est représentée par une racine «**hub**» et un sommet «**Tip**». La fixation se réalise sur la roue pour éliminer le mouvement avant, arrière, haut, bas et la rotation.

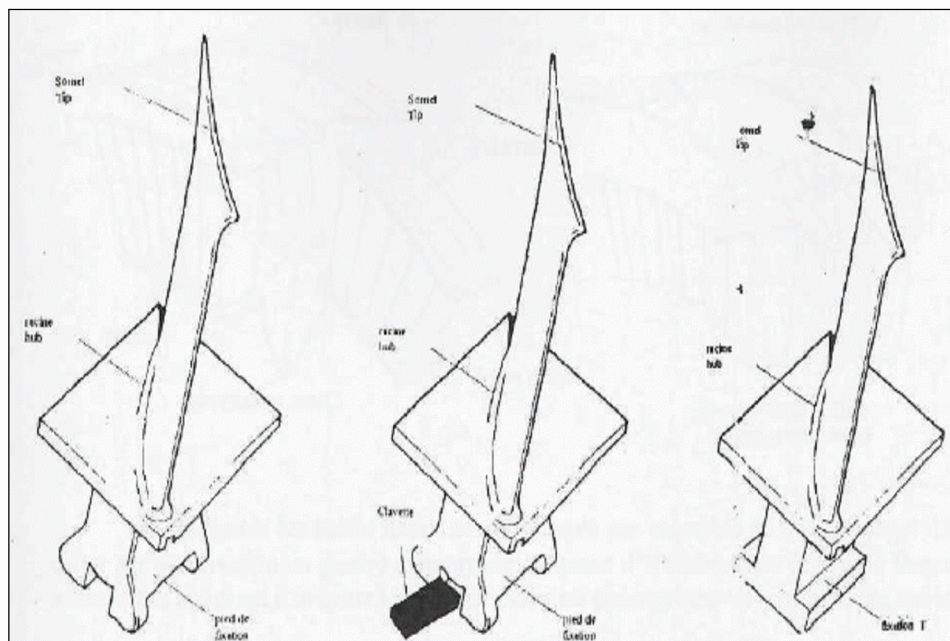


Fig. (1-18.)-différents type de fixation aubes compresseur

Dans le rotor les aubes sont fixées une à côté de l'autre. Les pieds de fixation sont en **queue d'aronde** en **T** en **peigne** en **sapin** ou en **baguette**.

On rencontre plusieurs types de fixation qui sont :

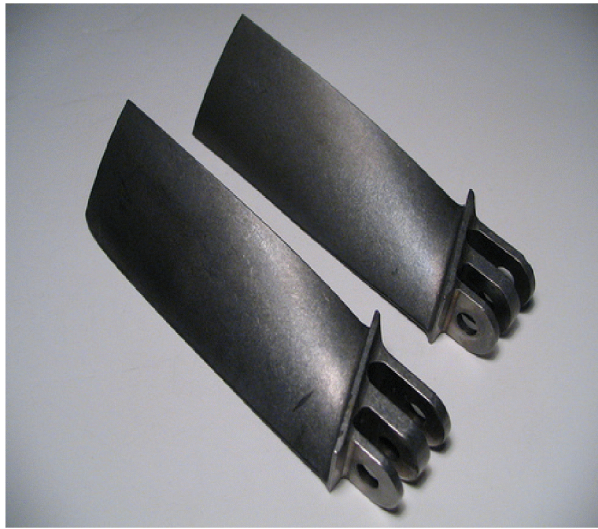


Fig. (1-19)-Fixation en peigne

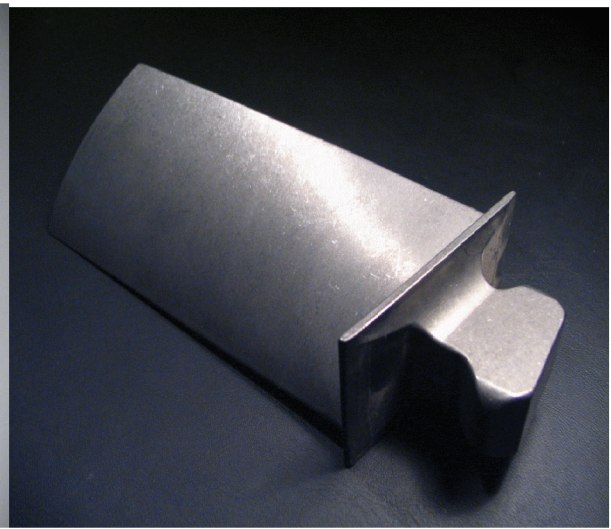


Fig. (1-20)-Fixation en T



Fig. (1-21)-Fixation Sapin



Fig. (1-22)-Fixation Sapin

L'empilement des disques forme une gante ou en reçoit les aubes qui sont soumis a une forces centrifuge. Les méthodes usuels qui sécurise la fixation des aubes rotor aux disques peut être circonférentielle ou axial aussi.

❖ Puissance réelle fournie par le compresseur ou fluide :

En raisonnant comme pour la puissance théorique il vient :
Puissance réelle = $m_a C_p (T'_2 - T_1)$

$$P_{rc} = m_a C_p (T'_2 - T_1)$$

(1-2)

❖ Rendement du compresseur:

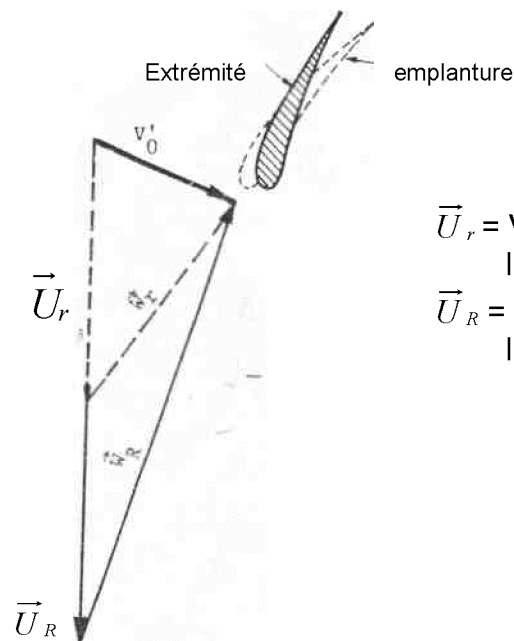
En revenant à la définition du rendement :

$$\eta_c = \frac{T_2 - T_1}{T'_2 - T_1} \quad \text{Avec } T'_2 > T_2 \quad (1-13)$$

Ce rendement est de l'ordre de .8 à 0.85.

6. VRILLAGE D'UNE AILETTE ROTOR:

Nous avons vu dans la description du rotor que l'aubage rotor avait une section se présentant sous la forme d'un profil aérodynamique et d'autre part que la vitesse périphérique \vec{U} variait comme le rayon ($\vec{U} = \vec{\omega} R$). Afin que la vitesse relative W se présente avec une incidence correcte sur toute la hauteur de l'ailette, il faut donc modifier le calage de celle-ci au fur et à mesure que l'on s'éloigne de l'emplanture.



\vec{U}_r = Vitesse périphérique proche de l'emplanture

\vec{U}_R = Vitesse périphérique proche de l'extrémité de l'ailette.

Remarque :

Pour un rotor, la vitesse à prendre en considération est la vitesse relative : ainsi pour une section (r) nous avons :

$$M(r) = \frac{W_r}{a_r} \quad (1-14)$$

Et :

$$M(R) = \frac{W_R}{a_R} \quad (1-15)$$

Un profil est dimensionné pour travailler dans une gamme de vitesse donné, donc pour $M(R) \leq 1 \Rightarrow M(r) \cong 0,5$ au régime compresseur maximal.

7. LE POMPAGE:

Le pompage est un phénomène aéronautique dû au décrochage des filets d'air sur le profil d'aubes qui se présente à une incidence trop élevée.

Si on considère le diagramme de Vitesse. On constate qu'une incidence trop élevée résulte d'un **débit trop faible** ou d'une vitesse **de rotation trop forte**.

Pour diminuer l'incidence il lui faut :

- 1) Jouer avec la direction de la vitesse V (aube directrice)
- 2) contrôler la vitesse U en la diminuant.
- 3) Augmenter le débit.

❖ Cycle de pompage:

Quand la pression chute au-delà de la ligne de caractéristique l'ensemble compresseur récepteur devient instable.

Lorsque le contre-pression du récepteur devient supérieur à la pression de refoulement il y a inversion du débit qui entraîne une chute de pression dans le récepteur ce qui permet au débit de revenir normal au point de fonctionnement mais si la cause n'est pas corrigée il y aura un retour vers le pompage ce qui définit un cycle de pompage.

Les conséquences sont :

- Une chute des caractéristiques du GTR
- Des vibrations
- Extinctions possible
- Ruptures possibles des aubes.

❖ Causes de pompages:

- Faibles régimes
- Conditions de vols
- Régimes augmentation brusques $Tt4$.
- Un Grand nombre d'étages.
- Une charge élevée sur chaque étage.
- Dérapage.

8. Courbes caractéristiques de fonctionnement:

8-1-Généralités:

Chaque compresseur possède des courbes caractéristique de fonctionnement obtenue sur banc d'essai pour différent rapport de compression et débit à un régime de rotation donnée.

Afin de généralise l'utilisation de ces courbes. On représente alors les paramètres précédents sous forme de valeurs réduites.

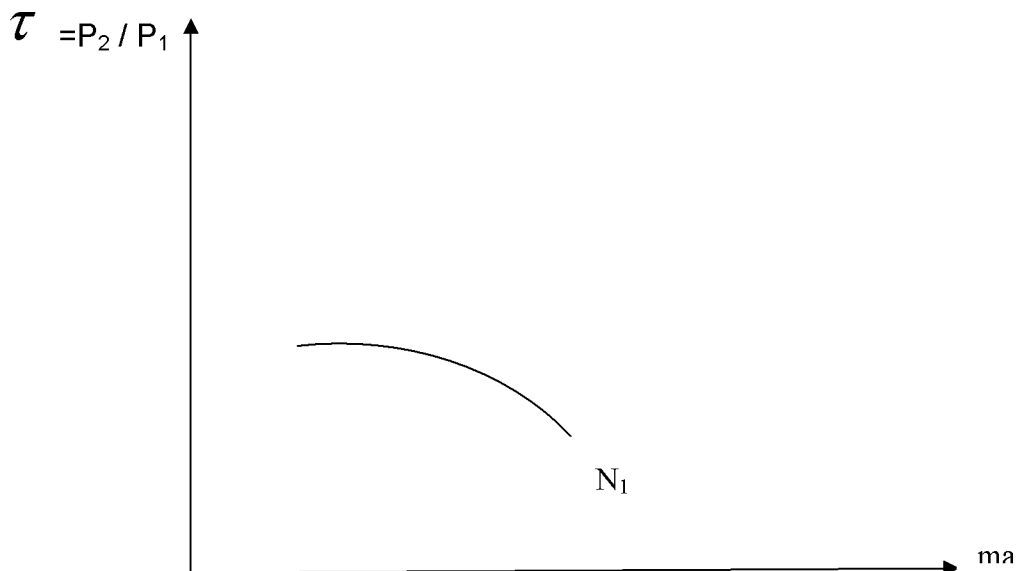
On posant :

$$N_{red} = \frac{N}{\sqrt{T_{t2}}} \quad (1-16)$$

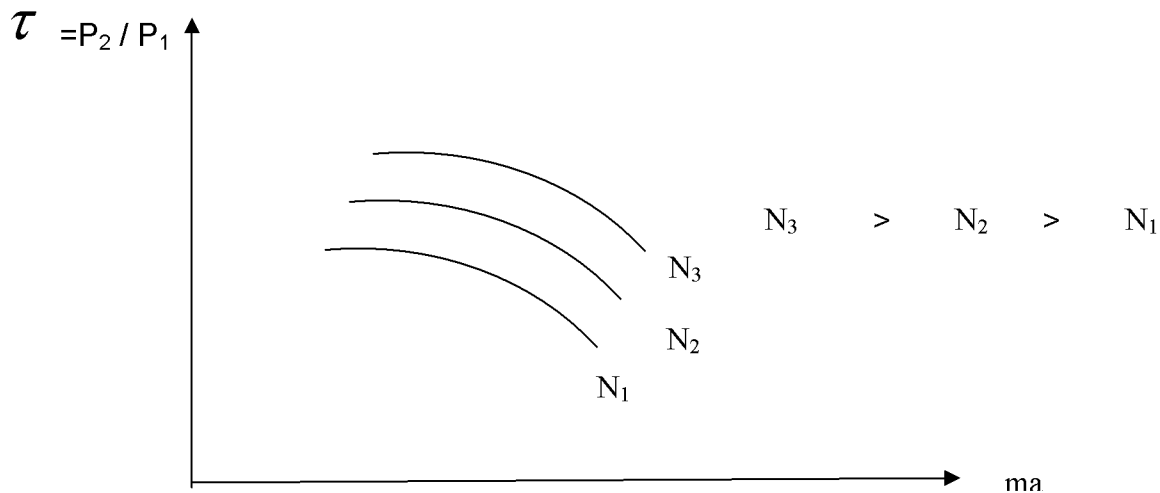
Et

$$ma_{red} = ma \sqrt{T_{t2}} / P_{t2} \quad (1-17)$$

A un régime donne en faisant varier le débit d'air par l'intermédiaire des volets A et B et en relevant les variations du taux de compression on obtient une courbe dans le plan P_2 / P_1 et débit masse d'air ayant la forme suivante .



En changement de régime et soit $N_2 > N_1$ on obtient un réseau identique au précédent. Les courbes N_1 et N_2 portent le nom d'isorotation .



8-2-Ligne d'adaptation:

L'équilibre de puissance turbine compresseur. Pour chaque régime du moteur correspond un couple de valeur de débit et de rapport de compression, la jonction de ces points définit la courbe d'adaptation. L'écoulement à la sortie de la tuyère influe sur la ligne d'adaptation qui va du régime sub-critique à critique correspondant à la vitesse de sortie de la tuyère liée au rapport de la pression statique de la sortie à celle de l'ambiance. Pour une section de tuyère fixe et pour chaque iso rotation réduite, il n'existe qu'un seul couple de valeur de débit / rapport de compression pour le quelle cet équilibre est satisfait.

8-3-Ligne de pompage:

Pour chaque régimes compresseur il existe un couple point pour le quelle on assiste à un décrochage de l'écoulement engendrant un cycle de pompage l'ensemble de ces points définit une frontière dite ligne de pompage.

8-4-Limitations dues à la chambre de combustion:

La chambre ne peut s'entretenir que dans un domaine de dosage limité par l'extinction pauvre (trop d'air) et l'extinction riche (trop carburant). Sur la courbe la zone d'extinction pauvre se trouve vers les forts débits de masses alors que l'extinction riche se situe vers le pompage dans les forts régimes.

9. Efforts sur le compresseur:

Les efforts appliqués sur les éléments du compresseur se résument sur les contraintes suivantes :

- Efforts centrifuges.
- Efforts thermiques
- Efforts vibrations
- Efforts aérodynamiques.
- Efforts gyroscopiques.

10. comparaison entre compresseur axial et Centrifuge:

10.1-Centrifuge:

a. avantage:

- moins fragile aux chocs
- meilleure accélération (moins d'inertie)
- usinage plus facile donc moins onéreux.

b. inconvénients

- rendement de compression médiocre en altitude.
- Taux de compression limité à 4 par étage.
- Maître couple important.

10.2-Axial:

a. avantage:

- rendement de compression supérieur au centrifuge
- taux de compression par étage limité à 1,2, mais la multiplication du nombre d'étages ne pose aucun problème de raccordement)

b. inconvénients:

- fragile aux chocs
- usinage délicat donc onéreux.

I/ Principes de moulage

Le **moulage** est l'action de prendre une empreinte qui servira ensuite de moule dans lequel sera versé un matériau et qui permettra le tirage ou la production en plusieurs exemplaires d'un modèle. Le moulage consiste donc à injecter un matériau liquéfié par la chaleur dans un moule dont il prendra la forme.

Mais il ne suffit pas simplement de choisir un produit, d'en recouvrir le modèle et d'attendre que cela durcisse pour réaliser un moule ! Le moulage demande beaucoup de réflexion et de goût. Avant toute opération il faut étudier minutieusement les formes, en sentir les moindres détails. Avec un peu d'expérience, cette observation attentive du modèle alliée à un peu de pratique permet de déterminer le choix de la technique, et des produits à utiliser.

1/ Méthode de moulage

il existe 3 technique de moulage:

- Moulage en sable

Technique très courante dans l'industrie, démoule aussi par destruction du moule. L'intérêt de cette technique est qu'elle permet de travailler avec un matériau réfractaire (le sable), et que le moule ne coûte pas cher à fabriquer.

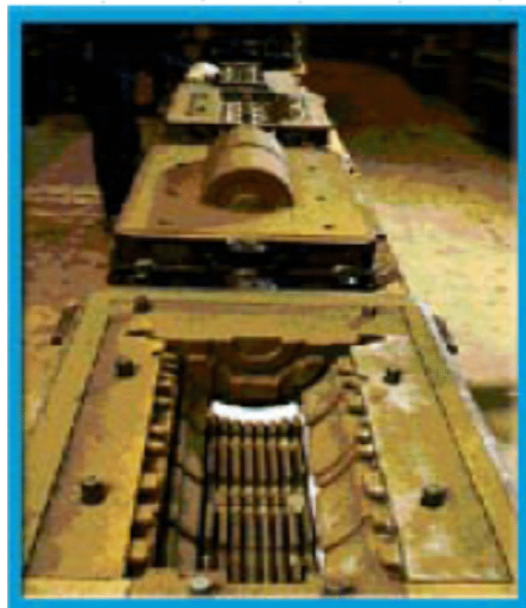


Fig. (2-1.)- demi-moule d'une machine de serrage

Cette méthode est employée pour :

- Alliages à haut point de fusion,
- Géométries complexes (formes extérieures simples et formes données par des noyaux),
- état de surface rugueux

▪ Moulage de précision

Le moulage sous pression est un procédé de fabrication rapide et économique pour la production de grands volumes de pièces métalliques à côtes finies et de tolérance étroite. L'un des avantages est une qualité, souvent à des coûts inférieurs à ceux engendrés par d'autres procédés.

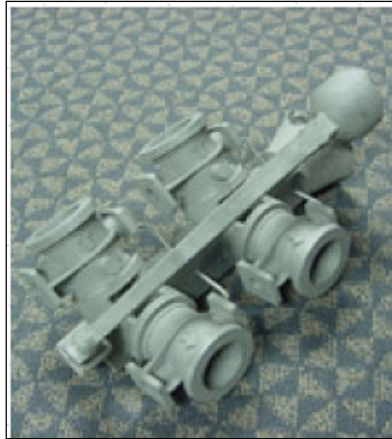


Fig. (2-.2)-pièce réalisé par le moulage en cire perdue

Cette méthode est employée pour :

- Alliages à haut point de fusion.
- Géométries complexes (une seule surface de joint, des noyaux latéraux sont possibles "contre-dépouille").
- état de surface de rugosité moyenne.

▪ Moulage de coquille

Technique qui consiste à couler, par gravité, du métal liquide dans un moule métallique. Avantages: très beau fini de surface, très rapide et bonne précision dimensionnelle.

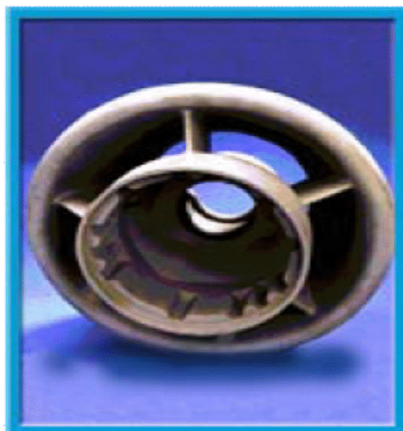


Fig. (2-.3)-pièce réalisé par moulage en coquille

Cette méthode est employée pour :

- Alliages à haut point de fusion.
- Géométries moyennement complexes (formes extérieures complexes si nécessaire, formes intérieures simple "toutefois un noyau en sable pour formes intérieures est envisageables: exemple : culasse avec noyau de circulation d'eau").
- État de surface de rugosité moyenne.

2/ Méthode de moulage:

Lorsque vient le temps de réaliser une pièce de fonderie, plusieurs procédés peuvent être utilisés. Chaque procédé possède ses avantages et ses inconvénients.

Ces procédés de moulage peuvent être classés en deux familles :

A) Moulage en moule permanent:

Le moule non permanent est une structure principalement réalisée avec des matériaux de moulage, composée d'une ou de plusieurs parties et offrant après assemblage un évidement appelé empreinte.

Cette empreinte correspond à la pièce brute, en tenant compte :

- du système d'attaque permettant de remplir l'empreinte sans préjudice pour les matériaux du moule ni pour la qualité de la pièce.
- du système d'alimentation compensant la contraction de solidification.
- du retrait à l'état solide.

Généralement les formes intérieures des pièces sont données par des noyaux (emploi parfois de noyaux extérieurs) qui sont des éléments de moule réalisés séparément avec un outillage spécial (boîtes à noyaux).

Après coulée de l'alliage, cette structure est désagrégée (décochage) pour extraire la pièce brute solidaire du système d'attaque et du système d'alimentation.

L'enlèvement des matériaux de moulage adhérant à la pièce, ainsi que des systèmes d'attaque, de remplissage, et des bavures (provenant du jeu entre les différentes parties du moule) constitue le parachèvement.

Le moule est détruit dans la phase de fabrication de la pièce. et la réalisation d'une autre pièce (ou groupe de pièces dans une même empreinte) conduit à la fabrication d'un autre moule.

A.1/ type de moule en moule non permanent

Plusieurs procédés peuvent conduire à des résultats techniquement identiques, mais de prix de revient différents. On distingue parmi ces procédés types.

1. MOULAGE AVEC MODÈLE PARTIEL

Ces procédés peuvent parfois être remplacés par des procédés avec modèle polystyrène.

Le moulage avec modèle partiel est 3 types :

1-1. Moulage par troussage

La forme de l'empreinte est obtenue en raclant le matériau de moulage déposé en excès dans un châssis à l'aide de pièces en bois et en métal découpées selon le profil de la pièce à réaliser.

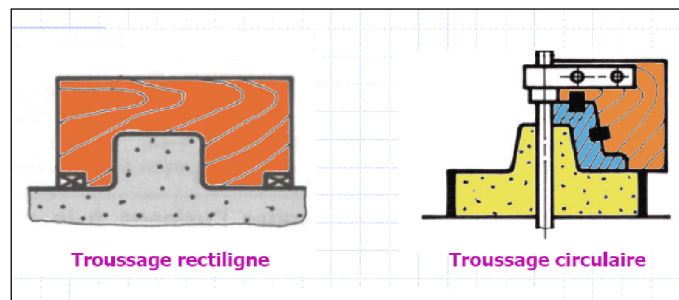


Fig. (2-.4)-modèle par troussage

Employé pour réaliser un moule, ou une partie du moule, soit un faux modèle en sable sur lequel est moulée l'empreinte. Il est caractérisé par:

- Coût très faible du modèle en moulage unitaire
- Haute qualification du personnel
- Réalisation de moulages de grande dimension (> 1 m).

1.2. Moulage avec modèles carcasses:

Les modèles sont composés d'une ossature et doivent être remplis, soit de sable de moulage, soit de plâtre pour réaliser les surfaces extérieures.

