

République Algérienne Démocratiques et Populaire
Ministère de l'Enseignements Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Djillali Liabes de Sidi Bel Abbas
Faculté de Technologie
Département de Génie Mécanique



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
جامعة جيلالي ليابس - سيدي بلعباس
كلية التكنولوجيا
قسم الهندسة الميكانيكية

Polycopié pédagogique

Procédés de mise en forme

Cours destiné aux étudiants :

Filière : Génie Mécanique

Option : Fabrication Mécanique et Productique

Parcours : Master

Semestre : S1

Unité d'enseignement : UEF 1.1.2

Cours présenté par :

Dr. BOUCHELARM Mohammed Amine

Année Universitaire 2021/2022

AVANT-PROPOS

Ce polycopié n'a pas la prétention de donner des réponses à tous les problèmes liés aux techniques de fabrication. Il n'est certes pas possible, de développer les différents procédés de formage des matériaux dans un petit volume. Le but de l'auteur est de fournir aux étudiants de parcours de Master de la spécialité Fabrication Mécanique et Productique et toutes spécialités confondues, un support de cours qui résume avec un maximum de détails les procédés de mise en forme en insistant plus particulièrement sur ceux les plus répandus dans le domaine de l'industrie.

Le polycopié est élaboré conformément au programme officiel fixé par le Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique. Un contenu riche et varié avec près de 200 illustrations présentant des schémas, des processus et des abaques pour le calcul des différents paramètres.

A l'issue de ce cours, l'étudiant sera en mesure de :

- *Connaitre les techniques de formage des matériaux, en allant de la transformation du minerai de fer jusqu'à l'obtention des pièces destinées à l'utilisation industrielle ;*
- *Connaître, pour chacun des procédés étudiés, le vocabulaire lié, les principes généraux, les types de pièces obtenues, les machines et outillages utilisés ;*
- *Identifier les possibilités et les domaines d'application ainsi que les principales variantes des procédés ;*
- *Choisir un parmi plusieurs procédés d'obtention pour une pièce de caractéristiques et de matériau donné en tenant compte de l'importance des séries de fabrication (petites, moyennes et grandes).*

Mohammed A. BOUCHELARM

Table des matières

Chapitre I : Elaboration des matériaux ferreux	1
1 Introduction :	1
1.1 Minerai :	1
1.2 Principaux minéraux ferrifères	2
1.3 Elaboration des fontes :	2
1.4 Elaboration de l'acier	5
1.4.1 Affinage liquide :	6
1.4.2 Affinage solide :	8
Chapitre II : Les procédés de formage par déformation	9
1 Laminage	9
1.1 Caractéristiques du laminoir :	9
1.2 Conception des cages	12
1.3 Différents types de laminoirs :	13
1.4 Choix des cylindres :	17
1.4.1 Utilisation des galets :	19
1.4.2 Frettes en carbure de tungstène :	19
1.5 Laminage à chaud :	20
1.6 Laminage à froid :	21
1.7 Sollicitations subies par les cylindres et les galets	22
1.7.1 Contraintes mécaniques internes :	22
1.7.2 Contraintes mécaniques dues au laminage :	22
1.7.3 Contraintes thermiques :	22
1.7.4 Fatigue thermique, faïençage :	23
1.7.5 Rupture d'un cylindre :	23
1.7.6 Retouche des cylindres :	24
2 Pliage :	25
2.1 Pliage manuel :	25
2.2 Pliage mécanique :	26
2.2.1 Pliage en frappe :	26
2.2.2 Pliage en l'air :	27
2.3 Caractérisation de l'aptitude au pliage. Rayon minimal de pliage.....	27
2.4 Calcul de flans	29
2.5 Calcul du retour élastique.....	31
2.6 Détermination des efforts :	35
2.6.1 Pliage en V :	35
2.6.2 Pliage en U :	38
2.7 Pliage à froid et à chaud.	39

2.8	Qualité des pièces pliées :	39
3	Emboutissage :	40
3.1	Principe :	40
3.2	Processus :	40
3.3	Procédés d'emboutissage :	41
3.3.1	Emboutissage en expansion :	41
3.3.2	Emboutissage en rétreint :	42
3.4	Détermination du flan :	42
3.4.1	Détourage :	43
3.4.2	Flan pratique.....	43
3.4.3	Détermination du flan théorique.....	43
3.4.4	Théorème de Guldin.....	43
3.5	Nombre de passes :	44
3.5.1	Coefficient de réduction (tableau).....	45
3.5.2	Détermination des différentes passes	45
3.5.3	Embouti à collerette.....	46
3.6	Effort d'emboutissage :	46
3.7	Effort sur le serre-flan :	47
3.8	Rayon d'emboutissage (rayon de la matrice) :	47
3.9	Rayon du poinçon :	48
3.10	Hauteur des ébauches successives.....	48
3.11	Détermination du jeu poinçon-matrice :	49
3.12	Emboutissage sans serre-flan	49
3.12.1	Emboutissage peu profond	50
3.12.2	Emboutissage profond.....	51
3.13	Détermination de l'énergie d'emboutissage :	53
3.14	Emboutissage au coup par coup :	53
3.15	Outillage :	55
4	Cintrage :	56
4.1	Principes généraux	56
4.1.1	Caractérisation de l'aptitude au cintrage.....	56
4.1.2	Déformations et contraintes résiduelles.....	56
4.2	Retour élastique.....	58
4.3	Détermination de l'effort, de l'énergie, et de la puissance de cintrage.....	58
4.3.1	Effort de cintrage.....	58
4.3.2	Puissance de cintrage.....	60
4.4	Technologie, machines, outillages :	62
4.4.1	Préparation des flans	62
4.4.2	Le croquage.	63

4.4.3	Formage de troncs de cônes	65
4.5	Calcul du flan	66
4.6	Calcul de l'angle d'inclinaison des rouleaux	66
4.7	Rouleuses :	67
5	Repoussage :	71
5.1	Repoussage au tour :	71
5.2	Outillage :	71
5.3	Repoussage sur machine à former les bords :	73
5.4	Outillage	74
5.5	Machines de formage :	75
5.5.1	Tours à repousser :	75
5.5.2	Machines à former les bords :	77
6	Fluotournage :	78
6.1	Principe :	78
6.2	Intérêt :	78
6.3	Modes de fluotournage :	79
6.3.1	Fluotournage conique :	79
6.3.2	Fluotournage cylindrique :	80
6.4	Paramètres :	81
6.4.1	Efforts :	82
6.4.2	Machines :	83
6.5	Possibilités et limites :	84
6.6	Marchés concernés :	85
7	Formage par explosion :	86
7.1	Principe :	86
7.2	Mécanisme :	87
7.2.1	Explosion :	87
7.2.2	Déformation du métal :	88
7.3	Technologie, outillages :	90
7.3.1	Exemples de fabrication.	90
7.3.2	Outillage :	91
7.3.3	Charges explosives :	91
7.3.4	Dispositifs de mise à feu :	92
7.3.5	Milieu de transmission :	92
7.3.6	Fosse d'éclatement :	92
7.4	Qualité des pièces formées par explosion :	92
8	Le découpage :	95
8.1	Définition :	95
8.2	Le Cisailage :	95

8.2.1	Principe du cisailage :.....	95
8.2.2	Mécanismes du découpage :.....	96
8.3	Le Poinçonnage :.....	99
8.3.1	Principe.....	99
8.3.2	Rapport épaisseur et diamètre	100
8.3.3	Domaine d'application :.....	101
8.4	Autre application :.....	103
9	Estampage :.....	104
9.1	Définition :.....	104
9.2	Déformation plastique en estampage :.....	104
9.3	Techniques de fabrication :.....	105
9.3.1	Débitage :.....	105
9.3.2	Chauffage :.....	106
9.3.3	Chauffage à la flamme :.....	106
9.3.4	Chauffage électrique :.....	107
9.4	Mise en forme :.....	108
9.5	Rôle du lubrifiant :.....	109
9.6	Machines utilisées :.....	109
9.7	Cas de pièces longues :.....	110
9.8	Outillages :.....	116
9.8.1	Sollicitations thermiques :.....	116
9.8.2	Sollicitations mécaniques :.....	116
9.9	Parachèvement :.....	119
	Chapitre III : La fonderie.....	121
1	Introduction :.....	121
2	Procédés de moulage :.....	122
2.1	Moulage main :.....	123
2.1.1	Principe :.....	123
2.1.2	Matériaux et sables utilisés :.....	123
2.1.3	Description du procédé :.....	124
2.1.4	Remarques :.....	124
2.1.5	Machines :.....	126
2.1.6	Outillages :.....	128
2.2	Moulage machine :.....	128
2.2.1	Principe :.....	129
2.2.2	Moulage machine sans châssis (en mottes) :.....	130
2.3	Moulage à modèles perdus :.....	133
2.3.1	Moulage avec modèles en polystyrène expansé :.....	133
2.3.2	Moulage à la cire perdue :.....	135

2.4	Moulage en moules métalliques :	138
2.4.1	Différents procédés de moulage en coquille :	139
2.4.2	Alliages coulés :	142
2.4.3	Outillages :	142
Chapitre IV. Mise en œuvre des poudres : Le frittage		144
1	Mise en forme :	144
2	Procédés de fabrication des poudres :	144
2.1	Le broyage mécanique :	144
2.2	L'atomisation :	145
2.3	La réduction d'oxydes :	146
3	Caractéristiques des poudres :	146
3.1	Compression uniaxiale :	148
3.2	Outillages de compression :	150
3.3	Compression uniaxiale avec vibration. :	153
3.4	Compression isostatique :	153
3.5	Laminage. Extrusion :	155
4	Frittage :	156
5	Fours de frittage :	158
5.1	Fours à passage en continu ou discontinu :	158
5.2	Fours à cloche :	159
5.3	Fours statiques à moufle :	160
5.4	Fours à creusets :	160
Références bibliographiques		161

Chapitre I
Elaboration des matériaux ferreux

Chapitre I : Elaboration des matériaux ferreux

1 Introduction :

Le fer n'est plus utilisé industriellement à cause de son altérabilité et sa faible résistance mécanique. Les métaux les plus utilisés dans la construction sont la fonte et l'acier puisqu'ils présentent beaucoup d'avantages tels que : la haute résistance, plasticité, conductibilité thermique, soudabilité...

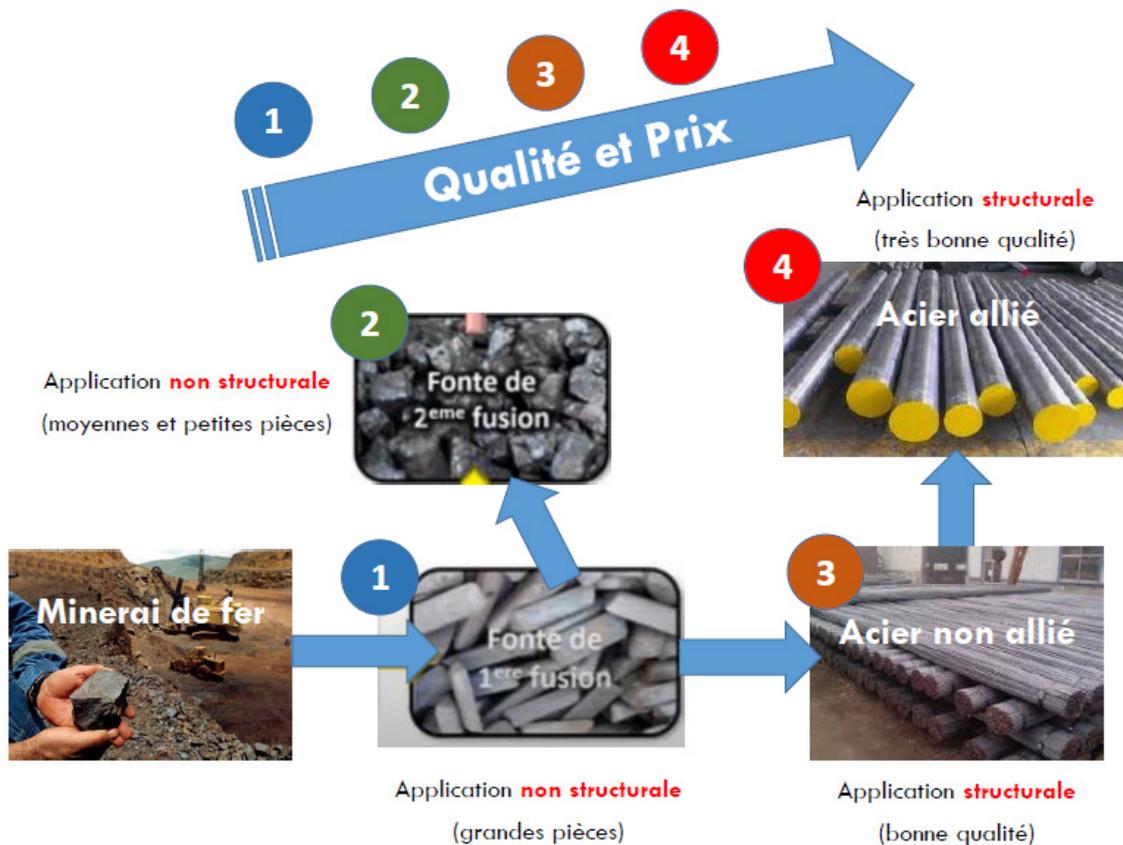


Figure 1. Classement des produits issus des minerais de fer sur l'échelle Qualité/Prix

1.1 Minerai :

Les minerais contenant du fer sont très nombreux, mais uniquement un nombre limité d'entre eux sont utilisés comme source de fer. Les minerais de fer sont considérés ici essentiellement en tant que matière première de base de la sidérurgie.

On appellera minerai de fer tout minéral naturel, ou toute association minérale, susceptible d'être utilisée par l'industrie sidérurgique comme source de fer, et gisement de minerai de fer ou, plus brièvement, gisement de fer toute masse de minerai de fer susceptible d'être exploitée en vue de son utilisation par l'industrie sidérurgique. Il convient, par ailleurs, de distinguer minerai brut ou tout-venant, qui est le matériau tel qu'on l'extrait de la mine, et minerai marchand, qui peut être du minerai brut, mais le plus souvent en dérive soit par un concassage-

criblage, soit après un enrichissement, qui peut lui-même être suivi d'une agglomération en boulettes.

1.2 Principaux minéraux ferrifères

Les minerais contenant du fer sont très nombreux, mais un nombre limité d'entre eux sont utilisés comme source de fer. Ce sont, par ordre d'importance décroissante, les oxydes et les hydroxydes, les carbonates et les silicates. De plus, la minéralogie de la plupart des minerais de fer est simple : un minerai donné contient rarement plus de trois ou quatre minéraux ferrifères.

Les fers natifs sont rares, d'origine terrestre ou météoritique et, dans ce cas, généralement associés à du nickel ; ils doivent être considérés comme des curiosités minéralogiques bien qu'ils aient sans doute joué un rôle important dans la naissance de l'âge du fer.

Les oxydes de fer sont les constituants essentiels de tous les minerais riches, que l'on caractérise souvent par le nom de l'oxyde prédominant.

- Magnétite : Fe_3O_4
- Hématite : Fe_2O_3
- Hématite brune : $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$
- Sidérose : FeCO_3



Figure 2. Minerai de Fer

1.3 Elaboration des fontes :

L'élaboration d'une fonte commence par le choix de la composition chimique de base. Cette composition impose les matières premières qui constituent les charges des moyens de fusion, les traitements de la fonte à l'état liquide, la détermination des pertes ou gain au feu. En règle générale, le cahier des charges de la pièce moulée à fournir est caractérisé par les propriétés mécaniques et physiques du matériau utilisé pour la fabriquer. Ces caractéristiques dépendent conjointement de la composition chimique finale et de la microstructure de la fonte. Cette microstructure est largement influencée par les vitesses de refroidissement pendant la solidification et à l'état solide, et par les traitements à l'état liquide du matériau. Il revient au fondeur de choisir la composition chimique de base initiale et les moyens de fusion à utiliser

pour répondre au cahier des charges. Le choix des moyens de fusion utilisés est également fonction du flux d'alliage liquide à fournir au chantier de moulage et de sa flexibilité.

Les éléments d'alliage principaux pour la caractérisation d'une fonte sont le carbone, le silicium, le manganèse, le soufre et le phosphore. Les éléments d'alliage sont introduits volontairement pour obtenir les spécificités demandées : stabilité des carbures, résistance à la corrosion, usinabilité, etc.

L'agrégat principal utilisé pour l'élaboration de la fonte est le haut fourneau, dans lequel se déroule le processus métallurgique de réduction, fusion, ainsi que la carburation du fer. Le but principal du haut fourneau est d'extraire le métal (fer) de son minerai et sa séparation de la gangue. Les matières premières utilisées pour l'élaboration de la fonte sont : Le minerai de fer, le coke et les fondants.

Généralement plus de 90% des fontes sont produites avec du coke. Le coke est obtenu par cokéfaction de la houille. Selon les variétés de la houille utilisée le coke est constitué de : 78 à 83% carbone, 8 à 11% sandre, 2 à 6% H₂O, 0,8- 1,2% Soufre et 2 - 3% éléments volatils.

Le rôle du coke dans le haut fourneau est de fournir la chaleur nécessaire pour la marche du processus du haut fourneau. En plus, la réduction du fer et des oligo-éléments de leurs liaisons dans le minerai et en même temps carburation du fer. Et enfin, ameublir la charge dans le haut fourneau afin d'avoir une bonne perméabilité aux gaz, grâce à sa grande résistance à l'écrasement.

Concernant les fondants, ils sont utilisés dans la charge du haut fourneau pour réduire la température de fusion de la gangue, pour la scarification de la soudure du coke et enfin pour l'obtention du laitier fluide ayant une bonne capacité d'absorption du soufre et du phosphore, ces deux derniers éléments sont indésirables dans la composition de la fonte.

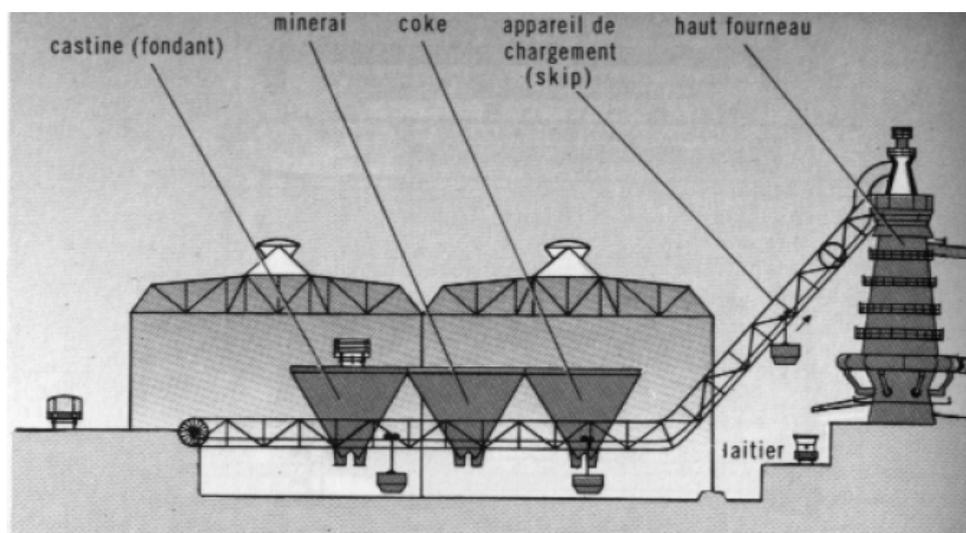


Figure 3. Installation d'ensemble d'un haut fourneau

Comme fondants on utilise le plus souvent le calcaire (castine) et très rarement la dolomite. Sous l'action de leur propre poids, les matières premières utilisées descendent peu à peu en se réchauffant jusqu'à la fusion. Le métal fondu composé de la fonte et du laitier s'écoule dans le creuset. Par suite d'une différence sensible entre les masses spécifiques de la fonte et du laitier ; ce dernier s'accumule à la surface de la fonte, il est évacué à travers le trou de coulée du laitier situé plus haut que celui de la fonte.

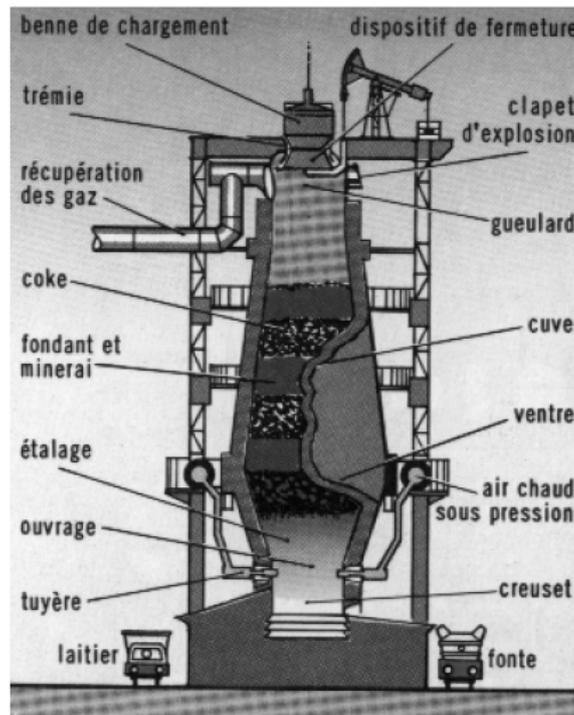


Figure 4. Coupe d'un haut fourneau

Le produit principal du haut fourneau est la fonte appelée aussi fonte de première fusion. Elle est obtenue à l'état liquide à une température près de 1400°C et avec une teneur en carbone de 3,5 à 4,5% et de teneur variable en Si, Mn, P, S. Elle peut aussi renfermer d'autres éléments tels que Ti, Cr, etc..

La fonte est définie comme un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est supérieure à 2 %. Le produit secondaire obtenu lors de l'élaboration de la fonte est le laitier (scorie) dont les principaux composants sont CaO , SiO_2 , Al_2O_3 et MgO .

La fonte du haut-fourneau est divisée suivant la destination en trois groupes : Fonte d'affinage, Fonte de moulage, Alliage ferro-métallique.

Plus de 80% de la production totale est composée de la fonte blanche d'affinage, essentiellement employée pour la fabrication de l'acier (le fer est à l'état de Cémentite Fe_3C). La fonte de moulage grise est employée pour l'obtention des coulées façonnées. Les alliages ferro-

métalliques et la fonte de moulage constituent près de 20%. Les alliages contiennent beaucoup de silicium et de manganèse.

La fonte de première fusion est caractérisée par le haut taux d'impuretés. Il reste toujours possible d'obtenir des pièces de grandes dimensions, cependant, il est impossible d'en faire des pièces de moyennes et de petites dimensions à cause du taux d'impuretés trop important comparé aux dimensions des pièces.



Figure 5. Fonte de première fusion

L'affinage de la fonte de première fusion se fait dans le cubilot, c'est une sorte de mini haut-fourneau. On introduit par le gueulard sous forme de charges alternées : la fonte de première fusion, le coke qui jouera le rôle de combustible, le fondant. Par les tuyères : l'air, éventuellement l'oxygène. Cette opération va dissoudre les impuretés. On en retire ou il en sort : par les orifices prévus dans le creuset : la fonte, le laitier ; et par la cheminée : les fumées. La quantité du laitier obtenue avec la fonte de deuxième fusion est plus faible comparée à celle obtenue avec la fonte de première fusion.

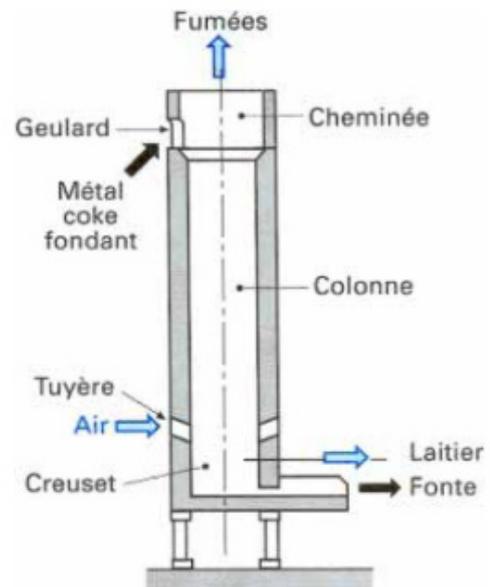


Figure 6. Schéma d'un cubilot

1.4 Elaboration de l'acier

L'acier est défini comme un alliage de fer et de carbone dont la teneur en carbone est inférieure à 2%. Dans l'industrie l'acier est plus utilisé que la fonte, car il possède des propriétés mécaniques relativement bonnes par rapport à ceux de la fonte.

Les procédés de fabrication modernes de l'acier sont assez nombreux. Ils donnent des produits de qualités différentes. La majorité d'entre eux consiste pour affiner la fonte de première fusion à la décarburer dans un premier temps, puis de rétablir par des additions convenables les teneurs de ces éléments au niveau désiré.

L'acier est obtenu dans des fours ou convertisseurs par différentes opérations métallurgiques tels que l'oxydation des différents éléments d'impuretés, décarburation de la fonte et addition d'éléments alliés nécessaire pour améliorer les différentes propriétés.

Les procédés pratiques d'élaboration de l'acier sont :

- l'affinage liquide, qui fournit la quasi-totalité de l'acier employé, le métal restant liquide à la fin de l'opération,
- l'affinage solide, qui donne un produit à l'état pâteux à la fin de l'opération.

1.4.1 Affinage liquide :

1.4.1.1 Affinage par l'air aux convertisseurs Bessmer et Thomas.

La fonte liquide arrivant du mélangeur est versée dans le convertisseur, à travers lequel on souffle un intense courant d'air qui brûle les impuretés de la fonte. Cette combustion dégage en même temps la chaleur nécessaire pour élever la température du bain depuis celle de la fonte en fusion (1200 °C) jusqu'à celle de l'acier (1600 °C).

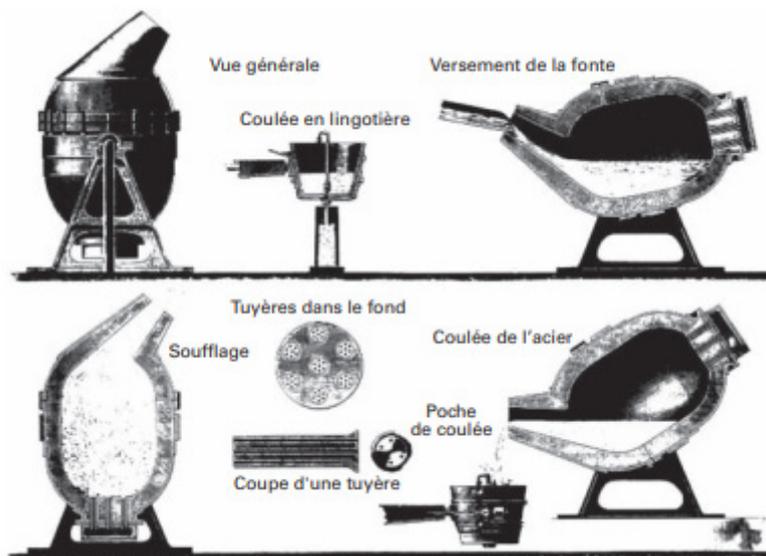
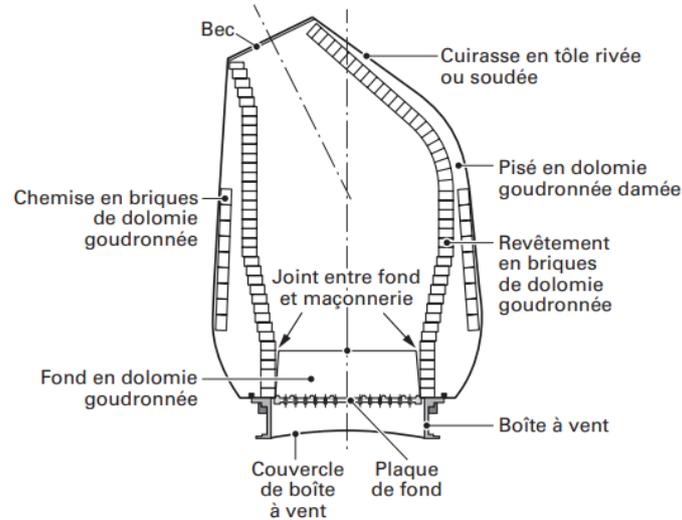


Figure 7. Schéma de convertisseur Bessmer

Le convertisseur Thomas diffère de Bessmer par son revêtement réfractaire, qui est basique (chaux) au lieu d'être acide comme dans le Bessmer (silice). Le procédé acide ou Bessmer, permet de traiter les fontes non phosphoreuses riches en silice (1,5 à 2%). Le procédé basique ou Thomas, permet de traiter les fontes phosphoreuses (1,7 à 2%) avec peu de silice (0,4 à 0,6%). La durée du traitement varie entre 15 et 30 minutes.



L'air destiné à la décarburation est injecté par le fond du convertisseur.

Figure 8. Coupe d'un convertisseur Thomas

1.4.1.2 Affinage au four Martin.

Dans le four Martin acide, l'affinage porte uniquement sur le carbone, le silicium et le magnésium ; le Souffre et le phosphore restant intacts. En revanche, dans le four Martin basique, l'affinage peut aussi porter sur ces deux derniers éléments.

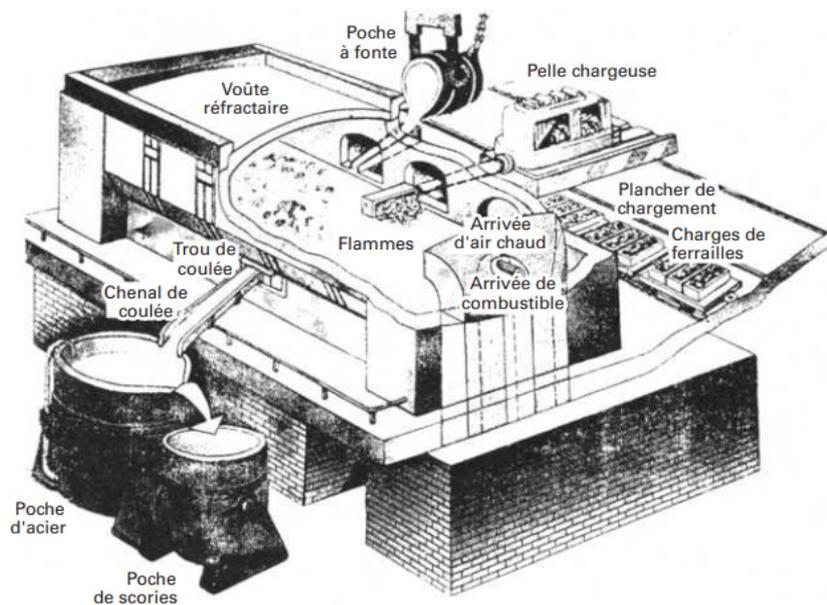


Figure 9. Coupe d'un four Martin

En qualité de combustible, on utilise le gaz et parfois les déchets de fer et d'acier. La durée de fusion est de 4 à 8 heures. Pendant ce temps, on prend systématiquement des échantillons pour analyse chimique. Quand on obtient la composition requise de l'acier, le métal est déchargé dans la poche à coulée et delà dans les lingotières.

Les aciers dits Martin et Thomas sont des aciers non-alliés possédant de bonnes propriétés mécaniques destinés à des applications structurales. Si on veut améliorer la qualité de l'acier produit, il faut ajouter des éléments d'alliage ce qui nécessite le passage à l'affinage au four électrique.

1.4.1.3 Affinage au four Electrique

Les aciers électriques sont élaborés dans des fours chauffés par l'énergie électrique. La différence existante entre ce procédé et le procédé Martin réside dans le mode de chauffage et la construction du four. La matière première destinée à la fusion est constituée essentiellement de ferraille. Les réactions d'oxydation et d'affinage s'effectuent sensiblement de la même façon, seulement l'atmosphère neutre ne peut pas contribuer à la formation d'oxyde de fer à la surface du bain des aciers électriques. Lors de l'élaboration des aciers électriques, l'opération de réduction joue un rôle très important. La température du bain peut dépasser 1800°C ce qui facilite la fusion des inclusions et favorise la réduction des oxydes, la température peut être facilement réglée. Grâce à l'élimination poussée du phosphore, du soufre et de l'oxygène, le procédé électrique est le seul procédé permettant l'élaboration des aciers de qualité supérieure avec des concentrations de $\text{P} = 0,01\%$, $\text{S} = 0,008\%$ et $\text{O}_2 = 0,003\%$, ainsi que tous types d'aciers alliés et en particulier les aciers à forte teneur en métaux réfractaires.

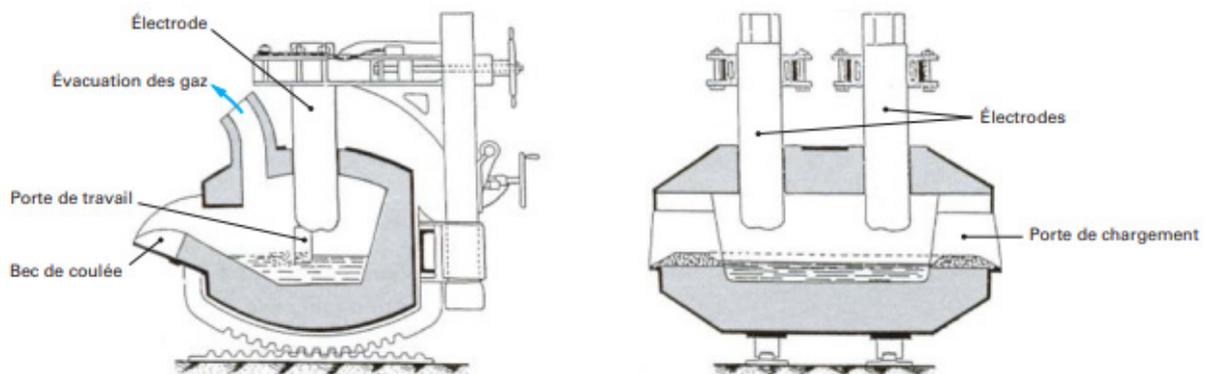


Figure 10. Four à arc (Heroult)

1.4.2 Affinage solide :

Capables de fournir des fers à teneur en soufre et phosphore très basse et inférieures à tout ce que l'on peut obtenir par les procédés d'affinage liquide. Dans ce procédé, le combustible (charbon de bois) est en contact direct avec la fonte. L'affinage est réalisé par oxydation des impuretés nuisibles de la fonte, les faisant passer dans le laitier. Lorsque l'opération est terminée, on retire du four des loupes spongieuses de métal contenant de nombreuses scories.

Chapitre II
Procédés de formage par déformation

Chapitre II : Les procédés de formage par déformation

1 Laminage

Dans le laminage, le métal est engagé entre deux cylindres tournant en sens inverse. Pour faciliter la déformation, l'opération se fait à chaud.

Alors que dans le forgeage, l'élargissement est égal à l'allongement ; dans le laminage, à cause du mouvement de rotation qui produit un écoulement du métal vers l'avant, l'allongement est très supérieur à l'élargissement. L'allongement et l'élargissement dépendent :

- De la température du métal laminé : un acier chauffé à 1 000 °C s'allongera plus que le même acier chauffé à 900 °C ;
- Du diamètre des cylindres : à pression égale, plus le cylindre sera petit, plus le métal s'allongera ;
- De la réduction de section provoquée à chaque passe ;
- La vitesse de rotation joue peu. Toutefois la température augmentant avec la vitesse de travail, l'allongement augmente.

La faculté d'allongement du métal dépendant de la température, il y a avantage à opérer à chaud pour obtenir de fortes déformations sans écrouissage du produit et à froid pour obtenir des produits écrouis de dimension donnée et d'épaisseur précise, d'où deux sortes de laminage : à chaud et à froid.

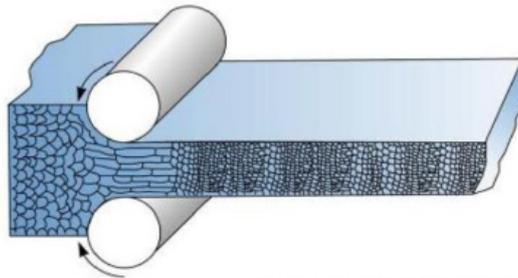


Figure 11. Procédé du laminage

1.1 Caractéristiques du laminoir :

Un laminoir est caractérisé par différents éléments :

- Géométriques : dimensions des cylindres, écartements maximum
- Mécaniques : force de laminage, vitesse
- Énergétiques : puissance d'entraînement, couple

La force ou pression de laminage F (N) que doit supporter le laminoir par réaction durant la déformation du métal, est donnée par la formule approchée :

$$F = kl\sqrt{D(E - e)/2}$$

k : résistance à la déformation (N/mm²)

l : largeur du produit (mm)

E : épaisseur du produit à l'entrée, e : épaisseur à la sortie (mm)

D : diamètre des cylindres de travail (mm)

Il apparaît que la force de laminage F sera d'autant plus faible, pour une réduction d'épaisseur imposée $E - e$, que les cylindres auront un petit diamètre D . Des considérations technologiques de flexion des cylindres limitent cette tendance et obligent dans ce cas à utiliser des laminoirs quarto dans lesquels les petits cylindres de travail sont supportés par des cylindres d'appui de plus grand diamètre.

La puissance du laminage peut se déduire comme ordre de grandeur à partir du couple C (N.m) de laminage par cylindre :

$$C = F \cdot a$$

a (m) : distance du point d'application de la résultante des forces par rapport à l'axe du cylindre

La puissance totale P (W) pour deux cylindres, à partir de la vitesse de rotation N en (tr/min) est :

$$P = 4\pi a FN / 60$$

La puissance réelle est supérieure à cette approximation en particulier dans le laminage froid des produits minces. Les paliers peuvent absorber 10 à 20 % de la puissance totale. Les installations atteignent des puissances de 15 000 kW.