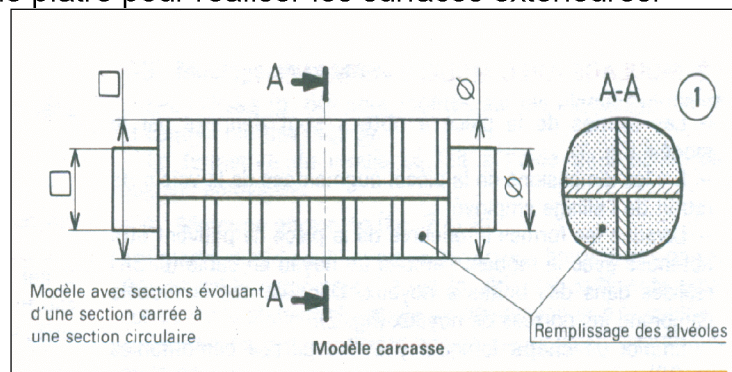


Fig. (2-.5)-modèle carcasse

L'ossature est réalisée avec des éléments plats représentant les sections droites extérieures longitudinales et transversales Fig. (2-5).

Parmi ses caractéristiques on site :

- Réalisation de surfaces gauches complexes avec des éléments simples de modèle.
- Haute qualification du personnel.

1-3. Moulage avec modèles squelettes:

Les modèles composés de sections simples transversales et longitudinales définissent des éléments de surfaces extérieures et des éléments de surfaces intérieures (pas de recours aux galettes du moulage avec carcasse).

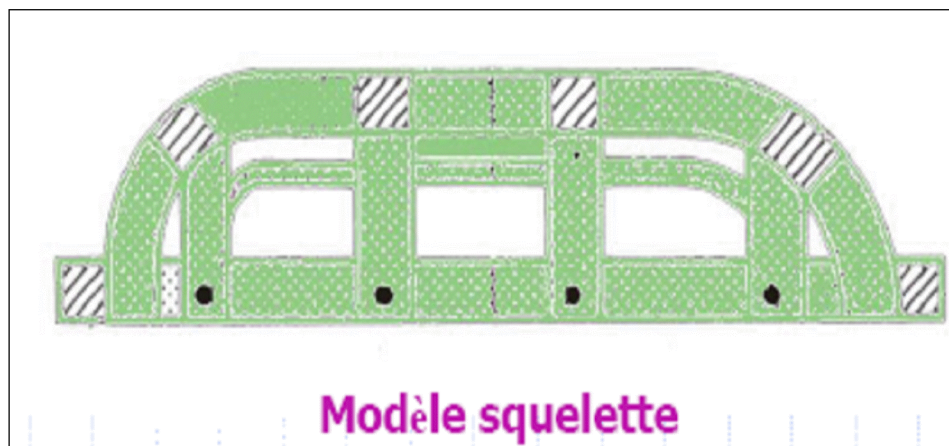


Fig. (2-.6)-modèle squelette

Caractéristiques:

- Réalisation de formes intérieures et extérieures avec le même outillage simple
- Pièces unitaires de grandes dimensions et de formes simples
- Haute qualification du personnel.

2. MOULAGE AVEC MODÈLE PERMANENT:

De ce type on peut retenir :

- Les formes de la pièce à obtenir sont données par le modèle
- Il a les dimensions de la pièce, augmentées de la valeur du retrait de l'alliage employé.
- Lorsque les formes intérieures de la pièce ne peuvent être obtenues avec le modèle : emploi de noyau en sable (voir moulage avec noyau) réalisés dans des boîtes à noyaux. Dans ce cas le modèle comprend les portées de noyaux.

- Emploi de **chape** lorsqu'il y a des parties démontables.

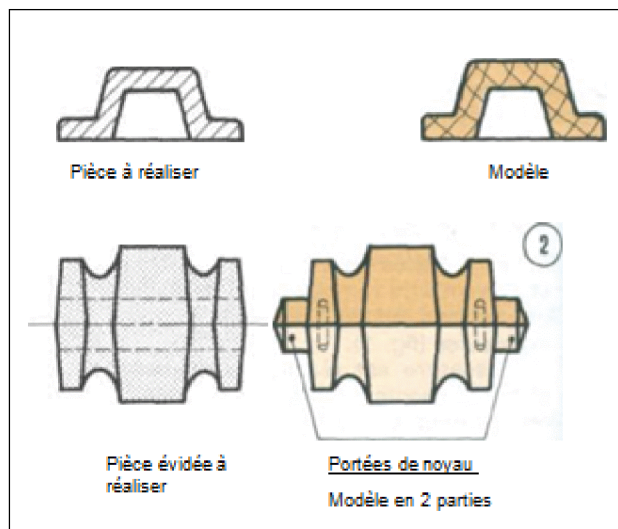


Fig. (2-6)-modèle permanent

- Les systèmes d'attaque et d'alimentation ne sont pas donnés par le modèle mais réalisés par le mouleur.

2-1.Dépouille :

Lors du moulage, le sable serré autour du modèle et s'oppose à son extraction par cause de :

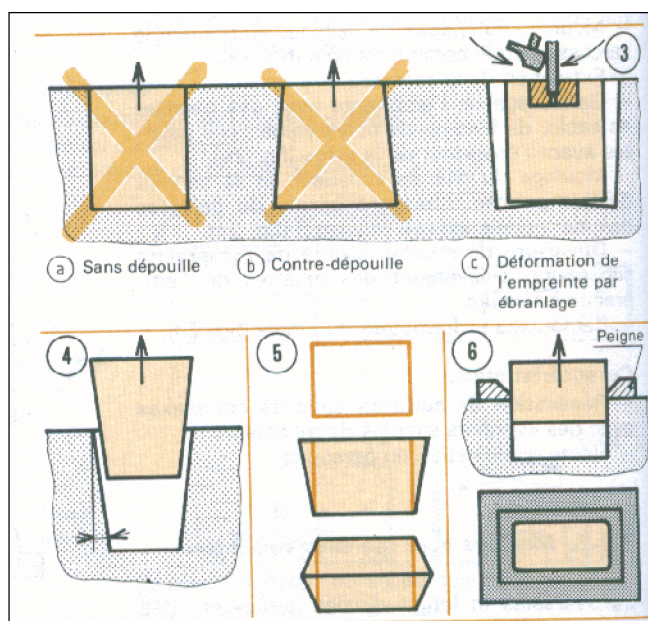


Fig. (2-8)-schéma dépouille

- par frottement (fonction de la granulométrie et de l'état de surface du modèle).

- par contre-dépouille lorsqu'une section du modèle est supérieure à la section de l'empreinte de la surface du moule.
- l'extraction est facilitée par l'ébranlage du modèle (déformation).

L'entraînement de sable est évité en inclinant les surfaces du modèle obliquement par rapport au sens de démoulage : C'est la **dépouille**; sa valeur dépendant de la classe des modèles, et s'ajoute généralement aux dimensions de la pièce sans dépouille.

La dépouille peut être diminuée avec un outillage approprié (schéma N° 6 sur la fig. (2.8))

2-2.Modèles :

Il existe 3 types de modèle non permanent:

❖ Modèles enlevés (en bois tendre non vernis):

- Ne comportent pas de plaque d'ébranlage : dépouille supérieure à 2 %.
- souvent monobloc : le mouleur doit rechercher la surface de joints.
- Les parties démontables sont simplement vissées sur le modèle principal.
- Ne comportent ni congé, ni raccordement de surface ceux-ci étant taillés par le mouleur : témoins de congé ou peinture noire sur le modèle (largeur = rayon) ou cotations du plan de pièce brute.

❖ Modèles légers (en bois tendre et mi-dur pour les parties fragiles, vernis)

- Plaque d'ébranlage : dépouille normale 2 %.
- Souvent coupés suivant la surface de joint.
- Les congés sont en partie réalisés avec du cuir ou du plastique collé.

❖ Modèles soignés (voir moulage avec plaque-modèle)

2-3.Fabrication du moule :

Plusieurs étapes sont nécessaires pour la fabrication de ce moule, à savoir :

- Serrage d'un moule sur une fausse partie si la surface de joint du modèle n'est pas plane,
- Retournement du moule et serrage de l'autre partie du moule,
- Ouverture et démoulage du modèle. Les éléments de modèle en contre-dépouille sont démoulés séparément après extraction du modèle principal,
- Réalisation des systèmes d'attaque et d'alimentation par taillage.

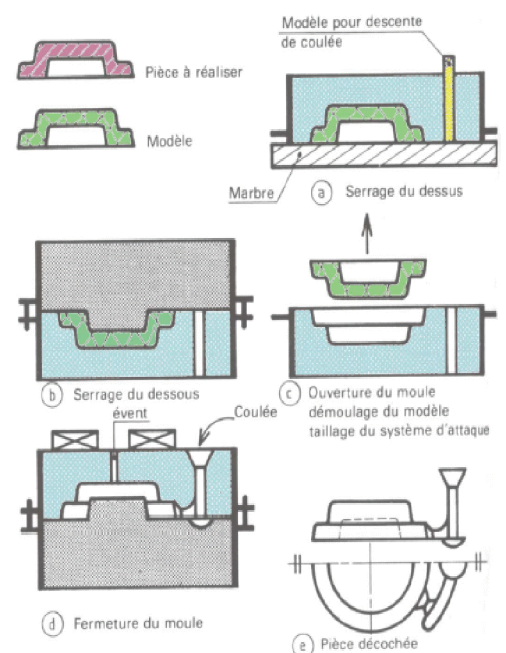


Fig. (2-9)-conception de modèle permanent

2-4. Caractéristiques :

- Fabrication de pièces unitaires de toutes dimensions
- Nécessite une main-d'œuvre qualifiée.

3. MOULAGE AVEC PLAQUE-MODÈLE

On retient de ce type de moulage :

- Moulage de pièces de la petite série à la très grande série selon la conception des plaques-modèles.
- Le modèle n'a qu'une surface de joint de moulage.
- Chaque demi-modèle est monté sur une plaque (fig. (2-10)) : panneaux de bois, plastique, marbre métallique ou bien est monobloc avec la plaque (grande série).

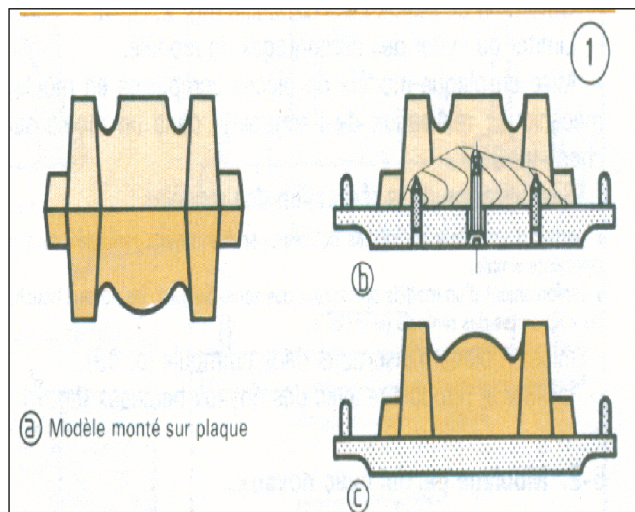


Fig. (2-.10)-deux demi-modèle

- Les empreintes ne pouvant être obtenues avec les 2 plaques modèles, sont réalisées par des noyaux donnant des formes intérieures ou extérieures (contre-dépouille de la pièce à réaliser).
Dans ce cas les portées de noyau sont réalisées par les plaques-modèles.
- Les plaques-modèles peuvent comporter les modèles réalisant les empreintes des systèmes d'attaque et d'alimentation.
- Emploi en moulage mécanique.

3-1. Classes des modèles :

- **Modèles soignés** : petite série jusqu'à 500 pièces.
- **Modèles très soignés** : série de 1 000 pièces.
- **Modèles de très grande production avec interchangeabilités**: série supérieur à 10 000 pièces.

3-2.Types de plaque-modèle:

Selon la forme de la pièce et le type de production, on distingue :

❖ **plaque-modèle simple** (fig. 2-11) : 1 plaque, 1 machine

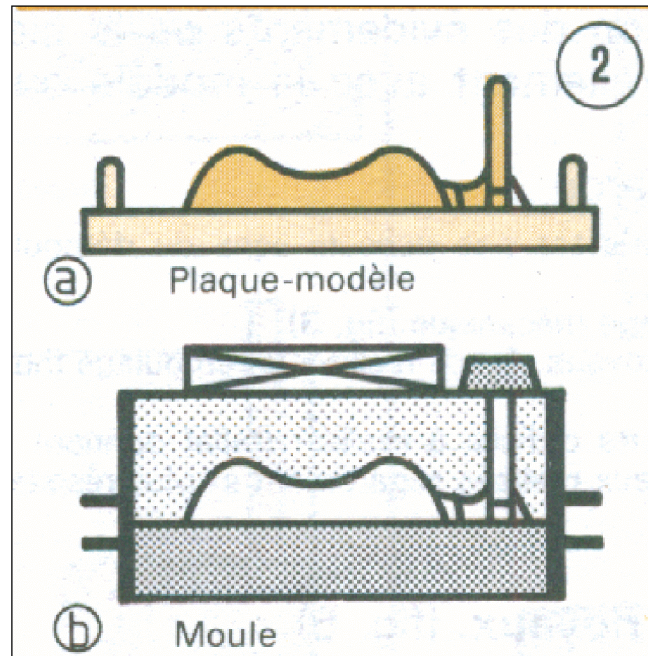


Fig. (2-11) -plaque-modèle simple

❖ **Plaque-modèle double** (fig. (2-12)) : 2 plaques, 2 machines.

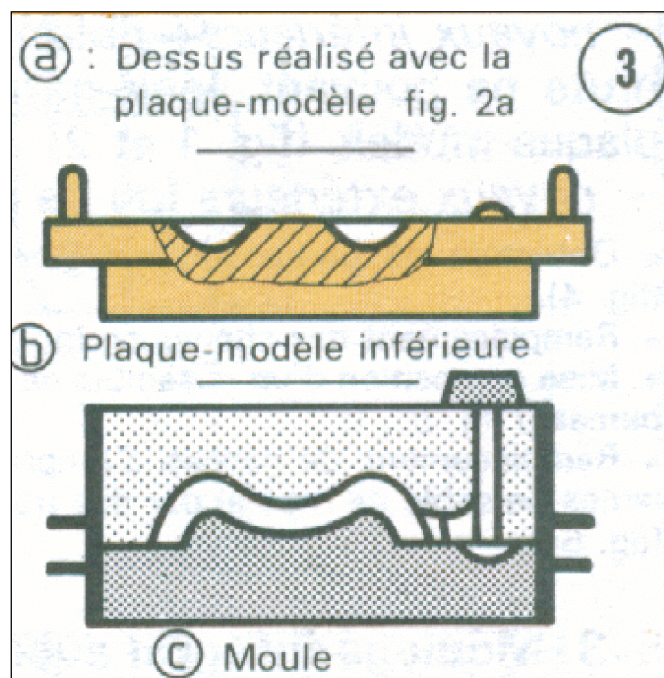


Fig. (2-12) -plaque-modèle double

- ❖ **plaque-modèle double face** (fig. (2-13)) : 1 plaque, 1 machine.

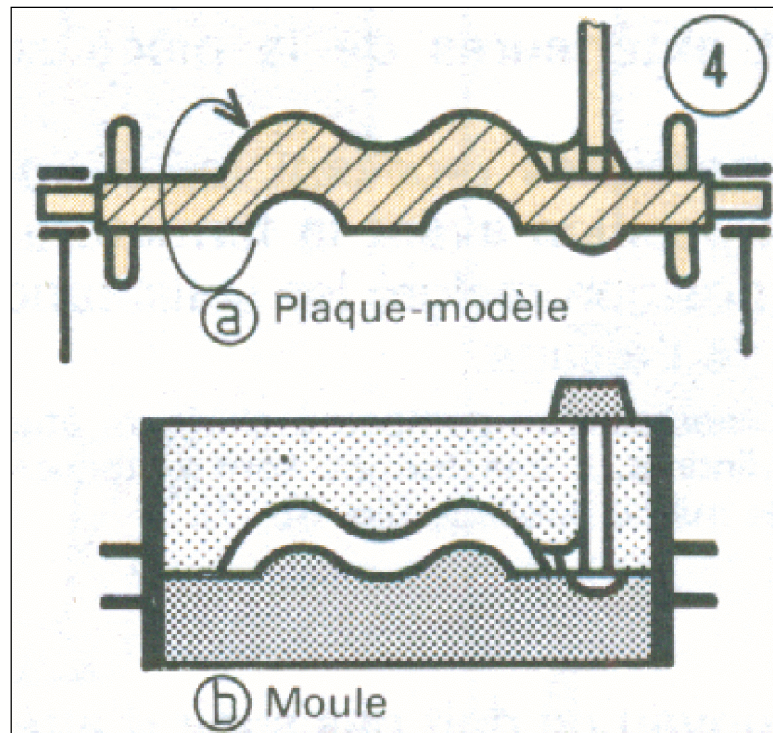


Fig. (2-13) -plaque-modèle double face

- ❖ **plaque-modèle réversible** (fig. (2-14)) : 1 plaque, 1 machine, le moule est réalisé avec 2 demi-moules identiques.

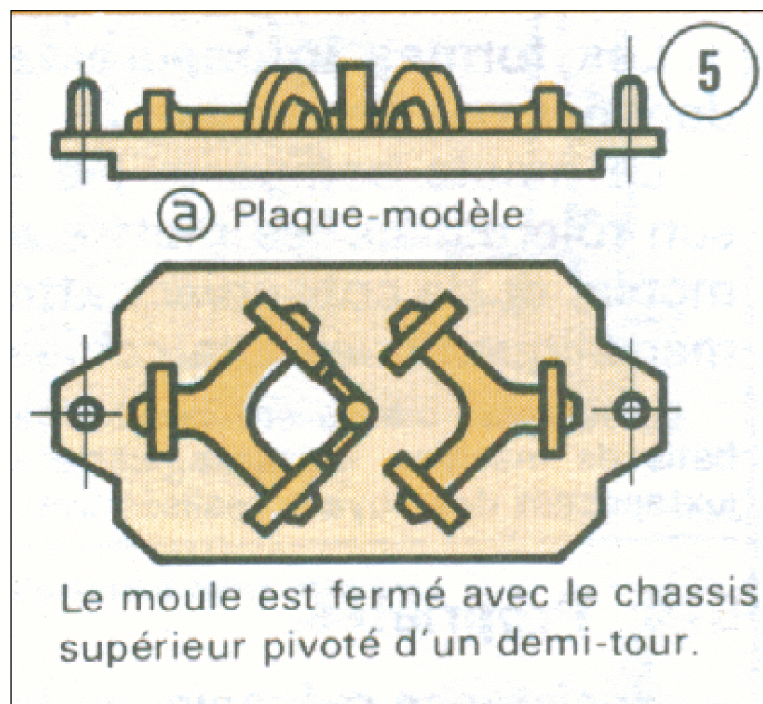


Fig. (2-14) -plaque-modèle réversible

- ❖ plusieurs modèles de pièces peuvent être montés sur la plaque-modèle, reliés aux mêmes systèmes d'attaque et d'alimentation : **moulage en grappe** (fig. (2-15)).

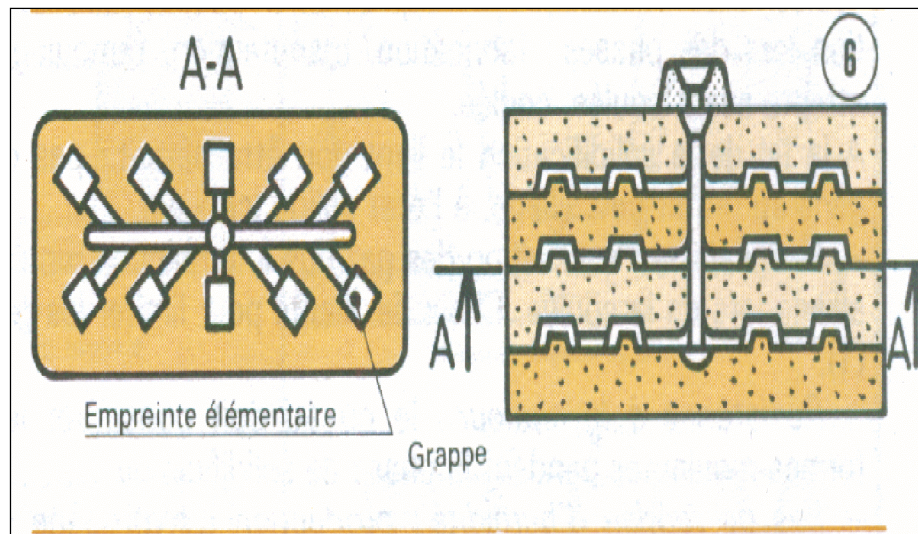


Fig. (2-15) –moulage en grappe

Les grappes de pièce peuvent être obtenues également en superposant plusieurs moules, réalisant la descente de coulée.

- ❖ l'assemblage de plusieurs moules disposant leurs surfaces de joint verticales afin d'être coulés, réalise le **moulage en presse** (8 fig.(2-16)).

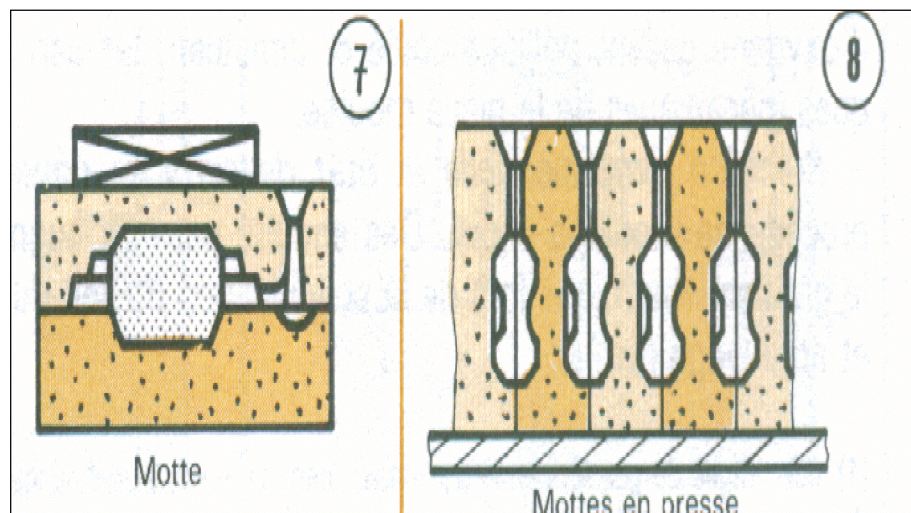


Fig. (2-15) –moulage en presse

3.3-Moulage en châssis :

Les châssis sont montés sur les plaques-modèles et centrés par des bagues.

La fermeture du moule se fait à l'aide de broches de guidage amovibles.

3-4. Moulage en motte (fig. (2-15)).

La cohésion du sable : sable serré sous haute-pression ou sable aggloméré à froid, est suffisante pour conserver la stabilité du moule au démoulage et à la coulée. Eventuellement une frette assure un maintien latéral lors de la coulée.

3-5. V-process:

Le V-process est une technique qui a fait son apparition en 1971 et son développement se poursuit encore aujourd'hui.

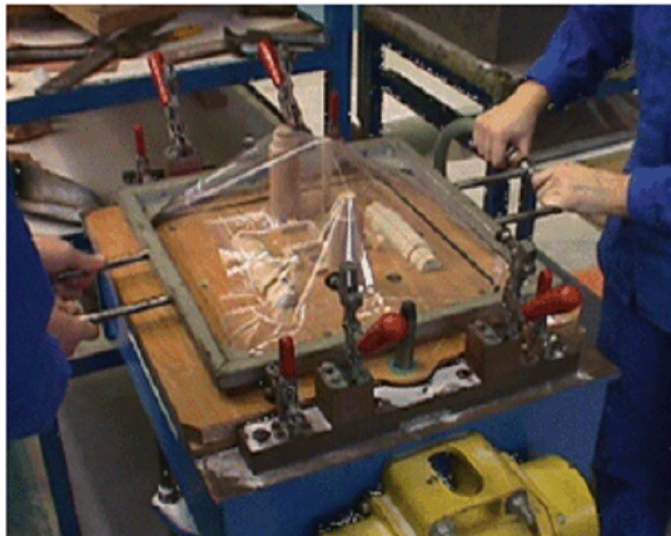


Fig. (2-16) –application du film thermoplastique

Le V-process est un procédé de moulage sous vide utilisant un film thermoplastique pour donner la forme du modèle aux deux parties du moule.