La possibilité d'engagement du produit sous les cylindres est donnée en première approximation par des considérations géométriques et de frottement entre les cylindres et le produit à laminer. Pour une vitesse circonférentielle V constante du cylindre, il existe un point neutre y où la vitesse du produit est égale à celle du cylindre ($V = V_E = V_e$). En supposant l'absence de glissement pur, par rapport à la vitesse d'entrée du produit V_E et sa vitesse de sortie V_e :

- de x à y : $V_E < V$ le cylindre entraîne le produit ;
- de y à z $V_e > V$ le cylindre freine le produit.

L'engagement du produit au point x s'exprime en fonction de la force de pression du cylindre F_c (N) de la force de frottement F_f (N) entre le cylindre et le produit, de l'angle de contact ou angle d'embrassement α , et de l'angle de frottement f :

Le coefficient de frottement : $\mu = \tan f = F_f / F_c$

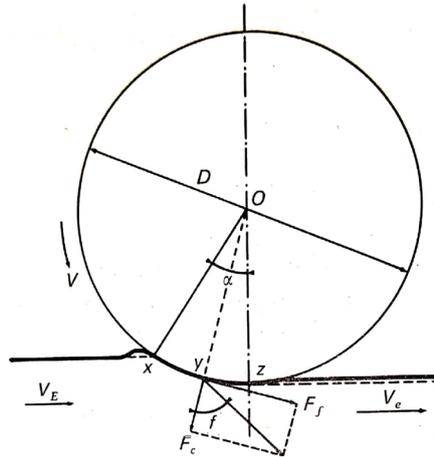


Figure 12. Contact cylindre/produit

Un laminoir doit être considéré comme un ensemble mécanique complexe en partie élastique dont les conditions de fonctionnement sont influencées par les propriétés propres du métal à travailler à chaud ou à froid. Sous l’action des réactions du produit en cours de laminage, l’ensemble (cage, cylindres, paliers, etc.) se déforme, c’est le cé dage:

$$\text{Cédage} = \text{épaisseur du produit à la sortie } e \text{ (mm)} - \text{écart entre cylindres à vide } e_0 \text{ (mm)}$$

Pour effectuer le réglage des cylindres, le laminoir doit tenir compte, par calcul ou par expérience, des facteurs propres au produit (épaisseur et largeur du produit à l’entrée, température, caractéristiques mécaniques) et de ceux propres au laminoir exprimé par son module :

$$\text{tg } \gamma = \Delta F / \Delta (e - e_0)$$

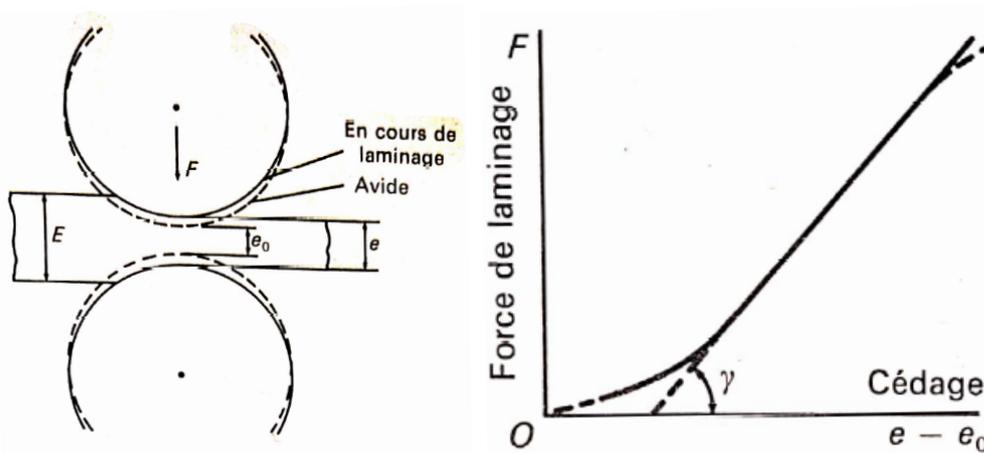


Figure 13. Cédage d'un laminoir

1.2 Conception des cages

Une cage est dite « ouverte » si le montage des cylindres s'effectue par le dessus, en enlevant le chapeau. Ce type de cage tend à disparaître, car le démontage d'une telle cage n'est pas mécanisé et est très long. Elle est dite « fermée » si le montage des cylindres s'effectue latéralement. Les colonnes et le chapeau ne forment qu'un seul bloc (figure 14)

La cage peut être à circuit long si les empoises sont insérées dans des montants qui en font tout le tour. Dans ce type de cage, le cé dage est contenu au prix d'une section importante des montants (figure 15).

Une cage à circuit court n'a pas de montant. Deux tirants relient les empoises supérieures et inférieures. Leur longueur étant limitée, la section l'est également. Par construction, ces cages sont des ensembles mécaniques précis, conçus pour limiter les jeux au maximum. C'est cette technologie qui est utilisée aujourd'hui sur les trains à fils et à barres. Ces cages présentent l'avantage d'un cé dage minimal.

Une autre technique pour limiter encore le cé dage des cages peut être la précontrainte. Les empoises sont empilées entre deux montants qui sont mis en tension par un écrou hydraulique. Lorsque la pression est relâchée, les boulons restent tendus par leur élasticité propre et compriment les éléments constituant la colonne, à la manière de deux tôles de chaudière comprimées par un rivet qui se refroidit.

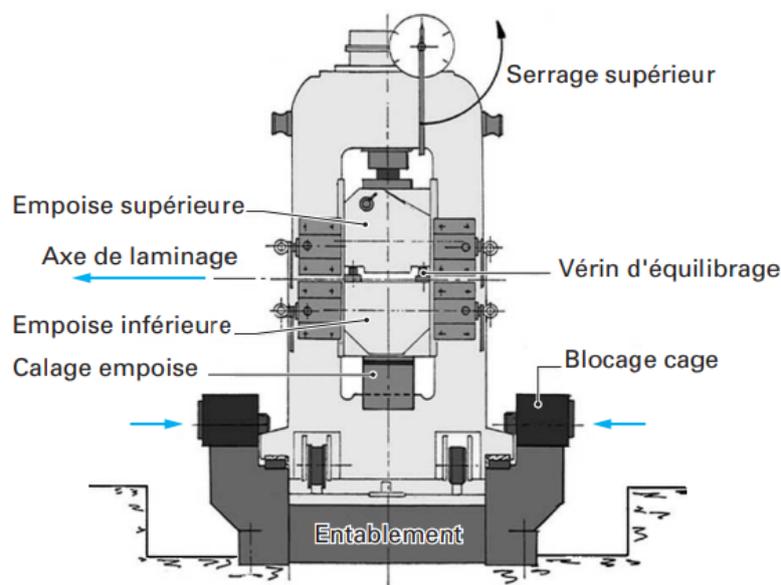


Figure 14. Éléments d'une cage de laminoir

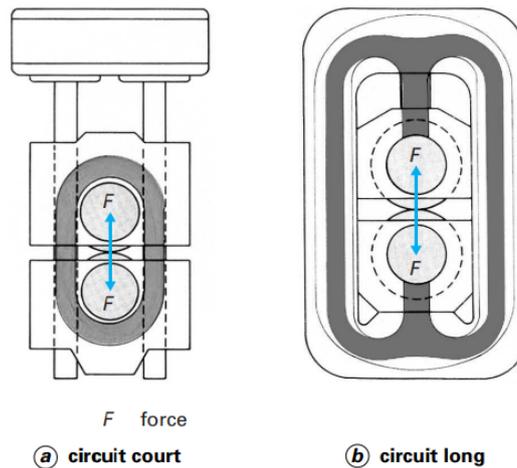


Figure 15. Types de cages

1.3 Différents types de laminoirs :

Suivant le nombre et la disposition des cylindres, on distingue les laminoirs duo (à 2 cylindres), trio (à 3 cylindres), double duo (à 4 cylindres).

Dans le laminoir duo, le produit à laminier passe toujours dans le même sens, à moins que le laminoir ne soit réversible (avec changement du sens de rotation à chaque passe).

Dans le cas où le laminoir n'est pas réversible, ou bien le produit ne subit qu'une passe de laminage ou s'il doit en subir plusieurs, il est renvoyé de l'autre côté du train en passant par-dessus le cylindre supérieur.

Dans les duos, les deux cylindres sont en général rendus solidaires du moteur par l'intermédiaire d'une cage à pignons ; il n'y a exception que pour les duos à tôles fines dans lesquels le cylindre du bas est seul entraîné par le moteur, le cylindre du haut n'étant entraîné que par frottement.

Dans le laminoir trio, chaque cylindre tourne toujours dans le même sens et le produit à laminier passe alternativement dans un sens entre le cylindre supérieur et le cylindre médian et dans l'autre entre le cylindre médian et le cylindre inférieur. Dans cette disposition, le cylindre médian s'use deux fois plus que les deux autres ; c'est pour cette raison qu'a été imaginée la disposition en double duo.

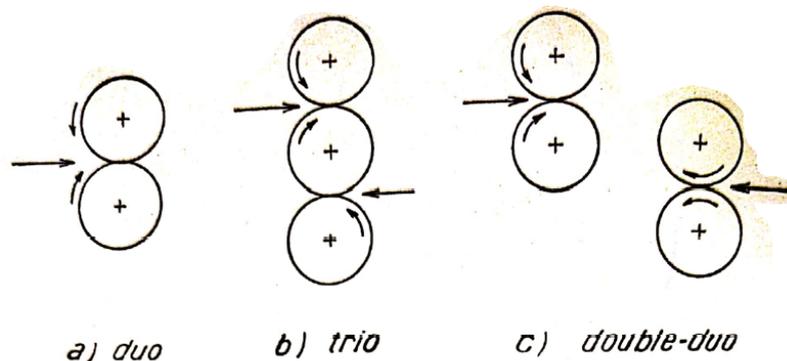


Figure 16. Disposition des cylindres

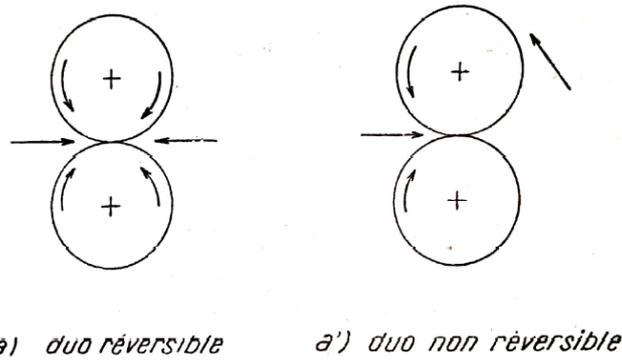


Figure 17. Disposition des duos : réversible ou non réversible

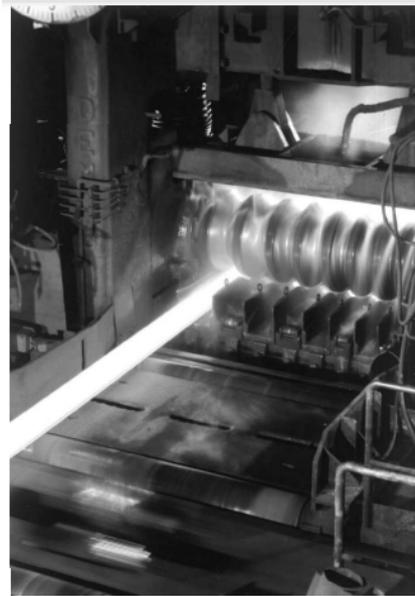


Figure 18. Cage duo réversible

En général, les trois cylindres dans les trios ou les quatre cylindres dans des doubles duos sont rendus solidaires du moteur par l'intermédiaire d'une cage à pignons. Il n'y a exception que pour le trio Lauth, destiné à laminier des tôles d'épaisseur moyenne dans lequel le cylindre médian plus petit que les deux autres n'est entraîné que par frottement ; seuls les deux cylindres, supérieur et inférieur sont solidaires du moteur par une cage à pignons.

On rencontre dans le laminage à chaud des trains quarto, dans lesquels les deux cylindres de travail de faible diamètre sont soutenus par des cylindres d'appui de plus gros diamètre. Dans ce cas, seuls les cylindres d'appui sont rendus solidaires du moteur par l'intermédiaire d'une cage à pignons.

Enfin, il faut signaler les cages universelles. Une cage est dite universelle à cause de la multiplicité de ses possibilités pour déformer le métal. Elle est par contre en général destinée à des fabrications très particulières ; large plat, feuillard, bande continue d'une part, poutrelles à ailes parallèles, d'autre part. Devant un duo, un trio Lauth ou un quarto se trouvent deux

cylindres verticaux qui agissent en diminuant la largeur du produit au laminage. Ces deux cylindres verticaux sont solidaires du même moteur que les cylindres horizontaux

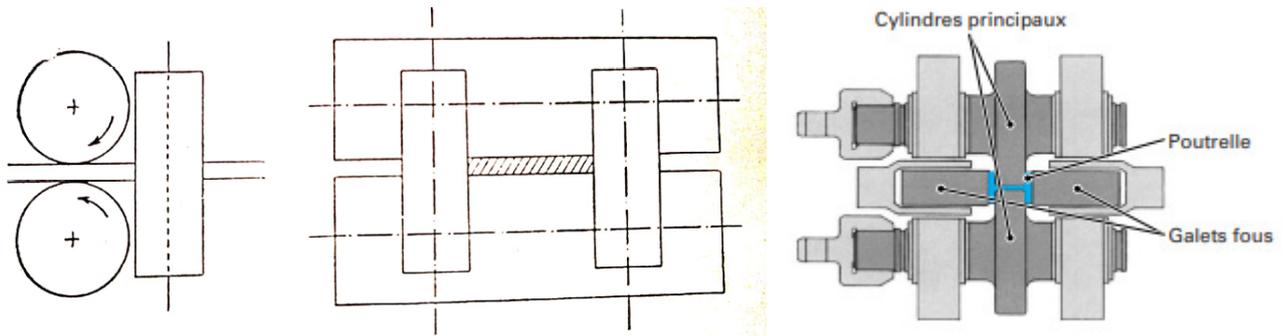


Figure 19. Laminoir duo à cage universelle.

Dans toutes les dispositions de cages, les cylindres sont soit en acier forgé traité superficiellement (dureté Shore 60 à 70) ou coulé lorsqu'on impose au produit une forte déformation sans chercher de la précision (cas de l'ébauchage) soit en fonte dans le cas contraire (cas des passes de finition).

Les cylindres se composent

- d'une table de travail, lisse ou cannelée ;
- de deux tourillons supportés dans une cage par des coussinets en bronze, en bois, en textolite (toile et résine synthétique), à rouleaux (pour les fortes pressions des laminoirs à froid) ;
- de deux trèfles d'accouplement servant à relier l'allonge commande au cylindre lui-même, à l'aide d'un manchon.

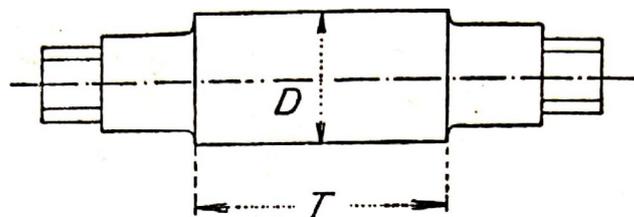


Figure 20. Cylindre de laminoir.

En outre, des guides sont disposés à l'entrée et à la sortie des cylindres pour permettre l'introduction et la sortie correcte des produits, surtout pour les cylindres à cannelures.

La longueur de la table T est en rapport avec le diamètre D du cylindre, pour éviter les flexions au cours du travail, généralement $T/D < 2,5$ à froid. Toutefois, pour les cylindres de blooming, où le travail a lieu très chaud, $T/D = 2,7$ à $3,0$, tandis que pour les cylindres finisseurs, à chaud, $T/D = 1,5$ à $2,0$.

Pour le laminage de produits plats (bandes, tôles, feuillards), afin de compenser la flexion des cylindres on donne un profil bombé à la table. Dans le laminage à chaud où la déformation

thermique de dilatation peut être importante dans la partie centrale du cylindre, on compense l'ensemble de ces déformations par un profil creux ou bombé suivant l'importance relative de chaque type de déformation. Pour un cylindre de $T = 1\ 000\text{ mm}$, $D = 500\text{ mm}$ travaillant à froid, le bombé peut atteindre $b = 0,2$ à $0,4\text{ mm}$.

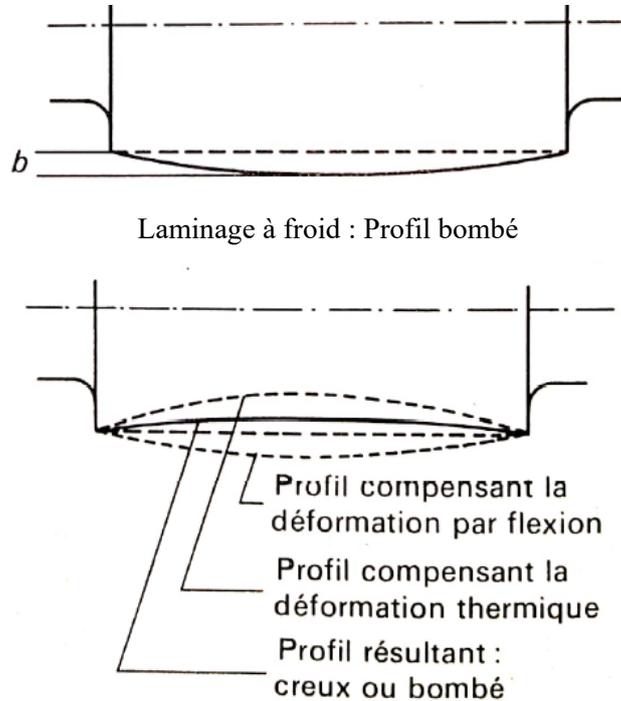


Figure 21. Laminage à chaud : Profil creux ou bombé

Pour le laminage de produits profilés (barres, ronds, cornières, rails, poutrelles, etc.) le nombre et le profil des cannelures ouvertes ou fermées est en rapport avec les déformations recherchées et le nombre de passes successives. Les profils sont très variés suivant les passes de dégrossissage ou de finition (cannelures ogivales, losange-carré, rectangle-carré, ovale-rond, etc.).

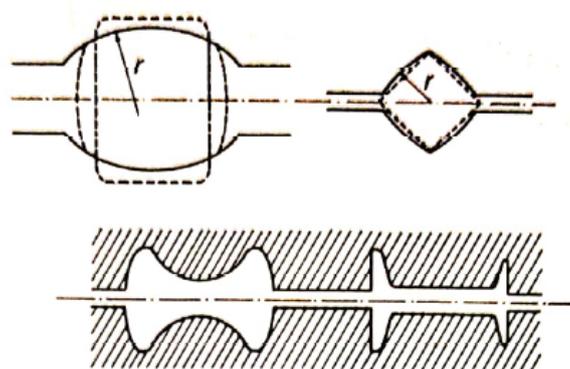


Figure 22. Exemples de profils de cannelures

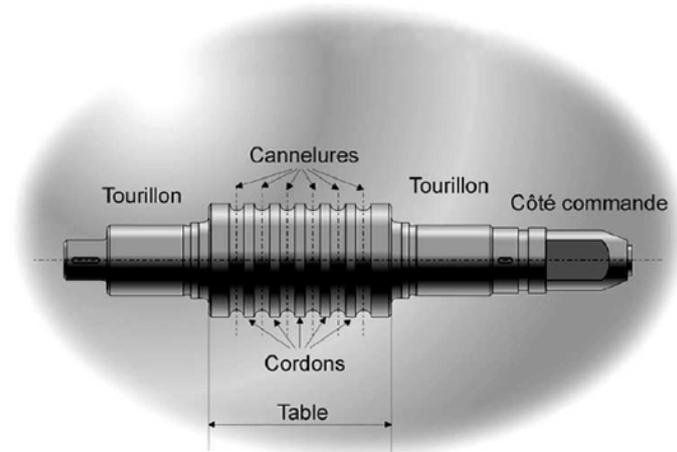


Figure 23. Cylindre de laminoir avec cannelures

Les rails des grandes voies sont des profils qui demandent, au point de vue laminage, des soins très spéciaux. Ces rails sont soumis à des contrôles de réceptions draconiens, tant du point de vue dimensionnel que sur le plan qualité du métal. Le développement des rails soudés de bout en bout conduit à fabriquer des rails de longueur unitaire, de plus en plus grandes (120 m). La figure 24 montre, à titre d'exemple, un procédé de laminage avec des cages universelles.

1.4 Choix des cylindres :

Le choix du cylindre doit répondre aux exigences suivantes :

- une résistance à la rupture suffisante pour supporter les efforts de laminage ;
- une tenue suffisante de l'état de surface ;
- une résistance à l'usure aussi grande que possible, avec la contrainte que le cylindre doit pouvoir être réusiné.

D'une façon schématique, on peut dire que l'acier, plus résistant que la fonte, sera utilisé pour les gros trains ou les cages dégrossisseuses à fortes pressions. La fonte plus fragile, mais plus résistante à l'usure, sera utilisée pour les trains intermédiaires et les cages finisseuses.

Là où cela est possible, on utilisera des fontes GS (graphite sphéroïdal) dans les dégrossisseurs, car elles résistent mieux aux chocs thermiques en conservant un aspect de surface régulier. Les cylindres en fonte à trempe indéfinie équiperont les trains intermédiaires ou les finisseurs de moyennes sections, ceux en fonte à trempe nette seront réservés aux petites sections dans les trains finisseurs.

L'état de surface des cylindres, quelles que soient leurs positions dans le train, joue un rôle de plus en plus grand. Certains clients ne tolèrent déjà plus, dans certains cas, de défauts de surface de plus de $3/100^{\text{e}}$ de mm de profondeur. Il faut insister sur la qualité du dispositif de refroidissement des cannelures et le changement de cannelures dès que la fatigue thermique du cylindre apparaît. Un cylindre faïencé est un cylindre perdu.

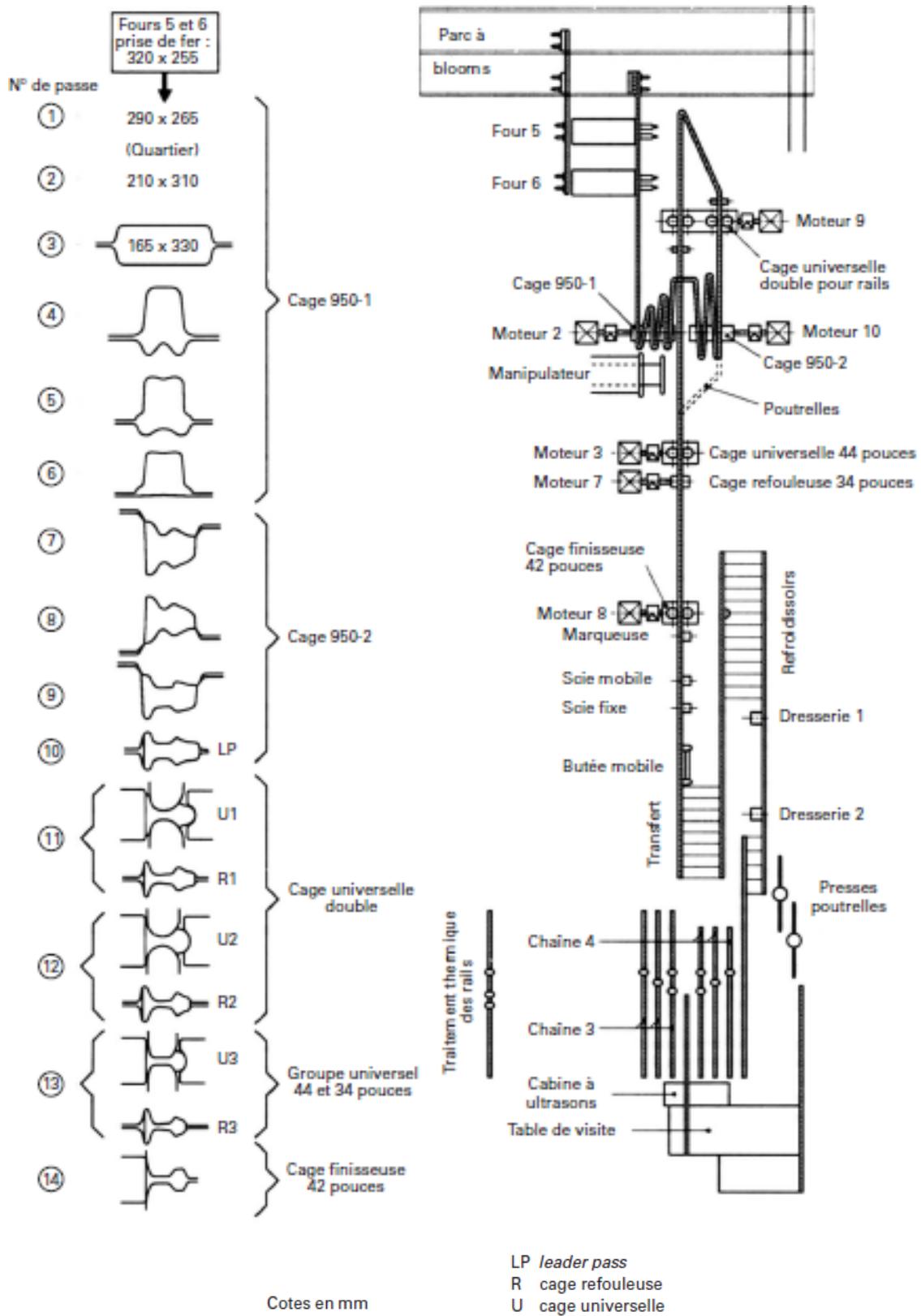


Figure 24. Procédé de laminage des rails

1.4.1 Utilisation des galets :

Dans les années 1960, avec l'augmentation des vitesses de laminage, il s'est avéré nécessaire de trouver des matériaux de laminage très résistants à l'usure. Les recherches ont conduit à la réalisation de galets en carbure de tungstène (figure 1). Le liant est traditionnellement du cobalt, mais l'on peut y ajouter du nickel si des problèmes de corrosion se posent, notamment dans le cas où l'eau de refroidissement peut avoir un pH inférieur 7.

Comme pour les cylindres traditionnels, la fatigue thermique est le fléau des galets en carbure. C'est elle qui est à l'origine des fissures qui, combinée à l'abrasion et à la corrosion, réduit la durée de vie des cannelures. Pour lutter contre ces phénomènes, il faut veiller à refroidir correctement, à éviter les surcharges qui facilitent la propagation des fissures et à sélectionner la nuance de carbure approprié. Dans le cas où l'eau peut être acide, on devra avoir recours à des nuances au nickel que l'on peut utiliser jusqu'à pH 5.

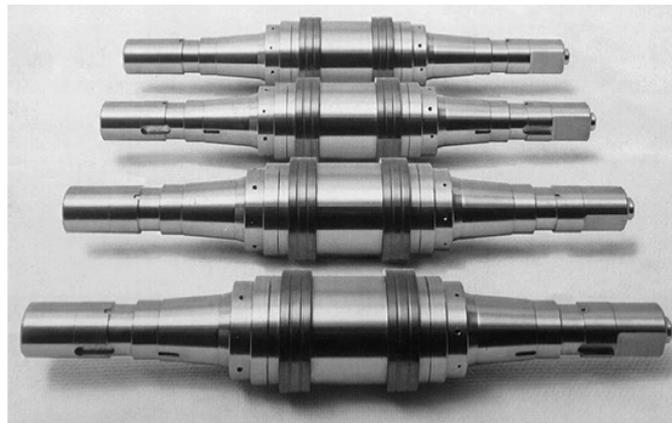


Figure 25. Galets de laminage en carbure de tungstène

Enfin, il est indispensable de réaliser correctement les rectifications et, en particulier, d'éliminer complètement les fissures avant le remontage suivant. Il ne faudra pas négliger l'importance du choix de la machine, ni des meules.

1.4.2 Frettes en carbure de tungstène :

Les cylindres de laminoir étant des pièces mécaniques chères, en raison des traitements thermiques qu'ils subissent et de l'usinage soigné qu'ils nécessitent, on a été tenté par l'utilisation de frettes en carbures rapportées. Techniquement le procédé est au point, néanmoins la mise en œuvre est freinée par le coût des pièces et le montant global de l'investissement à réaliser (figure 26).



Figure 26. Frettes en carbure de tungstène

1.5 Laminage à chaud :

Le laminage de dégrossissage de l'acier se fait sur un « laminoir blooming ».

On part du lingot, dont le type courant correspond à une section carrée de 700 x 700 mm à l'extrémité la plus épaisse et une hauteur de 2 m à 2,3 m et qui pèse environ 6 t. Ce lingot après homogénéisation de la température au four Pits, à 1 100-1 200 °C est soumis au laminoir blooming à une pression verticale qui à la fois l'allonge et l'élargit. Sur un laminoir blooming moderne, les cylindres ont une table de 1 m à 1,20 m de diamètre et une longueur de 2,50 à 3 m ; la vitesse de rotation est lente : 150 tr/mn ; les produits obtenus sont appelés « blooms », à section carrée, ou « brames », à section rectangulaire. Les premières cannelures du blooming comportent des saillies qui s'impriment dans le bloom et facilitent l'engagement aux passes suivantes. Les dimensions courantes des blooms varient entre 100 x 100 et 250 x 250 mm ; les brames destinées à la fabrication des tôles moyennes ont 500 x 80 mm.

Pour la fabrication des demi-produits, billettes, rails, poutrelles... la transformation du bloom se fait d'abord sur un train dégrossisseur. Le bloom est réchauffé dans un four poussant ; sa longueur est de 2 à 2,50 m et peut quelquefois atteindre 4 m. Les trains utilisés sont généralement constitués de laminoirs trio.

Pour la transformation en demi-produits de plus petite section, rond, carré ou hexagone, on part de billettes qui sont laminées sur des trains à fer marchand. Pour le fil machine (diamètre de 5 à 8 mm), on termine avec des trains continus, à la sortie desquels le fil machine s'enroule en couronnes.

L'accroissement de la vitesse du laminage des fils, qui atteint avec les liaisons continues, 33 m/s, pour le fil machine d'acier de 5 mm, rend nécessaire l'emploi de billettes de plus en plus massives, pour éviter les inconvénients dus à l'engagement des billettes.

On a recours actuellement au soudage par étincelage des billettes de 50 x 50 et de 80 x 80.

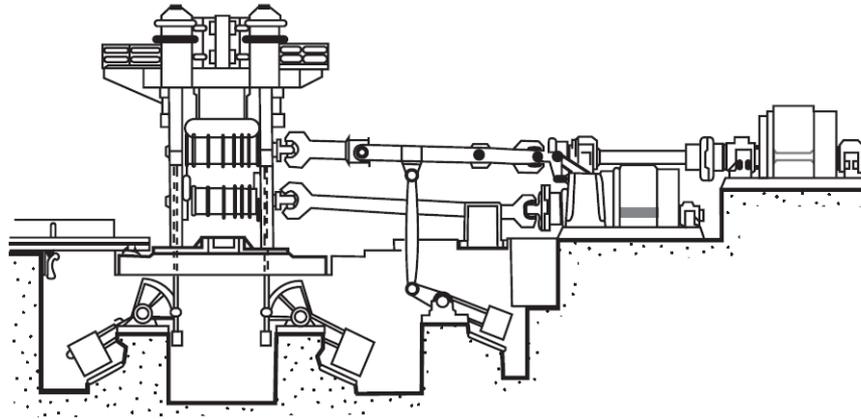


Figure 27. Laminoir à bloom pour dégrossissage à chaud des produits longs

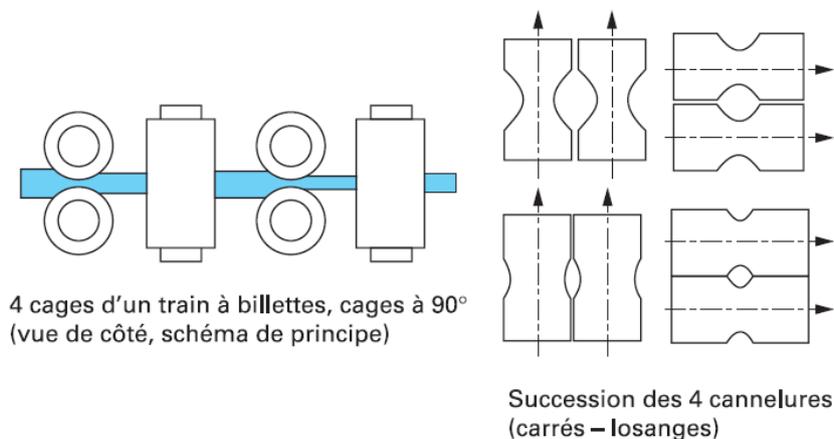


Figure 28. Laminage des produits longs : trains à billettes

1.6 Laminage à froid :

Le laminage à froid s'applique à la fabrication des tôles minces et des feuillards en tous métaux : acier, cuivre, laiton, aluminium, zinc.

Il tend à se faire de plus en plus en continu ; de chaque laminoir réversible, se trouve placé un dévidoir sur lequel s'enroule se déroule alternativement la bande de métal. Un système de réglage de l'écartement des cylindres permet de faire varier l'épaisseur de la bande laminée. Une traction et un freinage sont souvent exercés en amont et en aval de la bande.

Le laminage à froid de l'acier nécessite des pressions considérables, ce qui exige des cages très robustes et des cylindres très rigides pour éviter les flexions et obtenir une épaisseur uniforme du produit avec une tolérance pouvant atteindre $\pm 0,02$ mm pour une épaisseur de 2 mm.

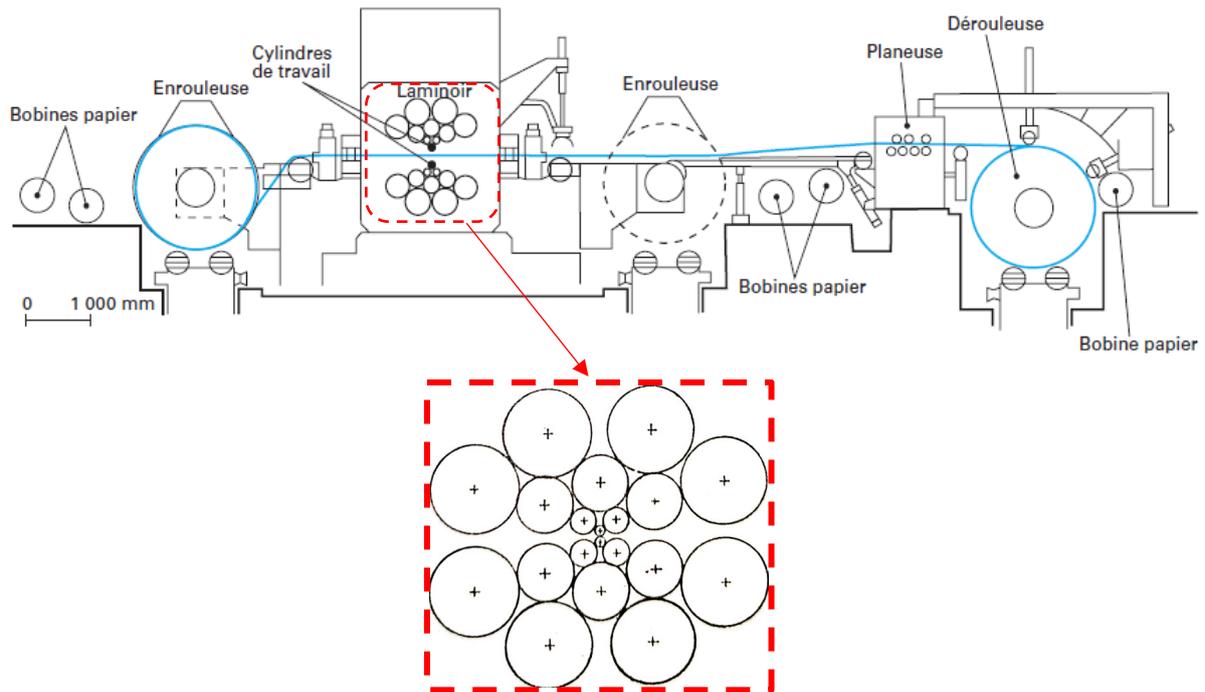


Figure 29. Laminoir Sendzimir, réversible à 20 cylindres pour le laminage des aciers inoxydables (les bobines de papiers sont destinées à protéger les surfaces brillantes)

1.7 Sollicitations subies par les cylindres et les galets

Pour satisfaire aux exigences de qualité et de productivité, les cylindres et les galets, subissent des sollicitations auxquelles ils doivent résister.

1.7.1 Contraintes mécaniques internes :

Les cylindres de travail à chaud doivent être précontraints en compression en surface, pour s'opposer aux sollicitations de laminage. Cette précontrainte est obtenue par le procédé de fabrication du cylindre.

1.7.2 Contraintes mécaniques dues au laminage :

Au cours du déroulement du cycle de laminage, les cylindres subissent des efforts mécaniques tels que la flexion, la torsion et le cisaillement. Pour connaître la sollicitation mécanique réelle, il faut superposer à ces contraintes, les sollicitations thermiques et les contraintes internes. Enfin, les cylindres sont également soumis à des chocs, lors de l'engagement du produit.

1.7.3 Contraintes thermiques :

Lors du contact entre le produit et les cylindres, il y a diffusion de chaleur du produit laminé vers les cylindres par conduction. L'échauffement de la surface dans l'emprise sera d'autant plus élevé que le temps de contact sera plus long. S'ajoute à cela, un échauffement dû au frottement dont une partie pénètre dans le produit, mais une autre est transmise aux cylindres.

La surface passe alors alternativement, et très rapidement, d'une température voisine de 600 °C à 50 °C.

1.7.4 Fatigue thermique, faïençage :

L'échauffement du cylindre provoque l'apparition de gradients de température et de dilatation selon le rayon et la circonférence. La portion du cylindre se trouvant directement au contact du produit cherche à se dilater, mais elle est contrariée par les couches internes qui restent à température moyenne. Il apparaît à cet endroit de fortes contraintes de compression, qui se superposent aux contraintes internes et de laminage et peuvent dépasser la limite élastique. À la sortie de l'emprise et sous l'effet du refroidissement, c'est le mécanisme inverse qui se produit et se traduit par une contrainte de traction, la résistance à la rupture en traction peut être dépassée sur quelques dixièmes de millimètres de profondeur. On assiste alors à l'apparition de fissures superficielles. Ce phénomène est appelé faïençage.

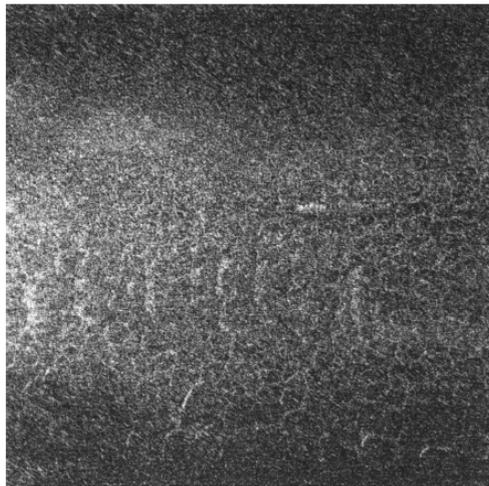


Figure 30. Phénomène du faïençage

1.7.5 Rupture d'un cylindre :

C'est un accident grave dans un laminoir. Il est donc fondamental de l'analyser dans les moindres détails. En effet, il peut s'agir d'une cassure due à un effort trop important dans la cage ou bien d'un choc thermique résultant d'un déséquilibre entre l'introduction et l'extraction de la chaleur dans la masse du cylindre. Une mention particulière doit être faite concernant les ruptures de tourillon et de trèfle qui, à l'évidence, proviennent soit d'une surcharge systématique du laminoir, soit d'un effort exceptionnel ou accidentel. Dans certains cas, la rupture est favorisée par un dessin imparfait des raccords aux changements de section entre trèfle, tourillon et table.

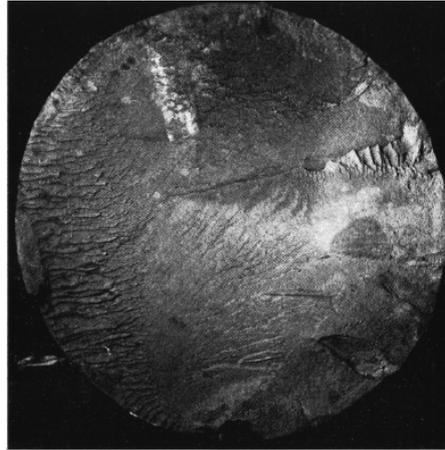


Figure 31. Faciès de rupture du cylindre rompu.

1.7.6 Retouche des cylindres :

La retouche d'un cylindre est précédée d'un examen attentif de ses dégradations. C'est à ce stade qu'il est important de déterminer les causes qui vont conduire à l'enlèvement de matière sur le cylindre. Quelle est l'importance de la retouche que l'on doit attribuer aux différentes causes de dégradations constatées ?

Dans certains cas de suivi exceptionnel de cylindres, il est possible de chiffrer les pourcentages d'enlèvement de métal du cylindre pour différentes causes : usure réelle, fissuration, écaillage, changement de calibrage, etc. En fonction de l'objectif poursuivi par le lamineur, l'importance d'une retouche peut varier. Dans tel cas, l'enlèvement de matière sera réduit au strict minimum ; dans tel autre, on opérera une retouche préventive pour éviter l'apparition ultérieure de dégradations plus importantes.

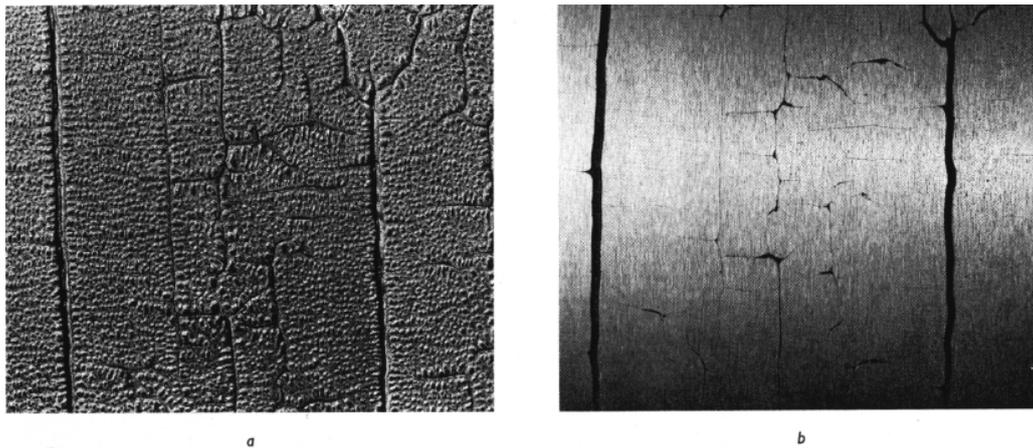


Figure 32. Aspect du maillage et des fissures avant rectification superficielle (a) et après (b).

2 Pliage :

Le pliage permet l'obtention de pièces développables dont les plis sont obligatoirement rectilignes. Il est effectué par une ou plusieurs opérations successives sous l'action d'une force exercée sur la pièce. Plier une tôle, c'est relever une partie de cette tôle de façon à former un angle dont l'arête est rectiligne et plus ou moins arrondie.

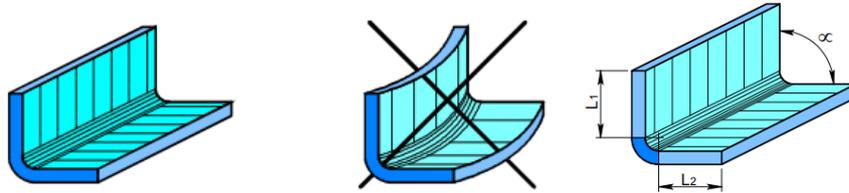


Figure 33. Forme du pli

Les deux plans de la tôle qui forme un angle α que l'on appelle angle dièdre. Les longueurs L_1 et L_2 qui portent le nom de parties droites

Le pliage permet d'obtenir des déformations plastiques localisées d'un flan préalablement découpé.

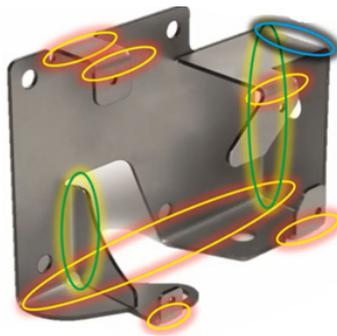


Figure 34. Déformations plastiques localisées

Le pliage s'obtient par un effort de flexion provoquée sur toute la longueur du pli soit manuellement ou mécaniquement.

2.1 Pliage manuel :

Il est réalisé à l'aide d'une plieuse universelle manuelle. Cette machine est utilisée pour les petites séries, elle permet des pliages assez complexes pour des tôles de dimension importantes, avec une qualité et précision moyenne.

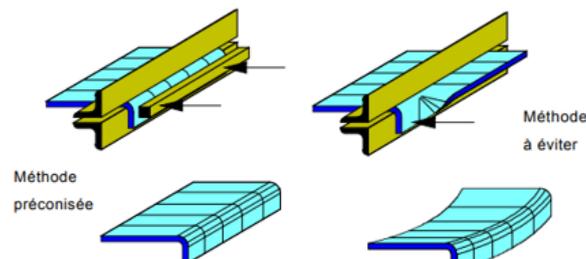


Figure 35. Pliage manuel

2.2 Pliage mécanique :

La presse-plieuse est une machine qui applique les lois de la flexion pour plier des tôles. Les tôles sont placées sur une matrice (ou vé), appuyée contre des butées réglées auparavant. En actionnant une pédale, l'opérateur fait descendre le poinçon (ou contre-vé) et va grâce à une force, plier la tôle jusqu'à un degré choisi. Les réglages s'effectuent en fonction de l'épaisseur, du matériau, des longueurs à plier et des outils choisis.

Les limites des presse-plieuses sont surtout la longueur de pliage et la force de pliage.

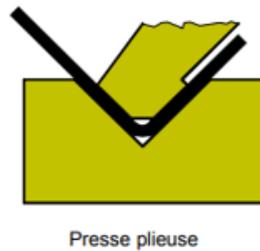


Figure 36. Pliage mécanique

Il existe deux techniques de pliage :

2.2.1 Pliage en frappe :

Le poinçon entraîne les deux branches libres du pli jusqu'au contact des faces intérieures de la matrice, il en résulte un écrouissage de la zone pliée et l'angle obtenu est sensiblement égale à celui du vé. Cette technique permet d'obtenir des pièces précises, mais elle nécessite des efforts de pliage importants (environ $30t/m/mm$ d'ép.). Il faut un outillage pour chaque angle et il est limité aux tôles jusqu'à 2 mm d'épaisseur. Le fait de matricer l'intérieur du pli permet d'obtenir des angles très précis ($\pm 0,5^\circ$). L'épaisseur de la tôle est réduite à l'endroit du pli.

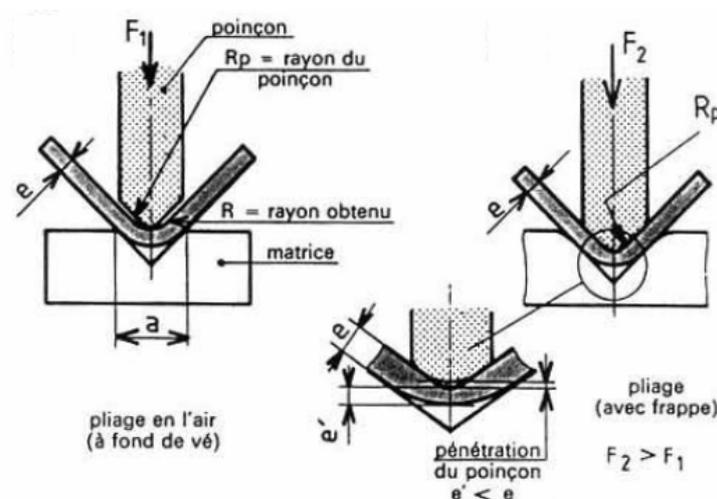


Figure 37. Techniques de pliage (en l'air et en frappe)

2.2.2 Pliage en l'air :

Les branches libres du pli ne viennent pas au contact des faces intérieures du vé. La limitation de la descente du poinçon et l'écartement du vé, permettent d'obtenir les plis aux angles désirés. Ce qui veut dire que l'angle est donné par la profondeur de pénétration du poinçon dans la matrice. Ce mode de pliage est couramment utilisé car les forces appliquées sont environ 5 fois moins importantes que pour du pliage en frappe.

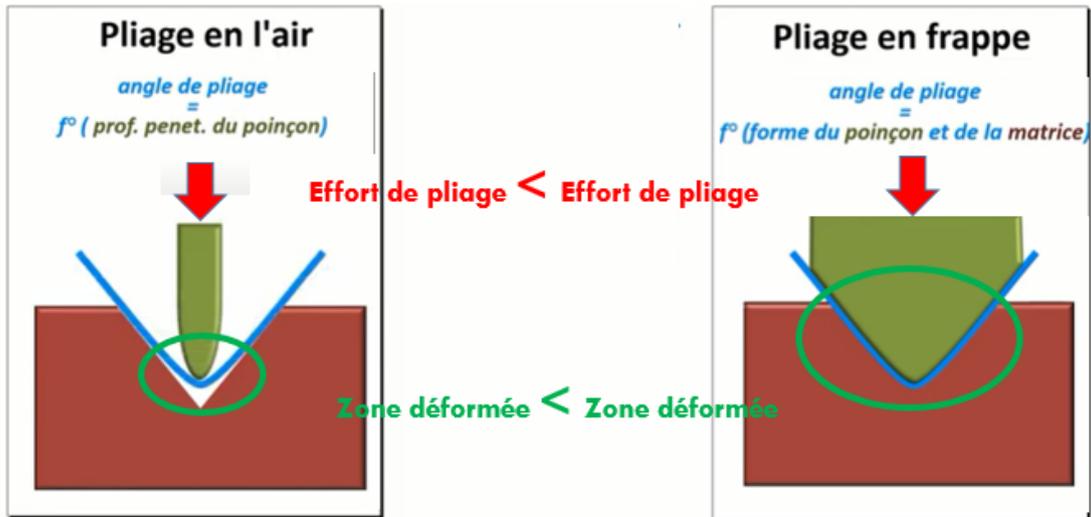


Figure 38. Comparaison entre les techniques de pliage

2.3 Caractérisation de l'aptitude au pliage. Rayon minimal de pliage

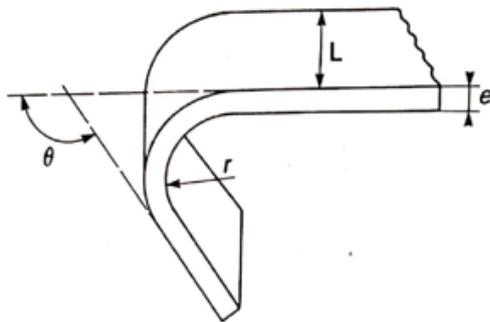
Le schéma d'une pièce pliée avec les différents paramètres géométriques du pliage est porté sur la figure 39

Le plus petit rayon pour lequel il n'y a pas apparition de fissures lors du pliage est appelé rayon minimal de pliage. Quel que soit le procédé de pliage utilisé le bureau d'étude doit tenir compte du rayon minimal de Pliage réalisable. Les facteurs qui interviennent sur la valeur de ce rayon sont les suivants :

- nature du métal,
- géométrie de la pièce,
- état du bord découpé.

Le rayon minimal de pliage diminue lorsque la capacité de déformation plastique du métal augmente. Une étude de Creusot-Loire (aujourd'hui groupe Industeel Arcelor) a permis de déterminer une relation empirique reliant le rayon minimal de pliage, rapporté à l'épaisseur, aux caractéristiques de traction de la tôle :

$$\frac{r_m}{e} = \frac{1}{\left[\frac{A-4}{100-Z} \right] + \left[\frac{A-4}{100-Z} + 2 \right]}$$



e : épaisseur de la tôle (mm)
L : longueur pliée (mm)
r : rayon de pliage (mm)
 θ : angle de pliage
A : Allongement après rupture (%)
Z : coefficient de striction (%)

Figure 39. Paramètres géométriques du pliage

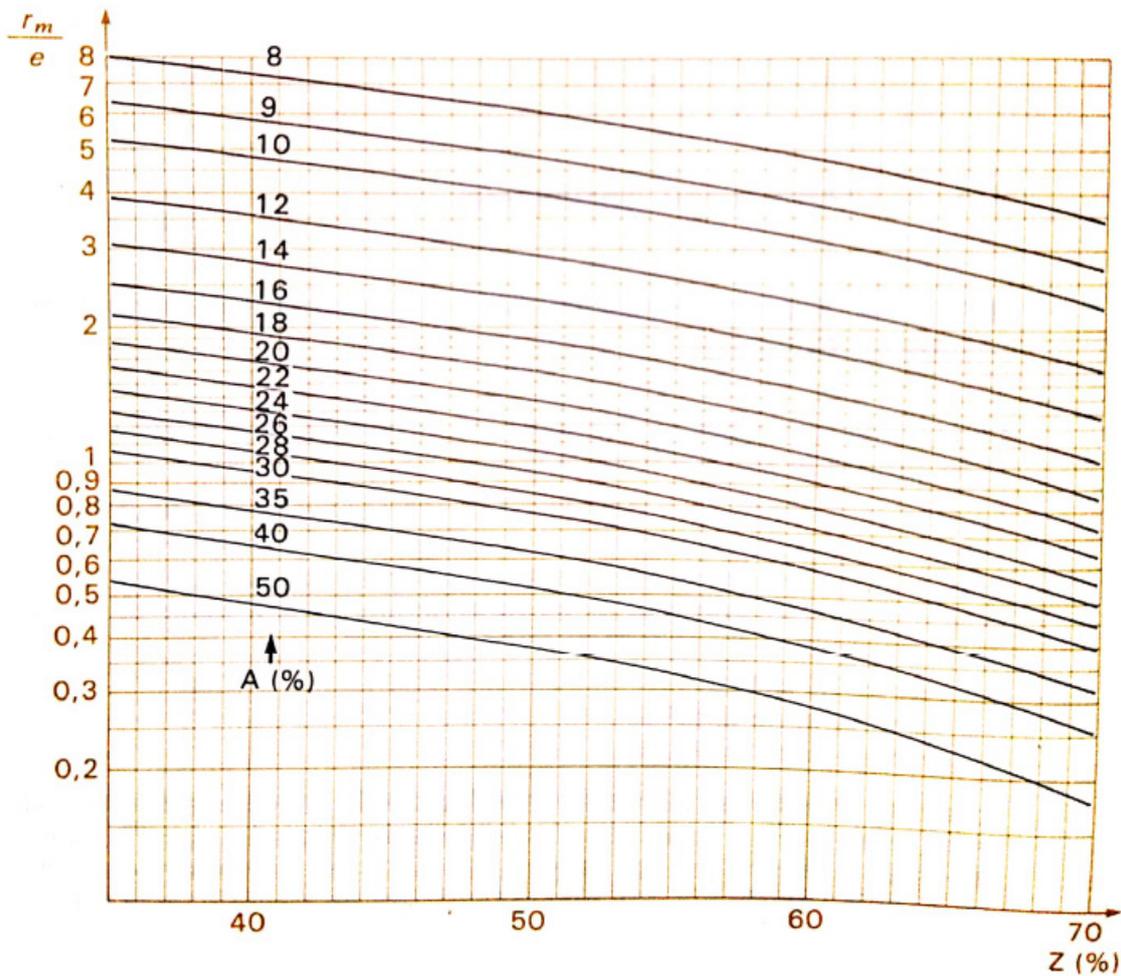


Figure 40. Estimation du rayon minimal de pliage

Cette relation a été établie pour des aciers de construction non alliés et faiblement alliés, de limite d'élasticité comprise entre 400 et 1 100 MPa. L'abaque de la figure 40 permet de déterminer rapidement la valeur de r_m/e à partir de *A* et *Z*.

2.4 Calcul de flans

Le calcul de la longueur développée d'une pièce pliée est nécessaire pour déterminer la longueur du flan et pour régler la position des butées lors de l'opération de pliage. Dans la partie pliée de la tôle la fibre non déformée (fibre neutre) n'est plus au milieu de l'épaisseur, elle s'est déplacée vers la face interne du pli (fig. 41). Le rayon de cette fibre neutre est alors $r + ke$. Le tableau 1 ci-dessous donne les valeurs de k (d'après la norme DIN 6935).

r/e	$> 0,65$	> 1	$> 1,5$	$> 1,5$	$> 3,8$
k	0,3	0,35	0,4	0,45	0,5

Tableau 1 : Valeurs de k (d'après la norme DIN 6935).

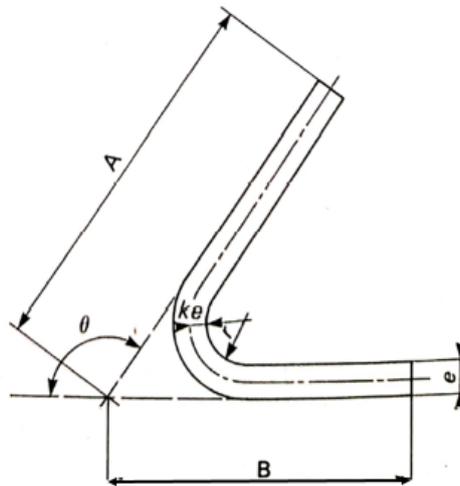


Figure 41. Déplacement de la fibre neutre

La valeur de la longueur développée de la tôle pliée est donnée par la formule :

$$L = A + B - C$$

Avec :

$$C = 2(r + e) \cotg \frac{(180 - \theta)}{2} - \frac{\pi}{180} (r + ke) \theta$$

Les paramètres sont définis sur la figure 41. L'abaque représenté sur la figure 42 permet de trouver rapidement la valeur de C.

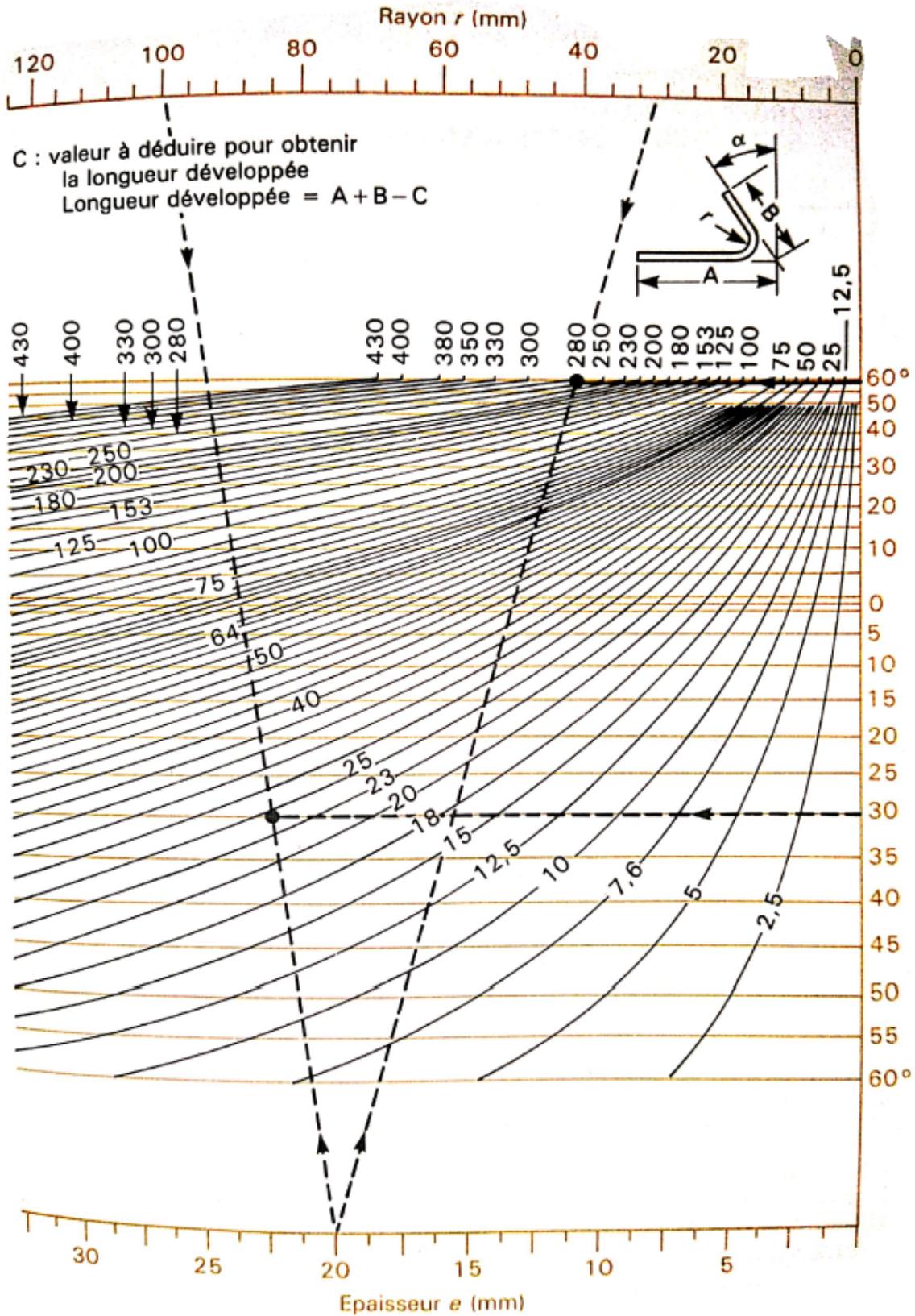


Figure 42. Détermination de la longueur développée d'une tôle pliée

Exemple d'utilisation de l'abaque : soit à déterminer la longueur du flan et les positions des lignes de pliage pour obtenir la pièce représentée sur la figure 43

Longueur du flan :

$$l_3 = 700 + 500 - 280 + 450 - 24,5 \approx 1345 \text{ mm}$$

Positions des lignes de pliage :

$$l_1 = 700 - \frac{280}{2} = 560 \text{ mm}$$

$$l_2 = 700 + 500 - 280 - \frac{24,5}{2} = 908 \text{ mm}$$

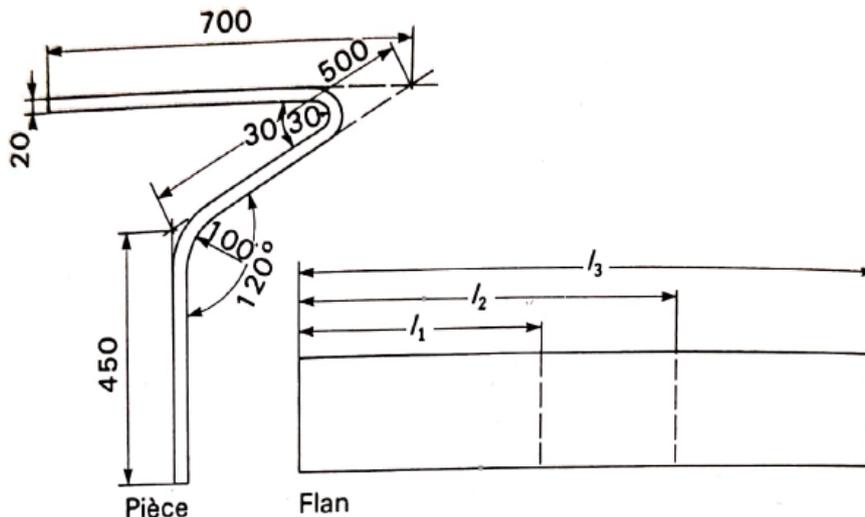


Figure 43. Détermination de la longueur du flan et les positions des lignes de pliage

2.5 Calcul du retour élastique.

Pendant l'opération de pliage sous l'action du poinçon la tôle est pliée à un angle θ_0 , lorsque le poinçon se relève, l'angle s'ouvre légèrement jusqu'à un angle θ (fig. 44). Ce phénomène, dû au relâchement des contraintes élastiques, est appelé retour élastique. Pour obtenir un pliage à un angle précis il faut tenir compte de ce retour élastique au moment de la conception de l'outillage.

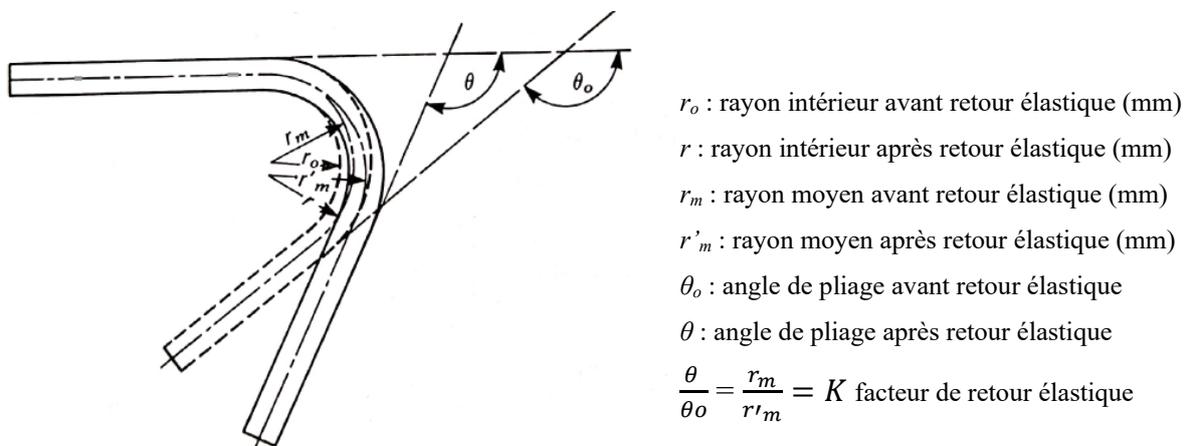


Figure 44. Retour élastique

Le calcul du retour élastique pour des rapports rayon/épaisseur de la tôle supérieurs à 10, peut être réalisé en utilisant la formule suivante :

$$\frac{r_0 + e_0/2}{r + e_0/2} = \frac{1}{1 + 3 \frac{r + e_0/2}{e_0} \frac{R_e}{E}}$$

Avec :

R_e : limite élastique du matériau (MPa)

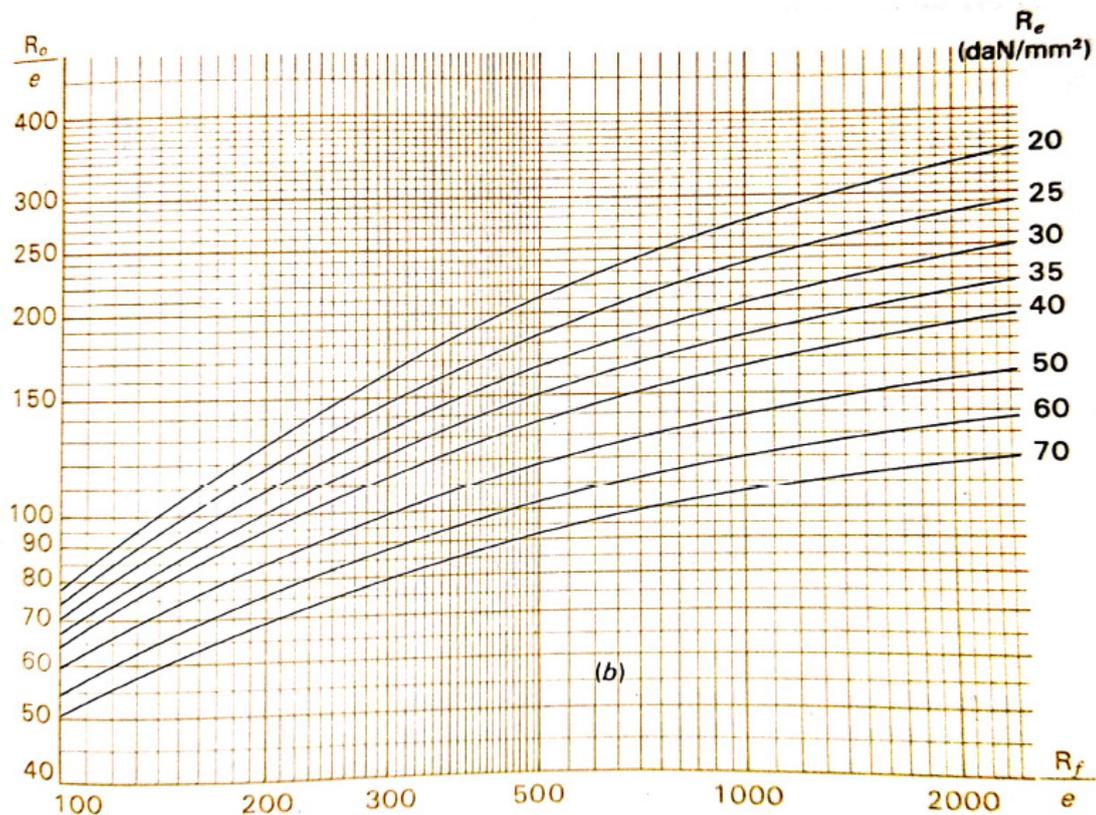
E : module de Young du matériau (MPa)

r_0 : rayon initial (mm)

r : rayon intérieur après retour élastique (mm)

Une autre manière de déterminer le retour élastique est l'utilisation d'une solution graphique donnée sur l'abaque de la figure 45. Le paramètre R_f/e varie de 10 à 2500 ce qui couvre la plupart des cas de retour élastique

Dans le cas d'une tôle en acier A52 P1 ($R_e = 40 \text{ daN/mm}^2$) d'épaisseur $e = 25 \text{ mm}$, il faut plier à un rayon initial $R_0 = 1355 \text{ mm}$, pour obtenir un rayon $R_f = 2000 \text{ mm}$ sur la pièce finie.



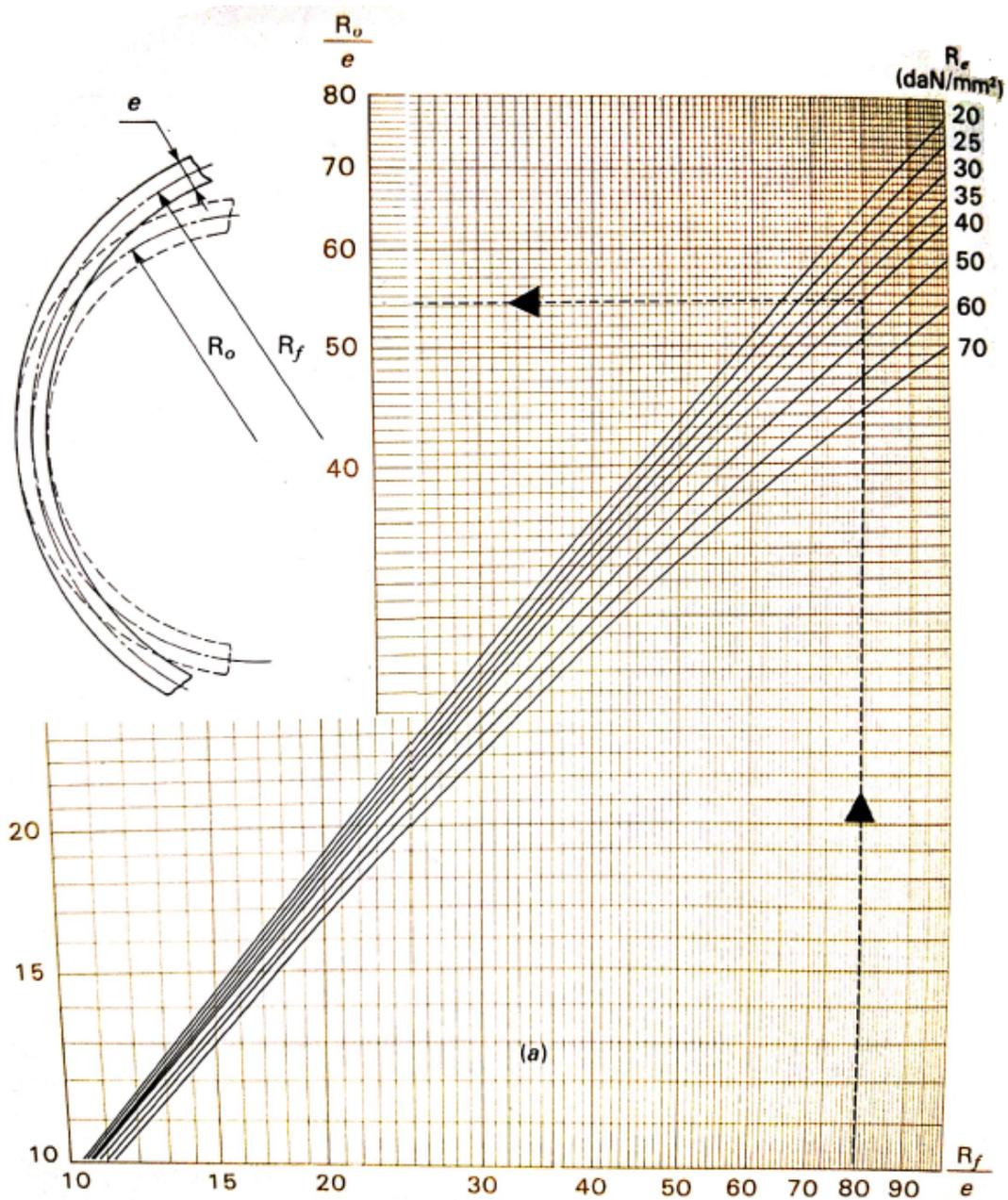


Figure 45. Calcul du rayon de courbure initial R_0 nécessaire pour un pliage au rayon R_f

Pour des rapports inférieurs ou égaux à 10, la formulation suivante est valide pour le retour élastique :

$$\frac{r_m}{r'_m} = 1 - \frac{3k(1 - \nu^2)}{E(n + 2)(3/4)^{\frac{1+n}{2}}} \left[2 \frac{r_m}{e} \right]^{(1-n)}$$

Avec :

r_m : rayon moyen avant retour élastique = $r_0 + e_0/2$

r'_m : rayon moyen avant retour élastique = $r + e_0/2$

n : coefficient d'écroutissage du métal (daN/mm²) } De la loi d'écroutissage $\sigma = k\varepsilon^n$
 k : coefficient d'amplitude du métal (daN/mm²) }

ν : coefficient de Poisson ($\nu = 0,3$ pour l'acier)

E : module d'élasticité (daN/mm²)

L'abaque de la figure 46 permet de calculer r_m/r'_m pour différents métaux.