❖ Principe:

- Les plaques modèles et châssis sont des caissons permettant ainsi la mise en dépression de l'ensemble.

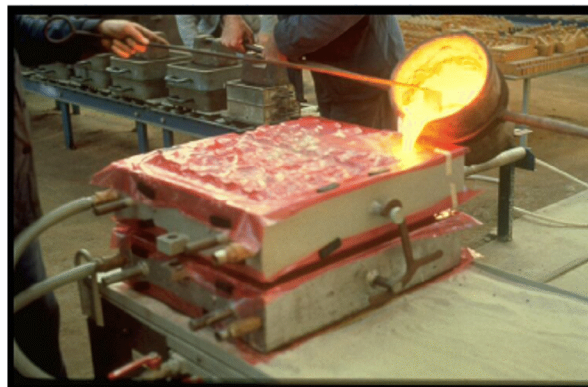


Fig. (2-17) –coulé v-process

- Après chauffage d'un film thermoplastique, celui-ci est déposé sur le caisson modèle et vient plaquer parfaitement le modèle par une mise en dépression.

- Le vide étant maintenu sur le modèle, on vient positionner le caisson châssis qui sera ultérieurement raccordé au système déprimogène.
- Le châssis étant rempli de sable extra-silicieux, on provoque des vibrations pour améliorer la compacité du moule. Après égalisation du sable et pose du film plastique (non chauffé) sur la partie supérieure du moule, le châssis est mis sous dépression.



Fig. (2-.18) –machines v-process

- Pour pratiquer le démoulage, il suffit de supprimer le vide dans le caisson et d'insuffler à la place de l'air sous faible pression puis de soulever le châssis.
- La seconde partie du moule est réalisé suivant le même processus.

❖ **Avantage:**

- Pas de préparation (sable sans liant) ;
- Bonne perméabilité du moule ;
- Hautes précisions géométriques et dimensionnelles des pièces coulées ;
- Dépouille non nécessaire ;
- Matériaux de moulage bon marché ;
- Très bon état de surface ;
- Aucune usure des châssis par suite des secousses ou du décochage.

4. MOULAGE AVEC NOYAUX

Le noyau est une structure en matériau de moulage, réalisée indépendamment du moule et donnant après remmoulage (mis en place dans le moule) des reliefs permettant d'obtenir des formes intérieures et extérieures de la pièce brute. La stabilité est assurée par des portées.

Les noyaux peuvent être assemblés entre eux avant ou après remmoulage.

❖ **Conditions d'emploi**

—Réalisation de formes intérieures

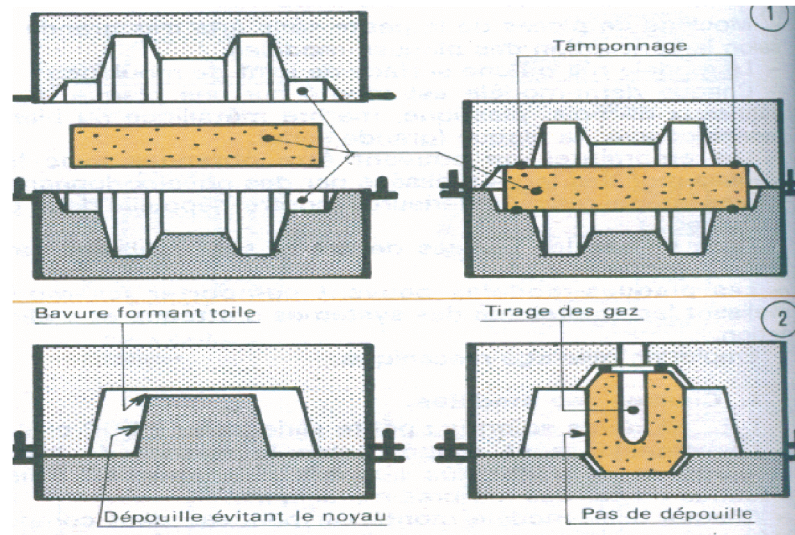


Fig. (2-19) –schéma montrant noyaux intérieurs

—Obtention de parois sans dépouille.

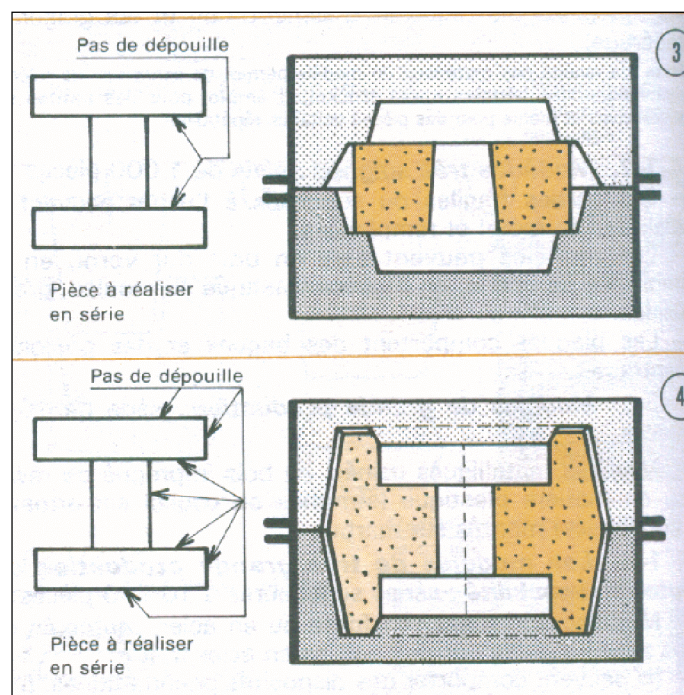


Fig. (2-20) –parois sans dépouille

— limiter ou éviter des démontages de modèle.

— Mise en plaque-modèle de pièces complexes en moulage mécanique (réalisation de

- l'empreinte dans un moule sans chape),
- Simplification de la réalisation des modèles,
 - mise en place d'insertions dans un moule,
 - faciliter le remoulage avec des noyaux berceaux

On distingue 2 types de moulage avec noyaux:

4-1.Moulage partiel avec noyaux

—*noyaux intérieurs* : obtention des évidements de la pièce brute ne pouvant venir naturellement avec le modèle ou la plaque-modèle (fig. (2-19))

—*noyaux extérieurs* (ou de paroi):

- Obtention de parties d'empreinte n'étant pas dans le sens du démoulage (fig. 4).
- Remplacement des chapes en moulage mécanique (fig. (2-20)).
 - Mise en position d'un ensemble de noyaux afin de faciliter le remoulage (noyau berceau).

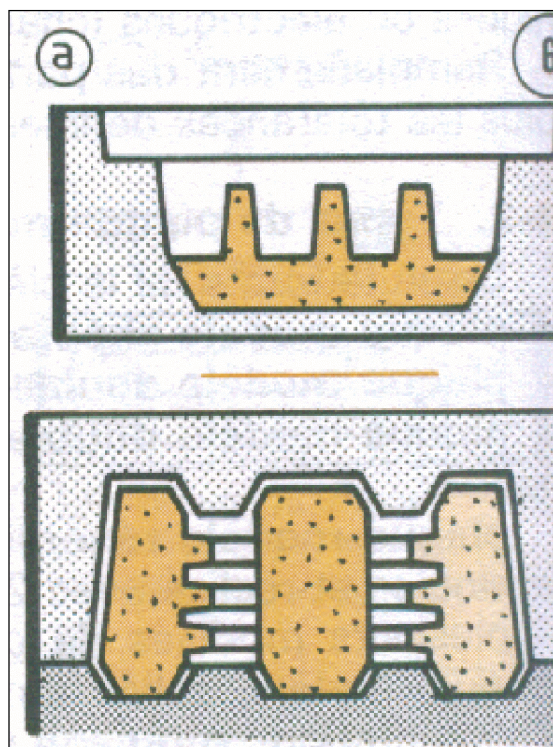


Fig. (2-.21) –moulage intégrale noyaux

- Remplacement de parties d'empreinte difficile à réaliser (relief donnant des lames de sable de moule) par des noyaux réalisés séparément et plus résistants (fig. (2-21)).

4-2. Moulage intégral avec noyaux (fig. (2-22))

Les formes intérieures et extérieures de la pièce sont données par des noyaux.

Le moule comporte les empreintes recevant les noyaux, son rôle est de les mettre en position avant la fermeture du moule, et de conserver cette position malgré les sollicitations mécaniques dues à la coulée de l'alliage.

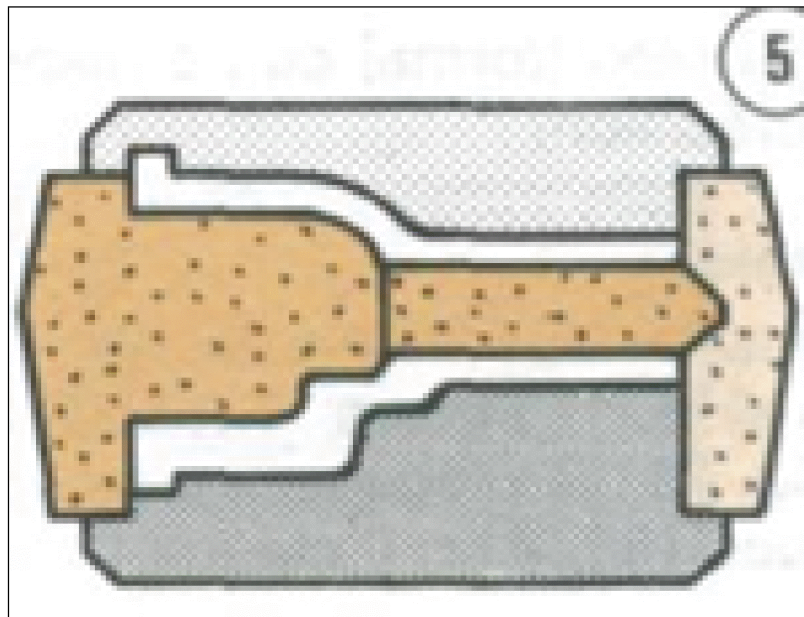


Fig. (2-.22) –bloc de noyau avant remoulage

Lorsque les pièces ont des formes modulaires : pompes à plusieurs étages, bâtis de machine, culasses, carter-cylindres..., ces formes sont obtenues en juxtaposant des noyaux réalisés avec le même outillage (fig. 2-23)

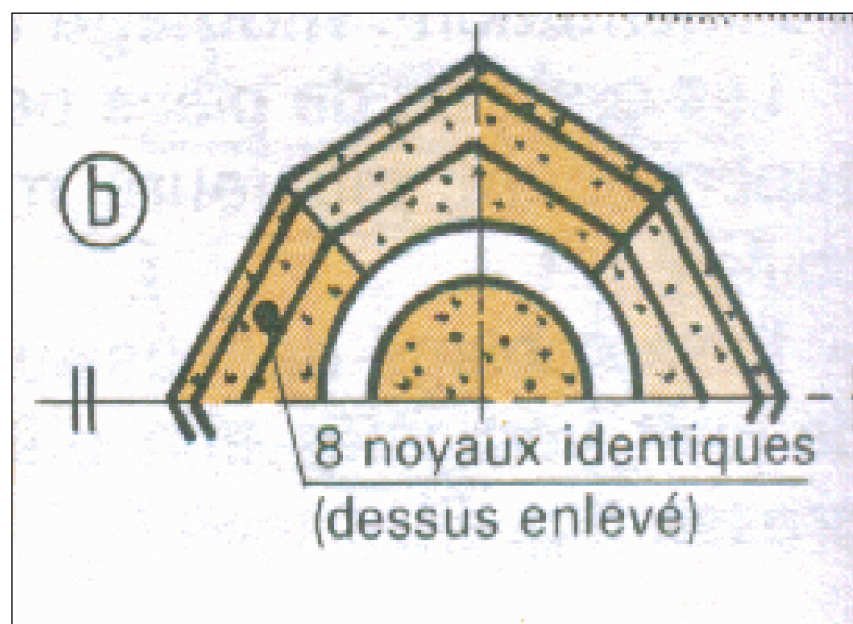


Fig. (2-23) –noyaux juxtaposés

❖ Comparaison de gammes de moulage

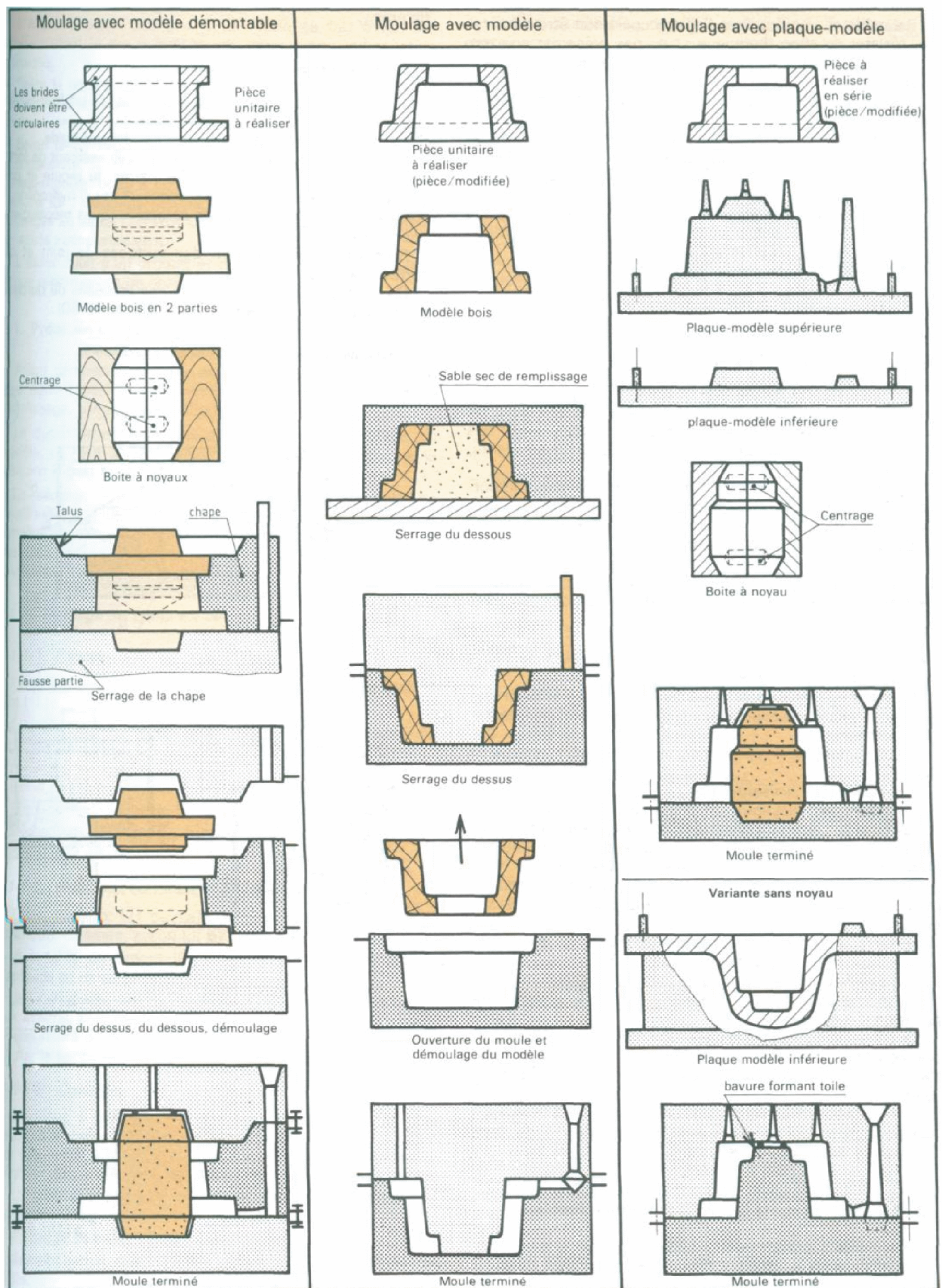


Fig. (2-.24) –tableau de comparaison des gammes de moulage

5. MOULAGE EN SABLE ARGILEUX

Le sable en contact avec l'alliage coulé doit être réfractaire, résister au choc thermique et ne pas présenter une trop forte dilatation thermique (destruction de parties de l'empreinte).

C'est le plus souvent un sable siliceux (le plus répandu et le moins cher).

Des propriétés spécifiques sont obtenues avec des sables spéciaux : alumine, bauxite, chamotte, chromite, olivine, zircon..., employés seuls mélangés à l'argile, ou en faible proportion avec un sable siliceux.

La résistance mécanique de l'empreinte et la perméabilité du moule sont réalisées, pour un mode de serrage du sable et un alliage donnés, en adaptant :

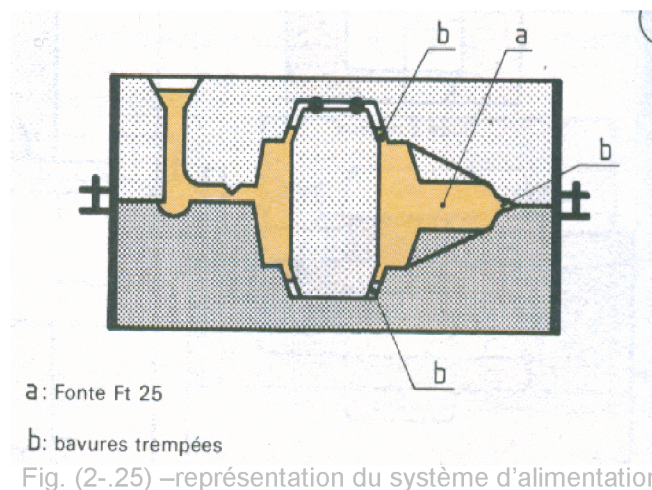
- la granulométrie du sable : de 0,1 mm à 1 mm,
- la teneur d'argile : 3 à 15 %,
- la teneur en eau : 4 à 10 %.

Parmi les moulages en sable argileux en cite 3 types:

5-1.Moulage en sable à vert

L'empreinte du moule est obtenue soit avec un sable silico-argileux naturel (provenant de carrières), soit avec un sable de moulage synthétique, préparé et dosé à partir des constituants : silice, sables spéciaux, argile, eau, adjuvants, ...

L'humidité du sable donne un gradient thermique important à la périphérie de l'alliage coulé (influence sur la structure de l'alliage, (fig. 2-25))



Selon le matériel employé on distingue :

- **Le moulage à la main** : pour les pièces unitaires ou de très petite série, le moulage étant avec *modèle*, ou sans modèle : *troussage*...

Le moulage mécanique : pour les pièces de petite série à la très grande série.

5-2. Moulage en sable à vert séché, grillé, flambé

Le séchage superficiel de l'empreinte accroît la dureté du moule et diminue le gradient thermique de l'alliage coulé au contact du moule.

Emploi d'air chaud, rayonnement infrarouge, rayonnement électromagnétique (micro-ondes), couches flambantes, flamme...

5-3. Moulage en sable étuvé

Le passage du moule dans une étuve ou un four élimine plus complètement l'humidité du sable.

Le moule a perdu sa plasticité il est devenu rigide.

- Emploi pour la coulée de grosses pièces exerçant de fortes pressions métallostatiques sur les parois du moule et pour des alliages sensibles à la présence d'eau (l'hydrogène et l'oxygène peuvent modifier les caractéristiques mécaniques: aciers inoxydables...).

- Risques de déformation des surfaces de joint et des! portées de noyaux.

On peut souvent lui substituer des procédés de durcissement du sable au contact de l'outillage.

6. MOULAGE EN SABLE AGGLOMÉRÉ CHIMIQUEMENT

L'agglomération des grains de sable se fait avec des produits dont le durcissement est obtenu par une réaction chimique.

- Selon la nature des produits la réaction chimique se fait à température ambiante : **prise à froid** ou sous l'effet de la chaleur : **prise à chaud**.

- Selon la technique de moulage, la réaction chimique de durcissement se fait **au contact de l'outillage** (modèle, plaque-modèle, boîte à noyau...) ou après le démoulage : **en dehors de l'outillage** (étuvage, frittage, ...). Les produits mélangés au sable donnant un durcissement à froid donnent un **sable auto durcissant**.

7. MOULAGE EN SABLE SANS LIANT.

7.1 Moulage par dépression dans le sable (moulage sous vide)

L'empreinte donnée par une plaque modèle, est conservée après démoulage entre deux films de matière plastique appliquant sur le sable la pression atmosphérique, pendant qu'une dépression est appliquée dans le châssis entre ces deux films. Tous les alliages peuvent être coulés par ce procédé.

❖ Gamme de fabrication

Les plaques modèles ajourées sont montées sur des caissons déprimogène reliés à une pompe à vide. Un film de matière plastique (de 50 μ .m à 100 μ .m d'épaisseur), préchauffé, est appliqué sur chaque plaque modèle par la pression atmosphérique.

Le sable est serré par vibration sur la plaque modèle, dans un châssis spécial pourvu d'orifices d'aspiration.

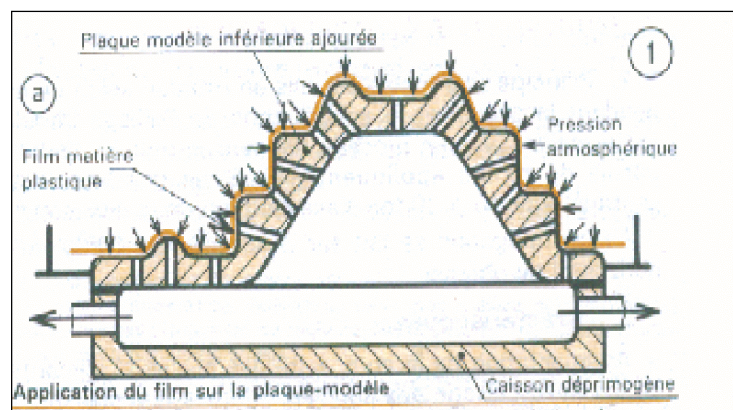


Fig. (2-.26) – application u film sur plaque modèle

Après arasage de l'excédent de sable, un autre film de matière plastique est déposé à la partie supérieure du châssis, et le châssis est relié à la pompe à vide. La pression atmosphérique applique les films contre le sable.

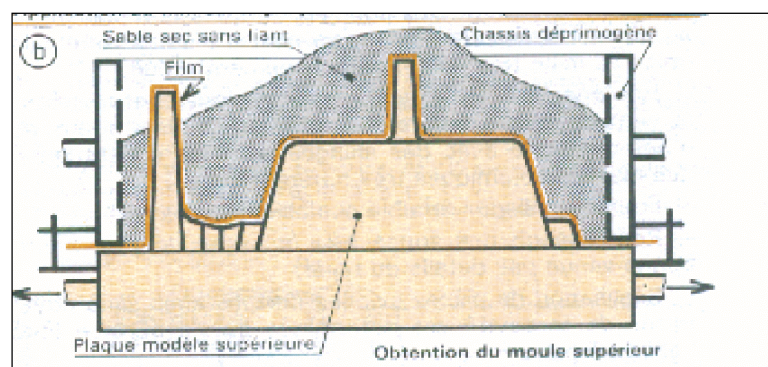


Fig. (2-.27) – gamme de fabrication du moulage sous vide

La dépression dans les châssis sera conservée jusqu'à la fin de la solidification de l'alliage.