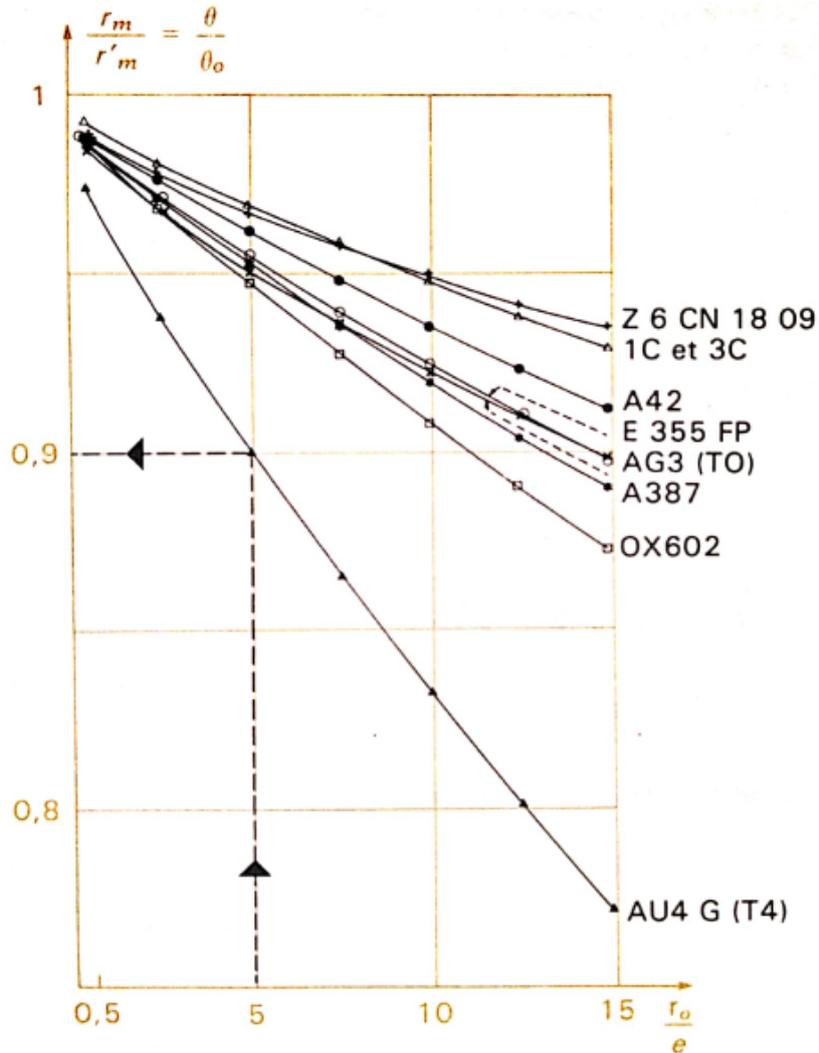


Figure 46. Détermination du retour élastique des tôles pliées

Exemple d'application :

Tôle AU 4 G (T4) ; $e = 10 \text{ mm}$; $r_0 = 50 \text{ mm}$

On a : $\frac{r_0}{e} = 5 \rightarrow \frac{r_m}{r'_m} = 0,9$

$$r_m = r_0 + \frac{e}{2} = 50 + 5 = 55 \text{ mm}$$

$$r'_m = \frac{55}{0,9} = 61,1 \text{ mm}$$

Rayon intérieur après retour élastique : $r = 56,1 \text{ mm}$

Matériaux		n	k (daN/mm ²)	E (daN/mm ²)
Acier inoxydable austénitique	Z6 CN 18-09	0,33	88	19 000
Aciers non alliés	1 C et 3 C	0,18	60	21 000
	A 42	0,18	75	21 000
Aciers à haute limite d'élasticité	A 355 FP	0,21	97	21 000
	OX 602	0,13	92	21 000
Acier faiblement allié	A387 (\approx 15CD-05)	0,17	90	21 000
Alliages d'aluminium	AG 3 (TO)	0,3	45	7 000
	AU4 G (T4)	0,2	70	7 000

Tableau 2 : Quelques valeurs caractéristiques des métaux

2.6 Détermination des efforts :

2.6.1 Pliage en V :

L'effort de pliage est exercé par le poinçon (exprimé en Newton) est donné par la formule :

$$F = \frac{C \cdot R_m \cdot L \cdot e^2}{V}$$

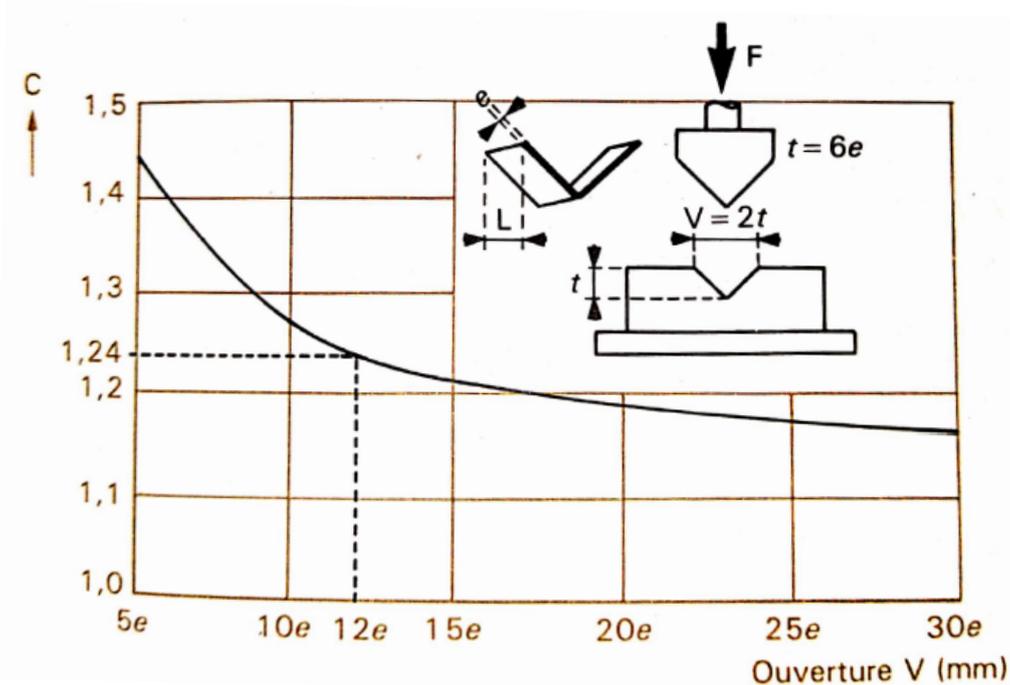


Figure 47. Détermination du coefficient C pour le calcul de l'effort vertical F

Avec :

R_m : résistance à la traction (MPa)

L : longueur pliée (mm)

e : épaisseur de la tôle (mm)

V : ouverture du Vé (mm)

C : coefficient en fonction de l'ouverture du Vé (fig 47)

L'abaque de la figure 48 permet de déterminer rapidement l'effort du pliage à partir des paramètres caractéristiques de la tôle et de l'outillage.

Exemple :

Données : $L = 360$ mm ; $R_m = 60$ daN/mm² ; $V = 20$ mm ; $e = 2,5$ mm.

Résultats :

1° On joint a ($L = 360$) à c ($R_m = 60$) ; soint b le point où ac coupe la droite (A) ;

2° On joint d ($V = 20$) à b ; db coupe la droite de référence (B) en p ;

3° On joint p à g ($e = 2,5$) qui coupe la droite F en f = 100, on détermine ainsi l'effort de cambrage $F = 100$ kN.

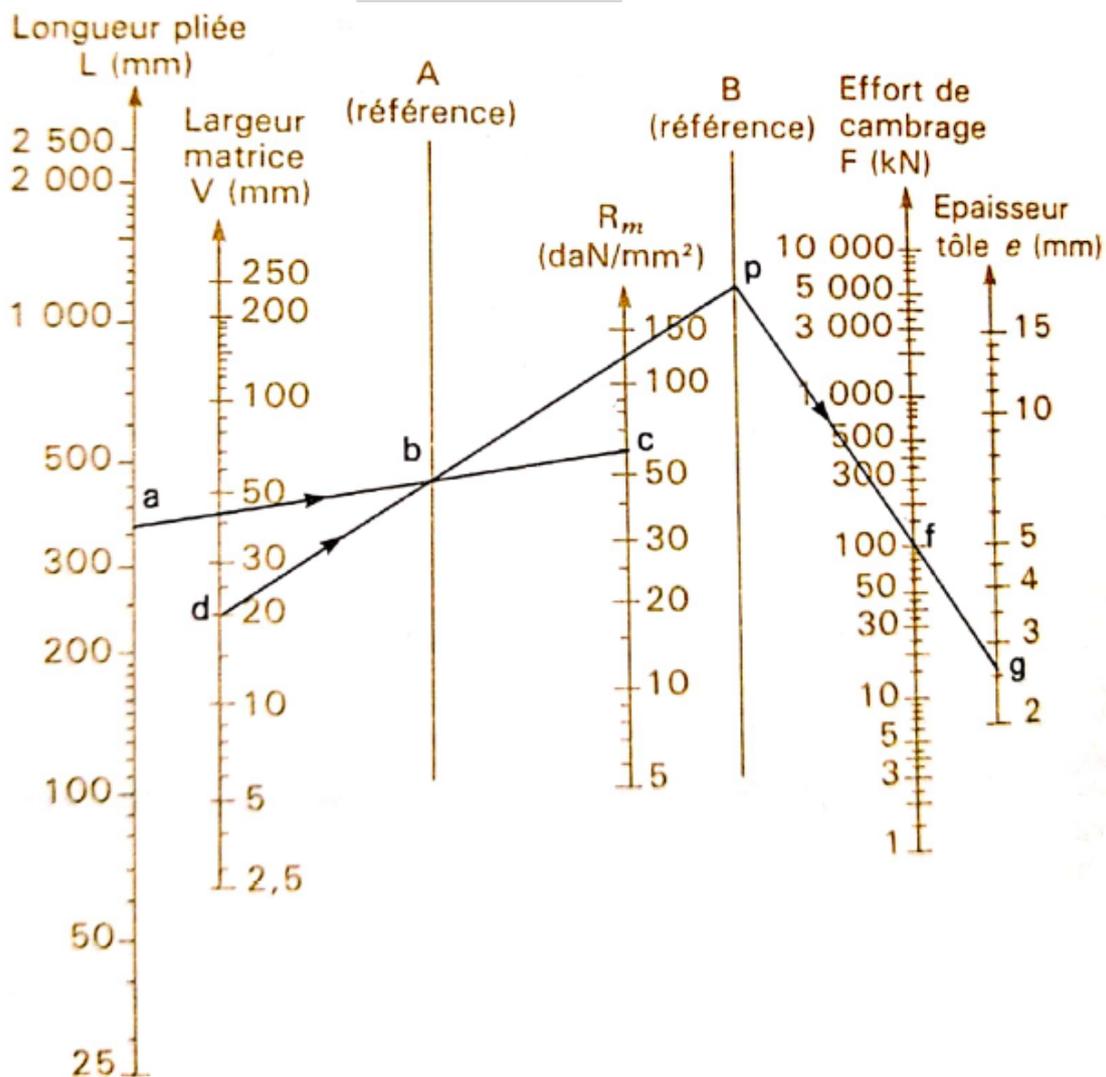


Figure 48. Abaque pour la détermination des efforts de pliage en V

Les fabricants de presses plieuses fournissent des tableaux qui indiquent les efforts de pliage en fonction de l'ouverture du vé et de l'épaisseur de la tôle (fig. 49).

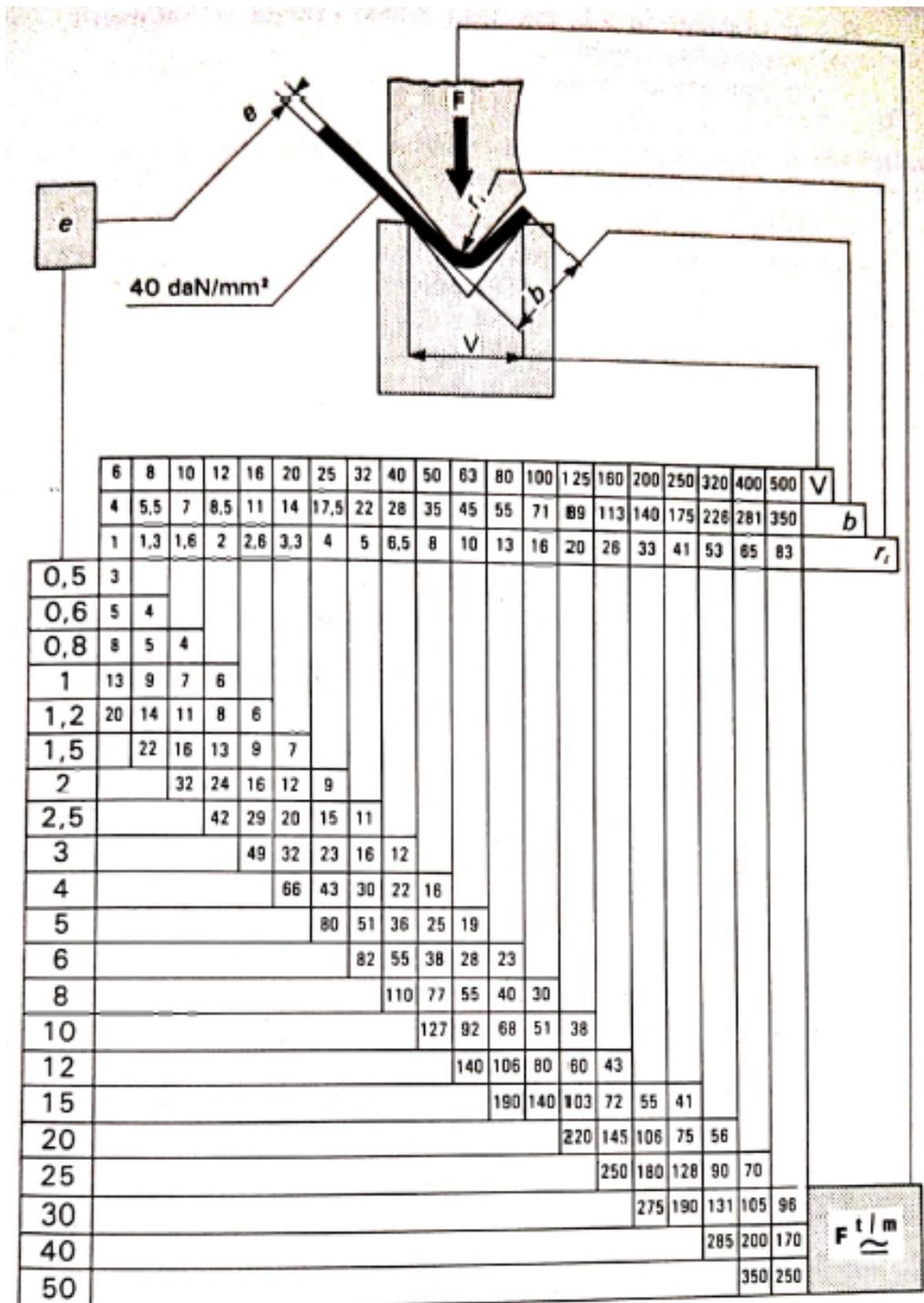


Figure 49. Efforts de pliage en V d'un acier de résistance à la traction $R_m = 40 \text{ daN/mm}^2$

Dans le cas du pliage de tôles épaisses avec de forts rayons de courbure dans des matrices relativement étroites par rapport au rayon du poinçon (fig. 50), il s'est avéré que la formule donnée ci-dessus conduisait à des valeurs trop faibles. Lorsque l'ouverture de la matrice est

inférieure à 5 fois $(r + e)$, une autre expression de l'effort de pliage (exprimé en Newton) est proposée :

$$F = \frac{0,96 \cdot R_m \cdot L \cdot e^2}{V - (r - e)}$$

Avec :

R_m : résistance à la traction (MPa)

L : longueur pliée (mm)

V , e et r : paramètres géométriques de la pièce et de l'outillage définis figure 50 (exprimés en mm).

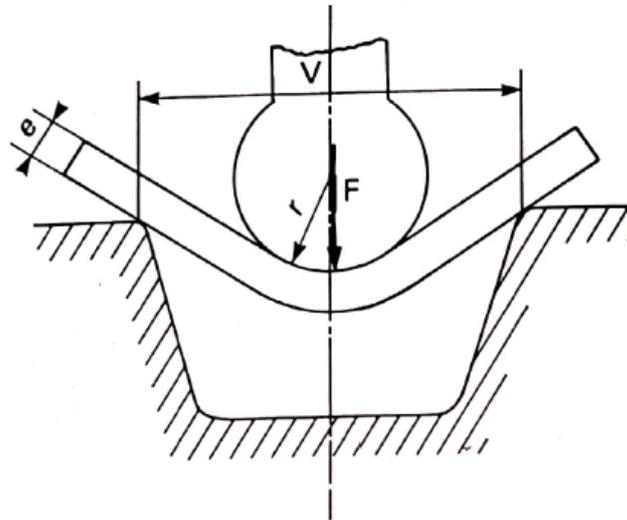


Figure 50. Géométrie de l'outil lors du pliage avec un grand rayon de poinçon et une matrice à faible ouverture

2.6.2 Pliage en U :

Des formules empiriques permettent de calculer de façon approximative l'effort du pliage en U ; on peut donner la formule ci-dessous pour le pliage avec un jeu de 10 % (F est exprimé en Newton) ;

$$F = 0,5 \cdot R_m \cdot L \cdot e$$

Avec :

R_m : résistance à la traction (MPa)

L : longueur pliée (mm)

e : épaisseur de la tôle (mm)

2.7 Pliage à froid et à chaud.

Le pliage est généralement exécuté à froid pour éviter la rupture ou la formation de fissures au moment du pliage il faut respecter le rayon minimum de pliage défini par la norme de l'acier considéré.

Le pliage à chaud est pratiqué lorsque la puissance de la presse est insuffisante ou lorsque la capacité de déformation à froid du métal n'est pas suffisante pour obtenir le rayon de pliage désiré. On peut chauffer l'ensemble du flan ou effectuer un chauffage local. Le flan est chauffé à une température supérieure à AC_3 , la température de fin de formage est fonction de l'opération exécutée. Pour les aciers non alliés il faut éviter de former dans la zone de 150 à 550 °C qui correspond à la fragilité au bleu.

2.8 Qualité des pièces pliées :

Bien souvent les tôles pliées ne sont pas des pièces de sécurité. Dans ce cas la restauration des caractéristiques mécaniques par traitement thermique n'est pas nécessaire.

Lorsque la pièce pliée est un élément de structure dont la rupture peut entraîner des dégâts importants (éléments fonctionnels d'un appareil chaudronné ou d'une structure offshore), les règles générales concernant le traitement thermique après formage doivent être appliquées. Rappelons que pour les aciers non alliés on admet une déformation à froid de 5 % sans traitement thermique après formage. Lorsque la déformation est supérieure à 5 % le traitement thermique à appliquer est un recuit de normalisation ou tout autre traitement dont l'efficacité est démontrée par des essais.

Pour les pièces qui seront ensuite soudées dans la zone du pli, certains organismes de contrôle définissent une procédure de qualification. Des essais de résilience sont prescrits sur des éprouvettes prélevées dans la zone pliée et vieillie artificiellement.

3 Emboutissage :

3.1 Principe :

L'emboutissage est un procédé de formage par déformation plastique à froid des métaux (tôle). Il transforme une feuille appelée flan en une surface généralement non développable. Il est effectué sur une presse au moyen d'un outillage qui comprend deux pièces principales : le poinçon et la matrice.

Le poinçon a la forme intérieure de la pièce à obtenir et la section de la matrice est semblable à celui du poinçon. Pendant l'opération d'emboutissage, le flan est exposé à la fois aux forces radiales et tangentielles ou de combinaison variable.

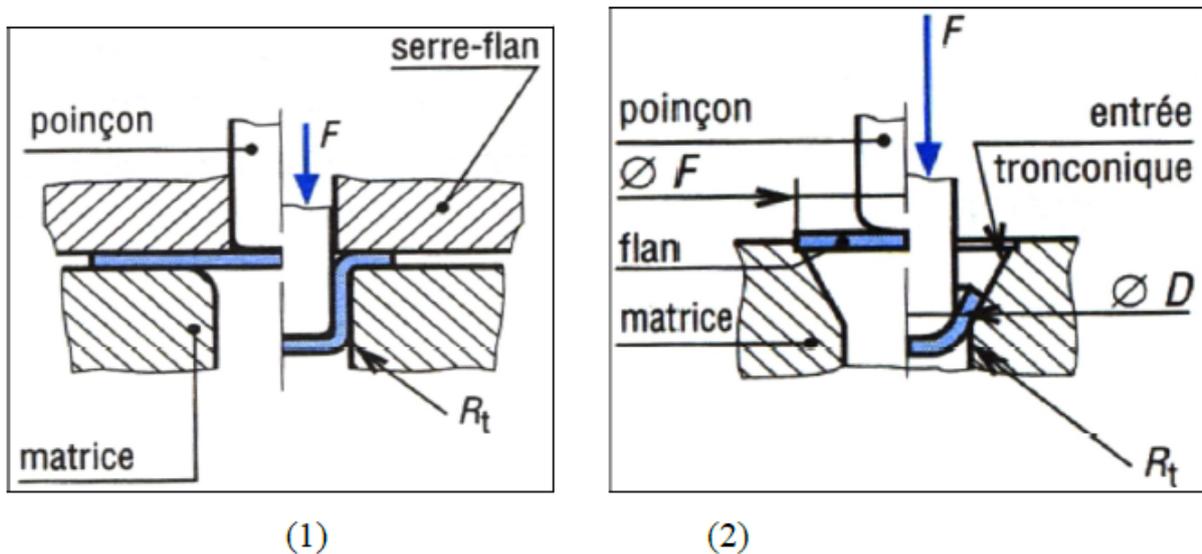


Figure 51. (1) Emboutissage avec serre flan (2) Limitation aux embouties de faible hauteur

3.2 Processus :

Un flan est posé sur la matrice, le Poinçon descend, l'emboutissage commence (Fig 51).

Si sur le flan, on trace des lignes concentriques équidistantes, on remarque que pendant l'emboutissage chacune de ces lignes se raccourcit jusqu'à ce que sa longueur devienne égale au périmètre de la matrice. Plus les cercles concentriques, équidistants sur le flan, sont éloignés du fond de l'embouti plus la distance qui les sépare alors est grande (fig. 52.a). Cependant au cours de l'opération, les lignes tendent à conserver leur longueur initiale et à former des plis (fig. 52.b). Ces plis se résorbent si le flan n'est pas trop grand (voir F. 43 : emboutissage sans serre-flan).

Si le flan est grand, les plis sont très prononcés (ils peuvent même parfois se recouvrir) et ils entraînent alors la rupture de l'embouti (fig. 52.c). Il faut donc empêcher la formation des plis : c'est le rôle du serre-flan.

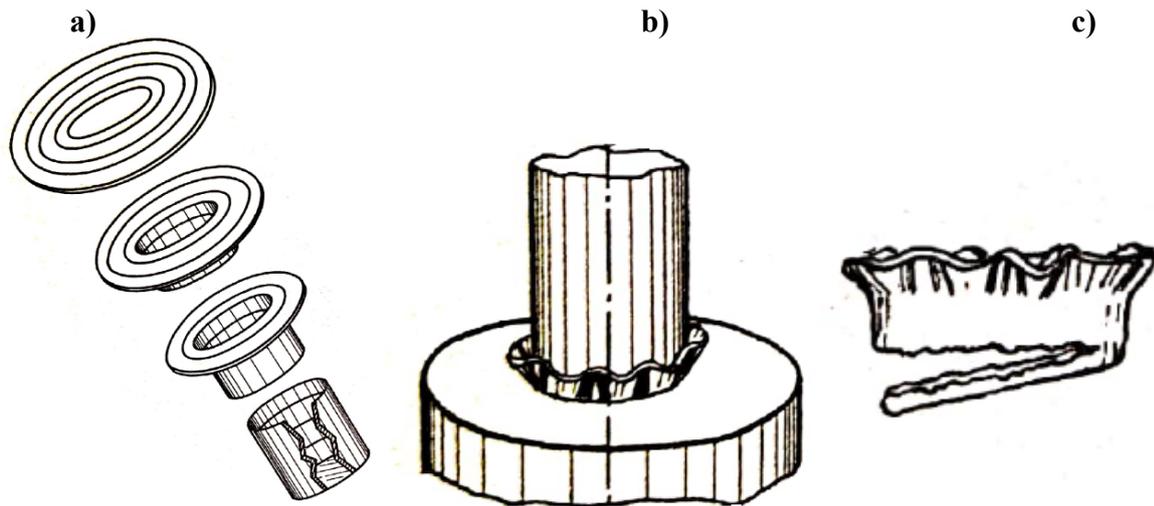


Figure 52. Processus de l'emboutissage

Un outillage type d'emboutissage (fig. 53.a) se compose donc d'une matrice, d'un poinçon et d'un serre-flan maintenant la tôle pendant l'emboutissage. Dans cet outil, le métal du flan se déplace vers le centre (fig. 53.b). L'épaisseur augmente mais l'enroulement du métal sur le rayon de la matrice et le laminage entre poinçon et matrice (surfaces A et B) la réduisent à sa valeur primitive. Un embouti a donc, théoriquement, une épaisseur constante.

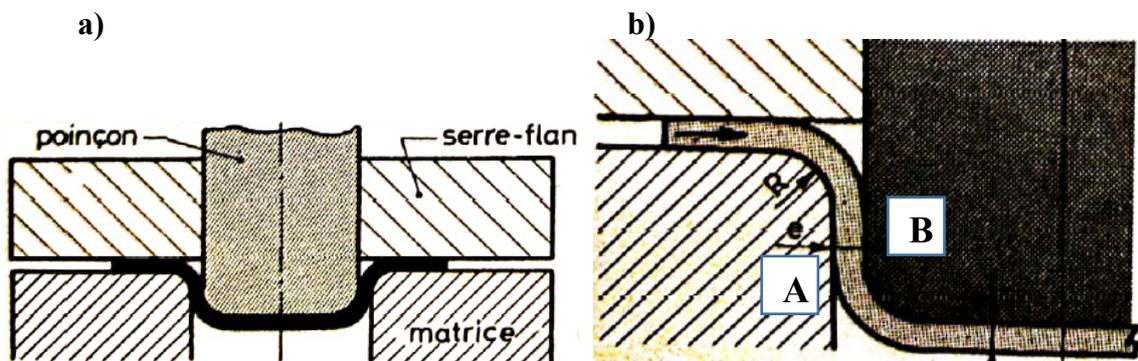


Figure 53. Outillage type pour l'emboutissage

3.3 Procédés d'emboutissage :

Il existe deux procédés d'emboutissage suivant la forme de pièce à obtenir.

3.3.1 Emboutissage en expansion :

Si la pièce a une forme complexe mais de faible profondeur on peut bloquer le flanc entre serre-flan et matrice, si besoin est avec des joncs. La tôle ne se déforme alors que sur le poinçon en s'allongeant dans une ou plusieurs directions et en s'amincissant, nous disons que nous travaillons en expansion (Figure 54)

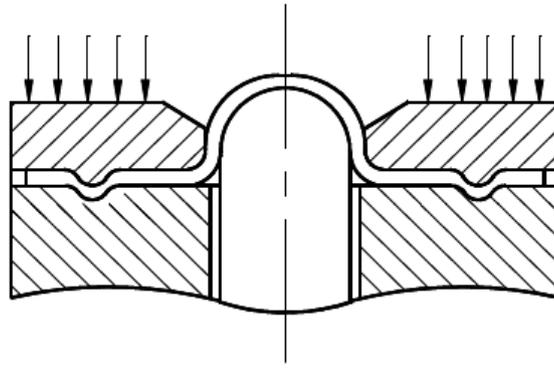


Figure 54. Emboutissage en expansion

3.3.2 Emboutissage en rétreint :

Si la pièce a une forme cylindrique droite (base circulaire ou quelconque) de forte profondeur on laisse glisser le flan entre serre-flan et matrice, la déformation sur le poinçon est limitée aux rayons de poinçon, la majeure partie de la déformation se fait par rétrécissement sur la matrice, c'est l'emboutissage en rétreint (Figure 55).

Une opération d'emboutissage quelconque est la combinaison de ces deux modes. Dans une opération mixte, un des gros problèmes est de régler le glissement sous serre-flan suffisamment faible pour permettre les déformations et éviter les plis, suffisamment fort pour éviter un étirage trop important qui conduirait à la rupture.

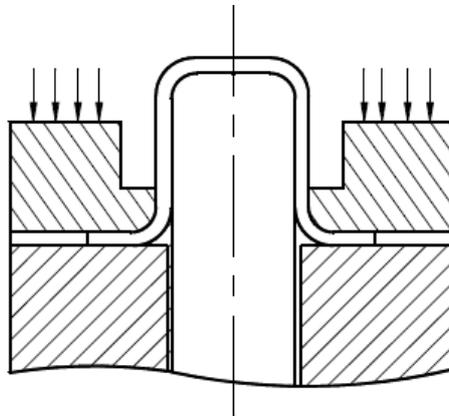


Figure 55. Emboutissage en rétreint

3.4 Détermination du flan :

L'embouti ayant théoriquement une épaisseur constante le flan aura la même surface que l'embouti (tous les calculs se font en considérant la fibre moyenne).

Cependant, en pratique, l'épaisseur varie légèrement et l'on constate qu'un flan théorique se révèle souvent trop grand.

3.4.1 Détourage :

Ajouter sur le dessin de pièce 2 à 3 mm pour le détourage : ce qui se traduira, compte tenu des diminutions d'épaisseur non prévisibles, par une chute de métal plus importante et souvent nécessaire pour effectuer un détourage correct.

Par cet artifice le flan théorique est souvent très proche du flan pratique.

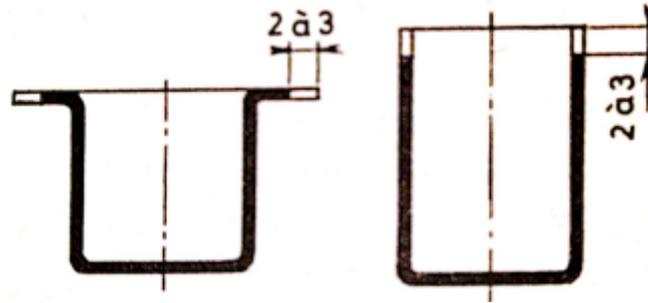


Figure 56. Détourage

3.4.2 Flan pratique

Il ne peut se déterminer qu'à la suite d'essais sur les outils d'emboutissage réalisés. L'outil de découpage du flan n'est exécuté qu'après ces essais.

3.4.3 Détermination du flan théorique

D'après le dessin de pièce modifié (détourage compris), il est possible de calculer le flan :

- En utilisant les formules du tableau figure 58.

Tous les rayons n'intervenant pas dans le calcul des diamètres de flans ne sont qu'approximatifs.

- En appliquant le théorème de Pappus-Guldin.

Calcul assez long mais plus précis que par la méthode précédente.

3.4.4 Théorème de Pappus-Guldin

La surface engendrée par une ligne plane tournant autour d'un axe situé dans son plan et ne le traversant pas est égale au produit de la longueur développée de cette ligne par la circonférence décrite par son centre de gravité.

Centre de gravité des arcs de cercle (fig. 57)

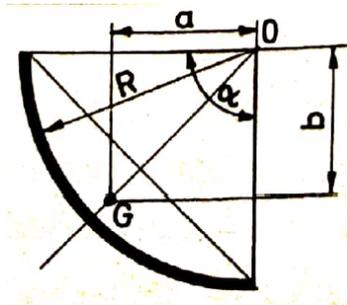


Figure 57. Application du théorème de Pappus-Guldin

Démonstration de la formule :

$$OG = R \times \frac{\text{corde}}{\text{arc}}$$

Pour $\alpha = 90^\circ$:

$$OG = R \times \frac{R\sqrt{2}}{\frac{\pi R}{2}}$$

$$OG = \frac{2R\sqrt{2}}{\pi}$$

$$a = b = \frac{OG}{\sqrt{2}}$$

$$= \frac{2R}{\pi}$$

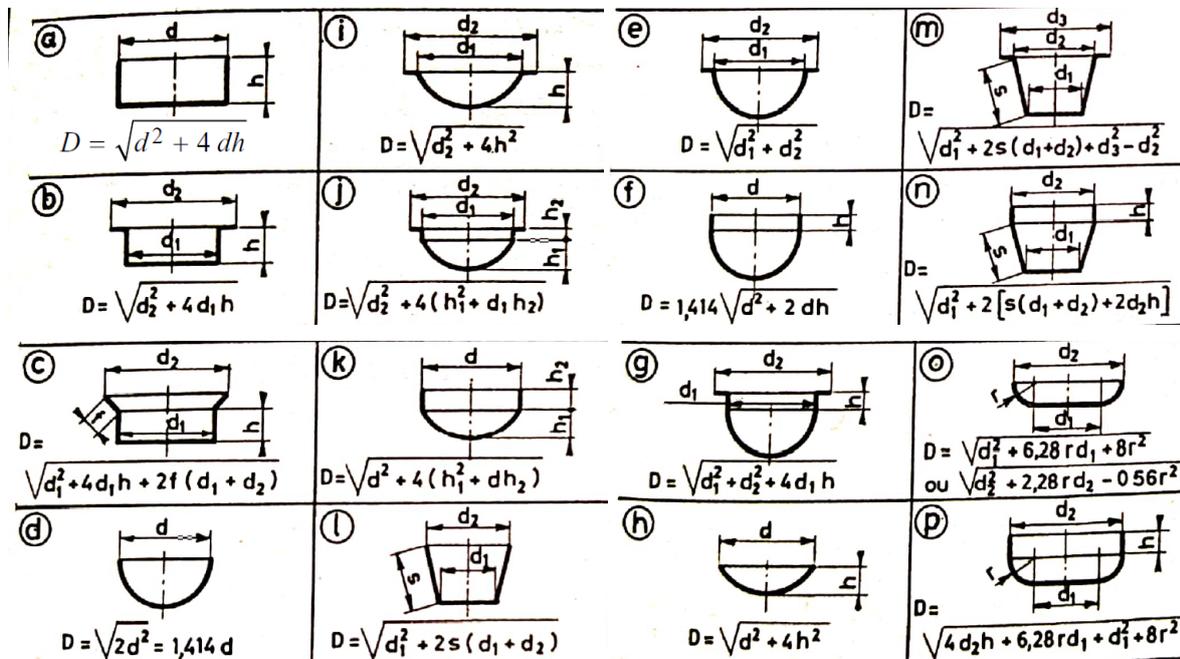


Figure 58. Détermination du flan théorique

3.5 Nombre de passes :

Considérons le flan et supposons qu'il soit composé d'une multitude de petits secteurs (fig. 59.a). Examinons la déformation de l'un d'eux (fig. 59.b), La couronne du flan définie par le diamètre extérieur de celui-ci et par le diamètre du poinçon résiste à la déformation qui lui est imposée. Pendant l'emboutissage, des contraintes de compression et de traction se développent dans le métal.

Là où les fibres se raccourcissent, il y a contrainte de compression [fig. 59 (1)]. Là où elles s'allongent, il y a contrainte de traction [fig. 59 (2)].

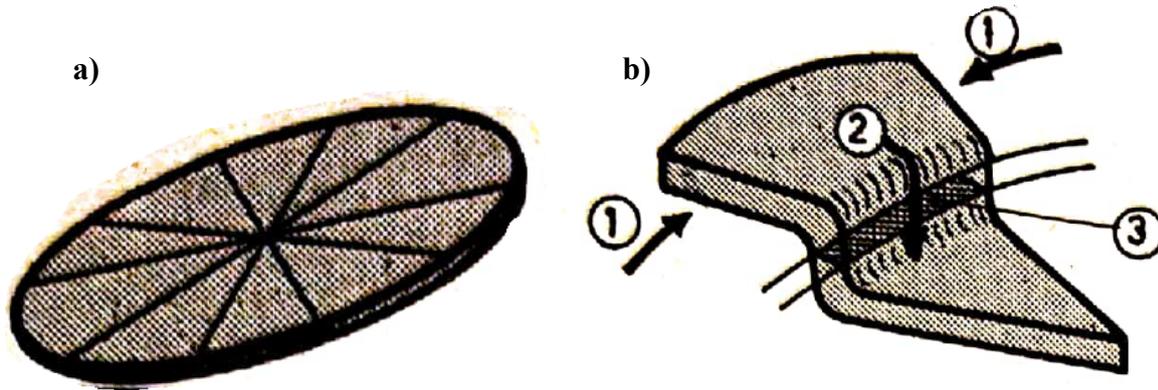


Figure 59. Analyse des déformations dans un flan

L'embouti se déchire si les contraintes internes atteignent la charge de rupture par traction du métal de la couronne emboutie à laquelle on donne le nom de section motrice [fig. 59 (3)].

De ce fait, un embouti donné ne s'obtient pas obligatoirement en une seule passe. Les passes intermédiaires se déterminent en fonction du coefficient de réduction admissible pour le métal que l'on emboutit.

3.5.1 Coefficient de réduction (tableau)

Le coefficient varie en fonction des métaux et du taux d'écroutissage admissible pour chaque métal.