Des noyaux peuvent être remoulés avant fermeture du moule. Lors de la coulée, l'alliage détruit le film et applique la pression atmosphérique (plus sa pression interne) sur le sable.

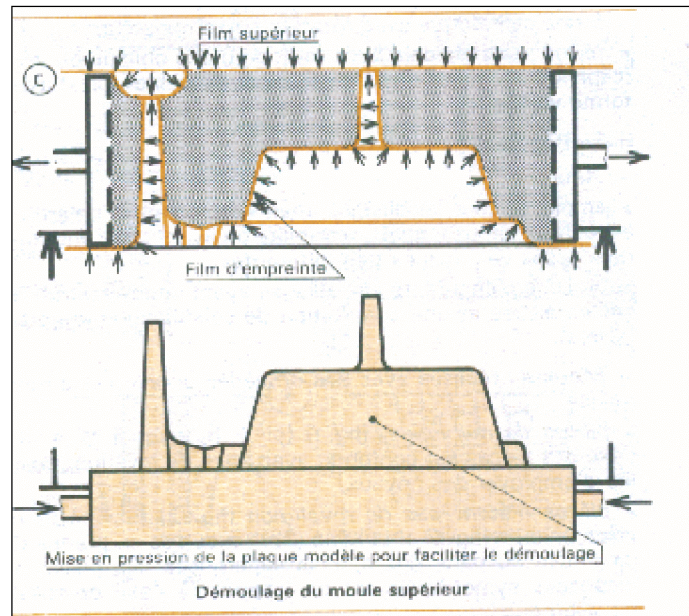


Fig. (2-.28) –démoulage du moule supérieur dans le moulage sous vider

Le décochage de la pièce est obtenu en reliant les conduits d'aspiration des châssis, à la pression atmosphérique.

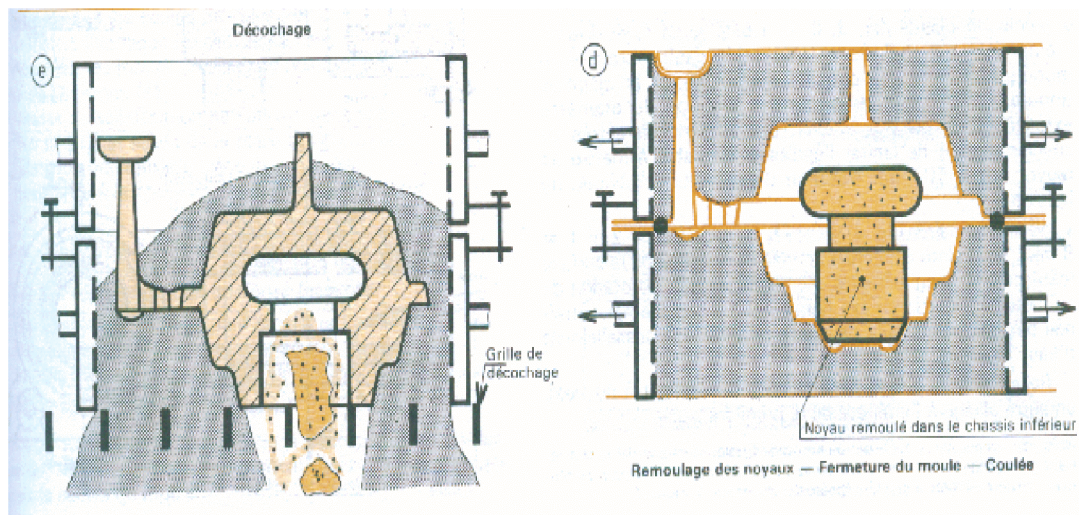


Fig. (2-.29) –décochage et remoulage des noyaux

❖ **Avantages**

Les plaques modèles sont protégées de l'érosion du sable. Elles peuvent être en plâtre, plastique...

Le sable, sans liant se met en place et se décoche très facilement, pas de préparation, recyclage presque intégral.

Etat de surface meilleur qu'en moulage sable à vert, cependant les reliefs prononcés et rapprochés sont difficiles à obtenir. Les moules peuvent être de grande dimension (plusieurs mètres), la limite étant donnée principalement par la capacité de la pompe à vide.

7.2 Moulage avec modèle gazéifiable (lost foam)

Les débuts du Lost-Foam dans l'industrie remontent aux années 80. Signifiant "Mousse-Perdue", ce procédé est à moule et modèle destructible.

Il est essentiellement utilisé dans le domaine de l'automobile car sa rentabilité réside dans la complexité des pièces.

❖ Principe

- Fabrication du modèle en polystyrène expansé et ses accessoires (les accessoires peuvent être assemblés par collage).
- Application d'un enduit (réfractaire)
- Disposition du modèle dans un bac que l'on remplit de sable
- Répartition du sable dans toutes les cavités par vibrations
- Coulée de l'alliage liquide dans le moule ce qui sublime le modèle
- Décochage par simple vibration ou insufflation d'air

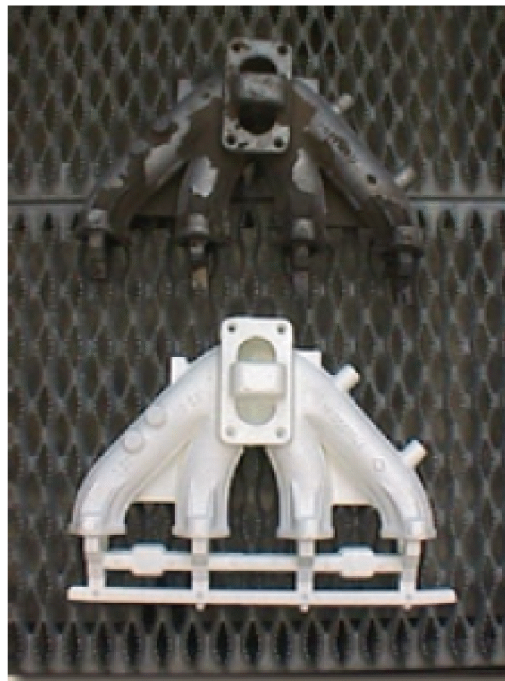


Fig. (2-.30)-modèle gazéifiable

❖ Avantage

- Pièce sans plan de joint,
- Moule sans noyau,

- Sable sans liant,
- Possibilité de réaliser des pièces complexes.

8. MOULAGE PAR CENTRIFUGATION

Le moule est mis en rotation selon un cycle, pendant la coulée et la solidification de l'alliage (moule en sable réalisé avec un procédé donnant un moule rigide).

Les parois du moule appliquent à l'alliage une accélération centripète de 15 à 30 fois l'accélération de la pesanteur.

La centrifugation se fait sur des machines à axe vertical, horizontal ou oblique.

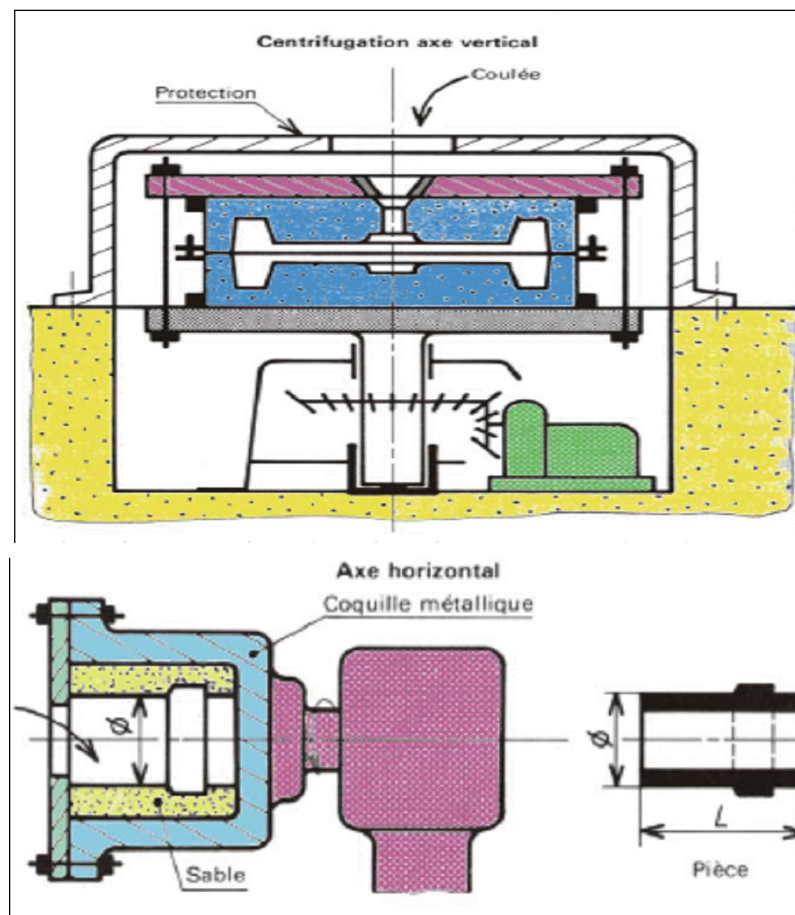


Fig. (2-.31)-schéma du moulage par centrifugation

❖ Caractéristiques :

- Augmentation de la compacité des pièces : l'alimentation se fait avec l'alliage des couches internes non solidifiées. La solidification est orientée des parois extérieures vers le centre (mise au mille très faible, parachèvement réduit).

- Homogénéité de l'alliage : les inclusions sont rejetées vers le centre (masse volumique inférieure). Cependant risque d'hétérogénéité avec des alliages dont les constituants ont des masses volumiques très différentes.
- Emploi d'alliages à faible coulabilité.
- Remplissage des zones peu épaisses de l'empreinte et bonne venue des détails du relief.
- Réalisation de pièces évidées ou tubulaires sans noyau, la forme de la cavité est déterminée par la surface libre de l'alliage liquide:
 - forme cylindrique avec rotation d'axe horizontal.
 - forme paraboloidale avec rotation d'axe oblique ou vertical (cependant emploi d'un noyau axial en sable afin d'avoir la forme voulue).

9. MOULAGE AVEC INSERTIONS

Une pièce (métallique en général) est remoulée dans l'empreinte d'un moule, afin de rester prisonnière après la coulée.

L'ensemble pièce moulée et insertion constitue une **pièce composite**.

❖ Caractéristiques

Les insertions doivent remplir les conditions suivantes :

- Assurer une liaison rigide avec l'alliage (le soudage est le cas idéal).
- Absence de réaction lors de la coulée (soufflures).
- Ne pas diminuer les caractéristiques mécaniques de la pièce moulée (modification locale du tracé).

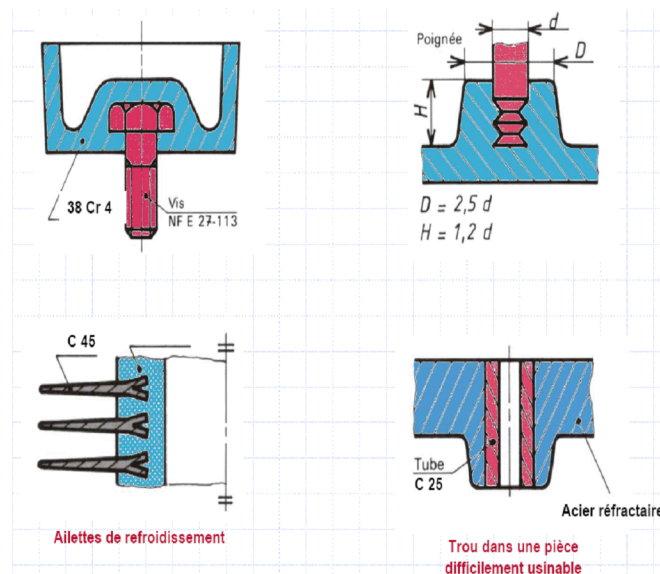


Fig. (2-.32)-différents type d'insérations

Choix de l'alliage de l'insertion, est pris en compte :

- Température de fusion de l'insertion.
- Température de coulée de l'alliage.

- Transfert thermique de l'insertion.
- Possibilité de former un alliage à point de fusion inférieur à celui de l'insertion.
- Vitesse de solidification de l'alliage dans le moule.
- Retrait à l'état solide de la pièce (contraintes).
- Dilatation différentielle pièce-insertion.
- Résistance à la corrosion du couple pièce-insertion.

10. MOULAGE EN CARAPACE

Connu également sous le nom de « Procédé Croning », moulage en masques.

Le moule doit être en 2 parties (1 seul joint plan) et peut comporter des noyaux obtenus également par ce procédé.

Chaque partie est obtenue avec une plaque-modèle chauffée (1 seule suffit si le moule est constitué par deux parties identiques) sur laquelle le matériau de moulage forme une croûte (carapace) épousant les reliefs de la plaque-modèle.

❖ Cycle de moulage (avec machine à retournement).

Un bac contenant du sable enrobé de résines thermodurcissables est fermé à sa partie supérieure par une Plaque-modèle métallique chauffée entre 200 et 300° C. L'ensemble est retourné.

Au contact de la plaque-modèle, la résine devient pâteuse, les reliefs de la plaque-modèle sont épousés précisément par le sable enrobé, qui s'agglomère progressivement à partir de l'empreinte, selon une épaisseur fonction de la nature de la résine, de la température de la plaque-modèle et du temps de maintien (40 à 60 sec).

L'ensemble est retourné à nouveau dans la position initiale, le sable non aggloméré retombe dans le bac pour être utilisé ultérieurement et le sable aggloméré forme une carapace de 4 à 10 mm d'épaisseur. La plaque-modèle se dégage du bac.

La carapace est alors chauffée pour polymériser la résine et obtenir le durcissement final.

La carapace est démoulée de la plaque-modèle par des éjecteurs.

Une carapace peut comporter les 2 parties du moule.

Les carapaces sont assemblées ou collées afin de constituer un moule.

L'empreinte, le système d'attaque et éventuellement le système d'alimentation (évidements pour constituer les masselottes) sont réalisés par la carapace.

Selon sa conception le moule est coulé avec le plan de joint horizontal ou vertical. La stabilité est augmentée en plaçant les carapaces dans un bac rempli de sable ou de grenaille.

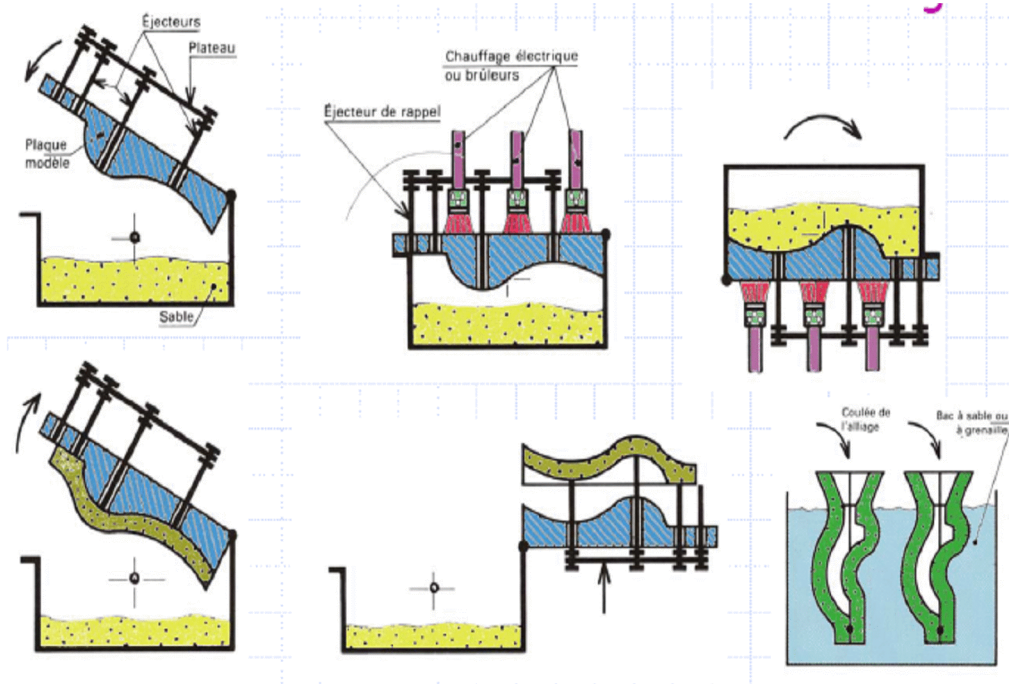


Fig. (2-.33)-différentes étapes du moulage en carapace

La mise en œuvre du sable enrobé au contact de l'outillage chauffé peut se faire par :

- Gravité et retournement.
- Soufflage.
- Tirage.

11. MOULAGE EN MOULE CÉRAMIQUE

Procédé également connu sous le nom de procédé Shaw, procédé Unicast, procédé céramiques...

Un coulis de produits réfractaires liés avec une solution à base de silicate d'éthyle est versé dans un moule contenant le modèle.

L'hydrolyse du liant produit un gel de silice, qui en quelques minutes durcit suffisamment le moule afin de démouler le modèle sans ébranlage (précision de l'empreinte).

Durcissement du moule : le durcissement final du moule ne doit pas modifier les dimensions initiales, selon le procédé :

- Immersion du moule dans un bain chimique poursuivant la réaction d'hydrolyse dans l'épaisseur du moule puis séchage à l'air chaud ou grillage.

- Flambage de l'alcool éthylique produit par la réaction d'hydrolyse du silicate d'éthyle :

La réaction de combustion est amorcée avec une torche puis entretenue par l'alcool du moule migrant vers l'empreinte.

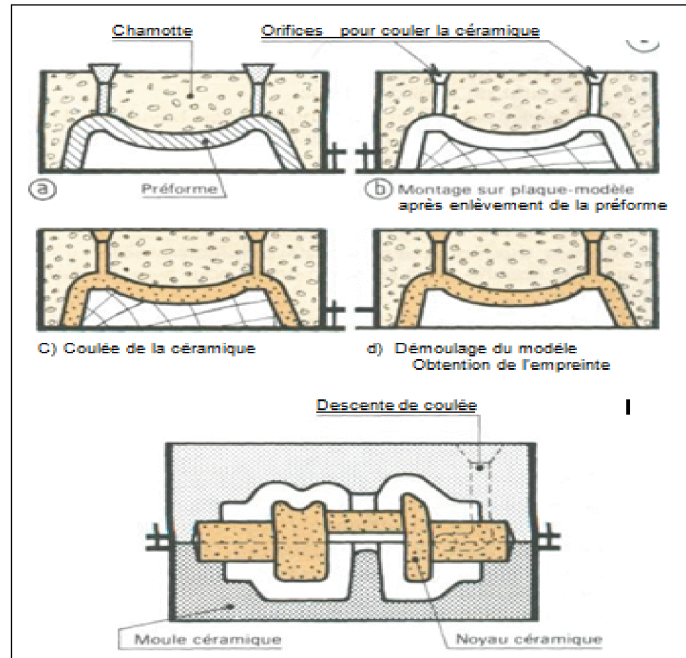


Fig. (2-34)-représentation moule et noyau en céramique

Par dissection du moule, il se forme en surface de l'empreinte et dans la masse du moule, un réseau ténu de microfissures ayant quelques μm de largeur, sans incidence sur l'état de surfaces des pièces coulées, et permettant :

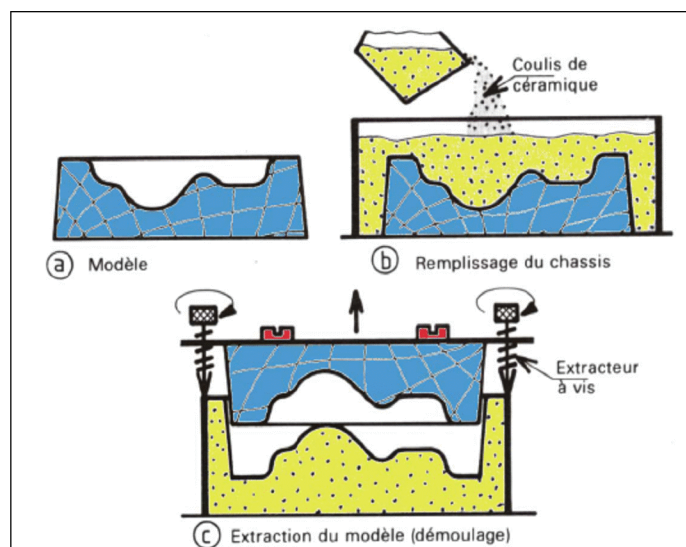


Fig. (2-35)-étapes du moulage en céramique

- une meilleure perméabilité du moule,
- une stabilité dimensionnelle du moule (réduction de la dilatation du moule lors de la

coulée de l'alliage).

- Une opération de frittage de la céramique vers 900 °C (non réalisée avec des moules de grande dimension) augmente la résistance mécanique du moule et limite la réaction alliage - moule (neutralité chimique du moule).

12. MOULAGE AVEC MODELE NON PERMANENT:

Le moulage est en une seule partie (sans surface de joint) et est réalisé autour d'un modèle, sans possibilité de démoulage.

Le modèle comporte à la fois les formes de la pièce brute à obtenir, ainsi que les systèmes d'attaque, d'alimentation (masselottes) et d'élimination du modèle (le système d'attaque a souvent ce rôle). Les critères de conception de la pièce sont différents des autres procédés de moulage: grande liberté pour le tracé de la pièce pourvu que la solidification de l'alliage dans le moule soit orientée (avec des masselottes éventuellement).

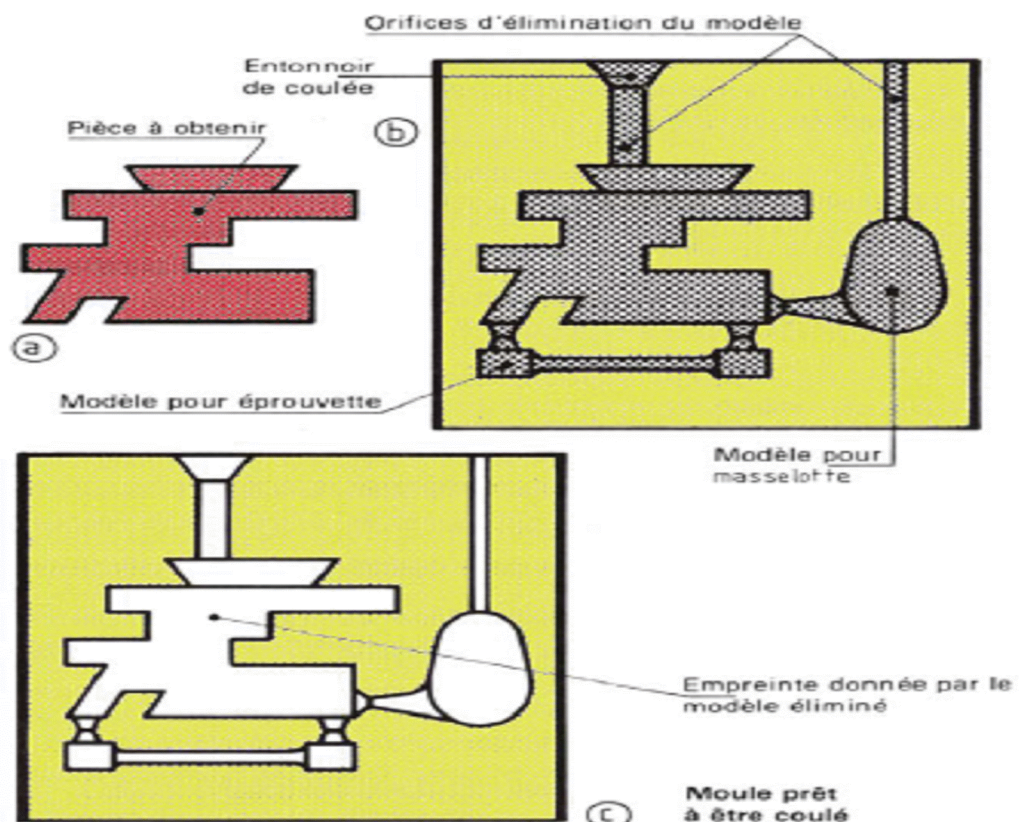


Fig. (2-.36)-représentation du moulage avec modèle non permanent

La pièce moulée est obtenue dans un cycle de fabrication au cours duquel le moule et le modèle sont détruits (moulage à modèle perdu).

❖ Conditions générales d'emploi

Ce procédé regroupe des techniques différentes selon la nature du modèle et le type du moule (modèle éliminé avant ou pendant la coulée, moule en sable siliceux ou en céramique) :

- réalisation de pièces ne pouvant être obtenues par d'autres procédés (usinage, forgeage...)

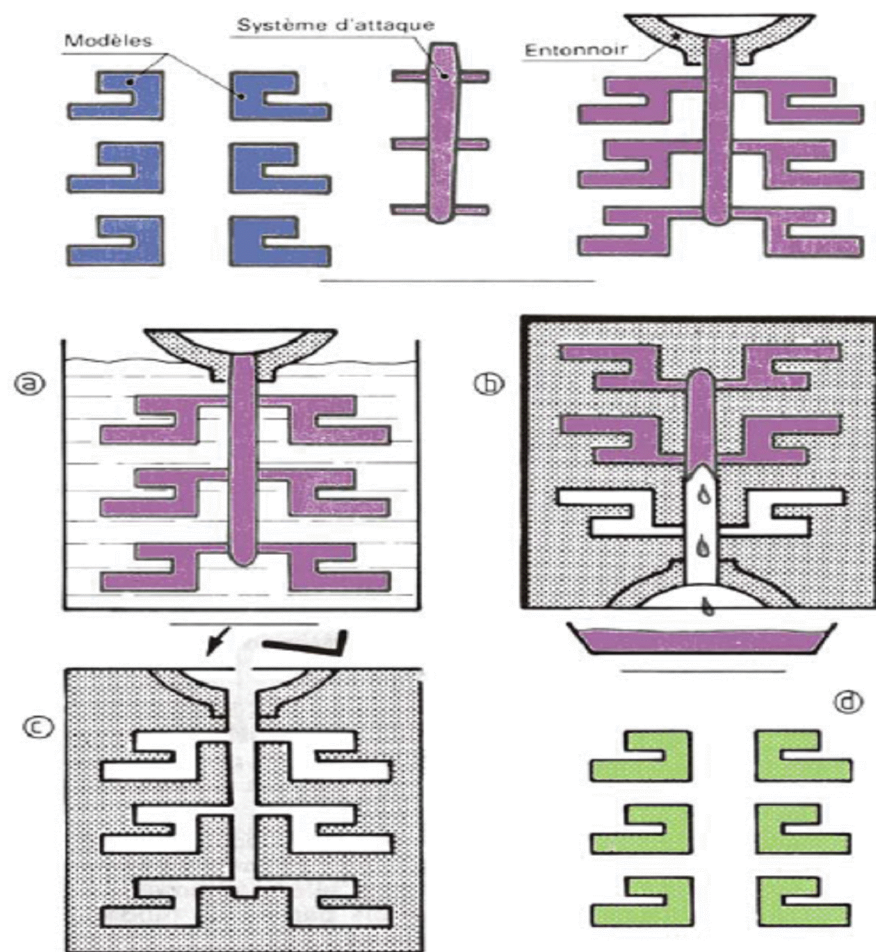


Fig. (2-.37)-évolution de la grappe lors du moulage avec modèle non permanent

- en raison des surfaces impossibles à obtenir par des procédés conventionnels ou non conventionnels : électroérosion, usinage électrochimique...
- alliages difficilement usinables (alliages d'outil de coupe, alliages réfractaires...).
 - pièces pouvant être obtenues par d'autres procédés mais en donnant des caractéristiques moins bonnes ou des coûts plus élevés.

L'emploi du procédé permet :

- meilleure précision dimensionnelle en donnant des variations d'empreinte de moule réduites ou nulle (1 seule empreinte)

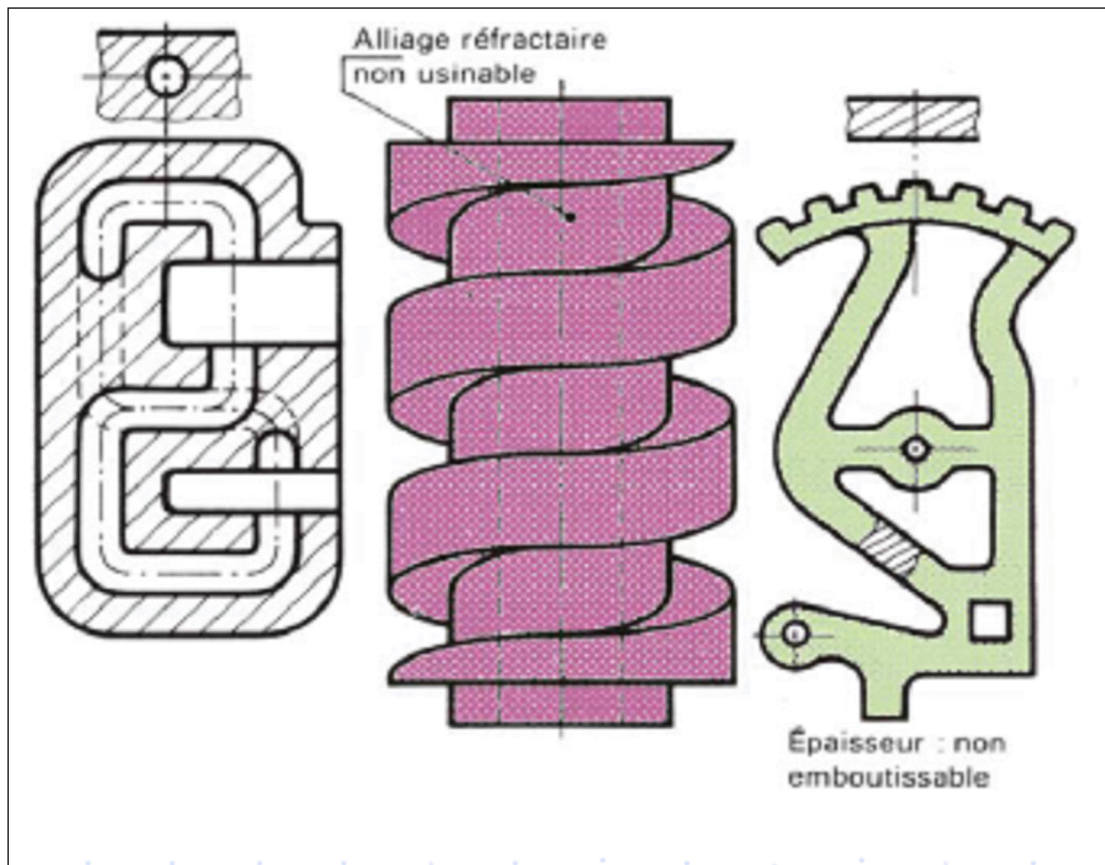


Fig. (2-.38)-type de formes pièces

- qualité de la surface moulée ne comportant ni bavures ni coutures dues à des surfaces de joints ou de noyaux, et réduisant le parachèvement ou l'usinage,
- réalisation d'une pièce unique même très complexe plutôt que plusieurs éléments assemblés,
- rapidité de production de pièces nécessitant un usinage long ou difficile (ex : pièces complexes de très petite taille et d'une centaine de grammes)
- simplification du moule lorsque l'obtention de l'empreinte avec d'autres procédés nécessite un grand nombre de parties,
- le coût d'un modèle permanent n'est pas justifié : pièces unitaires, prototypes
- substitution d'un modèle non permanent aux procédés de moulage sans modèle dans des cas difficiles.

Taleau des possibilités techniques:

PROCÉDÉS DE MOULAGE		Outillage **		Nature du moule		Matériaux de moulage					Mode de moulage		Type de pièce *				
OUTILLAGE **	FABRICATION DU MOULE	Froid	Chaud	Plastique	Rigide	Sable argileux à vert	Sable étuvé	Sable durci à froid	Sable durci à chaud	Céramique	Moulage à la main	Moulage mécanique	Nombre de surface de joint	Unitaire	Petite série	Série	
Planche à trousser modèles simplifiés boîte à noyaux éventuellement	Troussage	▲		●	▲	●	●				▲	▲	≥1	1.2.3			
	Centrifugation ***	▲									▲	▲	○		1.2.3		
Moulage avec modèle et boîte à noyaux	Moule	▲		▲	▲		●	▲	▲	▲	▲	▲	≥1	1 à 3	2.3.4		
	Noyau	▲		▲	▲			▲	▲	▲	▲	▲	≥1	2 à 3	2.3.4		
Moulage avec plaque-modèle	Moule	Châssis-motte sans serrage	▲		▲	▲					▲	▲	1		2 à 5	3.4.5	
		Châssis-motte serrage B.P.	▲		▲	▲		●			▲	▲	1		2 à 5	3.4.5	
		Châssis-motte serrage H. P.	▲		▲	▲					▲	▲	1		3.4	3.4.5	
		Carapace	▲		▲	▲					▲	▲	1		3 à 5	3 à 5	
		Céramique	▲		▲	▲					▲	▲	1		3.4		
Moulage avec boîte à noyaux	Noyau	Durci dans la boîte froide	▲		▲	▲					▲	▲	≥1		2.3.4	3.4	
		Durci hors de la boîte	▲		▲	▲		●			▲	▲	≥1		3.4.5	3.4.5	
		Durci dans la boîte chaude	▲		▲	▲					▲	▲	≥1			2 à 5	
		Carapace	▲		▲	▲					▲	▲	≥1			2 à 5	
		Céramique	▲		▲	▲					▲	▲	≥1		2 à 5		
Moulage avec modèle non permanent	Détruit avant la coulée	Moulage de précision à modèle perdu	●	▲	▲	▲					▲	▲	●	○	3 à 5	3 à 5	4 à 5
		Moulage avec modèle fragmenté ou brûlé	●	▲	▲	▲						▲	▲	≥1	1.2.3		
	Détruit à la coulée	Moulage avec modèle gazéifiable	▲		▲	▲					▲	▲	○	1.2		3.4	
<div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="width: 20px; height: 20px; background-color: black; margin-right: 5px;"></div> emploi habituel </div> <div style="display: flex; align-items: center; margin-top: 5px;"> <div style="width: 20px; height: 20px; border: 1px solid black; border-radius: 50%; margin-right: 5px;"></div> emploi possible </div>		POSSIBILITÉS TECHNIQUES															
		<p>* TYPE DE PIÈCE</p> <p>1 : Très grosse (> 10³kg)</p> <p>2 : Grosse (> 100 kg)</p> <p>3 : Moyenne (> 10 kg)</p> <p>4 : Petite (0,5 à 10 kg)</p> <p>5 : Très petite (10⁻³ à 0,5 kg)</p>					<p>** Matériel spécifique à une pièce donnée, à l'exclusion des machines qui mettent en œuvre les outillages de production des moules et des noyaux.</p>					<p>*** Centrifugation dans une coquille métallique garnie d'une couche de sable réfectionnée avant chaque coulée.</p>					

Fig. (2.-39)-tableau des possibilités techniques

comparaison des procédés de moulage:

OUTILLAGE (1)	PROCÉDÉS DE MOULAGE	Caractéristiques de l'empreinte					Coût de l'outillage	Nombre minimal de moules à réaliser	Coût total (3) d'un moule	
		Forme typique	Dimensions maximales	État de surface (8)	Tolérances	Relation avec les formes de la pièce en service (2)				
Planche à trousser modèles simplifiés, boîte à noyau éventuellement	Troussage	●	■	◐	◑	◒	■	1	■	
	Centrifugation (5)	●	■	◐(6)	◑	◒(7)	●	100	●(3)	
Modèle Boîte à noyaux	Sable avec liant argileux	◑	■	◐	◑	◒	■	1	●(3)	
	Sable aggloméré chimiquement à froid	◑	■	◐	◑	◒	■	1	●(3)	
	Céramique	■	◑	■	■	■	■	1	●(3)	
Plaque modèle Boîte à noyaux	Moule	Sable aggloméré chimiquement à froid	◑	●	◐	●	◑	■	100	●(4)
		Sable argileux serré B.P.	◑	◑	◐	◑	◒	■	100	●(4)
		Sable argileux étuvé	◑	●	◐	◑	◒	■	100	●(4)
		Sable argileux serré H.P.	◑	●	◐	◑	◒	●	1000	●(4)
		Carapace	◑	◑	●	■	●	●	500	●(4)
Boîte à noyaux	Noyau	Durci dans la boîte froide	◑	●	◐	●	◑	■	100	●(4)
		Durci hors de la boîte	◑	◑	◐	◑	◒	■	100	●(4)
		Durci dans la boîte chaude	◑	◑	◐	◑	◒	●	1000	●(4)
		Carapace	■	◑	●	■	●	●	500	●(4)
Modèle non permanent	détruit avant la coulée	Moulage de précision à modèle perdu	◑	■	■	■	■	100	●(4)	
		Moulage avec modèle fragmenté ou brûlé	■	■	◐	◑	■	■	1	■
	détruit à la coulée	Moulage avec modèle gazéifiable	■	■	◐	◑	●	■	1	■

- (1) Matériel spécifique à une pièce donnée à l'exclusion des machines qui mettent en œuvre les outillages de production des moules et des noyaux.
- (2) Obtenues éventuellement par usinage.
- (3) Y compris matériaux de moulage non recyclés. Il diminue si la série augmente.
- (4) Comme (3) plus la possibilité d'avoir plusieurs empreintes dans le moule.
- (5) Garnissage en sable refait avant la coulée.
- (6) Intérieur indépendant du moule.
- (7) Épaisseur de la pièce brute indépendante du moule.
- (8) Varie dans le même sens que : la finesse du sable, l'état de surface de l'outillage, la qualité des enduits.

	■	◑	◒	◐	◑	◒
Forme	Complexe	En partie complexe	Révolution	Profonde	Relief complexe	Relief simple
Dimensions	≥ 5 m	5 à 2 m	2 à 1 m	1 à 0,6 m	0,6 à 0,3 m	< 0,30 m
Classe	Excellent	Très bon	Bon	Assez bon	moyen	Médiocre
Coût	Faible	Moyen	Élevé	Très élevé		

Composition des procédés de moulage

2

Fig. (2-.40)-tableau de comparaison des procédés de moulage

A.2/Outillage:

1. Les châssis:

Le châssis est un cadre rigide devant contenir et maintenir le sable qui constitue le moule.

Les matériaux constitutifs sont : l'acier moulé, la fonte, l'acier profilé ou soudé, un alliage d'aluminium.

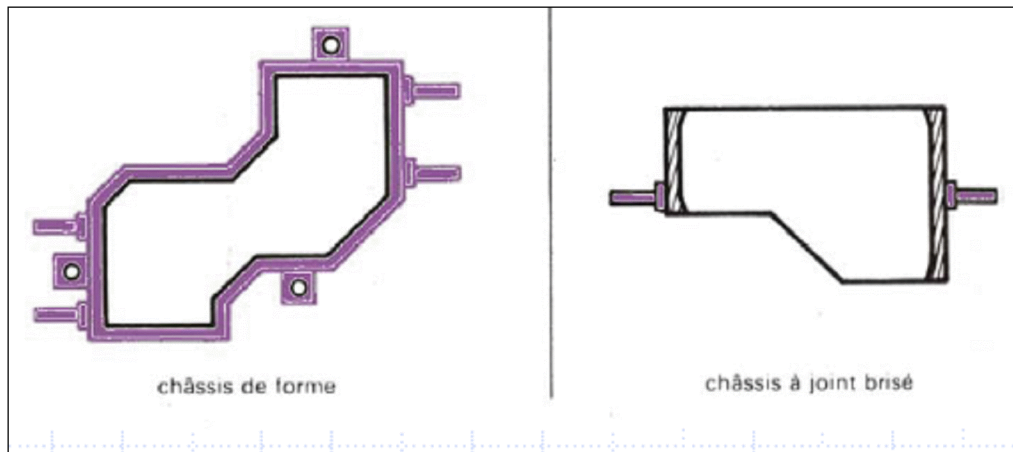


Fig. (2-41)-type de châssis

Les formes sont diverses : carrée, rectangulaire, ronde, polygonale, de forme quelconque ou « châssis » de forme.

Il existe deux types de châssis :

- les châssis pour moulage à la main
- les châssis pour moulage mécanique.

2. MODÈLES ET PLAQUES-MODÈLES

Le modèle d'une pièce donnée permet la confection d'une empreinte de celle-ci dans un matériau de moulage.

Il faut distinguer deux types de modèle:

- Le modèle.
- La plaque-modèle.

Le premier type peut être un modèle ne reproduisant qu'une partie des formes et comportant les portées de noyaux.

Dans ce type, on peut différencier quatre classes de modèle.

2-1/ La planche à trousser

La rotation autour d'un axe de cette planche, ou la translation sur des gabarits engendrent les formes de la pièce. Ce modèle est en bois.

2-2/ La carcasse et le squelette

La carcasse est composée d'une ossature en bois garnie de sable de moulage pour matérialiser les formes extérieures. Le squelette permet la venue des formes intérieures et extérieures.

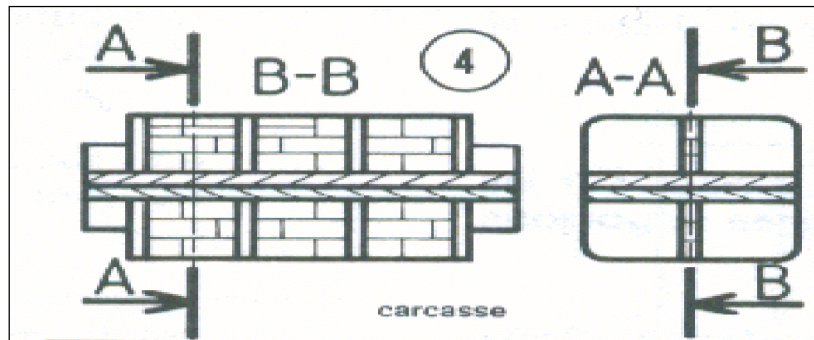


Fig. (2-42)-schéma d'une carcasse

2-3/Le modèle destructible

Ce modèle peut être constitué de blocs et de plaques, en polystyrène expansé, assemblés, collés et usinés. Il peut être en polystyrène injecté, en urée, en cire.

2-4/Le modèle au naturel

C'est une réplique exacte de la pièce brute. Il peut être en deux parties, le modèle étant coupé au joint. Il est en bois vernis ou en plâtre.

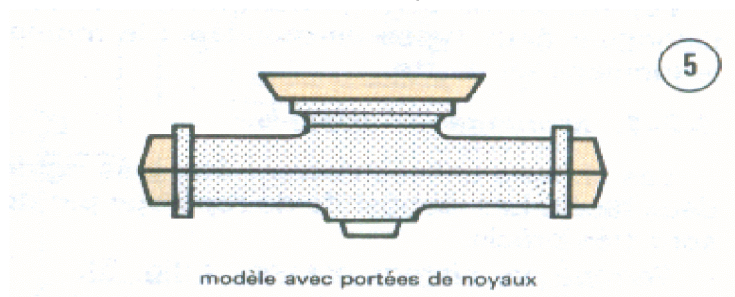


Fig. (2-43)-modèle avec portées de noyaux

Le deuxième type est un modèle qui détermine les formes de la pièce, le joint, le système de coulée et le système d'alimentation.

2-5/ Le modèle monté sur plaque

Ce modèle est soit en bois dur venis ; soit en matière plastique (avec renforcement par du métal des parties soumises à l'usure) ; soit en métal (acier ou bronze). La plaque est en acier et les dimensions sont consignées

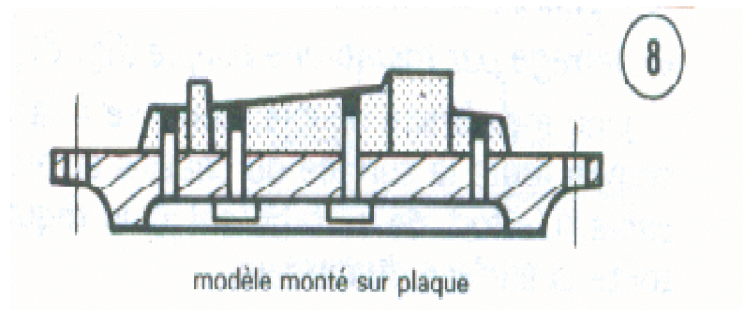


Fig. (2-.44)-modèle monté sur plaque

2-6/ La plaque-modèle monobloc

Ce modèle peut être en alliage d'aluminium coulé puis gratté, en résine synthétique surmoulée sur un modèle, en résine stratifiée, en ciment coulé dans une frette métallique, en métal entièrement usiné.

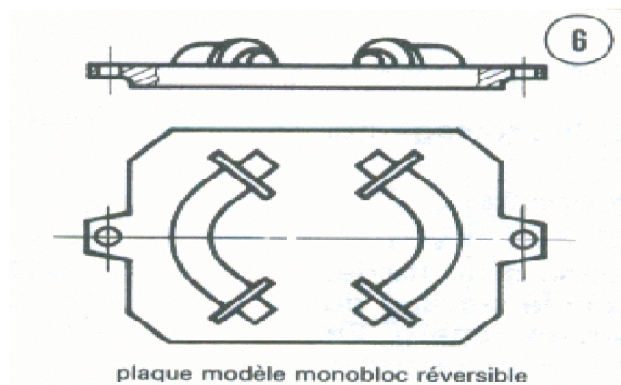


Fig. (2-.45)-plaque modèle monobloc réversible

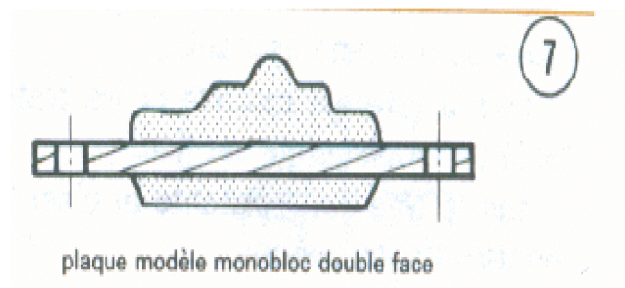


Fig. (2-.46)-plaque modèle monobloc double face

La plaque-modèle peut être simple, double, double face, réversible.

3. MACHINES A MOULER

Une machine à mouler effectue les deux opérations fondamentales pour la confection d'une empreinte : le serrage du sable et le démoulage du modèle. Les machines comportent donc un système de serrage et un dispositif de démoulage. Suivant la pression obtenue au joint du moule, on peut distinguer deux types de serrage:

- Le serrage sous basse pression de 1,5 à 5 bars.
- Le serrage sous moyenne et haute pression de 7 à 15 bars.

Les modes de serrage diffèrent suivant ces deux types de serrage, ainsi que la technologie des machines.

3-1/ Serrage sous basse pression

Les modes de serrage sont les suivants :

- Par pression.
- Par secousses.