3.5.2 Détermination des différentes passes

1^{ère} passe. Le diamètre d_1 de la première passe est égal au produit du coefficient k_1 par le ϕD du flan.

$$d_1 = k_1 \cdot D$$

Passes suivantes. Le diamètre de la deuxième passe d_2 est égal au produit du coefficient k_n par le diamètre de la première passe

$$d_2 = k_n \cdot d_1$$

Et ainsi de suite jusqu'au diamètre à obtenir :

$$d_3 = k_n \cdot d_2$$

$$d_4 = k_n \cdot d_3$$

$$d_n = k_n \cdot d_{n-1}$$

Matière	k_1	k_n
Tôle d'emboutissage ordinaire	0,60	0,80
Tôle d'emboutissage spécial	0,55	0,75
Tôle de carrosserie	0,52	0,75
Tôle d'acier inoxydable	0,52	0,80
Cuivre	0,58	0,85
Laiton	0,53	0,75
Aluminium recuit	0,55	0,80
Duralium	0,55	0,90

Tableau 3 : Valeurs de k_1 et k_n pour différents matériaux

3.5.3 Embouti à collerette

Le diamètre d'une collerette ne peut être modifié d'une passe à l'autre. Sur la figure 60 la collerette n'apparaît qu'à la seconde passe d'emboutissage. Son diamètre est ensuite constant.

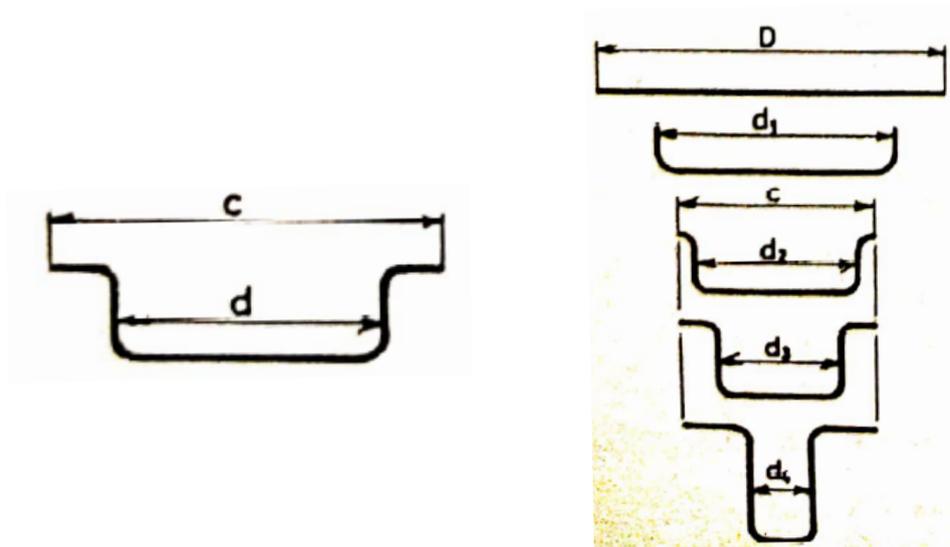


Figure 60. Embouti à collerette

3.6 Effort d'emboutissage :

Sa valeur maximale correspond à la charge de rupture par traction du métal de la section motrice de l'embouti. En pratique on utilise la formule suivante :

$$F = \pi \cdot d \cdot e \cdot R_m \cdot k$$

F : (en N).

d : Diamètre du poinçon (en mm).

D : Diamètre du flan (en mm).

E : Épaisseur de la tôle (en mm).

R_m : Résistance à la traction de la tôle (en N/mm²)

k : Coefficient fonction du rapport d/D .

d/D	0,55	0,60	0,65	0,70	0,75	0,80
k	1	0,86	0,72	0,60	0,50	0,40

Tableau 4 : Valeurs de k en fonction de d/D

Cette formule permet de calculer une valeur approchée de l'effort qui suffisante dans la plupart des cas industriels.

Lorsque l'emboutissage se fait sur presse à simple effet, l'effort sur le serre-flan est ajouté à l'effort d'emboutissage.

3.7 Effort sur le serre-flan :

$$F_s = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2).P$$

P : Pression spécifique sur le serre-flan (en N/mm^2)

Matière (flan)	Pression spécifique (N/mm^2)
Acier	2,5
Acier inoxydable	2
Aluminium	1,2
Duralium	1,6
Laiton	2

Tableau 5 : Pression spécifique des matières

Il faut noter que l'encombrement des outils utilisés conduit à l'emploi de presses qui exercent un effort nettement supérieur à celui requis ; le calcul de l'effort d'emboutissage s'avère souvent inutile pour le choix de la presse.

3.8 Rayon d'emboutissage (rayon de la matrice) :

Des rayons matrice trop petits induisent des déformations importantes du flan. Des rayons trop grands induisent la formation des plis par conséquent le serre-flan n'est plus efficace.

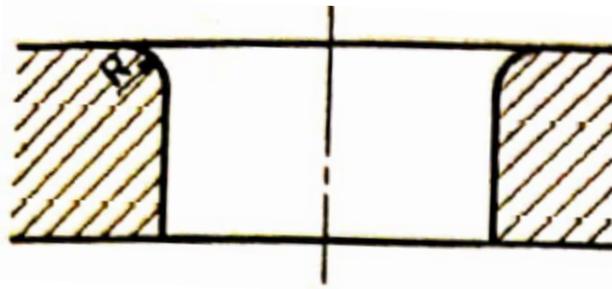


Figure 61. Rayon de la matrice

Le rayon est sensiblement égal à 5 fois l'épaisseur du métal embouti :

$$R \approx 5.e$$

Cependant Kaczmarek propose une formule plus exacte pour la 1^{ère} passe pour l'acier :

$$R = 0,8\sqrt{e.(D - d_1)}$$

Pour l'aluminium et ses alliages :

$$R = 0,9\sqrt{e.(D - d_1)}$$

R : Rayon de la matrice.

D : Diamètre du flan.

d_1 : Diamètre de l'embouti obtenu en première passe.

e : Épaisseur du métal embouti.

Pour les passes suivantes :

$$R_n = \frac{d_{n-1} - d_n}{2}$$

3.9 Rayon du poinçon :

Une tôle s'enroulant sur un rayon trop faible diminue d'épaisseur [fig 62 :(3)]. Après ré-emboutissage, le défaut se retrouve sur la surface latérale de l'embouti [fig 62 : (4)].

On adopte donc pour les passes intermédiaires un rayon au moins égal au rayon de la matrice :

$$5e < R < 10e.$$

Pour la dernière passe :

R = Rayon du fond de l'embouti à obtenir.

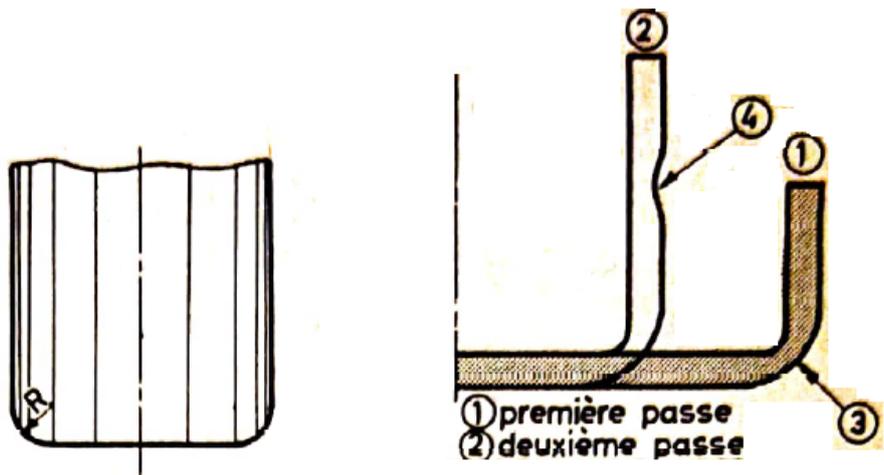


Figure 62. Rayon du poinçon

3.10 Hauteur des ébauches successives

Se détermine par égalité de volume. Les formules suivantes peuvent être employées :

Douille sans collerette (fig. 63.a) :

$$h = \frac{e(D^2 - d^2)}{4e'(d - e')} + e$$

Douille avec collerette (fig. 63.b):

$$h = \frac{e(D^2 - d_c^2)}{4e'(d - e')} + 2e$$

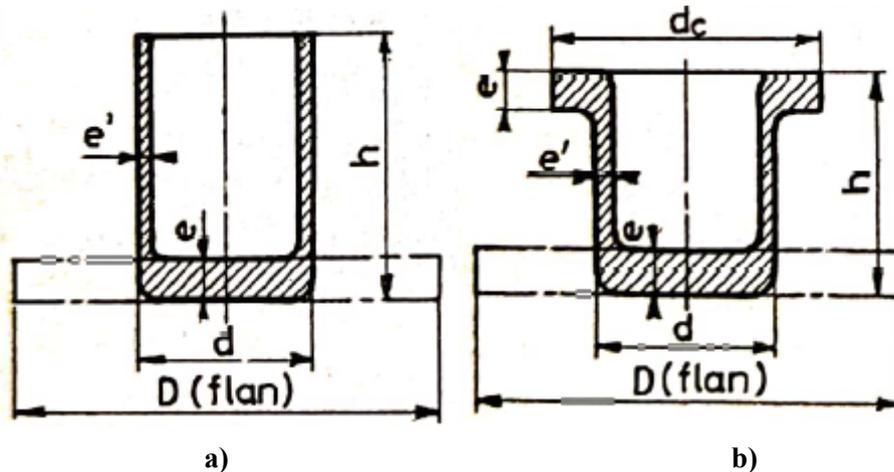


Figure 63. Hauteurs des ébauches : a) sans collerette, b) avec collerette

3.11 Détermination du jeu poinçon-matrice :

Lorsque le jeu entre le poinçon et la matrice est théoriquement égal à l'épaisseur de la tôle, il se produit une augmentation de l'épaisseur de la paroi.

L'augmentation de ce jeu entraîne certains inconvénients tels que :

- La détérioration du profil de la paroi ;
- Déviation du poinçon entraînant la formation de languettes sur le bord de l'embouti ;
- Apparition de plis sur la paroi de l'embouti.

Inversement, si l'épaisseur du flan est plus grande que le jeu qui existant entre le poinçon et la matrice, il se produit un écrasement et un amincissement indésirables de la paroi.

Le calcul du jeu est basé sur la formule suivante :

$$J = e \sqrt{\frac{D}{d}}$$

3.12 Emboutissage sans serre-flan

L'emboutissage des tôles épaisses est bien souvent pratiqué en matrice sans serre-flan. Cette technique est utilisée pour réaliser des pièces peu profondes telles que des fonds bombés. Elle

peut également être employée pour l'emboutissage profond de tôles d'épaisseur supérieure à 4 mm à partir d'un outillage spécifique.

3.12.1 Emboutissage peu profond

Le facteur limitatif de l'emboutissage sans serre-flan est la perte de stabilité de la tôle, caractérisée par la formation de plis radiaux, ce qui ne permet d'emboutir que des tôles relativement épaisses. Les conditions limites d'emboutissage sans serre-flan sont définies par la formule suivante :

$$\left(\frac{D_f}{e}\right)_{lim} = \frac{1,05 \beta (5,5 + r_m/e)}{\beta - 1,09}$$

Avec :

D_f : diamètre du flan (mm),

D : diamètre de la pièce,

β : rapport d'emboutissage (D_f/D),

e : épaisseur du flan,

r_m : rayon de matrice,

$(D_f/e)_{lim}$: diamètre relatif limite du flan.

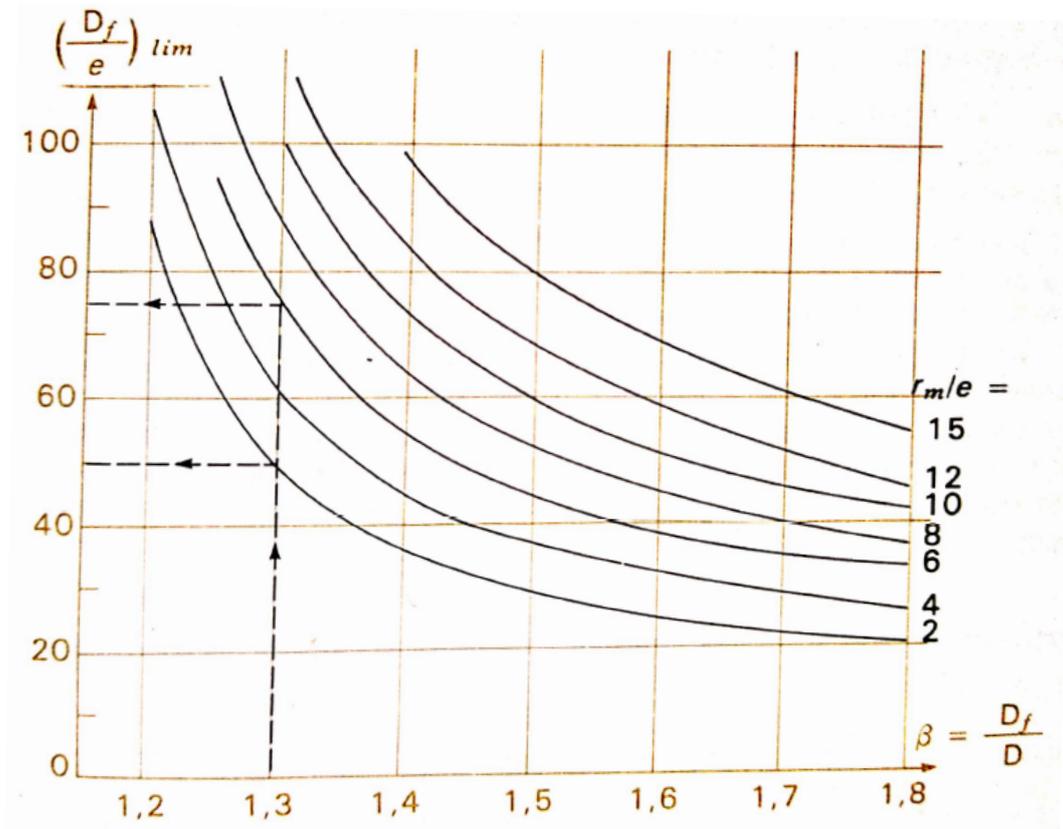


Figure 64. Détermination du diamètre relatif limite du flan $(D_f/e)_{lim}$ en fonction du rapport d'emboutissage β et du rayon matrice r_m .

L'abaque de la figure 64 permet de déterminer $(D_f/e)_{lim}$ en fonction du rapport d'emboutissage β et du rayon de matrice relatif r_m/e .

La formule ci-dessus est applicable pour l'emboutissage des fonds de réservoirs de types hémisphérique, elliptique, à grand rayon de carre ou à fond plat. La forme du fond, le matériau du flan et la température d'emboutissage ont une influence réduite qui est négligée.

Il est possible d'augmenter le diamètre relatif limite du flan en augmentant le rayon de matrice. Ainsi pour des emboutissages ayant un rapport β élevé, il est recommandé d'utiliser $r_m = 4$ à $6e$. Un rayon de matrice supérieur à $6e$ risque de provoquer un écart géométrique des fonds par rapport à la forme du poinçon.

Exemple :

$$D_f/D = 1,3 ; D_f = 1300 \text{ mm} ; D = 1000 \text{ mm}$$

$$r_m = 2 e ; (D_f/e)_{lim} \leq 50 \text{ emboutissage sans serre-flan possible si } e \geq 26 \text{ mm}$$

$$r_m = 6 e ; (D_f/e)_{lim} \leq 75 \text{ emboutissage sans serre-flan possible si } e \geq 17 \text{ mm}$$

3.12.2 Emboutissage profond

L'emboutissage profond sans serre-flan est possible en utilisant des matrices en forme de tractrice ou tronconique (fig. 65). Pour les matrices tronconiques, l'angle optimal de la matrice est fonction de l'épaisseur de la tôle. Pour les tôles relativement minces ($D/e > 30$) l'angle de matrice recommandé est $\alpha = 90^\circ$; pour les tôles relativement épaisses ($D/e < 30$), on prend $\alpha = 30^\circ$. Un angle de matrice de 30° nécessite une hauteur totale d'outil importante qui rend difficile le choix d'une presse convenable. Dans ce cas, l'angle de la matrice peut être augmenté jusqu'à 45° .

Pour l'emboutissage d'une coupelle cylindrique, par exemple, ($D = 182 \text{ mm}$, $e = 8 \text{ mm}$), le rapport limite d'emboutissage $\beta = 2,5$ a été obtenu avec une matrice tronconique d'angle $\alpha = 45^\circ$. La réussite de l'emboutissage profond sans serre-flan est limitée par l'apparition de rupture ou la formation de plis. Dans le cas d'un rapport d'emboutissage trop important on risque la rupture du fond ou la formation de plis sur le corps de l'embouti. Dans le cas d'un rapport d'emboutissage trop faible il y a formation de plis et de bosses au rayon du fond de l'embouti. L'abaque de la figure 66 définit les rapports limite d'emboutissage sans serre-flan en fonction du diamètre relatif de la pièce D/e et d'un paramètre de caractérisation de l'emboutissabilité du métal utilisé.

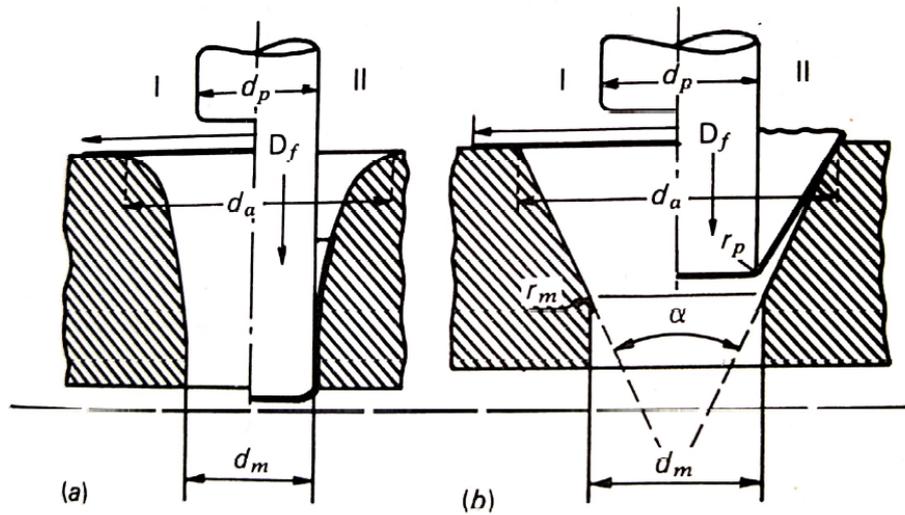


Figure 65. Emboutissage sans serre-flan à l'aide de matrice en forme de tractrice (a) ou tronconique (b)

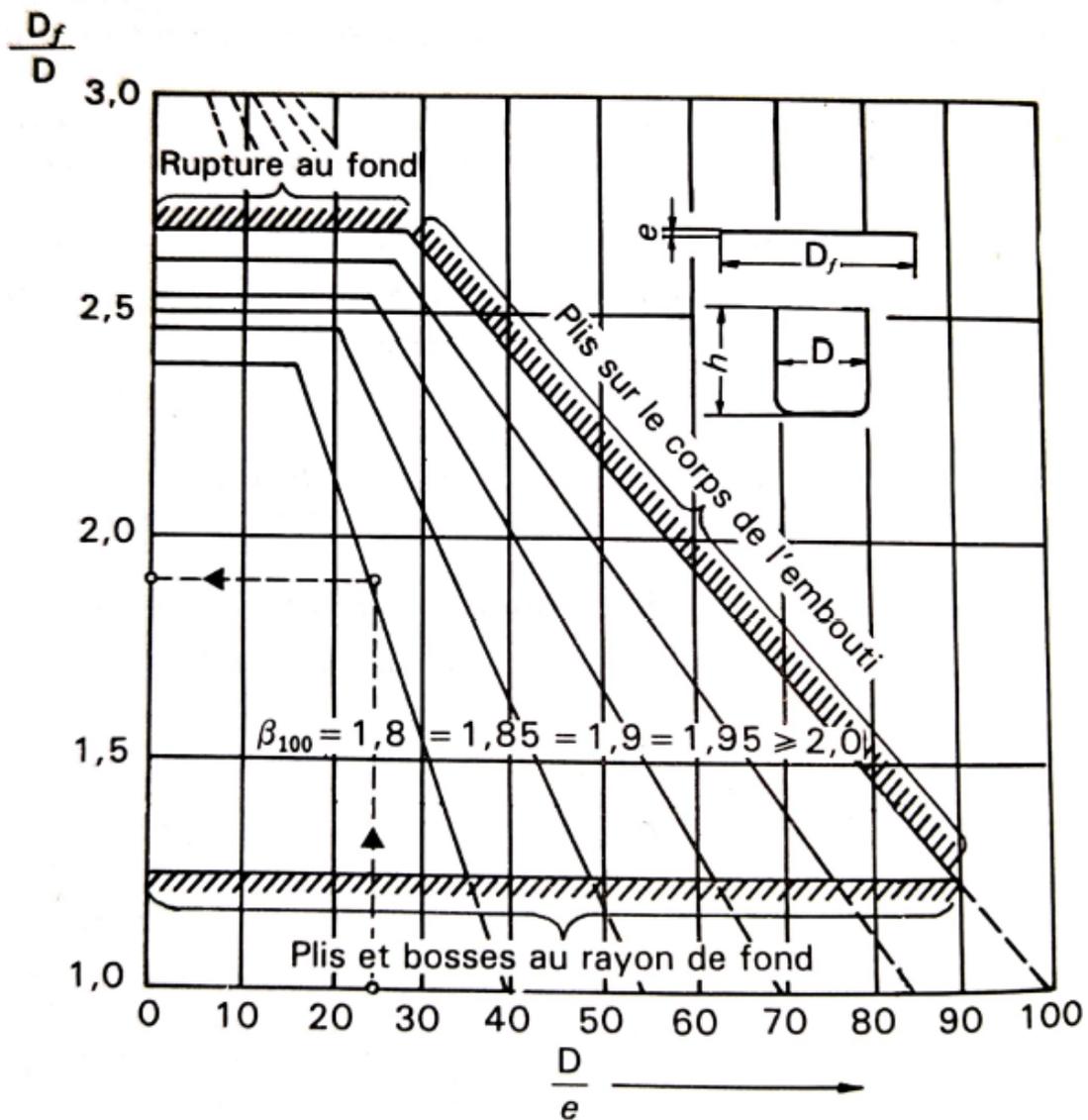


Figure 66. Détermination du rapport limite d'emboutissage dans le cas de l'emboutissage profond sans serre-flan

La qualité de la tôle est caractérisée par β_{100} rapport limite d'emboutissage déterminé par emboutissage avec serre-flan (diamètre de la pièce $D = 100$ mm).

Acier	A33	A34	E24	E26
β_{100}	1,7	1,8	1,9	2

Tableau 6 : Rapport limite d'emboutissage pour quelques aciers

Exemple d'application : pièce : $D = 250$ mm, $e = 10$ mm

Acier : A34

Rapport limite d'emboutissage :

$$\beta = \frac{D_f}{D} = 1,9$$

3.13 Détermination de l'énergie d'emboutissage :

L'énergie nécessaire pour une opération d'emboutissage (double action) est le produit de la force de pression d'emboutissage par le déplacement du poinçon (h) :

$$W = F \cdot \alpha \cdot h$$

Pour un emboutissage simple action :

$$W = (F \cdot \alpha + F_s)h$$

Le coefficient α dépend du rapport d'emboutissage initial :

β_{initial}	1,8	1,6	1,5	1,4	1,3	0,25
α	0,8	0,77	0,74	0,70	0,67	0,64

3.14 Emboutissage au coup par coup :

Le flan est formé progressivement au coup par coup entre poinçon et matrice. A chaque remontée du poinçon le flan est tourné ; l'avance est d'environ une fois le rayon du poinçon (fig. 67). L'opération est répétée jusqu'à l'obtention de la forme définitive. Ce procédé est utilisé pour former les calottes sphériques, les secteurs de sphère ou les éléments à double rayon de courbure. Ce type de formage convient également pour la fabrication de fonds de réservoirs torisphériques : la salière est formée par emboutissage progressif, le rayon de carre et le bord droit sont formés par reprise sur une machine à border, ou par un autre procédé. L'emboutissage au coup par coup est concurrentiel pour une production de petite série (5 à 10 pièces) ou à la pièce. Pour le formage de très grandes pièces, c'est souvent le seul procédé utilisable : fond de réservoir jusqu'à 7 m de diamètre, secteur de sphère de 8 x 4 m, élément de coque de navire.

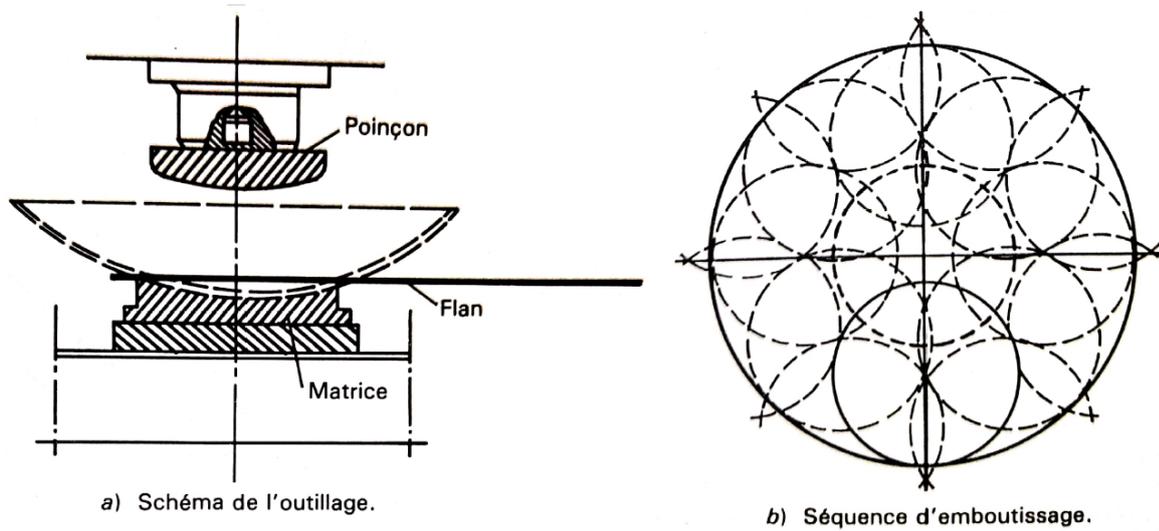


Figure 67. Schéma de l'outillage et séquences d'emboutissage d'une calotte sphérique

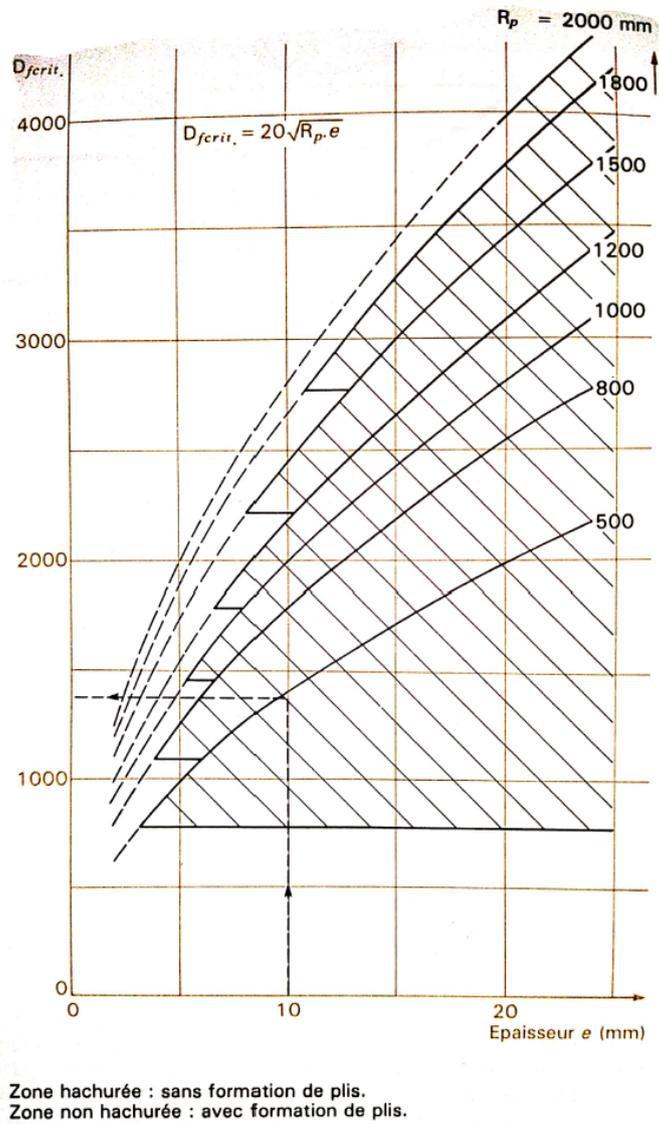


Figure 68. Emboutissage au coup par coup- diamètre critique du flan D_{crit} en fonction de son épaisseur e pour différents rayons de courbure R_p du poinçon

Pour former des calottes sphériques il est recommandé de commencer le formage par le bord du flan. Des plis se forment au cours de l'emboutissage si le diamètre du flan est supérieur à une valeur définie par la formule suivante (formage à froid) :

$$D_{fcrit} = 20 \sqrt{R_p \cdot e}$$

Avec :

R_p = rayon actif du poinçon,

e = épaisseur de la tôle,

D_{fcrit} = diamètre critique du flan pour lequel commence la formation de plis.

L'abaque de la figure 68 permet une détermination rapide de D_{fcrit}

Exemple d'application :

Pour un formage tel que $R_p = 500$ mm et $e = 10$ mm, nous avons $D_{fcrit} = 1400$ mm

3.15 Outillage :

L'outillage comprend un poinçon et une matrice comme indiqué sur la figure 67. Le diamètre de l'outil varie de 500 à 2 000 mm selon la puissance de la presse utilisée et les dimensions du flan. Les parties actives du poinçon et de la matrice ont une forme de calotte sphérique ou une forme à double rayon de courbure selon la pièce à former. Le formage progressif à froid n'est pas exempt d'un certain retour élastique dont il faut tenir compte dans le choix du rayon actif du poinçon. En première approximation, on prend un rayon de poinçon 25 % plus petit que le rayon désiré sur la pièce finie. Un exemple d'outillage est présenté sur la figure 69

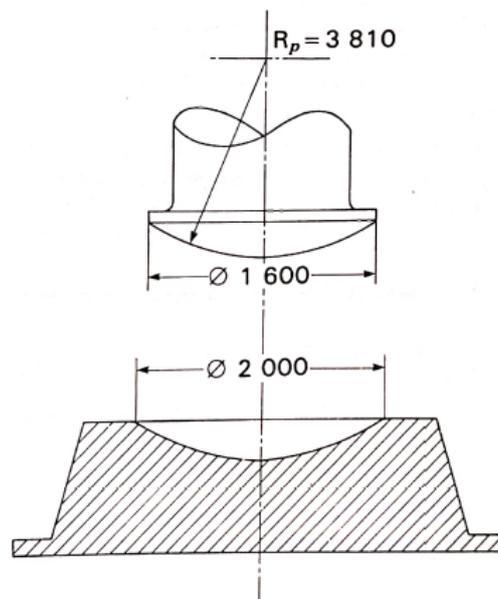


Figure 69. Poinçon et matrice sphériques utilisés pour former un secteur de sphère à un rayon de courbure de 5000 mm. (Dimensions du secteur de sphère 6 000 x 4 000 x 50 mm; formage sur presse hydraulique 15 000 kN = 1 500 t).

4 Cintrage :

4.1 Principes généraux

4.1.1 Caractérisation de l'aptitude au cintrage

Le cintrage des tôles ne nécessite pas une capacité de déformation importante. Par exemple, le cintrage d'une tôle d'épaisseur 50 mm au rayon de 250 mm engendre une déformation maximum de 10 %. L'aptitude au cintrage ne demande pas une caractérisation particulière.

Cette analyse n'est plus exacte pour les tôles de très forte épaisseur (100 à 250 mm) pour lesquelles il y a un risque de rupture brutale au cours du cintrage. La rupture s'amorce à partir de défauts existants dans l'épaisseur ou en surface de la tôle. Les bords découpés de la tôle sont des zones particulièrement dangereuses du fait de la fragilisation introduite par le découpage. Connaissant la valeur critique du facteur d'intensité de contrainte d'une tôle et les dimensions des défauts, la mécanique linéaire de la rupture permet d'évaluer le risque de rupture au cours du cintrage et de l'éviter par un formage à chaud ou à tiède par exemple.

4.1.2 Déformations et contraintes résiduelles

4.1.2.1 Déformations dans les tôles cintrées

Il est important de pouvoir calculer le degré de déformation existant dans une tôle cintrée pour déterminer s'il est nécessaire ou non d'effectuer un traitement thermique de restauration des caractéristiques.

Les différents codes de construction des appareils à pression donnent des formules pour le calcul de la déformation maximale obtenue à la surface d'une tôle roulée. Ces formules sont équivalentes à celle donnée par le code ASME section III :

$$d(\%) = \frac{50e}{R_f} \left(1 - \frac{R_f}{R_i}\right)$$

Avec :

d = pourcentage de déformation,

R_f = rayon final moyen de la pièce,

R_i = rayon initial moyen de la pièce (rayon infini pour une tôle plane).

Cette relation donne une valeur approximative de la déformation, mais elle a l'avantage d'être simple et utilisable au niveau du bureau d'étude. Pour un calcul plus précis il faudrait tenir compte du déplacement de la fibre neutre et des variations d'épaisseur.

4.1.2.2 Contraintes résiduelles

Lorsqu'il y a risque de corrosion sous tension, la connaissance des contraintes résiduelles à l'intrados et à l'extrados de la tôle permet de juger de la nécessité d'effectuer un traitement thermique de détensionnement.

L'abaque de la figure 70 donne la répartition des contraintes résiduelles dans l'épaisseur de la tôle pour différentes valeurs d'un paramètre qui caractérise le cintrage étudié : $2 R_f/e \times R_e/E$. Ce paramètre fait intervenir les caractéristiques géométriques du cintrage (R_f : rayon de la pièce, e : épaisseur de la tôle) et les caractéristiques mécaniques de la tôle (R_e : limite d'élasticité, E : module d'élasticité). Le calcul est effectué pour un métal élastoplastique parfait et sans tenir compte de l'effet Bauschinger.

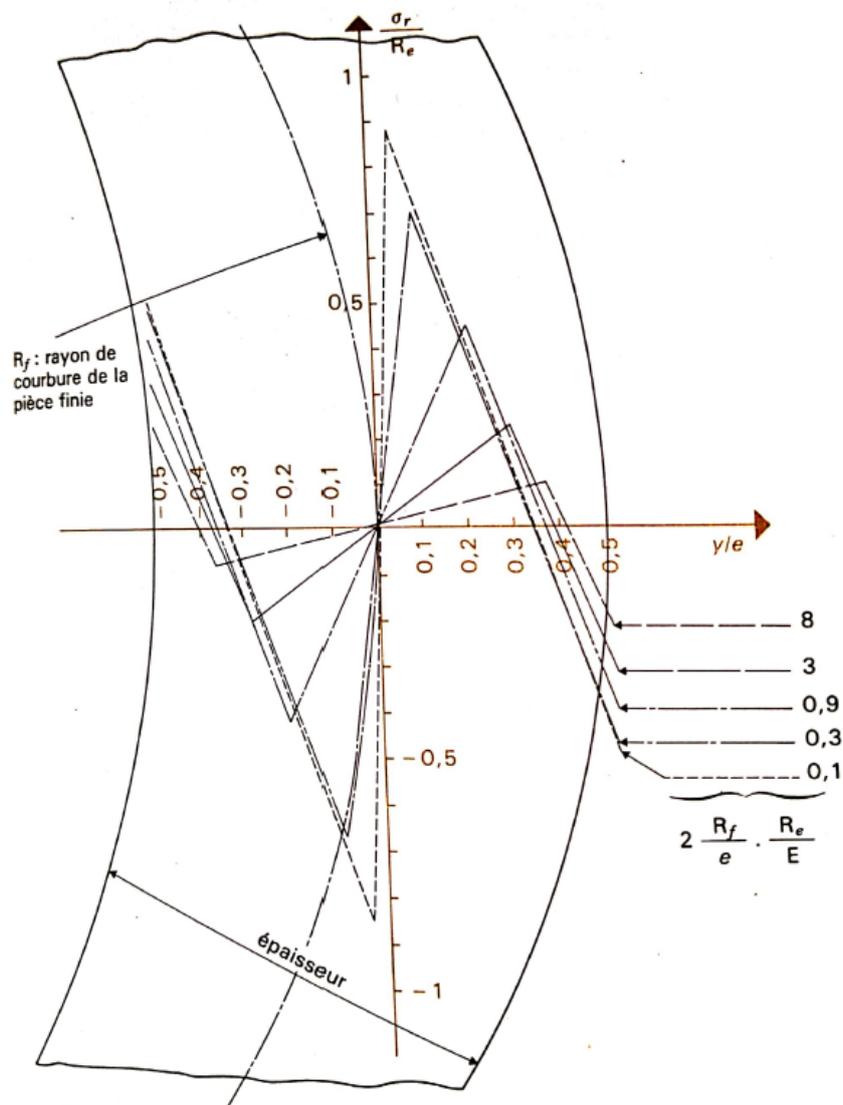


Figure 70. Détermination des contraintes résiduelles dans une tôle cintrée

Exemple d'utilisation :

$R_f = 500 \text{ mm}$, $e = 20 \text{ mm}$

Acier A 52 P 1 : $R_e = 40 \text{ daN/m}^2$, $E = 20\,000 \text{ daN/mm}^2$

$$2 \frac{R_f}{e} \cdot \frac{R_e}{E} = 2 \times \frac{500}{20} \times \frac{40}{20000} = 0.1$$

On en déduit, d'après la figure 70, d'après l'abaque, $\sigma_r/R_e = 0,5$ pour $y/e = -0,5$

La contrainte résiduelle en surface, sur la face interne, vaut donc : $\sigma_R = 20 \text{ daN/mm}^2$.