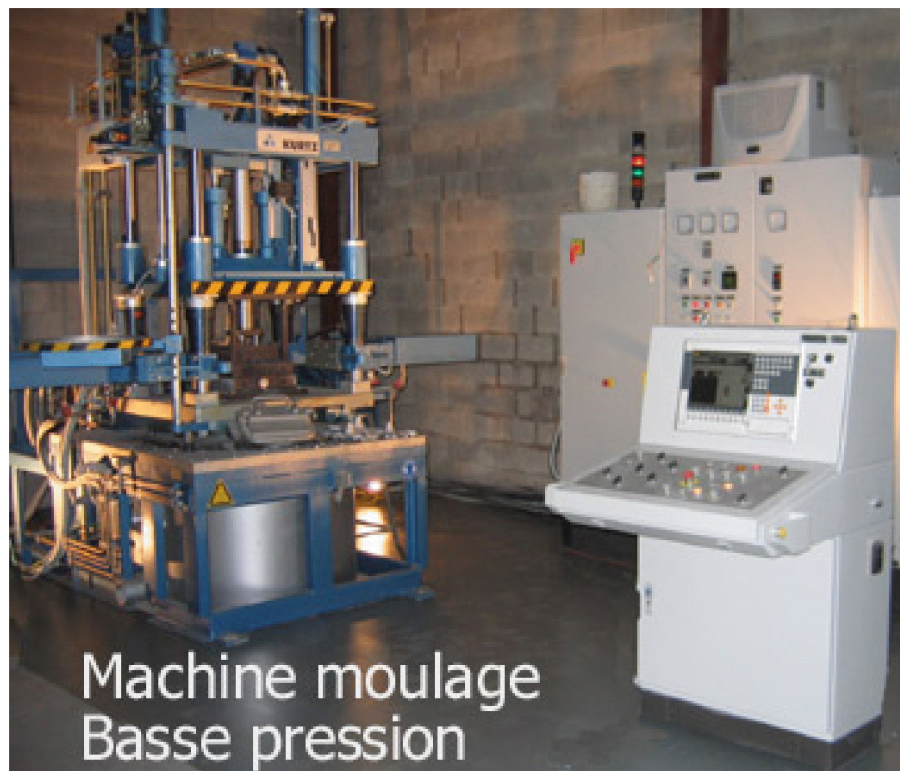


Fig. (2-47)-machine moulage basse pression

- Par pression et secousses.
- Par injection du sable.

3-2/Serrage sous moyenne et haute pression

Les modes de serrage sont différents et il faut également distinguer deux types de moulage :



Fig. (2-.48)-machine démontrant machine de moulage sous pression

Le moulage **en châssis** et le moulage **en motte**.

4. LES BOITES A NOYAUX

Une boîte à noyaux est un modèle permettant la réalisation d'un noyau en sable. La conception de ce modèle doit être telle qu'elle permette l'introduction du sable, son serrage dans cette boîte et le déboîtage du noyau sans détérioration de celui-ci.

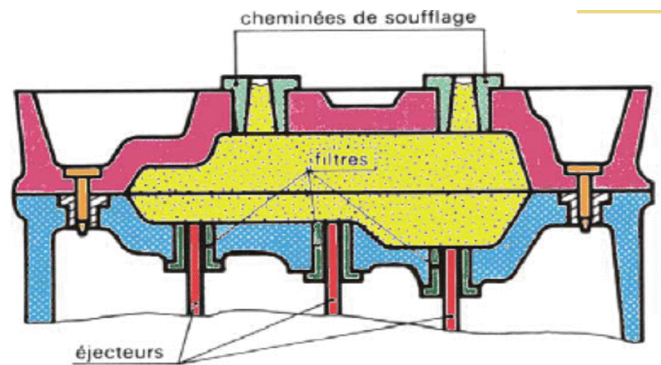


Fig. (2-49)-boite à noyaux

Suivant les matériaux de construction utilisés, on trouve trois types de ces modèles :

- les boîtes à noyaux en bois,
- les boîtes à noyaux métalliques,
- les boîtes à noyaux en résine synthétique.

5. MACHINES DE NOYAUTAGE

La fabrication d'un noyau en sable implique une opération de remplissage de la boîte et une opération de serrage de ce sable. La technique la plus utilisée est celle qui consiste à remplir et serrer simultanément le sable par soufflage de celui-ci dans une boîte à noyau métallique. L'application de cette technique nécessite donc une machine spéciale et une boîte à noyaux robuste et précise.

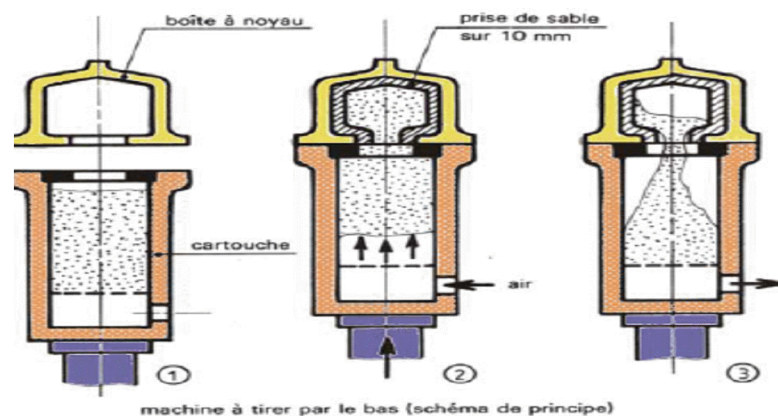


Fig. (2-50)-machine à nettoyage

Toutefois, on peut citer les machines à secousses et à pression pour la fabrication des gros noyaux ; ces machines étant absolument identiques aux machines à mouler du même type.

B) Moulage en moule permanent:

1) Moule par coquille

Les moules métalliques permettent de fabriquer des pièces en grandes séries. Mais pour des quantités moindres, le moulage en coquille constitue un bon compromis entre le sable et l'injection. Les pièces peuvent avoir des formes extérieures plus complexes et présenter un bel aspect de surface.

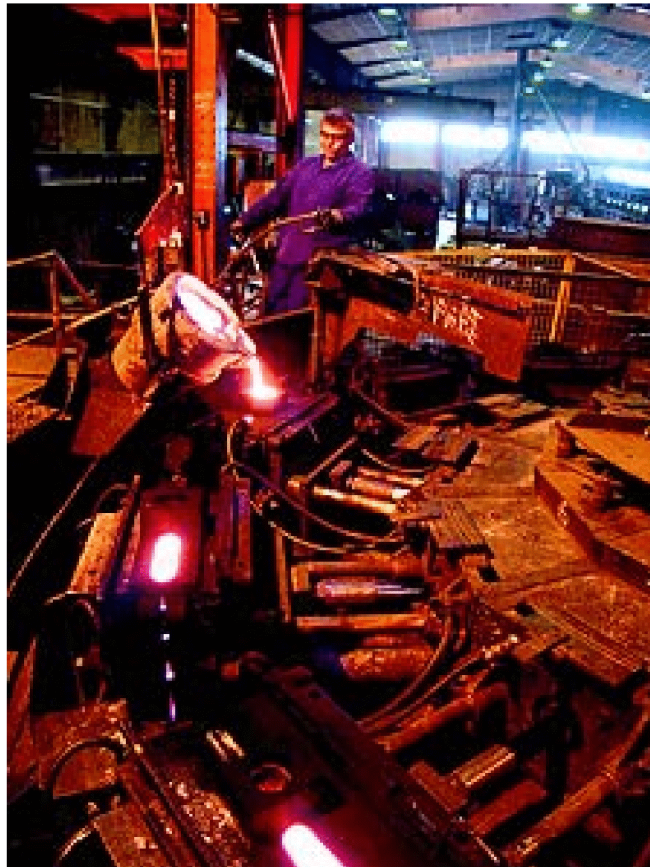


Fig. (2-.51)-coulé en coquille dans l'industrie

L'utilisation des alliages à traitement thermique est possible, de même que certaines opérations de protection, comme l'oxydation anodique.

Ce moule est typiquement constitué d'une chape (ou embase) et de deux demi moules coulissant sur cette chape, qu'on appelle les coquilles. Le moulage en coquille, lors de petites séries les coquilles métalliques sont munies de poignées étudiées pour dissiper la chaleur (ce qui n'empêche pas de les manipuler avec des gants) et sont manœuvrées manuellement. Dans le cas de plus grandes séries, elles sont manœuvrées sur machines, à l'aide de vérins pneumatiques ou hydrauliques.

- **Principe du procédé**

3-1 Mise en œuvre :

La coquille est un moule permanent qui permet de réaliser des opérations de moulage, remplissage, alimentation et éjection.

Aujourd'hui les coquilles réalisées sont de véritables machines où la mécanisation et l'automatisation y sont très poussées.

Le procédé de moulage en coquille peut être utilisé avantageusement à partir d'une série de 2000 pièces. Le but est d'introduire dans un creux, une quantité d'alliage métallique, liquide, qui donnera après solidifications, une forme conjuguée de ce creux.

Cependant, le moule permanent nécessite une préparation avant la coulée qui consiste à :

- éventuellement, monter l'outillage sur la machine appropriée (principalement en grandes séries) munie de ses vérins,
- préchauffer les coquilles,
- vérifier, voir refaire le **poteyage**.

Poteyer une coquille consiste à enduire les parties en contact avec le métal en fusion de différents produits destinés, notamment, à contrôler la solidification, de la même manière que la disposition de masselottes et de refroidisseurs dans un moule sable ; ainsi qu'à éviter une adhérence du métal en fusion sur le moule métallique (Cas des alliages d'aluminium, l'alliage adhère facilement.

3-2. Avantages :

- Rigidité de l'empreinte
- Grande précision dimensionnelle et l'état de surface des éléments moulants
- Conductibilité thermique élevée des éléments moulants.

Il en découle donc des pièces moulées :

- Avec un meilleur état de surface.
- Des caractéristiques mécaniques de l'alliage plus élevées.
- Une plus grande précision des dimensions.
- Un coût d'usinage plus faible.

3-3. Propriétés des matériaux

- Suppression de noyaux axiaux pour les pièces creuses de révolution.
- Augmentation de la compacité de l'alliage.
- La ségrégation centrale des éléments de faible masse volumique.
- Suppression presque systématique des systèmes de remplissage et d'alimentation.
- Réalisation dans un même moule de pièces en alliages composites centrifugés en couche successives
- Un meilleur état de surface
- Des caractéristiques mécaniques de l'alliage plus élevées
- Une plus grande précision des dimensions
- Coût d'usinage plus faible pour une pièce coulée en coquille.

2) Moulage basse pression :

2.1- Mise en œuvre :

Dans la coulée en moule sous basse pression, on obtient par ce procédé des pièces de fonderie ayant une meilleure intégrité métallurgique que les pièces faites par injection sous pression classique et on peut les recuire.

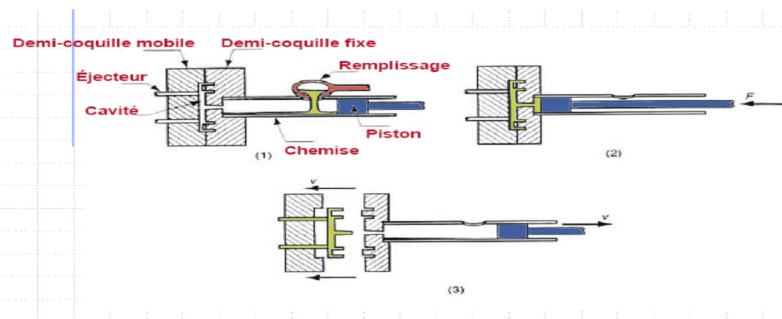


Fig. (2-.52)-schéma du moulage basse pression

Ce procédé offre la plupart des avantages de l'injection sous pression mais sans ses inconvénients. Les moules sont faits en fonte de fer qui est relativement meilleure marché et facile à usiner.

On peut utiliser des inserts en acier d'outillage pour des grandes séries ou des pièces complexes. Les coûts des outillages ne s'élève qu'à environ la moitié de ceux du moulage sous pression. Le procédé est seulement adapté aux alliages à bas points de fusion (Température de fusion $< 950^{\circ}\text{C}$). Les formes sont d'une complexité moyenne et on peut faire des contre dépouilles mais c'est coûteux.

2-2.-Intérêt du procédé :

Le procédé convient pour les alliages à bas point de fusion. On l'utilise de manière prédominante pour les alliages d'aluminium. Il donne une bonne définition de la surface et une meilleure intégrité métallurgique que l'injection sous pression. Un angle de dépouille de 2 à 3 degrés est requis pour permettre d'extraire les pièces du moule.

Ce procédé est généralement utilisé pour des roues d'automobile et têtes de cylindres, capot de boîte de vitesse et d'embrayage, boîtiers de transmission et de différentiels, stators de moteur électrique, capot des transformateurs et pièges thermiques.

3.3- Avantages :

Le principal avantage du procédé basse pression est le mode de remplissage, calme, de bas en haut qui préserve la qualité de l'alliage. La solidification se propage naturellement des zones froides aux zones chaudes, des zones éloignées vers l'attaque.

Lorsque la pièce est solide, on relâche la pression du four et le métal resté liquide recoule dans le four, séparant ainsi la pièce du système d'alimentation.

II. Caractéristique et choix des alliages de fonderie

1. Généralité :

Particularités des alliages de fonderie :

- **élaboration** ou fusion pour atteindre l'état liquide.
- **solidification** dans le moule.

- refroidissement dans le moule.

Dans ce processus de double changement d'état physique solide-liquide-solide suivi d'un refroidissement, de nombreux phénomènes interviennent, principalement **chimiques, physiques, thermiques**. Ces phénomènes conditionnent les moyens à mettre en œuvre pour obtenir une pièce de fonderie dont la qualité est conforme au cahier des charges

On appelle alliage d'un métal donné un alliage métallique contenant au moins 50 % de ce métal. Le métal de base est celui dont la teneur est la plus forte (elle peut être inférieure à 50 % dans les alliages complexes).

Les éléments d'addition sont les métaux et les métalloïdes autres que le métal de base ajoutés afin d'en modifier les propriétés. Les autres éléments sont appelés impuretés

2. ÉLABORATION DE L'ALLIAGE

- choix des composants en fonction des propriétés à obtenir, ou fusion de lingots d'alliage défini .
- règles de fusion et matériel spécifiques à chaque alliage.
- éventuellement traitements à l'état liquide par addition de très faible pourcentage d'éléments afin de modifier la structure de l'alliage à la solidification :
 - traitement de modification des alliages aluminium-silicium.
 - traitement d'inoculation et de sphéroïdisation des fontes.

3. COULABILITÉ

3-1. Aptitude de l'alliage de fonderie à remplir l'empreinte du moule

Dépend des paramètres :

- nature de l'alliage : propriétés thermiques, composition chimique, viscosité, tension superficielle, intervalle de solidification (variation inverse).
- température de surchauffe (variation de même sens).
- nature et température du moule.

3-2. Essai de coulabilité

Différents essais avec des moules-éprouvettes comparent soit des longueurs ou des hauteurs de canaux de section constante remplis par l'alliage, soit des propriétés physiques : viscosité, tension superficielle.

1. Introduction.

Le but de cette étude est la réalisation d'une pièce mécanique par procédé de fonderie qui consiste à obtenir à partir d'un alliage liquide une pièce saine de forme souhaitée.

Généralement, 80% des pièces coulées sont fabriquées par le procédé de moulage en sable vu les avantages qu'il offre dans les conditions d'une fonderie mécanique.

En élaborant le processus technologique de fabrication d'une pièce coulée, on doit déterminer :

- La position de la pièce dans le moule pendant le moulage ;
- Le plan de joint ;
- Les dépouilles et contre dépouilles (dans le cas des modèles) ;
- Les retraits de la pièce ;
- La valeur de surépaisseur d'usinage ;
- Le nombre de noyaux et leurs frontières ;
- La construction et les dimensions de systèmes de coulée et d'alimentation ;
- Le nombre des pièces dans le moule et leur disposition ;
- Le choix des équipements technologiques ;
- La composition du sable de moulage et celle de noyautage ;
- Le choix du processus d'exécution du moule et du noyau ;
- La technologie de la coulée, du décochage et du nettoyage.

2. Processus technologique de fabrication de la pièce

L'élaboration de la pièce n'est autre que le suivi du processus de production du dessin technique jusqu'à l'obtention de la pièce de moulage. Le schéma suivant montre les interventions de trois personnes : constructeur, modelleur. Il souligne de lui-même la nécessité d'une collaboration très étroite entre ces personnes, chacune étant conscient des problèmes qui se posent aux deux autres dans la réalisation d'une pièce donnée. Le schéma général de la fabrication d'une pièce coulée est le suivant :

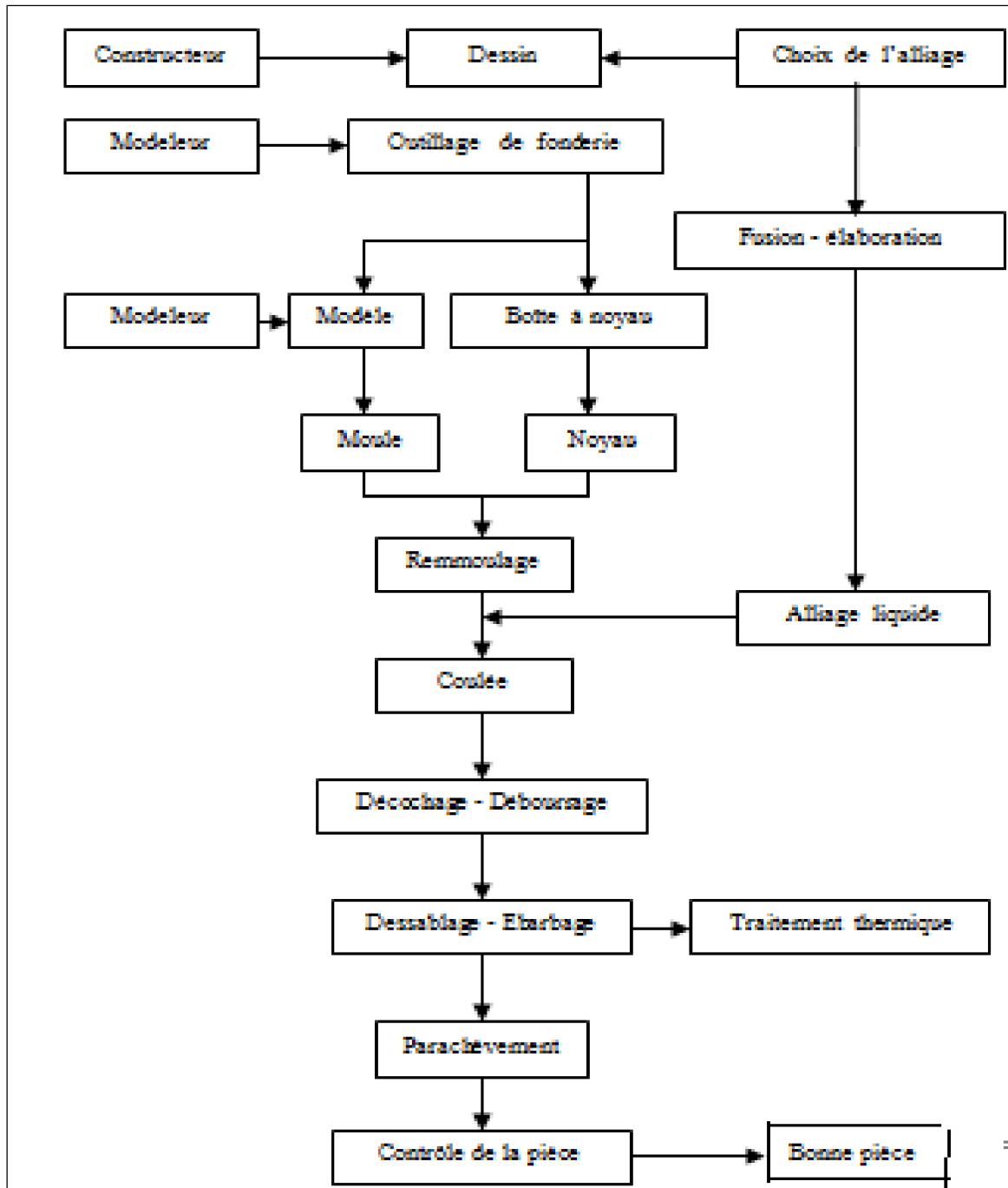


Fig.(3-1) - Schéma général de la fabrication d'une pièce coulée

2.1. Modelage.

C'est l'opération initiale de la fonderie qui consiste à exécuter le modèle de la pièce désirée. Dans notre cas on choisit le modèle métallique (en alliage d'aluminium), parce qu'on l'utilise dans la production en masse et en grande série. Il présente les avantages suivants :

- Grande résistance mécanique ;
- Grande longévité, constance des dimensions.



Fig. (3-2)-atelier de modelage

Le modèle est fabriqué en alliage d'aluminium qui à des bonnes caractéristiques mécaniques, il est léger et facilite de ce fait les manutentions.

2.2. Disposition de la pièce dans le moule.

En fonction de la forme et de la complexité de la pièce, la disposition de celle-ci doit assurer :

- La solidification dirigée ;
- Les parties importantes de la pièce doivent être disposées dans les parties inférieures du moule.

2.3. Le plan de joint.

C'est la surface de séparation des demi-mondes.

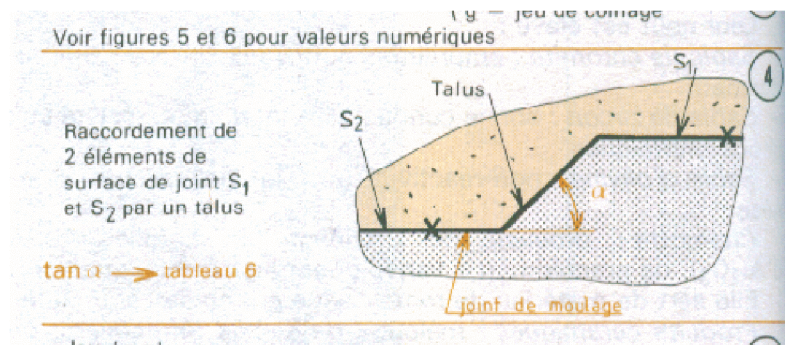


Fig. (3-3)-le plan de joint

Pour notre cas, un même plan de joint pour le modèle et le moule (horizontal) présente les avantages suivants :

- Commodité de serrage et du moulage ;
- L'extraction facile du modèle à partir du moule ;
- La commodité du placement du noyau et contrôle de leur position ;
- Le nombre de joint doit être le minimum possible.

2.4. Surépaisseur d'usinage.

Pour assurer une bonne qualité de la surface de la pièce, il est nécessaire de donner à cette pièce des surépaisseurs d'usinage.

La surépaisseur d'usinage dépend de la méthode de moulage de l'alliage coulé, de la précision de la pièce, des dimensions de la pièce et de la position de la surface usinée. Dans notre cas, la surépaisseur d'usinage est égale à 2 mm

2.5. Les dépouilles.

Pour assurer l'extraction du modèle sans détérioration du moule, les parois verticales doivent avoir une pente appelée dépouille. Pour notre pièce, on utilise des dépouilles de l'ordre de 3°.

2.6. Le retrait.

Le retrait des pièces coulées est en fonction de :

- La nature de l'alliage ;
- Dimension de la pièce ;
- La compressibilité des moules et des noyaux ;

Pour compenser ce retrait, on exécute les modèles à l'aide d'une règle appelée mètre à retrait.

Pour notre pièce le retrait volumique est de 6%, et le retrait linéaire est de 1,20 à 1,80%.

2.7. Choix du procédé de moulage.

Le type de moulage est choisi d'après les exigences de la fabrication et de mode d'utilisation.

Dans notre cas on a choisi le moulage à vert avec machine à mouler (à secousses et pression) qui assure un serrage optimale, et une densité de sable uniforme. On doit utiliser un sable unique et le démoulage se fait par chandelles. Le sable utilisé possède la composition suivante :

- Sable neuf..... 6% ;
- Sable régénéré..... 80% ;
- Argile bentonitique..... 8% ;
- Noir de fonderie..... 1,5% ;
- Eau 4,5%.

*L'argile est utilisée comme un liant.

*Le charbon pulvérisé nous permet d'améliorer l'état de surface de la pièce.

2.8. Choix du procédé de serrage :

Le serrage s'effectue par une machine combinée (secousses et pression):

Les secousses permettant d'obtenir un serrage intense ou important pour la partie avoisinante du moule et aussi elle nous donne un serrage homogène sur toute la surface de l'empreinte ; La pression est étulisé pour avoir un préformage au niveau du dos du demi-monde.

2.9. Choix et dimensions du châssis

Les châssis sont des cadres rigides fabriqués en bois, en fonte, en acier ou en alliages d'aluminium dont le rôle est de maintenir la motte de sable qui contient l'empreinte pendant le travail, le transport et la coulée. Le repérage des différentes parties du châssis se fait à l'aide de conjoint fixes dans les oreilles de l'un des châssis et qui pénètrent dans les trous percés sur les parties assemblées.

On a choisi des châssis en fonte.

3. Choix et calcul des systèmes de coulée et d'alimentation :

3.1. Choix du système de coulée et d'alimentation

Le système de coulée latérale est le meilleur, car il nous assure une bonne alimentation avec une solidification dirigée et une amenée calme du métal ; il est composé de :

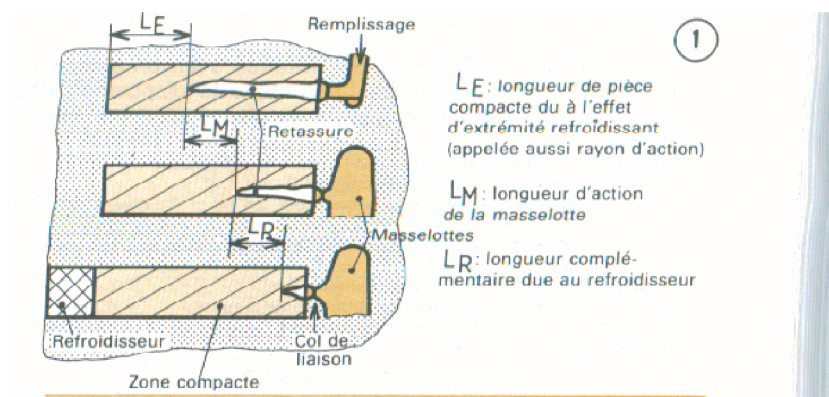


Fig. (3-3)-système de coulée

- Un entonnoir ;
- Une descente ;
- Un chenal ;
- huit attaques ;
- deux masselottes.

A. Entonnoir

Son but est de faciliter l'introduction du métal dans la moule avec un débit nécessaire sans éclaboussures, d'éviter les aspirations d'air dans le moule, d'arrêter les crasses, la mousse et les écumes qui pourraient s'échapper de la poche de diminuer l'effet dévastateur du métal en mouvement dans le moule.

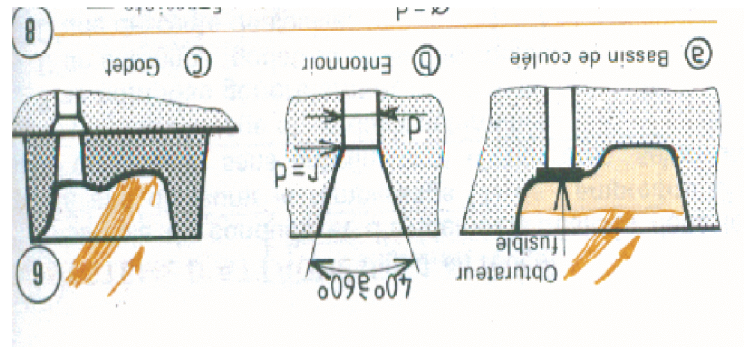


Fig. (3-4)-entonnoir de coulée

B. Descente de coulée

C'est un canal vertical qui relie l'entonnoir au piège à crasse

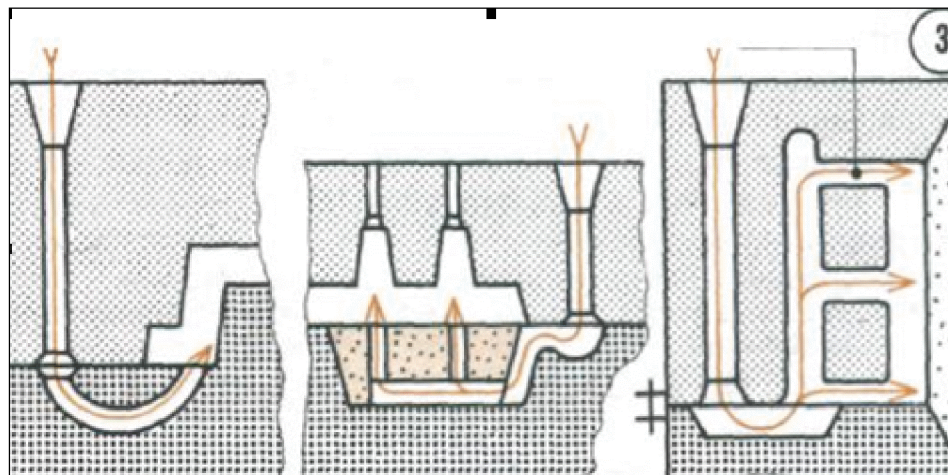


Fig. (3-5) dispositif de descente

On choisit une descente de section transversale circulaire qui permet de réduire la chute de température, les pertes de charges aussi d'éviter l'érosion et les chocs dans le fond du moule.

C. Chenal

C'est un canal horizontal reliant la descente aux attaques de coulée. Son rôle principal est de piéger la scorie et les inclusions non métalliques.

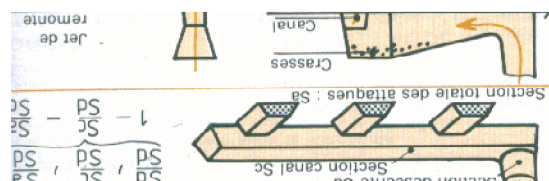


Fig. (3-5)-chenal

D. Attaques de coulée

Elles amènent le métal liquide dans l'empreinte du moule et doivent assurer :

- Un remplissage complet et correct ;
- Permettre un ébarbage sans risque ;
- Amener le métal dans le moule sans détérioration pour la pièce elle-même.

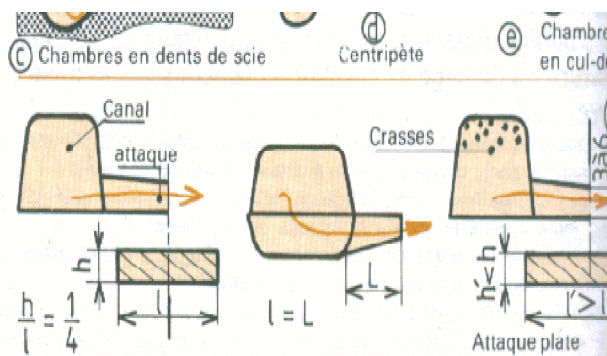


Fig. (3-6)- représentation attaques de coulée

E. Les événements

Se sont des conduits d'aération permettant l'évacuation des gaz de l'empreinte et des noyaux qui sont placés soit :

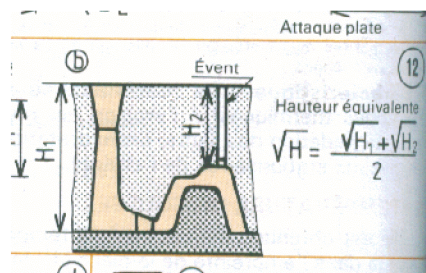
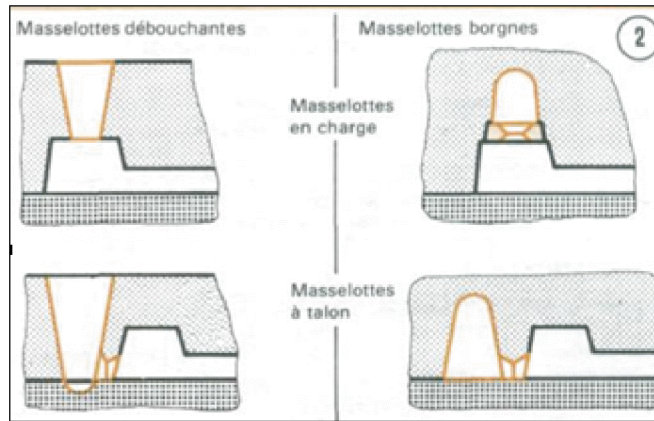


Fig. (3-6)-les événements

- Sur les parties hautes de la pièce ;
- Sur les parties les plus éloignées de la coulée.

F. La masselotte

C'est une réserve du métal en excédent qui adhère à la pièce coulée. Son rôle est de compenser le retrait et de déplacer les défauts à son niveau.



Voir la figure.

IV.3.2. Calcul de système de coulée et d'alimentation.

Puisque la pièce est en fonte et que sa masse est inférieure à 45 Kg, donc on utilise la formule de « DITTER ».

$$Sa = x \frac{\sqrt{G_{pc}}}{\sqrt{H_m}} \text{ (cm}^2\text{)} \dots\dots\dots(3-1)$$

Sa : Section globale des attaques pour une seule pièce coulée (Cm²) ;

G_{pc} : Masse de la pièce dans la position de coulée en (Kg) ;

H_m : Charge motrice du métal ;

X : Coefficient que l'on choisit en fonction de la pièce coulée (dépend de l'épaisseur). voir le tableau :

Epaisseur des parois (δ) en mm	2,5 à 3,5	3,5 à 8,0	> 8,0
X	5,8	4,9	4,3

D'après le tableau on prend X= 4,3 puisque δ = 8mm

- Application numérique:

$$Sa = 4,3 \frac{\sqrt{34}}{\sqrt{19.9}} = 5.62 \text{ cm}^2$$

Les sections globales de la descente de coulée et du chenal sont calculées selon la corrélation suivante :

$$\sum Sa : \sum Sch : \sum Sd = 1:1,06:1,11 \dots\dots\dots(3-2)$$

Détermination des dimensions linéaires des éléments du système de coulée :

- Dimension de le section de l'attaque.

$$\sum Sa = Sa \times n \dots\dots\dots(3-3)$$

n : Nombre des pièces par moule (on 4 pièces par moule) donc :

$$\sum Sa = 5.62 \times 1 = 5.62 \text{ cm}^2$$

Nombre d'attaques pour 1 pièces est de 3 donc on a :

$$\frac{5.62}{3} = 1,87 \text{ cm}^2 \dots\dots\dots(3-4)$$

H₀ : Hauteur de l'attaque.

- Détermination de G_{pc}, H_m:

$$G_{pc} = G_p + G_s \text{ (Kg)} \dots\dots\dots(3-5)$$

G_p : Masse de la pièce en (Kg) = 34kg.

G_s : Masse de surépaisseur d'usinage en Kg = 0,15 G_p.....(3-6)

$$G_{pc} = G_p + 0,15G_p$$

$$G_{pc} = 34 + 0,15(34)$$

$$G_{pc} = 39.1\text{Kg}$$

$$H_m = h_{dc} - \frac{h_s^2}{2h_{pc}} \dots\dots\dots(3-7)$$

h_{dc} : Hauteur de la descente de coulée en (cm).

h_{pc} : Hauteur de la pièce coulée (cm).

h_s : Hauteur de la partie de la pièce située dans le demi-moule supérieur. Voir la figure

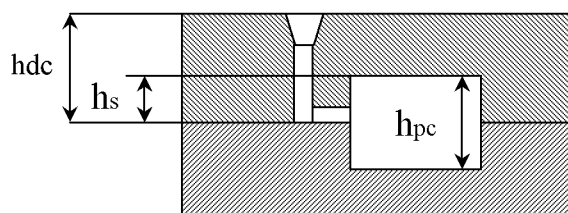


Fig. (3-7)-système de coulée

$$h_{dc} = 200 \text{ mm} = 20 \text{ cm}$$

$$h_{pc} = 50 \text{ mm} = 5 \text{ cm}$$

$$h_s = 25 \text{ mm} = 2.5 \text{ cm}$$

- Application numérique:

$$H_m = 20 - \frac{(2.5)^2}{2(5)} = 19.9\text{cm}$$

Donc :

On prend $H_0 = 10mm$

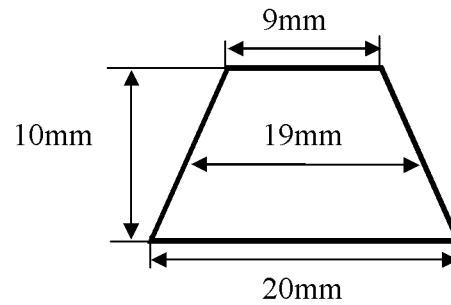


Fig. (3-7)-curation de la section d'attaque

Et comme

$$S_a = h_a \times b_a \dots\dots\dots(3-8)$$

Avec b_a est la longueur moyenne de l'attaque en (mm) donc :

$$b_a = \frac{s_a}{h_a} = \frac{1.89}{1} = 1.89 \approx 19mm \dots\dots\dots(3-9)$$

- Dimension de la section du chenal.

$$S_{ch} = 1,2h_{ch}^2 \dots\dots\dots(3-10)$$

$$h_{ch} = \sqrt{\frac{S_{ch}}{1,2}} \Rightarrow h_{ch} = \sqrt{\frac{5.9}{1,2}} = 2.21cm = 22mm \dots\dots\dots(3-11)$$

$$\Sigma S_{ch} = \Sigma S_a \times 1,06 = 5.62 \times 1,06 = 5.9cm^2 \dots\dots\dots(3-12)$$

$$b_{ch} = 1,2 \times 2.2 = 2.66cm = 27mm$$

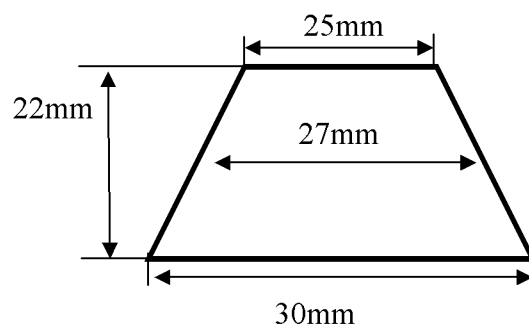


fig.(3-8)-cotation de la section du chenal

- Dimension de la section de la descente.

Puisque on a une seule descente donc :

$$\Sigma S_{dc} = S_{dc} \dots\dots\dots(3-12)$$

Où :

ΣS_{dc} : La section total de la descente de coulée (cm²).

Prenons la descente de la section circulaire :

$$S_{dc} = \frac{\pi d^2}{4} \Rightarrow d^2 = 4 \times \frac{S_{dc}}{\pi} \dots \dots \dots (3-13)$$

$$d_{dc} = \sqrt{4 \times \frac{S_{dc}}{\pi}} = \sqrt{4 \times \frac{7.15}{3.14}} = 2.67 \text{ cm} = 27 \text{ mm}$$

$$d_{\text{sup}} = d_{\text{inf}} + 0,01 h_{dc} \dots \dots \dots (3-14)$$

$$d_{\text{inf}} = d_{\text{sup}} - 0,01 h_{dc} \Rightarrow d_{\text{inf}} = 27 - 0,01 \times 20 = 26.8 \text{ mm}$$

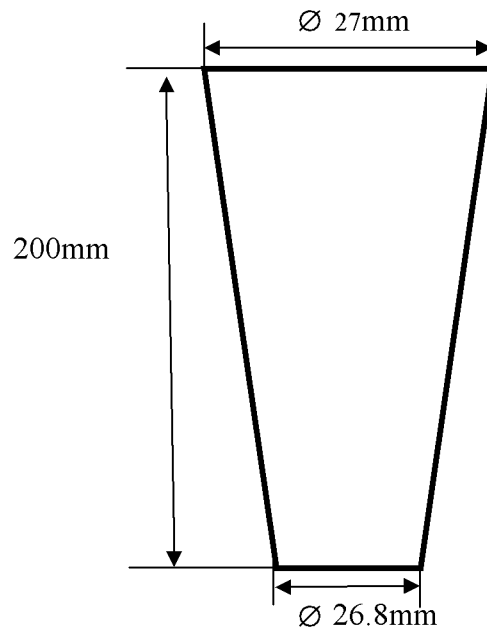


fig.(3-8)-cotations de la section de descente

- Dimension de l'entonnoir.

Le poids de la pièce est inférieur à 150 Kg d'où l'absence de bassin de coulée :

$$D_{\text{inf}} = D_{\text{sup}} = 27 \text{ mm} \quad \text{De la descente de coulée}$$

$$D_{\text{sup}} = 2 \text{ à } 3 D_{\text{inf}}$$

On prend :

$$D_{\text{sup}} = 2 D_{\text{inf}} = 2 \times 27 = 54 \text{ mm}$$

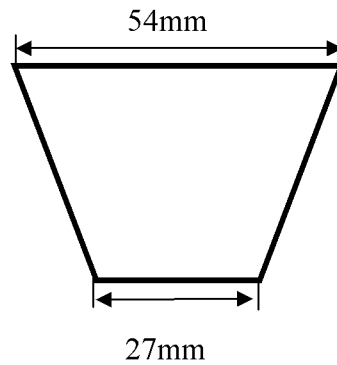


fig.(3-8)-cotations de l'enterreur

- Détermination du temps de remplissage.

$$\tau = S\sqrt{Gpc} \dots\dots\dots(3-15)$$

τ : Temps de remplissage du moule par le métal liquide en (sec) ;

Gpc : La masse de la pièce en (Kg) ;

S : Coefficient qui dépend de l'épaisseur des parois de la pièce.

Epaisseur des parois (mm)	2,5 à 3,5	3,5 à 8,0	>8,0
S	1,68	1,85	2,2

fig.(3-8)- tableau du coefficients en fonction de l'épaisseur de la paroi

Puisque l'épaisseur de la pièce $\delta = 8$ mm en prend $\delta = 2,2$ d'où :

$$\tau = 2,2\sqrt{34} = 12.8 \text{ sec}$$

Conclusion.

Lors de l'élaboration du processus technologique d'obtention d'une pièce par moulage, il est nécessaire :

- De connaître la composition chimique et la nature de l'alliage ;
- D'analyser la forme de la pièce pour permettre de déterminer le plan de joint et la disposition de la pièce dans le moule ;
- De choisir le mode de moulage et de noyautage convenable ;
- De déterminer et de calculer le nombre et les dimensions des éléments du système de coulée d'alimentation ;
- De déterminer le retrait pour permettre la confection du modèle.
- Et en fin, il faut choisir le mode de remplissage efficace et la position des attaques pour permettre un bon remplissage de l'empreinte et d'obtention d'une pièce saine.

1/ introduction

Notre projet consiste a la remise en marche d'un moteur électrique et cela par la construction d'aubes étage compresseur suivant le procédé de moulage en coquille par gravité.

Deux disciplines sont impliquées a savoir: la métallurgie et la fabrication mécanique.

Les aubes dont nous allons exposer les différentes phases de réalisation sont prévues pour supporter des contraintes thermiques et mécaniques, ce qui implique utilisation d'un métal adéquat et un parfait état de surface.

Cette technique de moulage a été parmi les créations humaines, car l'utilisation des métaux et plus encore la possibilité de les fondre, a marqué une étape décisive appelé âge du bronze (3000 ans avant Jésus-Christ) dans la maîtrise de la matière et la préparation au règne de la métallurgie.

2/la conception sur ordinateur

Autodesk Inventor est un logiciel de modélisation 3D réalisé par la société Autodesk, également créateur du logiciel de DAO Auto CAD.

Celui-ci permet d'exploiter le concept de conception paramétrique. C'est un logiciel de dessin technique à vocation mécanique que l'on retrouve dans plusieurs domaine : Automobile, Architecture, Construction, Biens de consommation, Équipement industriel, Matériel industriel, Éducation, Électricité, Production par processus

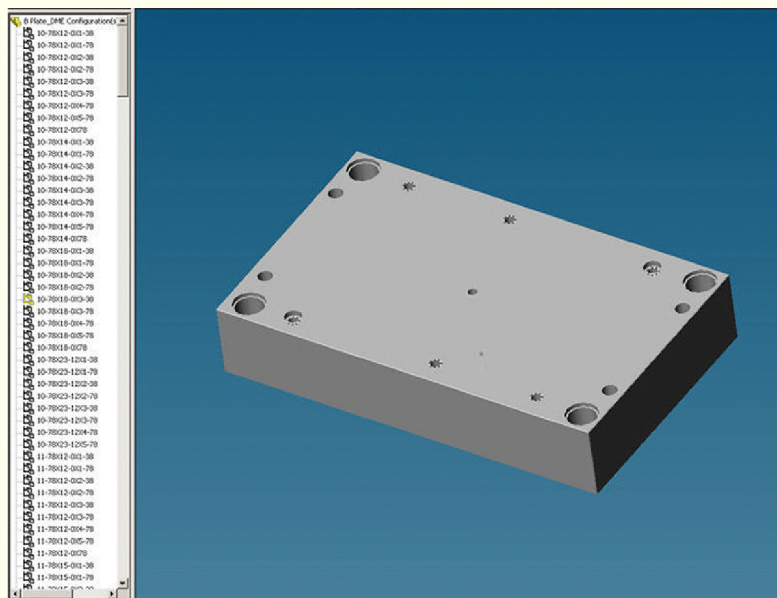


Fig. (4-1) .exemple de pièce réalisé avec invotor

Ce logiciel permet de modéliser :

- Des pièces
- Des assemblages
- Des dessins sous forme de plan

3/Etapes de réalisation

Les travaux de réalisation suivie sont abordé dans ce qui suit selon le plan en partant en premier des pièces (aubes stator, aubes rotor du compresseur) a savoir la réalisation modèle en bois du moule (coquille), le moule en fonte puis les pièces finales qui sont les aubes .

3-1/ étude de la pièce:

On partant des 2 types d'aubes, nous avons exécuté le plan pour les réaliser, pour cela nous avons procédé d'abord par le calcul des dimensions des pièces avec un pied à coulisse et ce, afin d'avoir les données nécessaires pour la réalisation du moule en fonte.



Fig. (4-2) photos des 2 aubes

En raison de sa conception, la pièce sera considérée comme pièce à dimensions pleines, c'est-à-dire qu'on ne prendra en considération que les 3 paramètres suivants : longueur, largeur et épaisseur de la pièce.

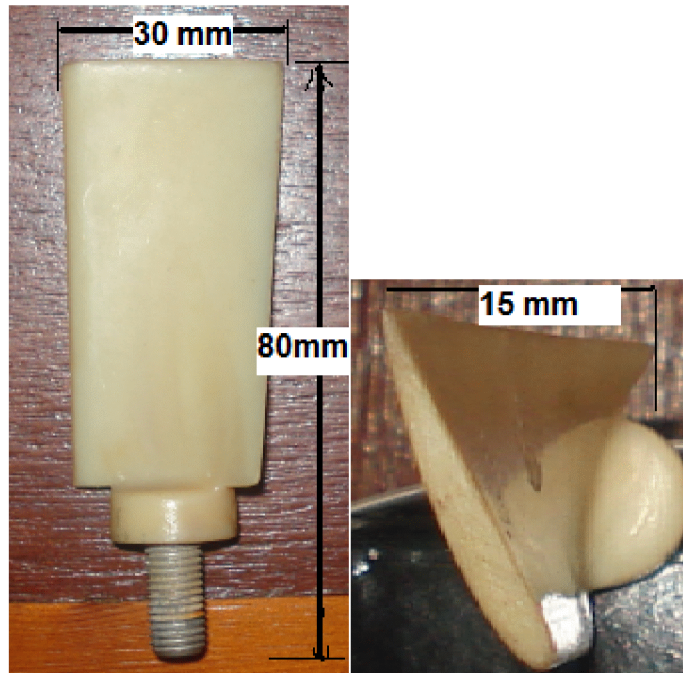


Fig. (4-3) démentions aube rotor

Les photos ci-dessus nous montrent la même opération pour l'aube stator, on ne prendra en considération que les 3 paramètres suivants : longueur, largeur et épaisseur de la pièce.