4.2 Retour élastique

La connaissance du retour élastique permet de déterminer le rayon de formage initial R_o nécessaire pour obtenir un rayon donné R_f sur la pièce finie. Connaissant R_o , on peut régler rapidement la position des rouleaux pour réaliser une pièce de rayon R_f .

L'équation reliant R_f et R_o est la suivante :

$$R_f = \frac{R_o}{1 - \frac{3}{2} \left[2 \frac{R_o}{e} \times \frac{R_o}{E} \right] + \frac{1}{2} \left[2 \frac{R_o}{e} \times \frac{R_o}{E} \right]^3}$$

Le calcul étant réalisé pour un matériau élasto-plastique parfait, cette formulation donne satisfaction pour des cintrages tels que $R_f/e \geq 10$

La solution graphique de cette équation est donnée sur les abaques de la figure 45 (section pliage). Le paramètre R_f/e varie de 10 à 2500 ce qui couvre la plupart des cas de cintrage.

4.3 Détermination de l'effort, de l'énergie, et de la puissance de cintrage

Les caractéristiques données par les constructeurs de rouleuses sont les suivantes :

- largeur maximale de la tôle,
- épaisseur maximale de la tôle,
- puissance du moteur.

Les capacités de cintrage sont définies pour une qualité d'acier et pour un diamètre de cintrage légèrement supérieur au diamètre du rouleau supérieur. Lorsqu'on change l'un de ces paramètres que devient la capacité de cintrage ? Si on diminue la largeur cintrée quelle est l'augmentation d'épaisseur admissible qui en résulte ? La connaissance des formules de calcul de l'effort et de la puissance de cintrage permettent de répondre à ces questions.

4.3.1 Effort de cintrage

Lorsque le rayon de cintrage est supérieur à $100.e$, la partie élastique de la déformation ne doit pas être négligée :

- Pour $R_o > 100.e$:

La formulation suivante est donnée pour l'effort de cintrage (exprimé en Newton) :

$$F = \frac{R_e \times l \times e^2}{v} - \frac{2}{3v} \times l \times \frac{R_e^3}{E^2} \times R_0^2$$

Avec :

e = épaisseur de la tôle (mm),

l = largeur de la tôle (mm),

R_0 = rayon moyen de cintrage (mm),

v = distance entre les points d'appui de la tôle au cours du cintrage.

$$v = \frac{a}{1 + \frac{d_i}{2r_e}} \quad (mm)$$

a = entraxe des rouleaux inférieurs (mm),

d_i = diamètre des rouleaux inférieurs (mm),

$r_e = R_0 + e/2$,

R_e = limite d'élasticité (N/mm²),

E = module d'élasticité ($\approx 20.10^4$ N/mm²)

La définition des paramètres géométriques est donnée figure 71.

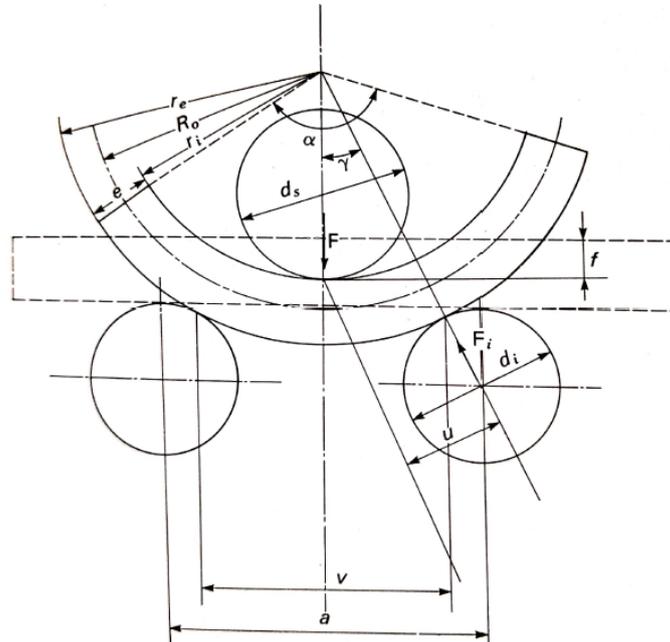


Figure 71. Paramètres géométriques du cintrage

- Pour $R_0 < 100 e$.

Dans ce cas la relation donnée ci-dessous permet de calculer une valeur approchée de l'effort (exprimée en Newton) :

$$F = \frac{0,7 \cdot R_m \cdot l \cdot e^2}{v}$$

Avec :

R_m = résistance à la traction (N/mm²).

Les autres paramètres ont été définis précédemment.

4.3.2 Puissance de cintrage

La puissance nécessaire pour une opération de cintrage est donnée par la relation :

$$P = \frac{F \cdot V}{60 v} (r_e - 0,5 \sqrt{4r_e^2 - v^2})$$

Avec :

P = puissance de cintrage (W),

F = effort de cintrage (N) calculé selon les formules données ci-dessus,

V = vitesse de cintrage (m/mn),

v = distance entre points d'appui (mm),

$r_e = R_o + e/2$.

La puissance nécessaire pour réaliser un cintrage est fonction des caractéristiques mécaniques du métal, de l'épaisseur de la tôle, du diamètre du cylindre à réaliser, du nombre de passes utilisées et de la température de formage.

Une rouleuse de puissance donnée a une capacité maximale de formage définie par une épaisseur maximale pour une largeur maximale et un diamètre de cintrage minimal. Quand on augmente le diamètre de roulage, la puissance nécessaire diminue, donc l'épaisseur maximale cintrable augmente (fig. 72). De la même manière, lorsqu'on diminue la largeur utilisée de la machine, l'épaisseur maximale augmente. Les constructeurs de rouleuses fournissent généralement une courbe reliant la largeur utilisée et le coefficient multiplicateur à appliquer sur l'épaisseur (fig. 73). Il est bien évident que lorsque les caractéristiques mécaniques du métal augmentent, la capacité de cintrage diminue (fig. 72 et 74).

En augmentant le nombre de passes, on peut augmenter la capacité de formage d'une rouleuse. Le formage en deux passes ou plus permet de former à de plus petits diamètres avec une machine de même puissance. Par exemple, une machine qui permet le formage d'une tôle d'épaisseur 38 mm et de largeur 3 050 mm au diamètre de 3660 mm en une passe pourra cintrer en 10 ou 12 passes une tôle d'épaisseur 67 mm de même largeur que la précédente au diamètre de 648 mm.

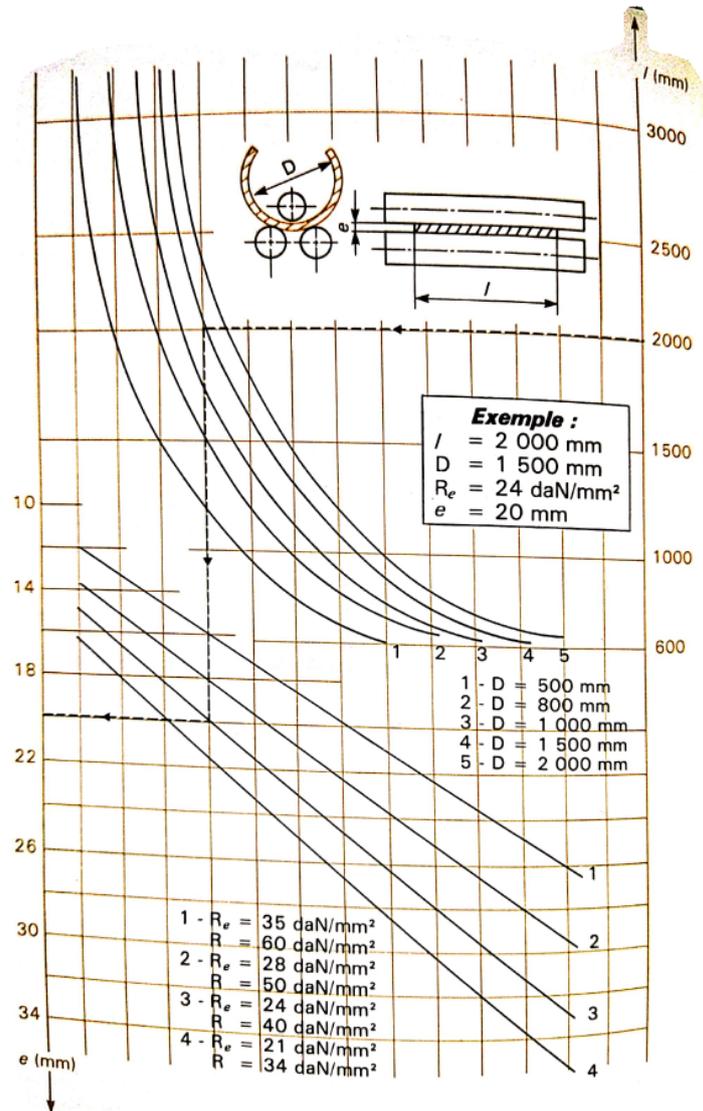


Figure 72. Variation de l'épaisseur cintrée en fonction de la largeur de la tôle, du diamètre du cylindre formée et des caractéristiques mécaniques du métal (machine de 30 kW de puissance ; vitesse de roulage 7m/min, diamètre des rouleaux 440 mm)

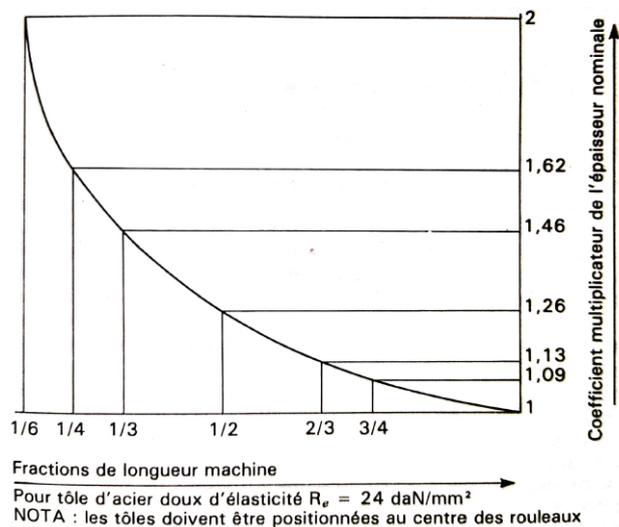


Figure 73. Document Promecam

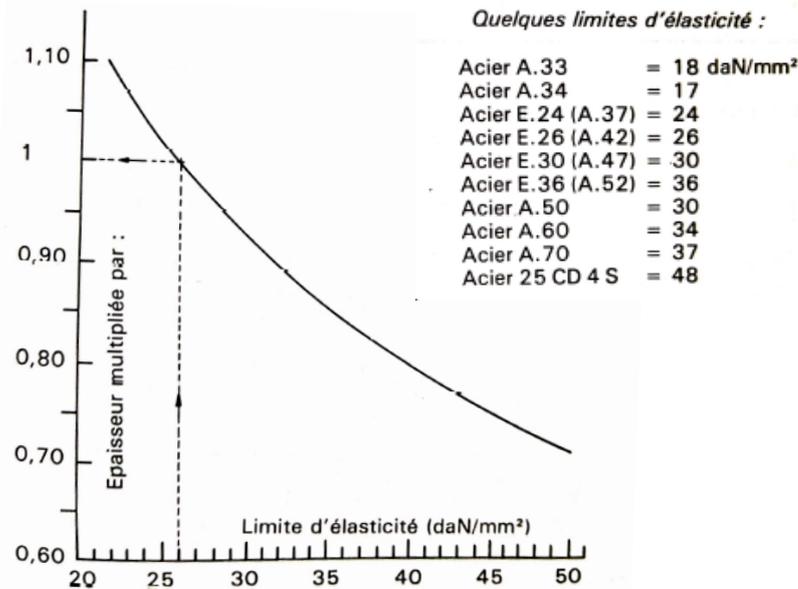


Figure 74. Variation de l'épaisseur en fonction de la limite d'élasticité du matériau de la tôle

4.4 Technologie, machines, outillages :

4.4.1 Préparation des flans

Les pièces formées sur rouleuses sont développables ; la longueur du flan (dimension de la tôle perpendiculaire à l'axe des rouleaux) est égale à la circonférence moyenne pour un cylindre ou au périmètre moyen d'une pièce de forme quelconque à génératrices parallèles. La fibre non déformée (fibre neutre) est située au milieu de l'épaisseur de la tôle. C'est cette ligne médiane qu'il faut considérer pour calculer le périmètre moyen. Dans le cas d'une virole cylindrique, le diamètre moyen à considérer est égal au diamètre intérieur plus l'épaisseur de la tôle. Lorsqu'il reste des zones plates aux extrémités de la tôle, on peut être amené à les couper avant la mise en forme finale. Il faut alors prévoir une surlongueur sur le flan.

Les flans sont découpés mécaniquement ou thermiquement ; cette opération risque de provoquer la formation de criques ou la rupture de la pièce au cours du formage à froid. Le cisailage provoque en effet un écrouissage local et crée des amorces de fissures. Le découpage thermique, quoique comportant moins de risques, peut engendrer une structure de trempe dans la zone coupée. Le danger de fissuration provoqué par l'état des bords découpés augmente lorsque l'épaisseur de la tôle augmente et que le diamètre de la virole diminue.

Pour éviter les criques sur les bords des tôles d'épaisseurs supérieures à 25 mm, il faut chanfreiner légèrement les chants du côté situé à l'extrados de la tôle comme nous l'avons indiqué sur la figure 75. Cet usinage peut être réalisé sur une machine à chanfreiner portable.

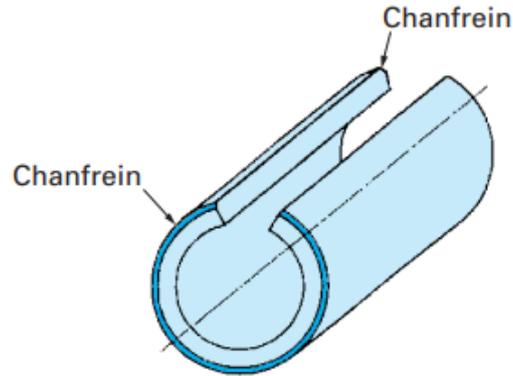


Figure 75. Position des chanfreins usinés sur le flan pour éviter le développement des fissures au moment du cintrage

4.4.2 Le croquage.

Le croquage consiste à former les extrémités de la tôle au rayon de courbure désiré. Pour les machines de type pyramidal, le croquage est exécuté avant roulage sur une presse plieuse ou sur une presse à col de cygne. Le formage est alors réalisé au pas à pas entre poinçon et matrice. C'est une opération longue et coûteuse qui a amené les constructeurs à concevoir des rouleuses capables de réaliser le croquage.

Sur les rouleuses de type croqueur le déplacement des rouleaux inférieurs permet de « pincer » l'une des extrémités de la tôle entre l'un des rouleaux inférieurs et le rouleau supérieur le formage étant obtenu par l'action du deuxième rouleau inférieur pour les machines à trois rouleaux (fig. 76) ou de l'un des rouleaux latéraux pour les machines à quatre rouleaux.

Les relations suivantes permettent de calculer les efforts sur les rouleaux et les diamètres des rouleaux nécessaires pour réaliser un croquage donné (fig. 76).

Effort sur le rouleau inférieur (exprimé en N) :

$$F_i = \frac{l \cdot e^2 \cdot 1,15 \cdot R_e}{4 \cdot X}$$

Avec :

R_e = limite d'élasticité de la tôle (N/mm²),

X = partie droite non croquée (mm).

- Effort sur le rouleau supérieur (exprimé en N) :

$$F_s = \frac{F_i \cdot V}{V - X}$$

Avec :

V = distance entre les points d'appui de la tôle au cours du cintrage (mm).

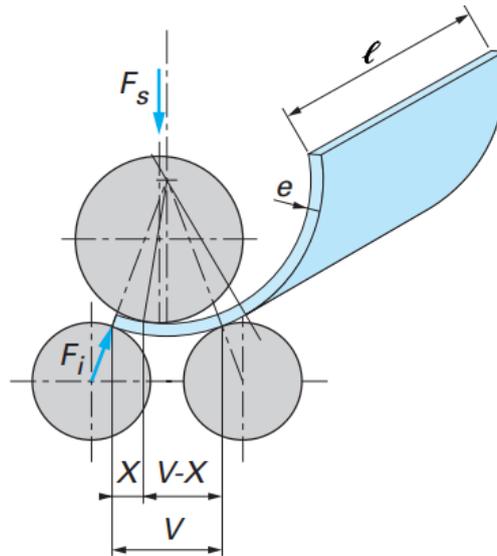


Figure 76. Opération de croquage

- Diamètre des rouleaux inférieurs (exprimé en mm)

$$d_i = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot F_i \cdot (2L_i - l)}{\sigma_t \cdot \pi}}$$

Avec

L_i = distance entre les paliers des rouleaux inférieurs,

σ_t = contrainte de travail admissible sur les rouleaux ($\sigma_t = 15$ à 18 N/mm^2).

- Diamètre du rouleau supérieur (exprimé en mm)

$$d_s = \sqrt[3]{\frac{4 \cdot F_s \cdot (2L_s - l)}{\sigma_t \cdot \pi}}$$

L_s = distance entre les paliers des rouleaux supérieur.

Exemple : le tableau 7 donne les valeurs de l'effort sur le rouleau inférieur et du diamètre des rouleaux inférieurs en fonction de la largeur de la partie droite non croquée.

X	0,5 e	1 e	2 e	3 e
F_i (kN)	28 700	14 400	7 200	4 800
d_i	990	780	620	540
Caractéristiques de la tôle : $l = 4\text{m}$; $e = 50 \text{ mm}$; $R_e = 250 \text{ N/mm}^2$				

On voit que plus la partie droite est courte, plus les efforts à développer sont importants et plus les diamètres des rouleaux sont grands. La puissance d'une rouleuse et les diamètres des

rouleaux sont déterminés par les valeurs suivantes : largeur de la tôle, épaisseur de la tôle, limite d'élasticité, diamètre minimum de cintrage, partie droite non croquée.

Sur les rouleuses de type standard la capacité de croquage est donnée pour une partie droite égale à 1, 5 ou 2 fois l'épaisseur de la tôle. Lorsque la capacité de croquage n'est pas donnée, on peut faire l'approximation suivante :

- capacité de croquage ($X = 2 e$) = 0,7 capacité de roulage,
- capacité de croquage ($X = 1, 5 e$) = 0,6 capacité de roulage.

4.4.3 Formage de troncs de cônes

Le formage de troncs de cônes est réalisé sur les rouleuses à trois rouleaux symétriques par inclinaison du rouleau supérieur ou des rouleaux inférieurs (fig. 77.a). Le formage des extrémités se fait sur la rouleuse en position de croquage si c'est possible ou sur une presse. Pour cintrer un tronc de cône et pour tenir compte du rapport des diamètres, la vitesse circonférentielle des cylindres devrait être plus grande pour le grand que pour le petit diamètre du cône à former. Les rouleuses ne sont pas adaptées au formage conique puisque les cylindres ont la même vitesse circonférentielle partout. Pour faciliter le formage conique les constructeurs prévoient l'adjonction d'une butée qui vient frotter sur le côté du petit diamètre et ainsi diminue la vitesse de rotation de ce côté. Sur les rouleuses à quatre rouleaux on procède de la manière suivante : le rouleau inférieur est légèrement incliné ce qui permet de serrer le tôle du côté du grand diamètre. Le petit diamètre de la tôle n'est pas en contact avec les rouleaux d'entraînement et il ne se pose pas de problème de vitesses circonférentielles différentes. Les cylindres latéraux sont inclinés de l'angle nécessaire à l'obtention du cône désiré (fig. 77.b).

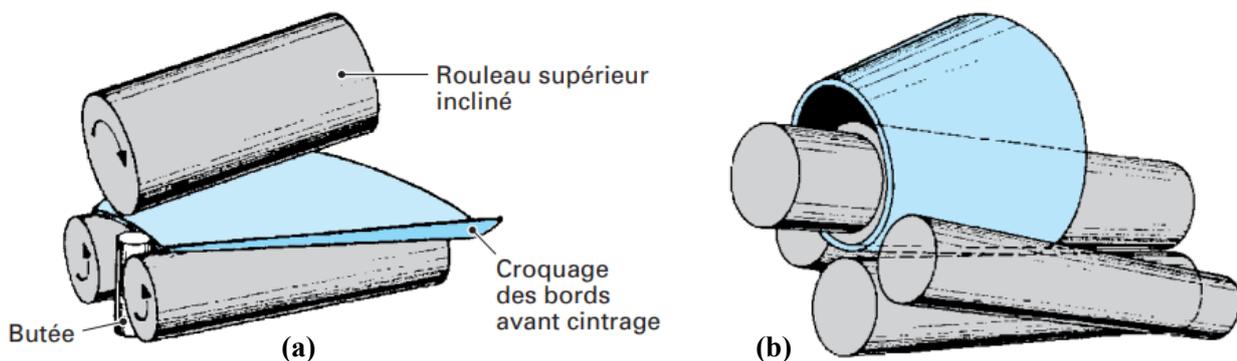


Figure 77. Formage des troncs de cônes : a) Position des rouleaux pour le cintrage conique sur rouleuse de type pyramidal, b) Position des rouleaux pour le cintrage conique sur rouleuse à quatre rouleaux

Comme pour le cintrage de cônes sur une machine à 3 rouleaux il faut freiner la rotation du côté du petit diamètre par l'action d'une butée. Ce type de rouleuse permet d'effectuer en continu le croquage et le cintrage.

4.5 Calcul du flan

Le flan nécessaire pour former un tronc de cône est un secteur de couronne dont les dimensions sont calculées à partir des caractéristiques du cône à réaliser, comme indiqué sur la figure 78. Le rapport R_0/e est toujours suffisamment grand ($R_0/e \geq 7$) pour considérer que la fibre non déformée se situe au milieu de l'épaisseur de la tôle. Le calcul du flan est donc réalisé en considérant la fibre moyenne de la tôle.

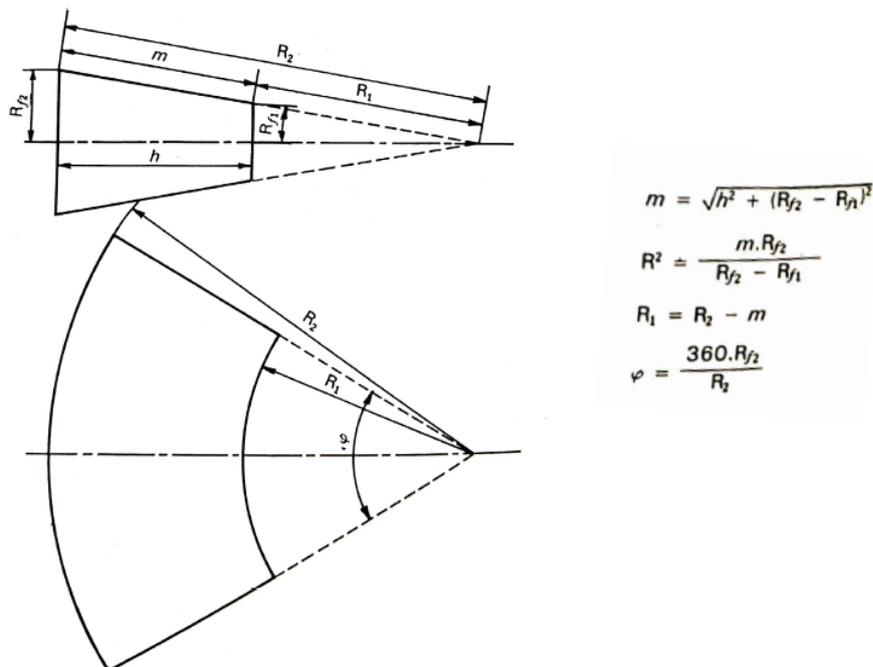


Figure 78. Calcul du flan

4.6 Calcul de l'angle d'inclinaison des rouleaux

Pour une section donnée du cintrage conique, on peut calculer la flèche f imprimée à la tôle (les paramètres géométriques sont définis figure 71) :

$$f = r_e - (0,5 a \cdot \cotg \gamma) + 0,5 d_i$$

Avec :

$$\gamma = \text{Arc sin} \frac{0,5 a}{r_e + 0,5 d_i}$$

L'inclinaison θ du rouleau supérieur est définie par la différence des flèches imposées sur le petit diamètre et le grand diamètre du cône (fig. 79) :

$$\sin \theta = \frac{f_1 - f_2}{m}$$

Connaissant la distance L entre les paliers du rouleau supérieur, on peut exprimer le déplacement vertical f_0 de l'un des paliers par rapport à l'autre :

$$f_0 = L \cdot \text{tg } \theta \approx L \cdot \frac{f_1 - f_2}{m}$$

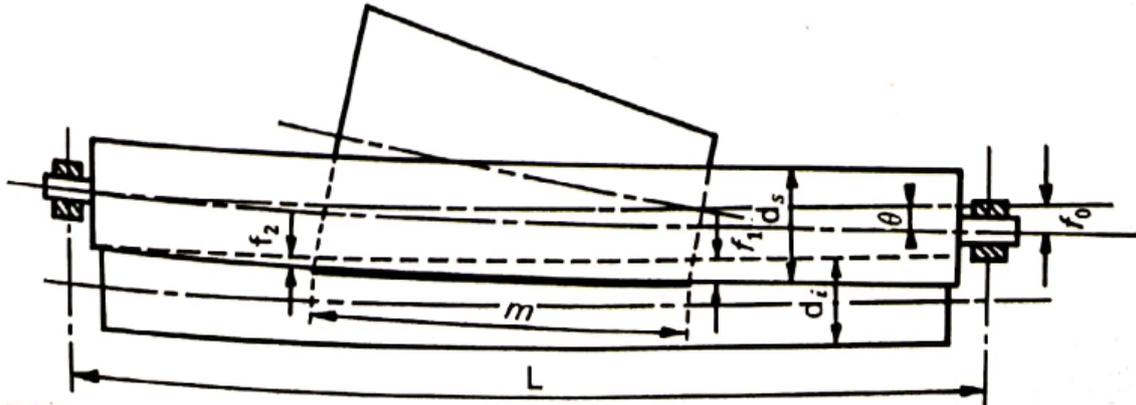


Figure 79. Paramètres définissant l'inclinaison du rouleau supérieur

Exemple :

Soit à exécuter sur une rouleuse de type pyramidale ($d_s = 700$ mm, $d_i = 600$ mm, $a = 960$ mm, $L = 4\,500$ mm), un tronc de cône ayant les caractéristiques suivantes : $R_{f1} = 400$ mm, $R_{f2} = 700$ mm, $h = 2\,000$ mm, $e = 15$ mm ; acier A 52 P 1 ($R_e = 40$ daN/mm²). Il faut tenir compte du retour élastique :

$R_{o1} = 345$ mm et $R_{o2} = 547,5$ mm (d'après la fig. 45).

$f_1 = 210,5$ mm et $f_2 = 149,4$ mm.

On en déduit la valeur de l'angle d'inclinaison du rouleau supérieur : $\theta = 1^\circ 44$, et le déplacement vertical d'un palier par rapport à l'autre : $f_0 = 136$ mm.

4.7 Rouleuses :

Les machines à rouler les tôles sont assez rarement à deux rouleaux, mais le plus souvent à trois rouleaux et, pour les unités les plus puissantes, à quatre rouleaux. Les rouleuses à deux rouleaux sont toujours des machines légères pour former les tôles de plus faible épaisseur.

Pour les rouleuses à trois ou quatre rouleaux, il existe deux types principaux de machines :

— les rouleuses de type pyramidal ;

— les rouleuses de type croqueur.

Ces machines ont généralement des rouleaux horizontaux, mais il en existe à rouleaux verticaux (les rouleuses verticales sont surtout utilisées pour le formage des barres et de poutrelles en I, en L ou en U).

Les épaisseurs travaillées varient de 1,5 à 250 mm et quelquefois jusqu'à 300 mm. L'épaisseur minimale est limitée seulement par l'équipement de manutention. On ne trouve pas de machines travaillant de 1,5 à 250 mm. Cependant, la plupart des machines peuvent former un domaine d'épaisseur relativement important : par exemple de 1,5 à 10 mm ou de 12 à 150 mm.

Le diamètre minimal de cintrage dépend du diamètre du rouleau supérieur. Pour les rouleuses de type croqueur, le diamètre minimal est égal au diamètre du rouleau supérieur plus 50 mm. Pour les machines de type pyramidal, le diamètre minimal est égal au diamètre du rouleau supérieur plus 150 mm.

Le diamètre maximal de formage est limité, pour les tôles les moins épaisses, par la flexion de la tôle sous son propre poids : une tôle de 6 mm peut être formée jusqu'au diamètre 2 100 mm sans support. Cependant, si l'on utilise des supports, tous les diamètres peuvent être formés.

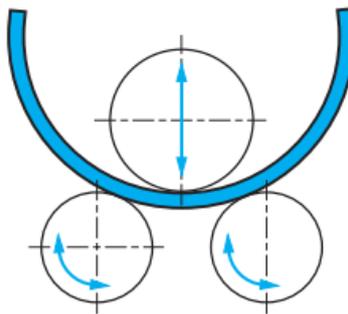


Figure 80. Rouleuse de type pyramidal

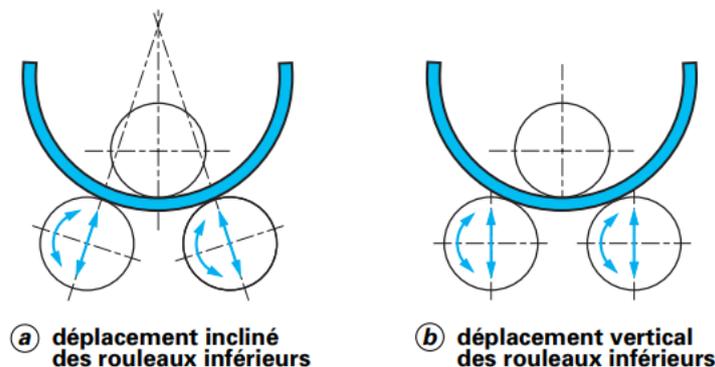


Figure 81. Rouleuse de type croqueur à rouleaux inférieurs symétriques

La largeur de la tôle pouvant être cintrée est fonction de la longueur des rouleaux. Selon le type de machine, la largeur maximale de cintrage varie de 1 000 à 6 000 mm. Pour le formage des largeurs supérieures à 3 000 mm, les rouleaux inférieurs sont soutenus par des rouleaux d'appui.

Pour la construction navale, il existe des machines permettant de cintrer des tôles jusqu'à 16 m de largeur.

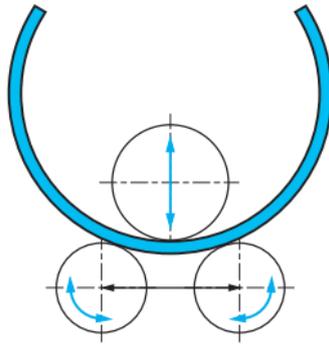


Figure 82. Rouleuse de type croqueur à déplacement horizontal des rouleaux inférieurs

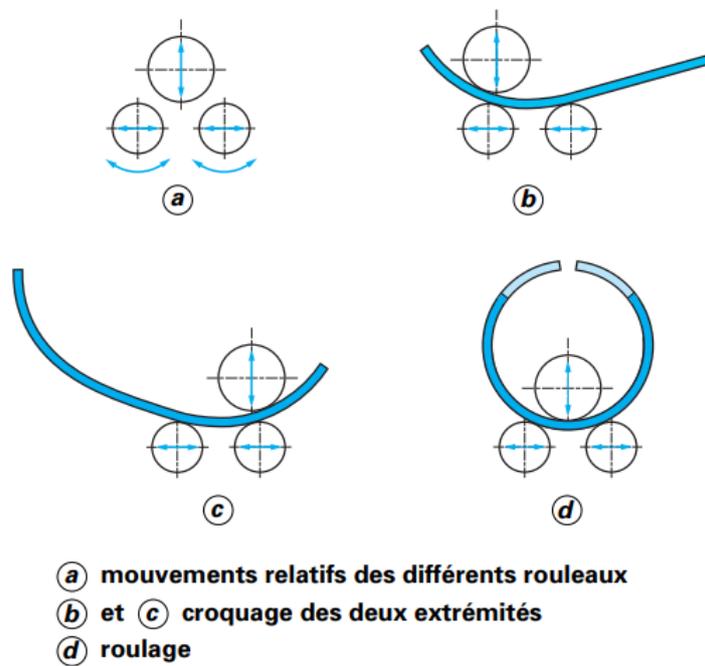


Figure 83. Formage pour zone supérieure de puissance (tôles de forte épaisseur)

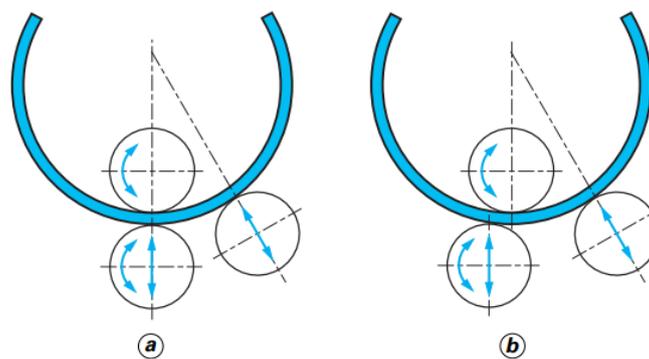


Figure 84. Rouleuses de type croqueur à rouleaux inférieurs asymétriques (a) rouleaux situés dans le même plan vertical (b) rouleaux légèrement décalés l'un par rapport à l'autre.

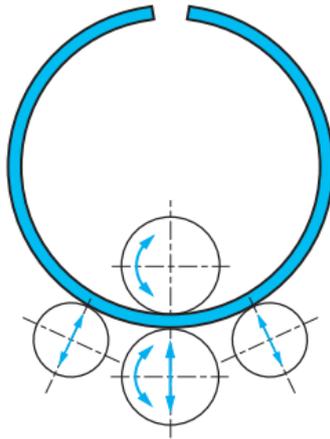


Figure 85. Rouleuse de type croqueur à quatre rouleaux

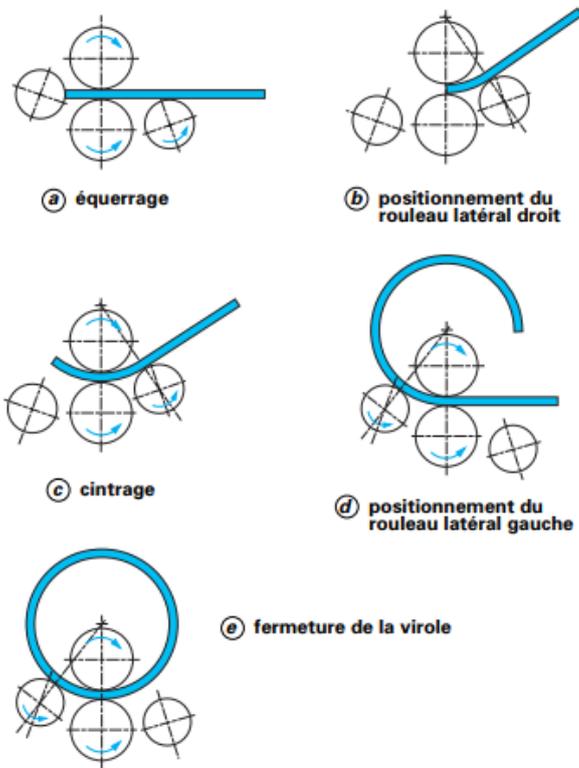


Figure 86. Roulage sur une rouleuse croqueuse à quatre rouleaux

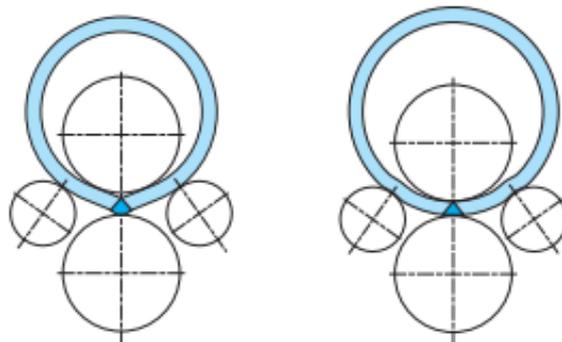


Figure 87. Calibrage d'un cylindre après soudage longitudinal

5 Repoussage :

5.1 Repoussage au tour :

Le repoussage au tour à repousser se caractérise par l'action d'un galet qui déforme progressivement un flan circulaire pour lui faire épouser la forme d'un mandrin (figure 88). Le flan est appliqué contre le mandrin par l'action d'un disque presseur ou d'une contre-pointe. L'ensemble est entraîné en rotation. Cette opération est effectuée à froid ou à chaud.

Ce procédé est employé pour le formage de pièces de révolution. L'épaisseur initiale du flan est approximativement conservée sur la pièce. Pour le formage d'une calotte sphérique ou de la salière (pôle) d'un fond torisphérique, on travaille en fluoprojection ; il y a un amincissement local tel que :

$$e_1 = e_0 \cos \alpha$$

Avec :

e_0 : épaisseur initiale,

e_1 : épaisseur finale,

α angle au centre définissant la position du point considéré par rapport à l'axe de la pièce

Il faut noter que la fluoprojection est une opération de formage au galet sur un tour à repousser muni d'un mandrin ayant la forme de la pièce à réaliser. Il s'agit d'un procédé proche du repoussage. La différence principale est le fait que la pièce soit réalisée en une seule opération (un seul coup d'outil). Contrairement au repoussage où la réalisation de la pièce à partir du flan en tôle nécessite plusieurs passes, la fluoprojection (ou le fluotournage) doit être réalisée en une seule opération. L'épaisseur du flan peut être réduite volontairement pour obtenir la pièce finale.