Fig. (4-4) démentions aubes stator

3-2-conception sur ordinateur:

Après avoir calculé les démentions des pièces on passera au traçage d'un croquis du modèle (boite à noyau) que le modeler suivra lors des étapes de confection.

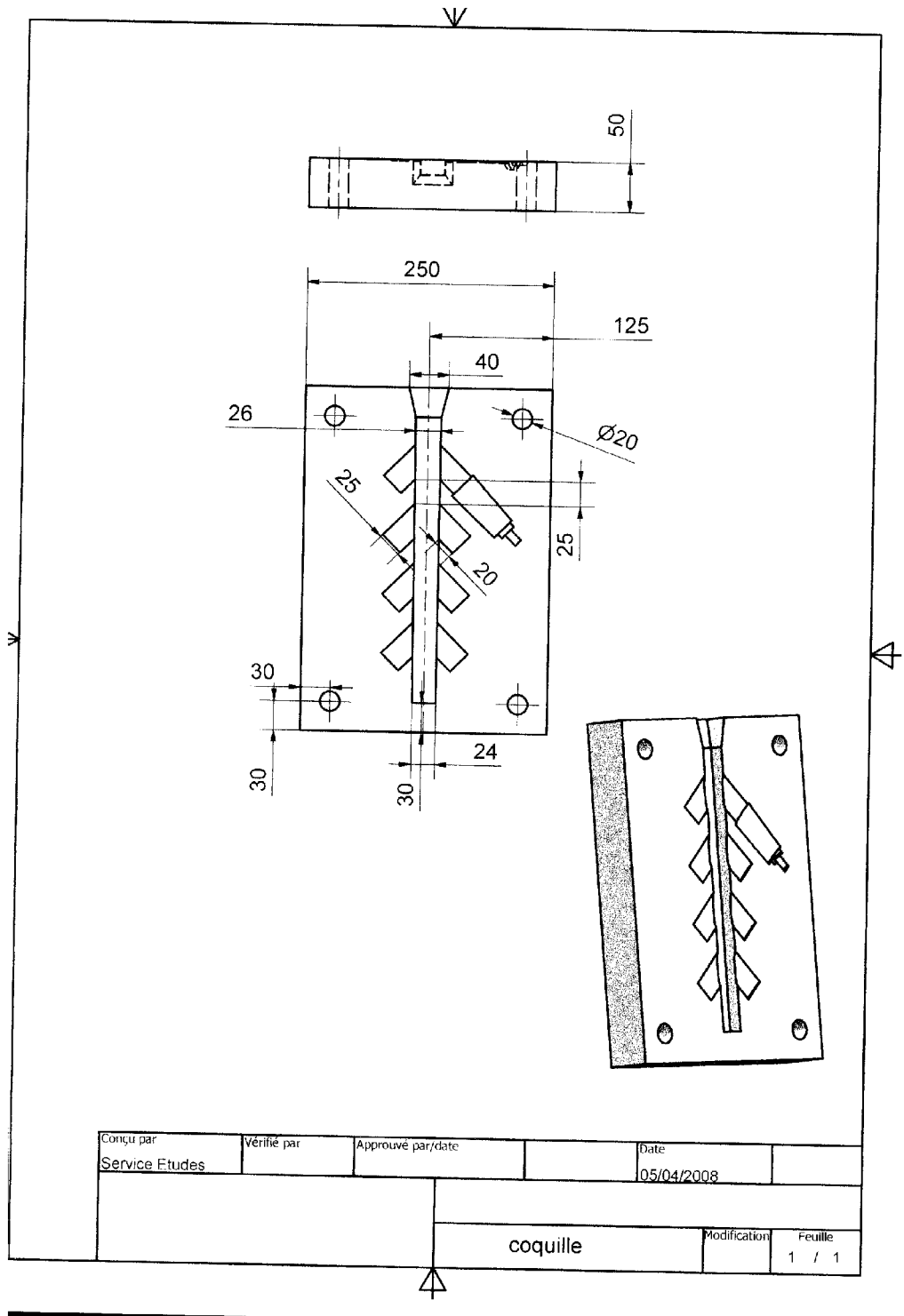


Fig. (4-5)) croquis du modèle

La photo précédente montre les cotes de chaque éléments de la coquille (système d'alimentation et d'attaque),cette figure à été réalisé par logiciel INVOTOR.

3-3-Confection d'un modèle:

L'opération de confection du modèle vient après calculs, cette opération est réalisée dans un atelier de modelage. Notre modèle sera en bois, c'est pour cela que des outils menuiserie seront utilisés.



Fig. (4-6) atelier de Modelage de la société ELFEL EL-HARACH

La confection du modèle à nécessiter plusieurs étapes, à savoir :

a) Réalisation sur bois (le modèle) :

Découpage en 2 parties d'une planche d'une 700x250x80mm pour la surface inférieure et supérieure du moule.



Fig. (4-7) découpage du bois

Avant tout, le bois utilisé doit être de bonne qualité, et que les deux parties doivent être de même dimension.

Afin de rendre ces 2 parties adéquates à la confection de ce modèle et avec une épaisseur de 5 cm, un rabotage à été nécessaire.



Fig. (4-8)-sillage d'une partie

Les extrémités de ces 2 parties seront passés au tapie de sillage pour la formation d'angle d'extraction appelé aussi la dépouille; cet angle nous facilitera l'extraction du modèle enfoui dans le sable lors de la prise d'empreinte du moule.



Fig. (4-9)-sillage latérale (dépouille)

Afin de rendre les surfaces de cette pièce lisse, un travail de ponçage a été effectué.

La photo ci-dessous, nous montre le modelleur entrain de régler la vitesse de rotation du disque de la ponceuse et afin d'obtenir un bon état de surface.



Fig. (4-11)-ponçage des parties externes du modèle

Lors de cette confection on tchera de ne pas oublie que c'est un travail basé sur la symétrie de 2 pièces, c'est pourquoi des goujons de centrage serons placé sur les 2 pièces en bois.

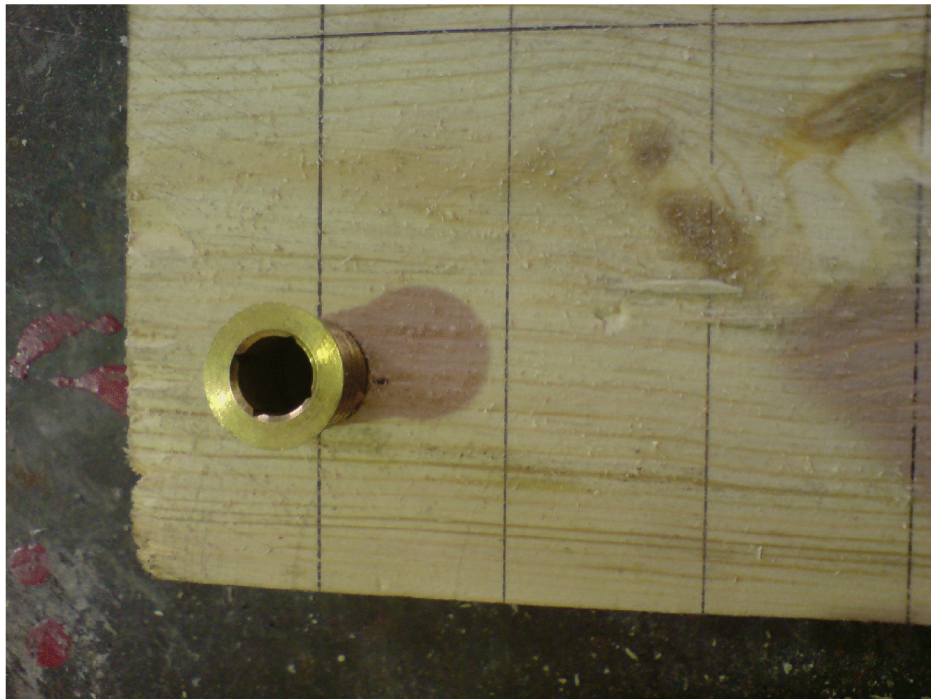


Fig. (4-12)-goujon en cuivre de diamètre 7mm

Ces goujons seront insérés après repérage et perçage sur les pièces en bois.
Le résultat des étapes citées ci avant nous a permis de fabriquer un modèle en bois vierge.

La photo ci-dessous nous montre le résultat escompté (rabotage et ponçage de la pièce)



Fig. (4-13) le roulage manuel

Une projection du croquis du modèle (réalisation avant le logiciel INVOTOR), a été effectuée sur la pièce ainsi qu'un taillage sur bois du système de coulée.

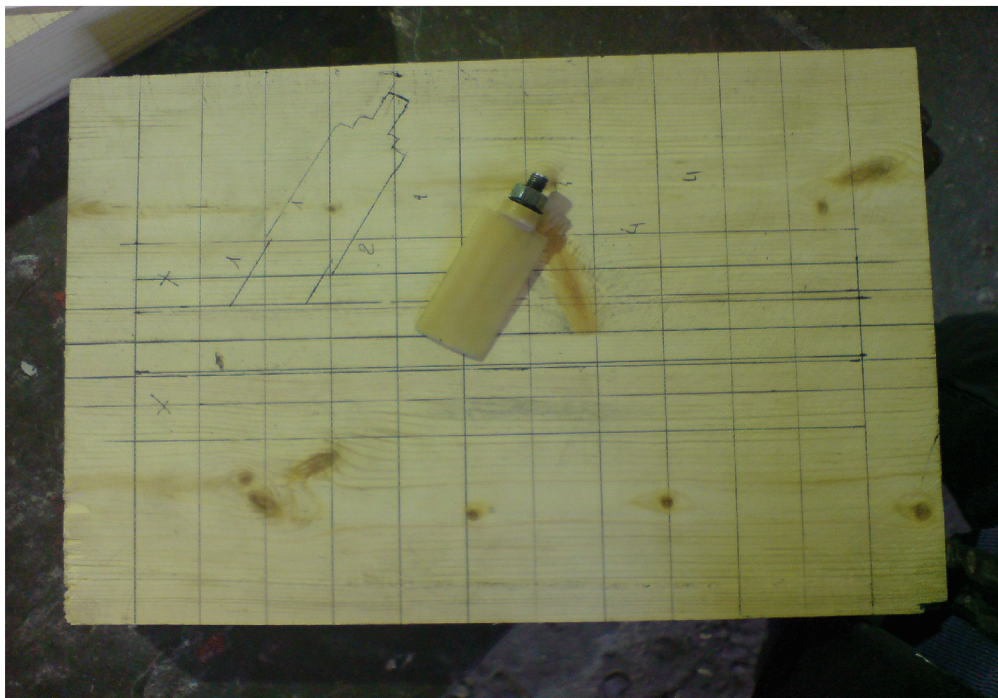


Fig. (4-14)-figure montent le traçage qui a été fait

Il est à rappeler qu'un traçage à été rendu nécessaire pour un repérage lors de la reproduction des empreintes d'aubes sur bois.

L'ensemble de ces travaux ont servi à l'aboutissement du négatif.



Fig. (4-15) _application du mastifer dans le Creus

Le taillage de la forme de l'empreinte a été suivie par un remplissage d'un produit appelé mastifer (mastique pour carrosserie de véhiculer).

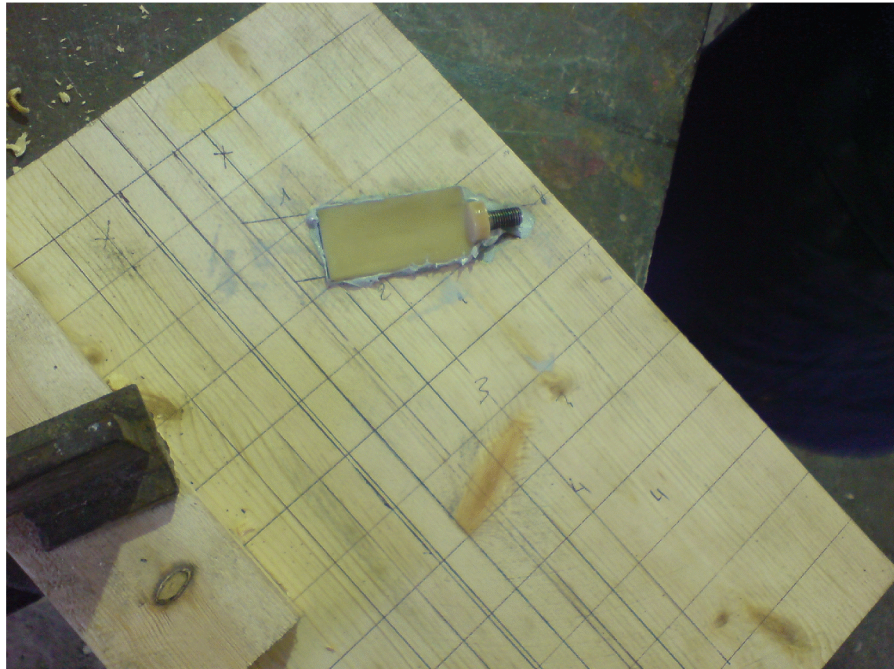


Fig. (4-16)-dépose de la pièce sur le mastique pour la réalisation de l'empreinte

Le mastifer est un produit moue pouvant assurer une bonne adhésion sur le bois

La présente photo, nous montre le remplissage de la surface d'emprunte



Fig. (4-17)-figure démontrant modèle avec toutes pièces

Cette opération à été élargie à l'ensemble de la surface pouvant contenir les aubes qui sont au nombre de huit (08)



Fig. (4-18)-taillage du système de coulé (descente)

Pour le drainage de la coulée, il a fallu effectuer un traçage d'une descente ainsi que des rainures pour l'aboutissement de cette même coulée aux empreintes des aubes.

La photo ci-dessous, nous montre la réservation à l'aide d'un ciseau de l'emplacement de l'entonnoir.



Fig. (4-19)-Taillage de l'entonnoir

Après cela il a fallu procéder au taillage de la forme de l'entonnoir.

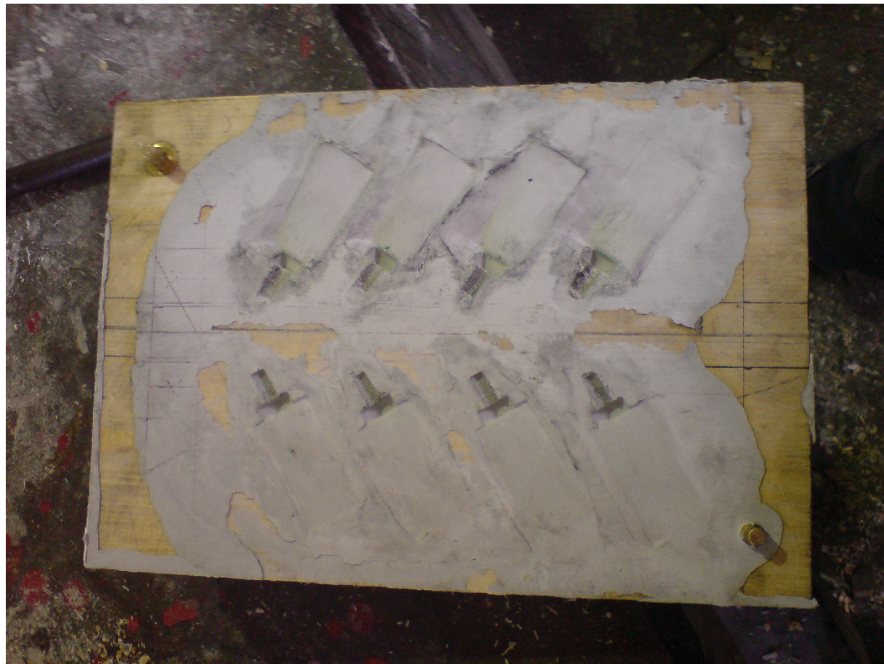


Fig. (4-20) – étalage de toutes les pièces sur la 2 eme partie du modèle

Pour une surface propre, une application d'une couche de mastic à été rendue nécessaire sur cette surface

Le non adhésion des grains de sable sur les parois du modèle lors de l'enfouissement, a nécessité l'application d'une couche de protection appelé plombagine.



Fig. (4-21)-figure montrant le modèle avec couche de plombagine appliqué dessus

Cette mesure a été appliquée tant pour la protection que pour un état de surface propre.

B) coulée en fonte:

Comme nous montre la présente photo, le moule confectionné après avoir passé l'étape de modelage est prêt à l'étape de production.

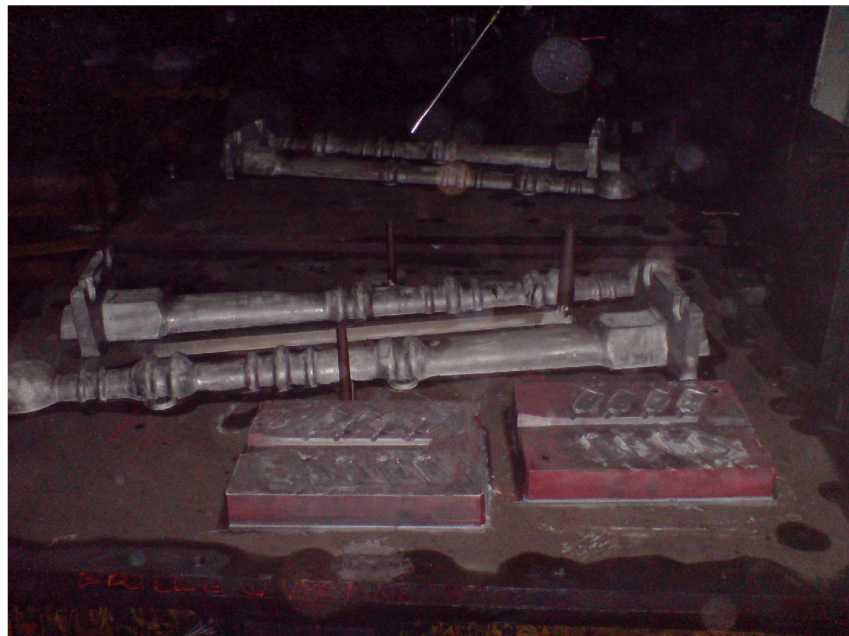


Fig. (4-22)-boite à noyau fixe sur la plaque modèle

On va procéder à la fixation des deux partie de la boite à noyaux sur la plaque modèle;

Un châssis va descendre et se fixer sur la plaque modèle, un jet de sable sera fait jusqu'au remplissage de châssis, passera ensuite au serrage, cette étape est appelé 1^{er} demi moule. Quant au 2eme demi-moule sera un châssis rempli uniquement de sable. Cette photo a été prise à la fonderie ALFEL El Harrach, qui nous montre le travail d'élaboration du métal ainsi que la coulé à l'échelle industrielle.



Fig. (4-23)-Fonderie ALFAL (El-Harrach)

Les deux demis moules vont se rassembler pour fixer un châssis complet qui contient l'emprunte du moule à réaliser, viendra ensuite le perçage de l'entonnoir permettant le drainage de la coulée.



Fig. (4-24)-coquille à état brute

Les travaux réalisés précédemment, nous ont permis d'obtenir une pièce à l'état brute, d'où l'utilisation d'une brosse métallique pour la netteté de son aspect.

L'un de nos objectifs est de réaliser des pièces avec des états de surface de très bonne qualité.



Fig. (4-25)-résultat finale de la coquille après usinage

La présente photo, nous montre l'obtention d'une pièce dans un état propre, prête à être utilisée.

3-4 Procédé de coulage :

a) Préchauffage de la coquille:

Cette prise de vue nous montre le déroulement de l'opération de préchauffage qui est rappelons le, est de ramener la coquille à une température de 700°C.



Fig. (4-26)-équipe de réalisation (ALFAL) observant l'avancé du procédé

Pour un bon drainage de la coulée du métal, il faudrait procéder à un préchauffage de la coquille à la température indiquée ci-dessus.

b) Elaboration du métal (AL-CU):

Cette étape consiste à ramener le métal à une température de fusion, afin d'assurer un bon remplissage de la pièce et diminuer les bavures.



Fig. (4-27)-figure montrant le chauffage de la poche

La température de fusion théorique de l'AL-CU (duralumin) est de 736°C, néanmoins lors de cette opération, une température de 750° a été atteinte afin d'éviter une perte de chaleur (temps).

c) coulée du métal dans la coquille :

Fig. (4-28)-premier essai de coulé

La présente photo montre un premier essai de coulé, effectué suivant les procédés cités ci-dessus.

Pour obtenir la coulée adéquate, il y a lieu de préciser que les deux parties du moule doivent être bien serrées, c'est-à-dire que notre moule doit être hermétique.

La présente photo montre un premier essai de coulé, effectué suivant les procédés cités ci-dessus, mais comme nous le constatons la grappe contient des bavures.



Fig. (4-30)-grappe premier essai de coulé

Après un premier essai, comme nous le montre la présente photo, nous constatons l'existence de bavure ainsi qu'un mauvais drainage, cela s'explique que le moule n'a pas encore atteint son régime thermique, toutefois au fur et à mesure de l'avancement des essais, nous constaterons un meilleur drainage ainsi qu'une diminution des bavures comme nous le montre les photos ci-après.

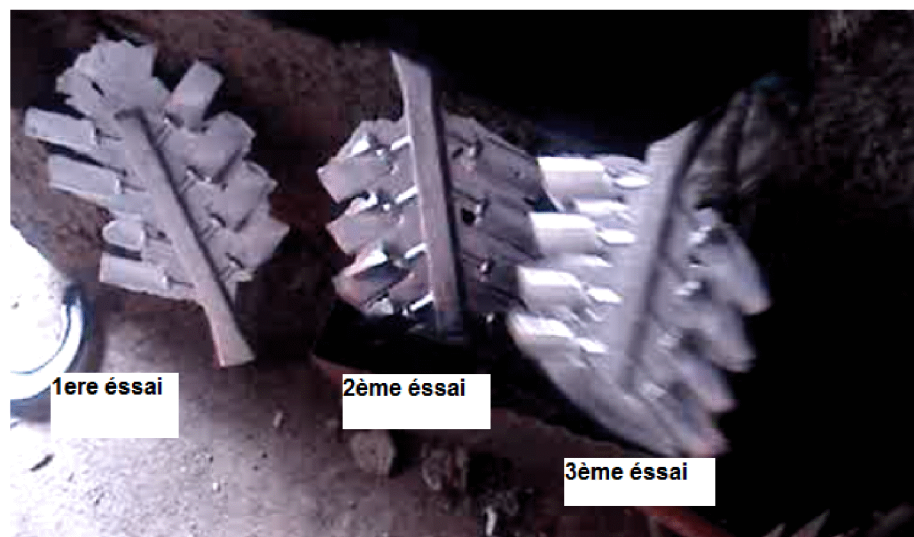


Fig. (4-31)-figure des 3 premiers essais réalisé

Les photos des trois premiers essais, nous montrent l'évolution graduelle de la qualité du moulage.

Comme cité ci-dessus, nous constaterons à travers cette nième coulé, une nette amélioration de la qualité du moulage de cette grappe.



Fig. (4-32)-ouverture de la coquille afin d'extraire la grappe

La photo ci-dessous nous montre une grappe sans bavure et d'une très bonne netteté, ce résultat a été obtenu après que le moule a atteint sa température escompté.



Fig. (4-33) figure de la pièce finale photographier en grappe

Bibliographie

✚ www.wikipedia.com

✚ http://web.mit.edu/course/2/2.810/ts_temp

✚ Précis de fonderie, G. Facy et M. Pompidou, AFNOR, 2è édition

✚ www.google.fr

✚ Technologie des fabrications mécaniques 1, Enrico Filippo.

✚ Pratique du Turbo Fan

✚ Technologie des Turboréacteurs