En repoussage, l'épaisseur du flan n'est pas réduite volontairement. L'épaisseur finale de la pièce dépend de la ductilité du matériau de la tôle et des déformations locales appliquées en fonction des formes géométriques réalisées.

En chaudronnerie, on utilise le repoussage pour former des calottes sphériques et des fonds bombés de formes elliptique, torisphérique ou hémisphérique. Ce procédé est utilisé pour des petites et moyennes séries. L'outillage est trois à cinq fois moins complexe et moins cher que pour l'emboutissage. Le temps de formage est plus court que pour l'emboutissage au coup par coup (dans le cas où il est applicable).

5.2 Outillage :

Il est constitué d'un mandrin et d'un galet de formage (figure 88).

Le mandrin, en acier ou en fonte, a la forme intérieure de la pièce à réaliser. Il faut un mandrin pour chaque pièce à former. Pour former des fonds torisphériques de même type et de même diamètre extérieur mais d'épaisseur variable, il est possible d'utiliser un mandrin en deux parties. Seule la partie correspondant au rayon de carre est changée pour former des épaisseurs différentes (figure 89).

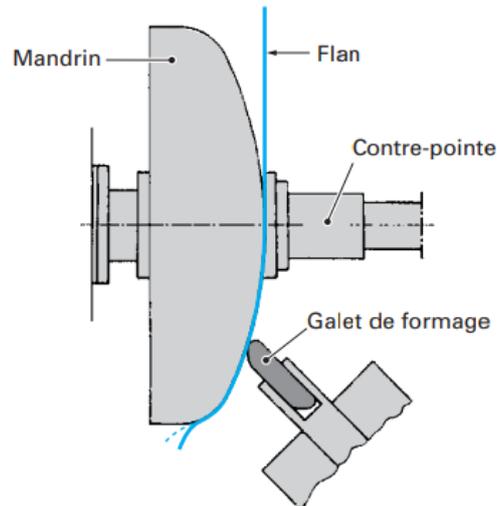


Figure 88. Repoussage au tour

Pour former les tôles fortes, on emploie un galet libre en rotation qui limite le frottement entre l'outil et le métal. Le galet est en acier ou en fonte alliée. Pour diminuer le marquage de l'outil sur la pièce, on peut utiliser soit des galets en matière synthétique pour former les alliages d'aluminium, soit des galets en bronze pour former les aciers inoxydables.

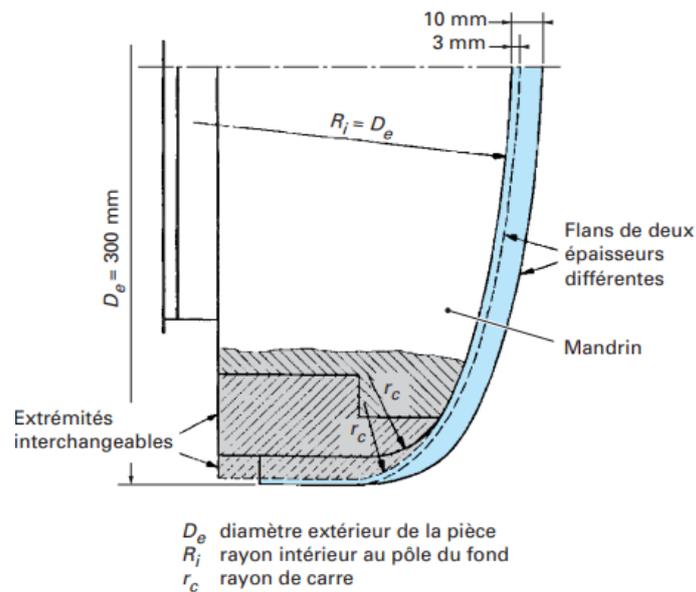


Figure 89. Mandrin à extrémité interchangeable pour le repoussage de fonds bombés torisphériques

5.3 Repoussage sur machine à former les bords :

Il s'agit d'une technique de formage spécifique aux pièces de révolution présentant un bord arrondi. Le bord est formé par l'action d'un galet bordeur qui vient repousser la tôle contre un galet qui a la forme du bord à réaliser (figures 90 et 91).

L'entraînement est assuré par le galet de forme. La vitesse de rotation est réglable en fonction du rayon de carre, du diamètre et de l'épaisseur de la pièce. Pour les grands rayons de carre, le formage est réalisé en plusieurs passes.

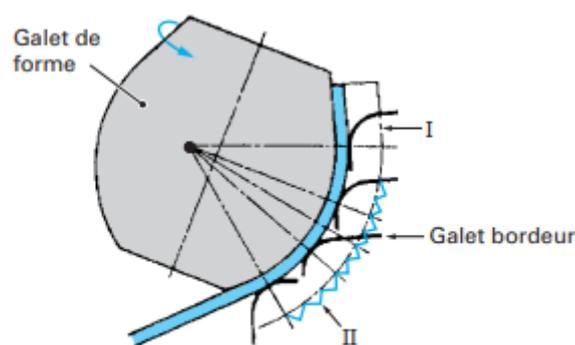
Ce procédé est employé essentiellement pour le formage des bords des fonds bombés. Les fonds torisphériques sont formés en deux opérations : emboutissage au coup par coup ou repoussage d'une calotte sphérique, puis formage du bord par repoussage sur machine à former. Les avantages de cette méthode de formage sont les suivants :

- augmentation du rendement par suite du temps d'utilisation plus court de chaque machine ;
- réduction du temps de changement d'outillage et de réglage ;
- faible investissement en outillage pour une grande variété de fabrication ;
- capacité de formage à froid plus grande que pour d'autres procédés (repoussage ou emboutissage complet sur une seule machine).

On citera comme inconvénients :

- un investissement plus important pour les machines ;
- une main-d'œuvre doublée, compensée en partie par l'augmentation du rendement.

Cette technique permet également de former une pièce hémisphérique à partir d'un tronc de cône soudé à une calotte sphérique (figure 92).



I courbe théorique de déplacement du galet bordeur (en noir)
II courbe réelle de déplacement du galet bordeur (en cyan)

Figure 90. Formage sur une machine à former les bords, à avance manuelle

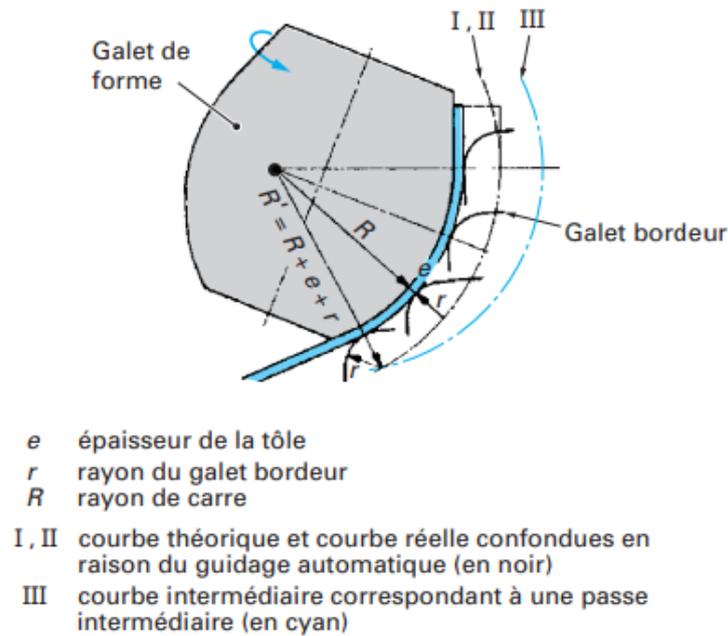


Figure 91. Formage sur une machine à former les bords à guidage automatique du galet bordeur

Il est possible de former à froid des épaisseurs allant jusqu'à 45 mm. Au-dessus de 30 mm, il peut être avantageux de former à chaud ; dans ce cas, la capacité de déformation de la machine est augmentée de près de 50 %. La mise en température du flan avant formage est réalisée soit dans un four, soit localement sur la machine à l'aide d'un système de chauffage par induction.

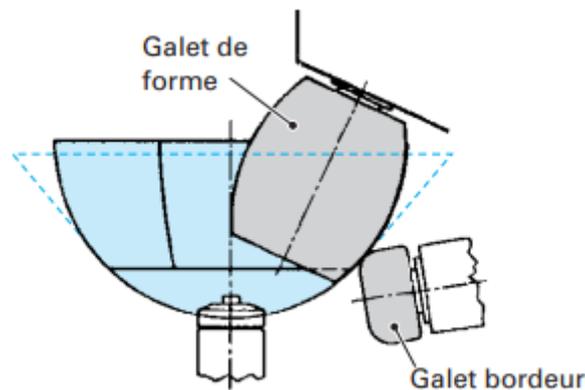


Figure 92. Formage d'un hémisphère par repoussage d'un tronc de cône soudé à une calotte sphérique

5.4 Outillage

Quelle que soit la valeur du rayon à obtenir, on peut utiliser le même galet bordeur. Le galet de forme doit avoir un rayon R (figure 91) égal au rayon de la pièce à former. Les galets sont en fonte à graphite sphéroïdal trempée superficiellement. Pour les pièces qui demandent un très bon état de surface, il est préférable d'utiliser des galets recouverts d'une résine adaptée au métal travaillé.

Du fait du retour élastique, la forme finale du bord du fond est légèrement différente de celle du galet de forme. Comme pour tous les autres procédés de formage, ce phénomène est d'autant plus important que la tôle est mince. On peut éviter ou diminuer le retour élastique en réglant l'angle de l'axe du galet de forme par rapport à l'axe de la calotte (figure 93).

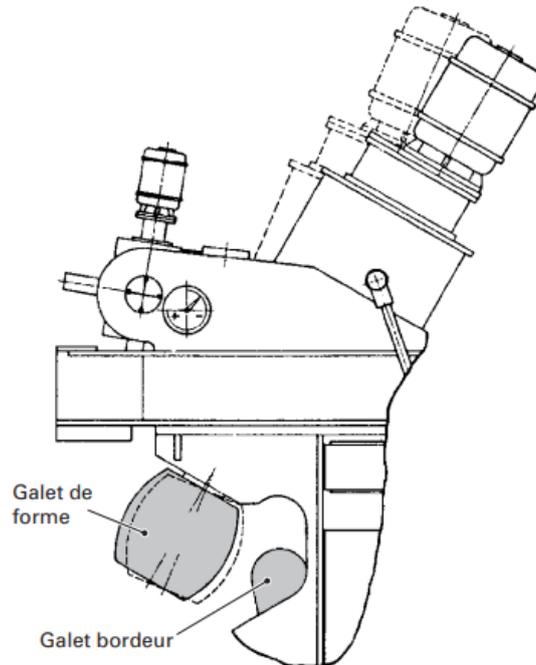


Figure 93. Machine avec galet de forme pivotant pour corriger la forme du rayon de carre

5.5 Machines de formage :

5.5.1 Tours à repousser :

Pour travailler les tôles fortes, on emploie des tours à repousser à commande hydraulique. Dans certains cas, un contre-appui actionné hydrauliquement permet d'éviter la formation de plis au cours du formage (figure 94).

Un chariot croisé à commande hydraulique permet d'obtenir un travail régulier. La commande du chariot qui supporte le galet de formage peut être ; manuelle, semi-automatique ou automatique. La commande automatique est constituée d'un dispositif de copie qui, par l'intermédiaire d'un gabarit et d'un palpeur, règle le déplacement du galet de formage. La vitesse de rotation est réglable en continu : ainsi, pour la fabrication de fonds bombés de grand diamètre, la vitesse de rotation est réglable de 1 à 300 tr/min. Certains tours sont équipés d'une variation automatique de la vitesse de rotation par rapport à l'avance du chariot.

Les tours de repoussage permettent de former des fonds bombés jusqu'à 5 000 mm de diamètre et 30 mm d'épaisseur pour un acier non allié formé à froid, ou jusqu'à 80 mm d'épaisseur pour

un travail à chaud. Le tableau 8 donne les caractéristiques principales de quelques tours à repousser représentatifs de la production actuelle.

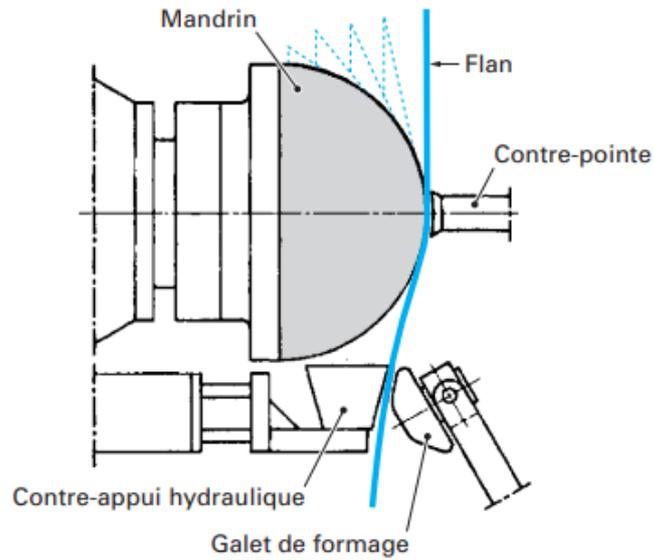


Figure 94. Repoussage avec contre-appui hydraulique

Jusqu'à 4 000 mm de diamètre, les pièces sont formées sur des tours à axe horizontal ; pour les diamètres supérieurs, on utilise des machines à axe vertical. Pour les diamètres de flan de 2 000 à 4 000 mm, les machines sont dotées d'une fosse qui permet le passage du flan et du mandrin (figure 95).

En remplaçant le galet de formage par un outil approprié, il est possible d'exécuter des opérations de finition telles que le détourage et le bordage.

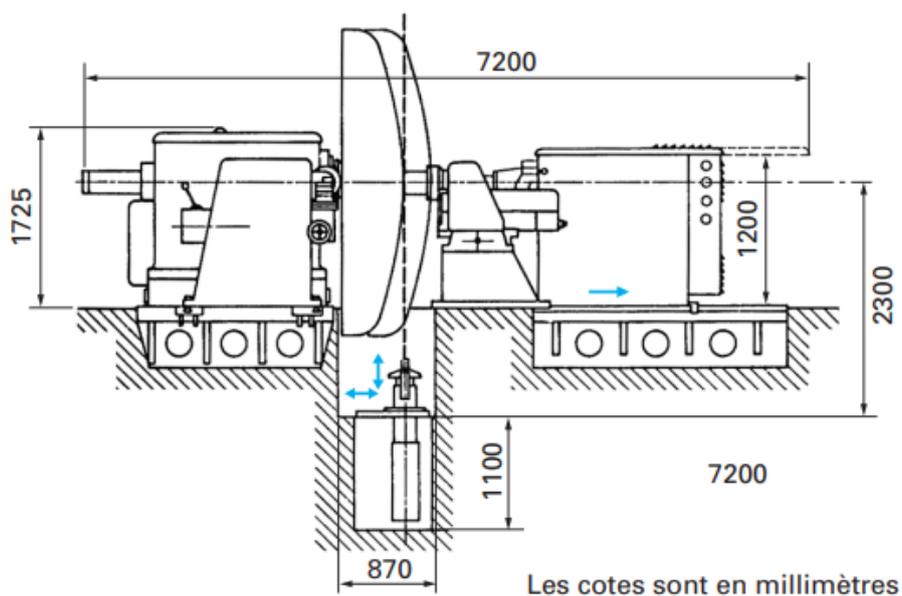


Figure 95. Tour à repousser doté d'une fosse permettant le passage du flan et du mandrin

Diamètre maximal du flan (mm)	Puissance totale Installée (kW)	Forces de formage		Épaisseur maximale du flan	
		Axiale (kN)	Radiale (kN)	en acier non allié (mm)	en acier inoxydable (mm)
800	5,5	30	15	3	2,5
1200	8	40	25	6	3
2400	14	60	80	11	5
3200	22	80	100	12	5,5
4000	90	140	200	15	10
5000	132	280	400	20	12
6000	200	600	600	30 (à chaud 80)	

Tableau 8 : Capacité de formage à froid de tours à repousser hydrauliques

5.5.2 Machines à former les bords :

On distingue les machines à former les bords avec et sans guidage automatique du galet bordeur. Dans le cas de la commande manuelle, l'opérateur travaille par approches successives ; selon son expérience, la formation de stries et la réduction d'épaisseur seront plus ou moins importantes (figure 90). Pour le travail automatique, le galet bordeur décrit une courbe correspondant au profil du bord à former (figure 91).

Selon la conception de la machine, l'immobilisation transversale de la pièce nécessite ou non le perçage d'un trou central. Pour éviter celui-ci, il est possible, dans certains cas, de souder au pôle de la pièce une plaque qui vient s'adapter au système de serrage de la machine.

Le tableau 6 indique quelques capacités de formage typiques de machines à former les bords

Diamètre D_c de la pièce (mm)	Rayon de carre r_c (mm)	Épaisseur e (mm)
300 à 4 000	20 à 300	1,5 à 13
500 à 5 000	20 à 500	3 à 22
1 000 à 6 000	30 à 1 500	4 à 45

Tableau 9 : Machines à former les bords : capacités de formage

6 Fluotournage :

6.1 Principe :

Utilisant un principe connu de longue date, il s'apparente à la technique du potier – mécanisé depuis les années 1950, le fluotournage consiste à déformer plastiquement les métaux par extrusion ponctuelle, la matière s'écoulant entre un mandrin mis en rotation et une ou plusieurs molettes exerçant une pression élevée. Le métal s'écoule en tournant, d'où le nom attribué au procédé.

Il permet d'allonger une préforme axisymétrique en réduisant son épaisseur. Cette réduction d'épaisseur est caractéristique du procédé, et l'on réserve le nom de repoussage aux mises en forme à épaisseur constante. Suivant les matériaux, le fluotournage s'effectue à froid (c'est-à-dire sans chauffer les ébauches), ou à chaud (450 à 1 050 °C suivant les métaux).

Les pays de langue anglo-saxonne utilisent plusieurs termes équivalents : spinning, flow-spinning, flow-forming, flow-turning, shear spinning.

6.2 Intérêt :

L'intérêt que présente la technique du fluotournage découle des caractéristiques spécifiques à ce procédé :

- obtention de pièces à symétrie de révolution, s'apparentant à des emboutis profonds, et dont les épaisseurs peuvent être faibles (1 à 5 mm) ou très faibles (jusqu'à 0,15 mm) ;
- réalisation de produits aux excellentes précisions dimensionnelles et d'états de surface d'un niveau tel qu'ils limitent ou suppriment les usinages ultérieurs ;
- économie de matière : déformation à volume constant et reprises d'usinage réduites ;
- élévation des caractéristiques mécaniques par écrouissage en fluotournage à froid (suppression éventuelle des traitements thermiques finaux) ;
- application à une grande variété de matériaux métalliques, y compris ceux réputés difficilement déformables ;
- mise en jeu d'efforts relativement modestes, étant donné le caractère local de la déformation : des pièces de grandes dimensions peuvent donc être fluotournées sur des machines de puissance moyenne ;
- possibilité de réaliser de fortes réductions d'épaisseur (50 à 80 %), ce qui diminue le nombre de passes nécessaires ;
- préparation sommaire des ébauches : pas de traitement de surface, pas de problème de lubrification.

Ainsi, les nombreuses possibilités qu'il présente, alliées à la simplicité de sa mise en œuvre, rendent le procédé compétitif au plan économique.

6.3 Modes de fluotournage :

C'est d'après les formes géométriques de l'ébauche et du produit que se classent les deux opérations types de fluotournage :

- le fluotournage conique, à partir d'une tôle plane appelée flan, permet l'obtention d'un cône ou d'une pièce de révolution à génératrice curviligne ;
- le fluotournage cylindrique réalise des pièces tubulaires à paroi mince, l'ébauche étant un godet forgé, embouti, extrudé, usiné, etc.

6.3.1 Fluotournage conique :

Le fluotournage conique est le plus classique et le plus facile à mettre en oeuvre ; c'est aussi celui dont il est fait état le plus souvent dans la littérature technique.

Il y a lieu de distinguer deux types de fluotournage conique :

- fluotournage conique à génératrice droite ;
- fluotournage conique à génératrice curviligne.

■ Fluotournage conique à génératrice droite

Le principe en est donné sur la figure 96. Le flan F, circulaire ou carré, d'épaisseur e_0 , est pris entre le mandrin M et la contre-pointe P. Cet ensemble est mis en rotation par la broche-machine supportant le mandrin. Une molette M_0 , folle sur son axe, réglée à une distance fixe e du mandrin, est entraînée en translation par un chariot et suit un mouvement rectiligne parallèle à la génératrice du mandrin.

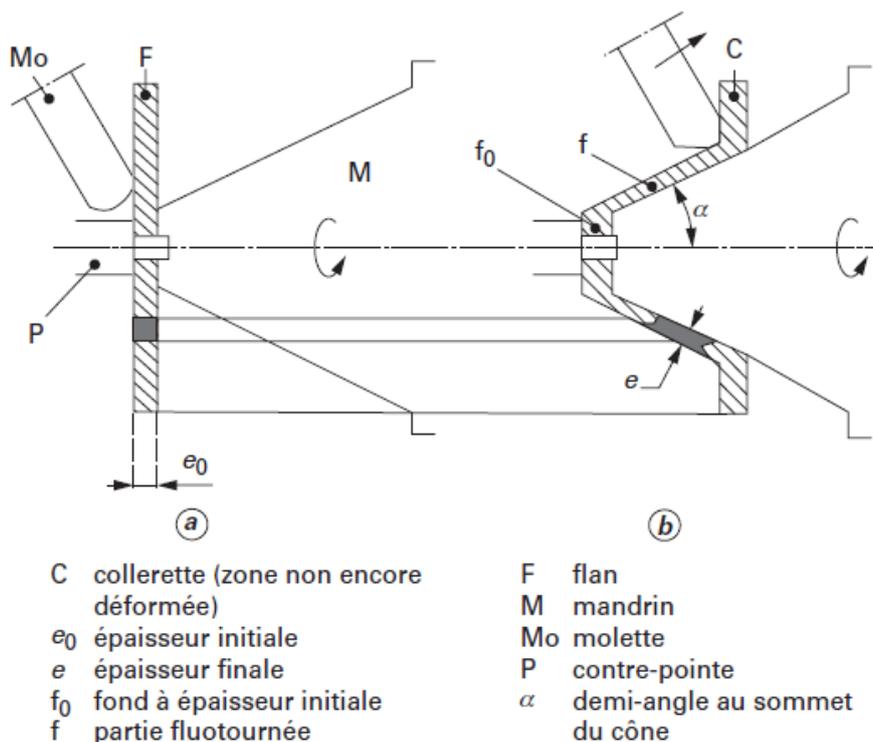


Figure 96. Fluotournage conique à génératrice droite

Au premier contact avec le flan (figure 96.a), la molette se met en rotation, entraînant la matière sous elle (figure 96.b). Le chariot porte-molette poursuit sa course jusqu'à l'obtention du produit fini. L'épaisseur de ce produit est sensiblement égale à la distance e de l'entrefer mandrin-molette.

En général, l'opération se pratique avec deux molettes diamétralement opposées ou trois molettes disposées à 120° .

■ Fluotournage conique à génératrice curviligne

Il est schématisé sur la figure 97. Les molettes décrivent le profil de la pièce par copiage sur gabarit ou en commande numérique. Les génératrices peuvent être concaves (carters, ustensiles ménagers, etc.) ou en partie convexes (tuyères, jantes, cloches, etc.).

L'angle α entre la tangente à la génératrice et l'axe de la pièce n'est pas constant.

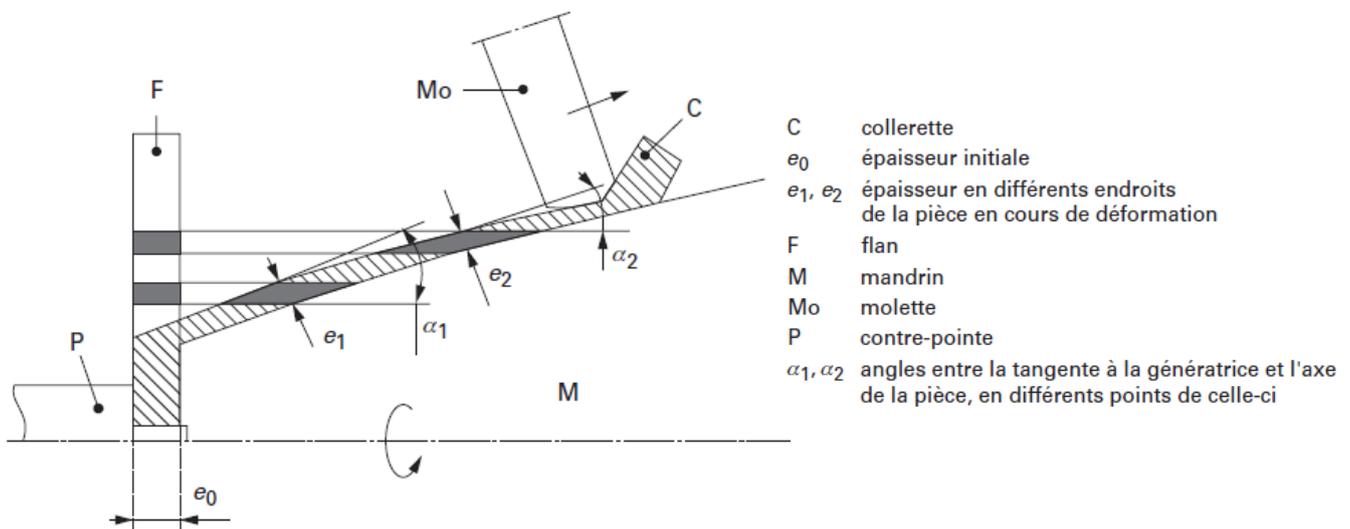


Figure 97. Fluotournage conique à génératrice curviligne

6.3.2 Fluotournage cylindrique :

Sorte de formage par étirage, le fluotournage cylindrique permet la réalisation de corps cylindriques creux, en une ou plusieurs opérations (passes).

L'épaisseur e_0 de l'ébauche est réduite, à diamètre intérieur constant, par l'action de plusieurs molettes coplanaires qui se déplacent parallèlement à l'axe du mandrin.

Là encore, deux types sont à distinguer :

■ Fluotournage cylindrique direct

L'ébauche cylindrique E (figure 98.a) est centrée sur le mandrin M et liée en rotation par la pression de la contre-pointe P. Tandis que l'ensemble est mis en rotation côté mandrin, les molettes Mo, folles sur leur axe, se déplacent à la distance e du mandrin, déterminant ainsi l'épaisseur de la pièce finie.

Dans la zone de déformation II, la matière s'écoule dans le sens du mouvement d'avance des molettes (figure 98.b). Le produit obtenu est forcément plus court que le mandrin (figure 98.c).

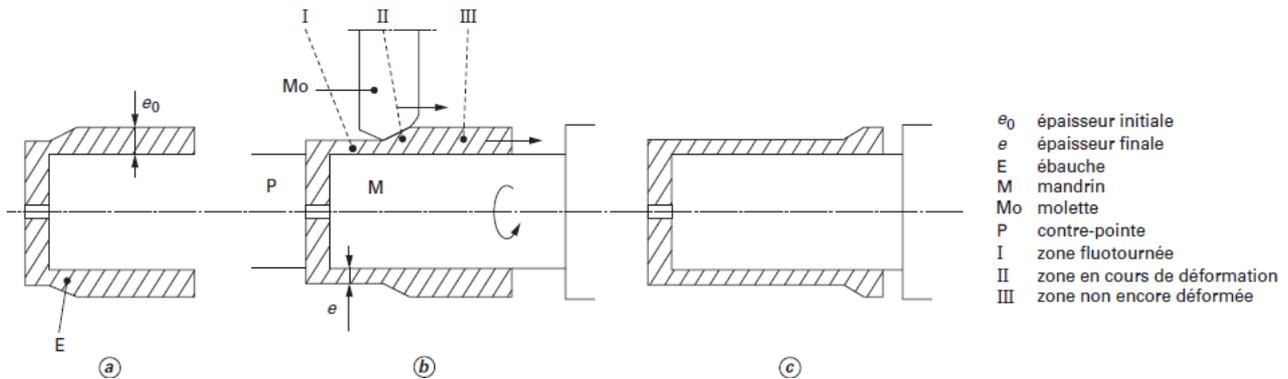


Figure 98. Fluotournage cylindrique direct

■ Fluotournage cylindrique indirect

Dans ce cas, l'ébauche (figure 99.a) vient en butée sur la face côté broche du mandrin. La liaison en rotation s'effectue par des ergots, des crans ou des dents de loup.

En cours de travail (figure 99.b), la matière s'écoule dans le sens opposé au mouvement d'avance des molettes. La pièce finie, généralement sans fond, peut-être plus longue que le mandrin (figure 99.c).

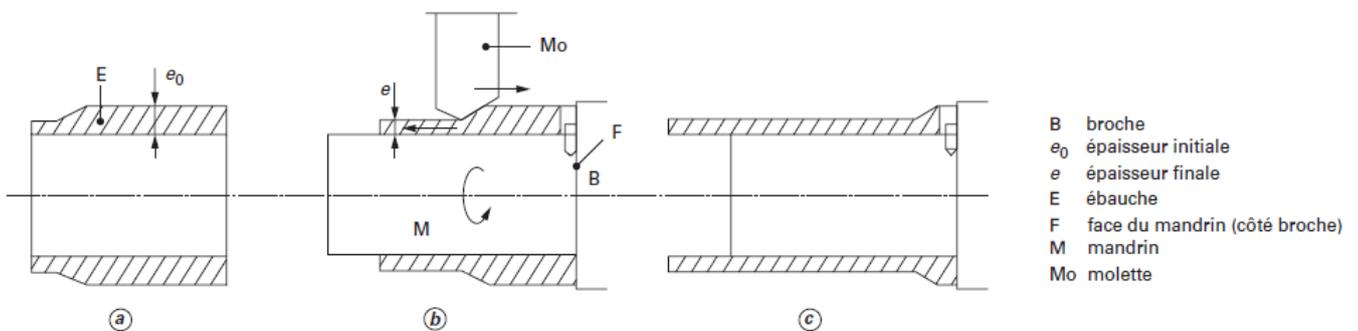


Figure 99. Fluotournage cylindrique indirect

6.4 Paramètres :

Les paramètres de fluotournage, peu nombreux, à ajuster avec le plus grand soin, conditionnent à la fois la définition géométrique de l'ébauche et la réussite de l'opération. On définit :

- l'effort développé (kN) et la capacité machine (dimensions tolérées, vitesses, etc.), fonction du matériau et de la taille des pièces à réaliser ;
- la vitesse de rotation de la broche (tr/min) ;
- l'avance de la molette (mm/tr) le long d'une génératrice ;
- l'entrefer e (mm), distance molette-mandrin ;

- la profondeur de passe (mm) : $e_0 - e$ (avec e_0 épaisseur de l'ébauche et e épaisseur de la pièce finie) ;
- le nombre de passes : nombre d'opérations successives sur la même pièce ;
- la réduction, R (%) = $[(e_0 - e)/e_0] \times 100$, représentant la diminution relative d'épaisseur, par passe ou totale ;
- le profil de la molette ;
- la température de l'ébauche, en fluotournage à chaud.

La vitesse de rotation et l'avance déterminent le temps technologique de réalisation d'une pièce.

6.4.1 Efforts :

Dans la zone de déformation, les forces de pression exercée par la molette se projettent en trois composantes perpendiculaires (figure 100) :

F_a force d'avance, parallèle à la génératrice de la pièce ;

F_c force circonférentielle ;

F_r force radiale, normale aux précédentes.

Le travail produit par F_a représente 5 à 8 % du travail total de déformation. La force F_r est petite (en fluotournage cylindrique) ou nulle (en fluotournage conique). Le travail produit par la force circonférentielle F_c est donc largement prépondérant dans tous les cas. Cette composante croît avec l'avance, le diamètre des pièces et celui des molettes.

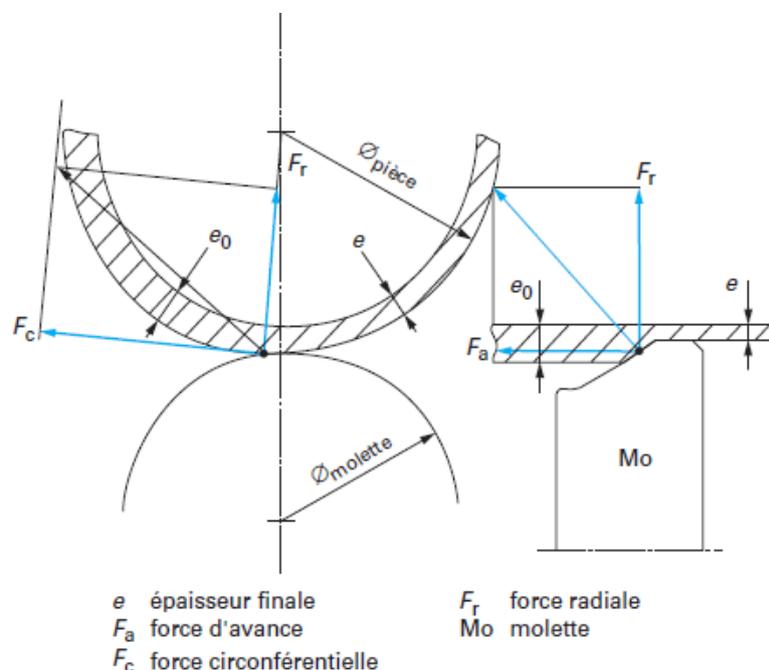


Figure 100. Répartition des efforts en fluotournage

L'effort appliqué par la molette sur la pièce est un élément important de dimensionnement des machines de fluotournage. La force appliquée est en première approximation proportionnelle à

l'épaisseur initiale de la pièce, à l'avance, à la contrainte d'écoulement du matériau fluotourné et, enfin, à un paramètre relatif à la déformation imposée.

6.4.2 Machines :

Les machines à fluotourner s'apparentent à des tours classiques de moyenne et grosse capacités. Elles possèdent (figure 101) un banc supportant les chariots porte-molettes, une broche donnant le mouvement de rotation au mandrin et une contre-pointe faisant office de serre-flan.

Les fluotours ont hérité de la robustesse et de la rigidité caractéristiques des autres machines de déformation à froid (presses à filer par exemple), bien que les efforts mis en jeu soient ici typiquement plus faibles : 80 à 300 kN.

La puissance est fournie par des groupes hydrauliques qui alimentent les vérins des chariots. Les mouvements longitudinaux sont synchronisés et réglables continûment. Les vérins transversaux amènent les molettes à la distance e du mandrin (entrefer préréglé), maintiennent une pression élevée pendant l'opération et dégagent les chariots en fin de cycle.

Le copiage des mouvements s'effectue par un système de copiage hydraulique sur gabarit de reproduction ou en commande numérique.

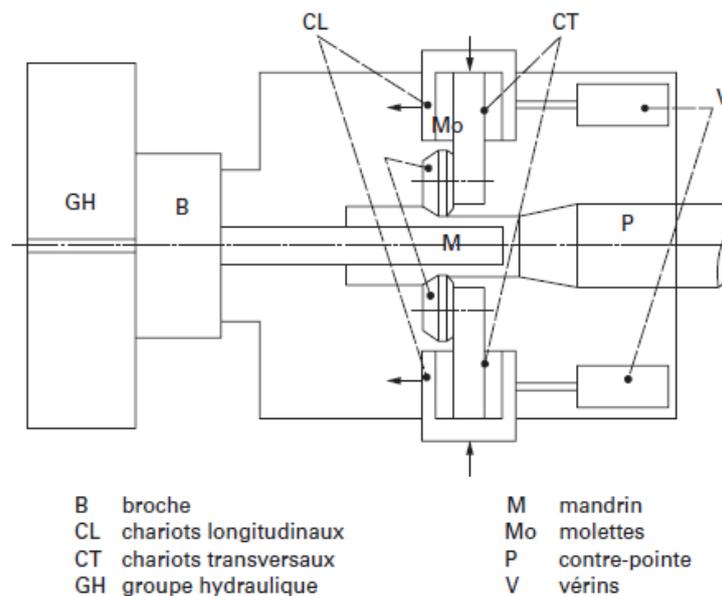


Figure 101. Fluotour à deux molettes

Les machines à deux molettes, de loin les plus utilisées, trouvent leurs limites dans le cas de pièces de précision et très élancées (rapport longueur/diamètre supérieur à 20), pour lesquelles le mandrin fléchit en passant alternativement au-dessus et au-dessous de l'axe des molettes. On utilise alors des machines à trois molettes (figure 102) qui garantissent le centrage permanent du mandrin.

Les efforts exercés sur chaque molette vont de 80 à 120 kN pour les machines de capacité moyenne ($\varnothing < 500$ mm, $L < 800$ mm, $e \leq 10$ mm), jusqu'à 300 kN pour les plus gros fluotours ($\varnothing_{\max} : 1\ 000$ mm, $L_{\max} : 2\ 000$ mm, $e_{\max} : 20$ à 25 mm).

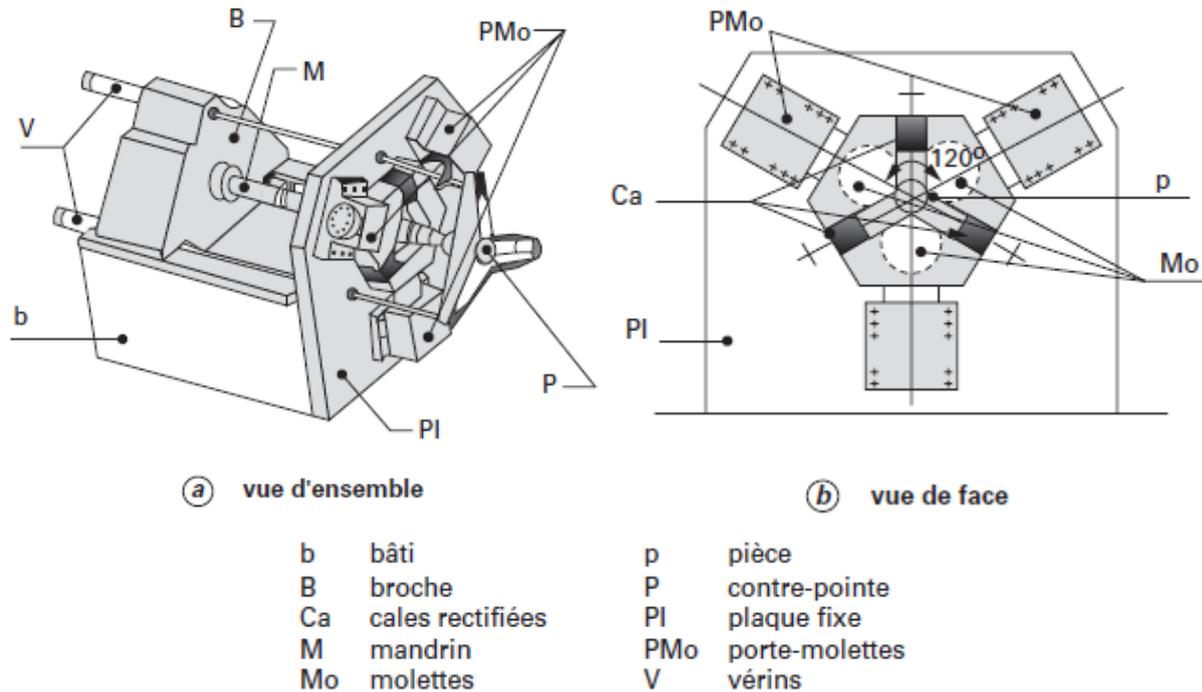


Figure 102. Fluotour à trois molettes

6.5 Possibilités et limites :

Les performances tiennent à la fois à l'aptitude de déformation du métal et à la capacité des machines, incluant gabarit, précision, gamme de variation des paramètres, système de copiage et asservissement.

Outre la vaste panoplie des matériaux intéressés, les dimensions extrêmes des pièces réalisables par fluotournage étendent son domaine d'application. Des exemples caractéristiques de pièces fluotournées sont donnés dans le tableau 10.

Les produits travaillés ont des masses allant de quelques dizaines de grammes à plus de 50 kg. Un autre avantage réside dans la qualité des états de surface intérieurs, comparables à ceux obtenus par rectification, soit $R_a = 0,4$ à $0,8 \mu\text{m}$. L'état de surface extérieur, lui, demeure moyen ($R_a = 1,6$ à $3,2 \mu\text{m}$) ; la hauteur des sillons laissés par les molettes dépend de la valeur des paramètres et peut se prévoir par le calcul.

Par rapport aux procédés traditionnels de mise en forme à froid, le fluotournage met en jeu des taux de réduction plus élevés, limitant ainsi le nombre des recuits intermédiaires : 50 % sur

cuivre, 60 % sur alliage d'aluminium, 70 % sur acier Maraging constituent des valeurs courantes de la réduction d'épaisseur entre deux traitements thermiques.

Très adapté à des pièces de symétrie de révolution, le procédé permet d'obtenir des formes simples, mais aussi des reliefs internes tels que soufflets, cannelures longitudinales à divers profils (engrenages, dents de loup, etc.), rayures hélicoïdales et filetages, utilisables bruts de fluotournage..

La puissance des machines limite les possibilités de déformation en forte épaisseur. Ainsi, des épaisseurs initiales $e_0 = 30$ mm sur alliage d'aluminium et $e_0 = 20$ mm sur acier demandent une poussée axiale de 250 kN et un effort radial de 300 kN.

Enfin, il faut signaler qu'un atelier de fluotournage peut constituer à lui seul une entité au sein d'une entreprise, tout comme être intégré dans une unité de production, au côté d'autres moyens de déformation qui lui sont complémentaires (presses à découper, à filer, à emboutir, calibreuses).

Type de pièce	Dimensions (mm) (1)		
	L	Ø	e et Δe
Tube en XC 18.....	700	20	e = 0,6 à 1,5
Tube en 15 CDV6.....	800	1 100	e = 3, Δe = 0,2
Corps de vérin en XC 35.....	400	125 H8	e = 10
Tube en alliage 7049 (A-Z8GU).....	200	90	e = 0,15
Godet en acier extra-doux étamé.....	100	65	e = 0,08 (m = 35 g)
Couvercle en acier Maraging.....	30	145	e = 0,7
Tube en acier Maraging.....	1 600	145	e = 0,7, Δe = 0,04
Cône en cuivre.....	45	50	e = 1, Δe = 0,02
Cône en alliage 2017A (A-U4G).....	650	413	e = 5

(1) e : épaisseur ; Δe : variation d'épaisseur ; L : longueur ; Ø : diamètre intérieur.

Tableau 10 : Exemples caractéristiques de pièces fluotournées

6.6 Marchés concernés :

Aérospatiale : réservoirs de satellite, viroles.

Aéronautique : tuyères, carters moteurs, réservoirs, capots.

Nucléaire : bols d'ultracentrifugation, tubes de coeur de réacteur.

Génie mécanique : corps de vérin.

Automobile : jantes et flasques de roue.

Matériel ferroviaire : cylindres de frein de locomotives.

Agroalimentaire : réservoirs, cuves, bidons.

Ménager et électro-ménager : ustensiles de cuisine, capots.

Orfèvrerie : coupes, plats.

Armement : éléments d'armes et de munitions, enveloppes.

7 Formage par explosion :

7.1 Principe :

Le principe consiste à déformer une pièce en utilisant l'énergie libérée par la détonation d'une charge explosive et transmise par un fluide. Généralement, le flan à former est monté sur une matrice avec un serre-flan, le tout étant immergé dans une fosse d'éclatement de grande dimension remplie d'eau (par exemple fosse de diamètre 12 m et de profondeur 10 m). On peut effectuer le formage en matrice fermée (fig. 103), en matrice ouverte (fig. 104) ou sans matrice. La pièce formée est obtenue à partir d'un flan plat, d'une préforme constituée d'éléments soudés ou d'un tube. Le calcul de la charge explosive se fait à partir du calcul de l'énergie nécessaire à la déformation du flan.

La détonation de l'explosif donne naissance à une onde de choc qui se propage dans l'eau, pénètre dans le flan et lui communique une puissante impulsion. Si l'on opère sur une matrice fermée (cas de la figure 103), la déformation de la pièce s'arrête brusquement lorsqu'elle entre en contact avec le contour de la matrice

Avec une matrice ouverte (fig. 104) le mouvement de la pièce prend fin lorsque la totalité de l'énergie cinétique acquise a été consommée par la déformation.

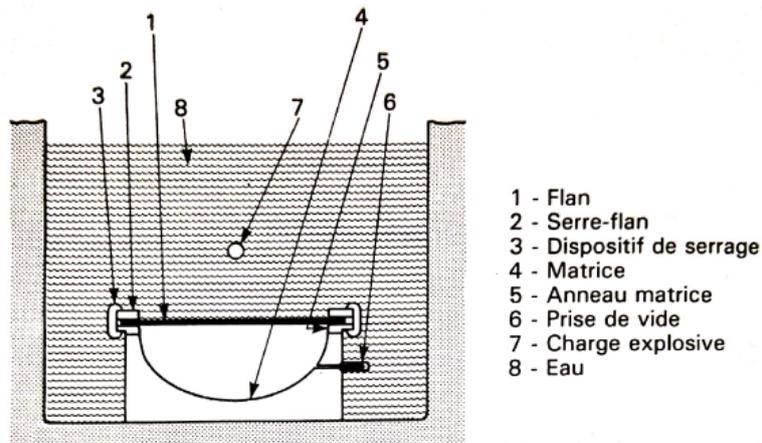


Figure 103. Formage par explosion en matrice fermée

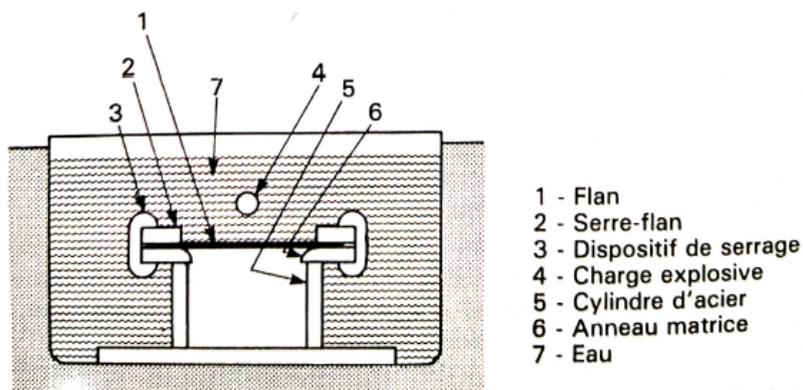


Figure 104. Formage par explosion en matrice ouverte

Ce procédé est rentable pour les petites séries de 2 à 10 pièces. Les prix de revient à l'unité sont d'autant plus compétitifs que la série est faible et que les dimensions sont importantes. Dans ce domaine de production, on fait appel au formage par explosion lorsqu'une ou plusieurs des conditions suivantes sont remplies :

- Tolérances dimensionnelles très faibles : en matrice fermée, sur une pièce de 1 m de diamètre, on obtient une précision de 0,1 à 0,7 mm avec des alliages d'aluminium, de 1 à 3 mm avec des aciers à haute limite d'élasticité,
- temps de réalisation d'un outillage plus court que pour un outillage classique,
- pièce de forme non normalisée ou sans symétrie axiale : tore non symétrique, forme à multiples rayons de courbure,
- métal de faible formabilité : acier réfractaire.

On utilise ce type de formage dans l'industrie aéronautique, la construction navale et la chaudronnerie. Les épaisseurs formées vont couramment jusqu'à 40 mm pour les alliages d'aluminium et 15 mm pour les aciers. En construction navale, on cite dans la littérature des cas de formage de tôles jusqu'à 100 mm d'épaisseur.

Les pièces formées en tôles épaisses sont principalement :

- des calottes sphériques,
- des fonds bombés elliptiques, hémisphériques ou torisphériques,
- des tubes évasés de gros diamètre.

7.2 Mécanisme :

7.2.1 Explosion :

La détonation d'un explosif est un phénomène très rapide mais non instantané. Il correspond à la transformation de l'explosif en produits gazeux à l'arrière d'un front de réaction appelé onde de détonation, qui se déplace dans l'explosif à plusieurs milliers de mètres par seconde.

Lorsque l'onde de détonation atteint les limites de l'explosif, le milieu environnant reçoit une perturbation

- D'une part dans l'eau, l'onde de détonation donne naissance à une onde de choc principale (onde de pression se déplaçant à une vitesse supersonique). Cette onde de choc accélère la masse d'eau au fur et à mesure qu'elle la traverse. Le déplacement ainsi créé conduit à une augmentation du volume occupé par les gaz de détonation qui par conséquent, se détendent.

Lorsque l'onde de choc arrive à l'interface eau/métal, elle passe dans le métal et induit dans celui-ci une pression, traduite en contrainte et une accélération traduite en déplacement.

- D'autre part, au moment où l'onde de détonation passe dans l'eau et devient onde de choc principale, il se crée en sens inverse, une onde de détente, selon la mécanique des chocs, qui

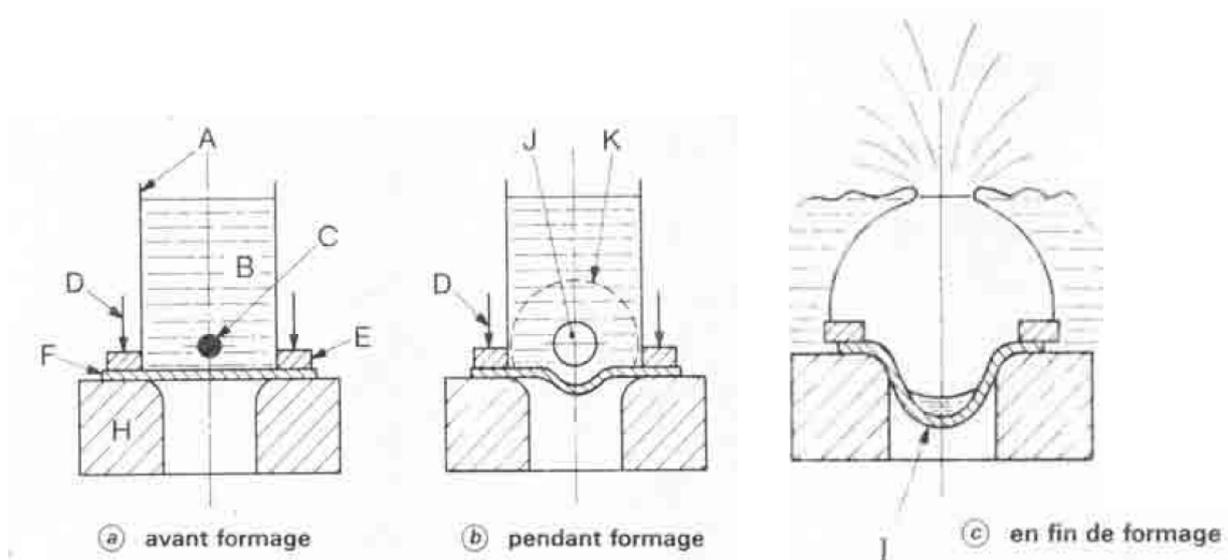
remonte dans les gaz vers le point d'initiation du phénomène (centre de la bulle). Par réflexions successives de l'onde initiale sur le centre de la bulle et sur l'interface gaz de détonation/eau, qui continue son expansion, il apparaît une onde de choc secondaire. Celle-ci, moins énergétique que la première, engendre des phénomènes identiques : une recompression et une remise en vitesse de l'eau, donc du métal connexe.

Dans l'eau, cette perturbation se traduit concrètement par une onde de choc qui se déplace à une vitesse de l'ordre de 2000 à 3 000 m/s et une bulle de gaz qui se développe à une vitesse de l'ordre de 100 à 200 m/s

Suivant la nature de l'explosif employé, l'énergie de l'onde de choc représente 25 à 35 % de la totalité de l'énergie libérée par l'explosion.

7.2.2 Déformation du métal :

La pièce métallique subit simultanément l'action de l'onde de choc et celle du flux radial de l'eau. L'onde de choc pénètre dans le métal et lui communique une puissante impulsion, la déformation commence au centre du flan (fig. 105) et gagne ensuite les bords. La vitesse de déplacement du centre atteint rapidement des valeurs de l'ordre de 100 à 400 m/s (fig 106) (à titre indicatif les vitesses usuelles d'emboutissage à la presse sont comprises entre 0,1 et 6 m/s). Elle décroît ensuite au fur et à mesure que l'énergie cinétique initiale est consommée par la déformation.



- | | |
|---------------------------|--------------------------------------|
| A : Virole | F : Flan |
| B : Eau | H : Matrice |
| C : Charge explosive | I : Pièce formée |
| D : Dispositif de serrage | J : Bulle des produits de détonation |
| E : Serre-flan | K : Onde de choc |

Figure 105. Phases de formage par explosif

La vitesse de déplacement du flan peut être déterminée grâce l'usage de systèmes à circuit électrique (sondes à contact, jauges de contrainte), de caméras à prise de vue ultra-rapide ou de systèmes à fibre optique et chronoscope. Pour des systèmes préétablis l'usage de l'ordinateur permet la simulation numérique de ce déplacement.

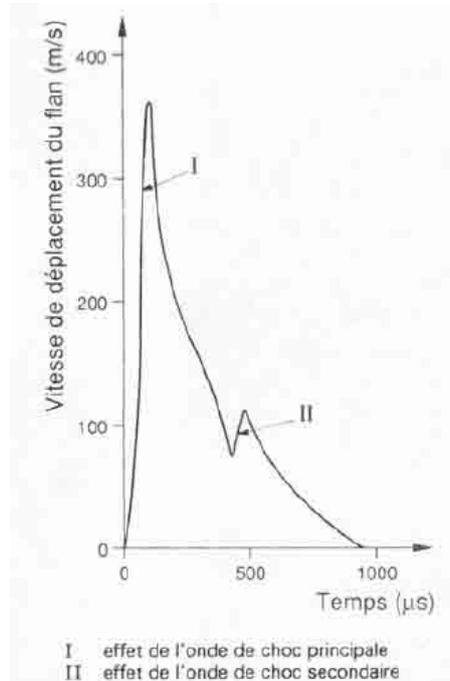


Figure 106. Formage par explosif d'un flan en acier XC35 de diamètre 470 mm et d'épaisseur 2 mm (matrice ouverte).

La perturbation que l'on observe sur la partie décroissante de la courbe correspond au nouvel apport d'énergie par l'onde de choc secondaire. L'opération dure environ un millième de seconde. Le déplacement du flan s'accompagne d'efforts en traction radiale qui provoquent un allongement du métal et le glissement du flan dans la matrice. Le rôle plus ou moins important joué par ces deux phénomènes dans la déformation globale dépend de la force appliquée sur le serre-flan.

De même qu'en emboutissage conventionnel, chaque pièce formée comporte trois zones (fig. 107) qui ont respectivement travaillé :

- en flexion et traction biaxiale (zone I);
- d'abord en compression tangentielle, puis (après avoir glissé dans la matrice) en flexion et traction biaxiale (zone II);
- uniquement en compression tangentielle (zone III).

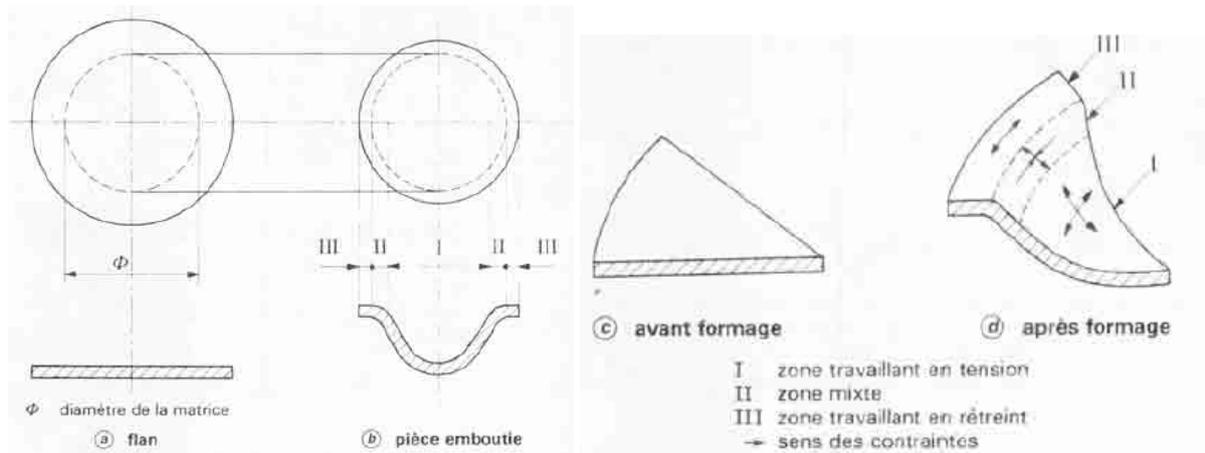


Figure 107. Analyse des déformations

Lorsque le flan est mince, cette compression entraîne un flambement avec formation de plis à la périphérie de la pièce (fig. 108.a). Ce phénomène est d'autant moins accusé que la pièce est épaisse (fig. 108.b).

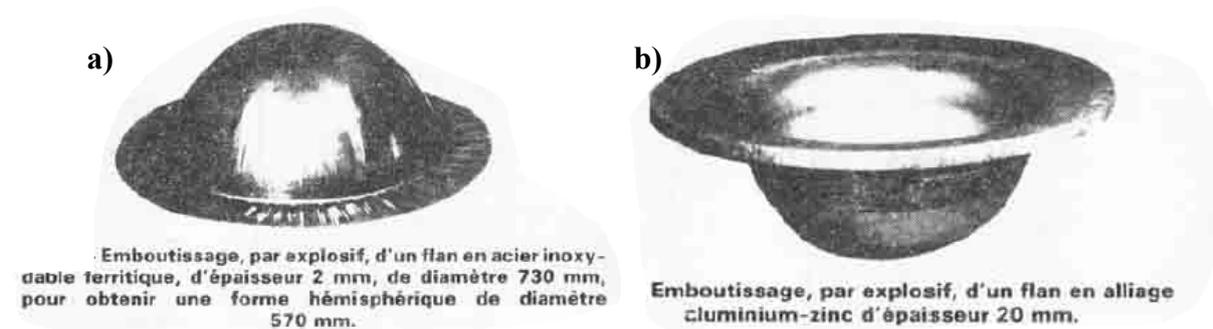


Figure 108. Flans emboutis par explosion

7.3 Technologie, outillages :

7.3.1 Exemples de fabrication.

Fonds bombés. — On peut citer quelques réalisations d'une société française spécialisée dans ce type de fabrication :

- fond elliptique de diamètre 2 000 mm en AG 3 de 35 mm d'épaisseur,
- fond à grand rayon de carre, de diamètre 4 m en Z 3 CN 18-10 de 4 mm d'épaisseur,
- doublage en titane de 2 mm d'un fond de réservoir en acier non allié de diamètre 4 m,
- formage de sphères jusqu'à 3,5 m de diamètre. Réalisées sans matrice à partir de troncs de cônes soudés.

Evasement de tube. — La figure 109 représente l'outillage et la pièce réalisée par explosion à partir d'un tube de diamètre 530 mm et d'épaisseur 13,5 mm. Le formage classique demande l'emboutissage à chaud de deux demi-coquilles, le soudage et l'usinage de la pièce finie. Le formage par explosion a conduit à des gains de temps (70 %) et de matière (10 %). Le formage a été exécuté en deux opérations avec un recuit intermédiaire à 650 °C.

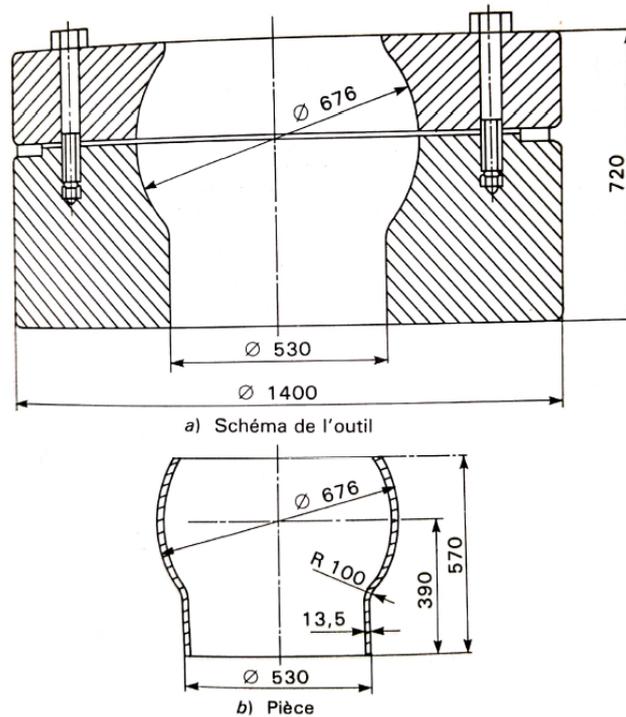


Figure 109. Formage d'une articulation par explosion

7.3.2 Outillage :

Un des intérêts du procédé est de nécessiter un outillage simple et peu coûteux. Pour la réalisation de calottes sphériques ou de fonds bombés le serre-flan est en acier et le système de serrage est mécanique ou hydraulique. Les matrices ouvertes ou fermées sont réalisées dans des matériaux très variés. On choisit le matériau en fonction de l'importance de la série et de la dimension de la pièce en recherchant toujours la solution la plus économique (voir tableau 11).

Fonte : pour les fortes pressions et les série importantes.

Alliage de zinc : pour les basses pressions et les petites et moyennes séries.

Béton : pour les pièces de grandes dimensions en petites séries. Le béton est souvent employé avec un revêtement de résine pour égaliser la surface active et diminuer les irrégularités de l'onde de choc.

Acier : pour les séries très importantes.

Glace : pour les petites séries. Les matrices en glace résistent bien à la compression, leur réparation est très facile et le coût de la matière est négligeable.

7.3.3 Charges explosives :

Les explosifs couramment utilisés sont choisis pour leur facilité de mise en forme (cordeaux détonants de différentes charges linéaires. explosif-gomme type plastic, explosif pulvérulent industriel, explosif composite). Ce sont aussi, pour des raisons de sécurité, des explosifs peu sensibles aux chocs et aux frottements.

7.3.4 Dispositifs de mise à feu :

Pour initier l'explosion, un ou plusieurs détonateurs électriques sont placés au contact de la charge explosive. Ils sont reliés par une ligne à une source de courant d'envoi d'une impulsion électrique dans la ligne qui commande le fonctionnement du détonateur et la détonation de l'explosif.

7.3.5 Milieu de transmission :

L'eau, du fait de son incompressibilité est le milieu le plus utilisé. On la maintient autour de la charge par une virole qui sera détruite par l'explosion et constituée d'un matériau dont les conséquences balistiques et le coût sont satisfaisants (cartons phénoliques, film de polyéthylène, tissus serrés, etc.).

7.3.6 Fosse d'éclatement :

La fosse d'éclatement a une forme généralement cylindrique. Il est possible d'utiliser aussi une fosse conique qui présente l'avantage d'une meilleure résistance aux explosions. La fosse est enterrée, les parois de béton sont recouvertes d'une enveloppe d'acier. Pour limiter l'effet des explosions sur les parois, on peut placer un tube à air au fond de la cuve. Ce tube, percé de trous régulièrement espacés et dans lequel on maintient une pression d'air suffisante, produit un tapis de bulles d'air le long de la paroi de la fosse.

7.4 Qualité des pièces formées par explosion :

Dans le cas du formage par explosion, la dégradation des caractéristiques mécaniques est due à l'écroutissage du métal à grande vitesse (250 m/s). Les valeurs de déformations peuvent être différentes de celles engendrées par un autre procédé de formage (emboutissage à froid ou à chaud).

Comme pour les autres procédés de formage on peut mesurer les déformations à l'aide d'un réseau de cercles marqué sur le flan et appliquer le traitement thermique adapté à la restauration des caractéristiques mécaniques en fonction de la déformation maximum mesurée

Une comparaison des propriétés mécaniques des fonds bombés formés par explosion et par emboutissage à chaud est donnée sur (fig. 110). Le formage par explosion produit une augmentation de 20 à 40 °C de la température de transition TK50. Un traitement de relaxation adapté à l'acier (A52 : 600°C, 1/2 h - 10CD9.10 : 700 °C, 1/2 h - 15D3 : 625 °C, 1/2 h) restaure en grande partie la résilience initiale.

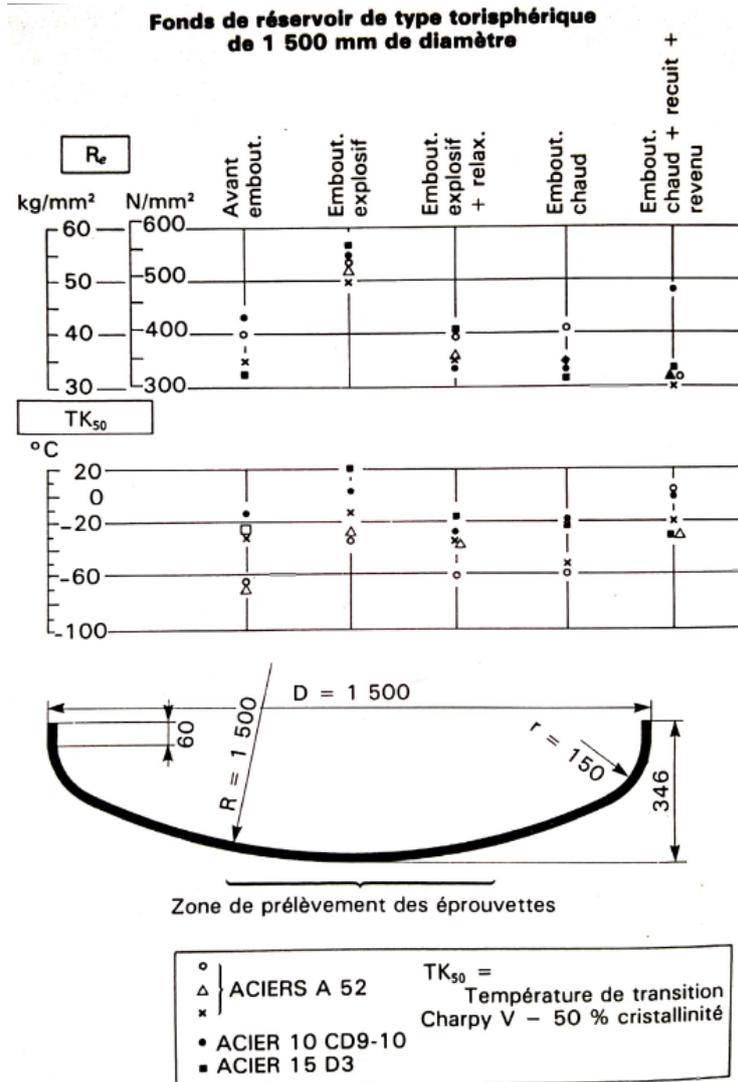


Figure 110. Évolution des caractéristiques mécaniques en fonction du type

Importance de la série (*)	Epaisseur de la tôle		Diamètre ou largeur de la pièce	
	e ≤ 3 mm	e > 12 mm	≤ 900 mm	>900 mm
1 à 2	Bois, matière plastique, béton, glace, plâtre dans un anneau d'acier	Glace	Bois, matière plastique, béton, glace	glace
5 à 10	Béton armé, alliage de zinc, glace	Alliage de zinc, glace	Alliage de zinc, fonte	Glace, Béton armé, alliage de zinc
50 à 100	Alliage de zinc, fonte	Fonte, acier	Alliage de zinc, fonte, acier	Alliage de zinc, fonte
>1000	Acier	Acier	Acier	Acier

(*) Pour les domaines intermédiaires non spécifiés le choix se fait en fonction de la forme de la pièce

Tableau 11 : Guide pour le choix du matériau employé pour la matrice

L'emboutissage à chaud (température de chauffage du flan : 950 °C, température de fin de formage 750 °C) améliore la résilience finale du produit par rapport à l'acier non formé. Un recuit de normalisation suivi d'un revenu appliqué après formage à chaud ont tendance à dégrader les propriétés mécaniques de la pièce. Il faut noter que ces caractéristiques ont été mesurées dans la zone du pôle de chaque fond, ces résultats demanderaient à être confirmés par des mesures effectuées dans les bords des fonds qui présentent certainement des déformations plus importantes.

8 Le découpage :

8.1 Définition :

Le découpage de tôles est une opération courante réalisée par les entreprises de la mécanique pour produire des pièces métalliques à partir de tôles. Son but est de séparer partiellement ou complètement des zones de la tôle de façon à obtenir la forme voulue et/ou de les préparer pour d'autres opérations comme le pliage ou l'emboutissage.

Pour les moyennes et grandes séries, le découpage à la presse est le procédé de découpage des tôles le plus ancien et reste encore, et de loin, le plus productif. La plupart des pièces métalliques qui composent une automobile sont découpées selon ce procédé : les pièces visibles, dites d'aspect (capots, ailes, côtés de caisse, haillons...), et plus ou moins cachées de la structure (longerons, pieds milieu, charnières, colonnes de direction...). Ce procédé est également utilisé dans les secteurs de la quincaillerie (rondelles, mécanismes de portes et fenêtres...), de l'électroménager (tambours de machines à laver, capotages...), du bâtiment (caillebotis, pièces d'échafaudage...), des composants électriques et électroniques (boîtiers d'autoradios, connexions, supports de circuits imprimés...).

La plupart du temps, le découpage accompagne une opération de formage comme l'emboutissage ou le pliage. Dans certains cas, c'est la seule ou la principale opération réalisée (cas des rondelles ou des pièces plates de connectique).

8.2 Le Cisailage :

8.2.1 Principe du cisailage :

On réalise la séparation totale ou partielle d'un élément métallique à l'aide de deux lames dont l'une au moins est mobile (Fig. 111).

Sous l'action de la contrainte imposée par la partie active des lames, une déformation élastique se produit, puis un glissement avec décohé sion du métal suivant 2 directions formant un angle. Cet angle, ainsi que la profondeur de décohé sion varient suivant la nuance du métal et son état (Fig. 111.a). Le profil de la face cisailée peut être amélioré en améliorant la direction du glissement par le jeu (Fig. 111.b). Ceci a lieu au détriment de la perpendicularité de la coupe. Ce paramètre est pris en considération pour les métaux peu fragiles, la décohé sion finale n'ayant pas d'effet secondaire.

Pour les métaux fragiles, la décohé sion peut amorcer une fissuration longitudinale (sens des fibres) nécessitant un réglage précis du jeu.

On prend généralement :

- $\beta = 4^\circ$ pour les aciers durs ;

• $\beta = 6^\circ$ pour les aciers doux et est légèrement diminué par l'affûtage ($90^\circ > \theta > 50^\circ$) suivant la dureté du métal à cisailer.

On modélise l'opération de cisailage à un couple tendant à faire basculer la pièce (action de F) d'où la force F_1 . Le métal intercalé introduit une contrainte F_2 qui produit l'arrachement et a une incidence sur les dimensions du produit découpé.

Pour le cisailage avec des lames parallèles on peut évaluer l'effort F nécessaire pour la coupe à :

$$F = L_1 \cdot e \cdot R_c$$

Ce qui donne environ $F_1 = 45\%$ de F.

Avec : R_c (la résistance au cisaillement) égale à $0,8 \cdot R_m$ (R_m Résistance maxi à la traction de la matière).

Pour le cisailage avec un angle des lames, l'effort est considérablement moindre étant donné une section de cisailage plus faible. L'effort peut donc se traduire par la formule :

$$F = \frac{e^2 \cdot R_c}{2 \cdot \tan \alpha}$$

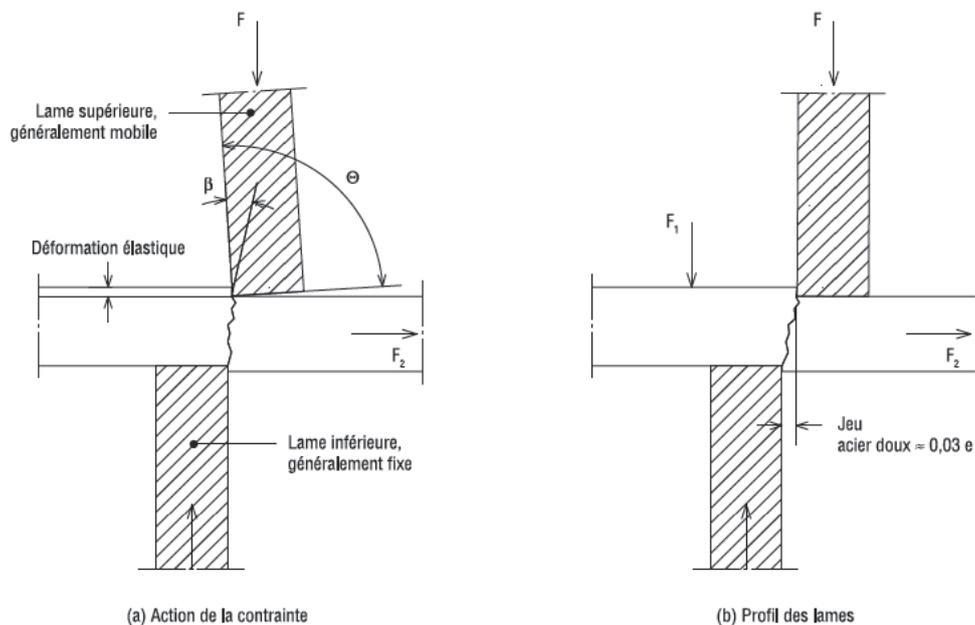


Figure 111. Principe de cisailage

8.2.2 Mécanismes du découpage :

Le découpage à la presse suit un mécanisme différent de celui des autres procédés de découpage (thermique et abrasif). C'est un procédé purement mécanique, réalisé sans apport de chaleur et engageant un mécanisme de cisaillement de la tôle. Ce cisaillement est provoqué par l'action de deux lames de découpage dont l'une agit en opposition au mouvement de l'autre et dont

l'espace entre les arêtes de coupe (jeu) détermine l'intensité des contraintes de cisaillement (figure 111.b).

On distingue habituellement trois phases dans l'opération de découpage (figure 112) :

- **phase 1** : indentation du poinçon dans la tôle. Le poinçon, qui commence à pénétrer dans la tôle, crée un bombé à l'entrée du bord découpé ;
- **phase 2** : cisaillement plastique. Le poinçon commence à créer une surface sur le bord découpé, parallèle au flanc du poinçon. Cette surface est d'aspect lisse ;
- **phase 3** : rupture. Avant que le poinçon n'ait traversé complètement l'épaisseur de la tôle, une fissure s'initie au niveau des arêtes de coupe de l'outil. Ces fissures se rejoignent rapidement pour créer la rupture. La zone correspondante du bord découpé est appelée « zone arrachée ».

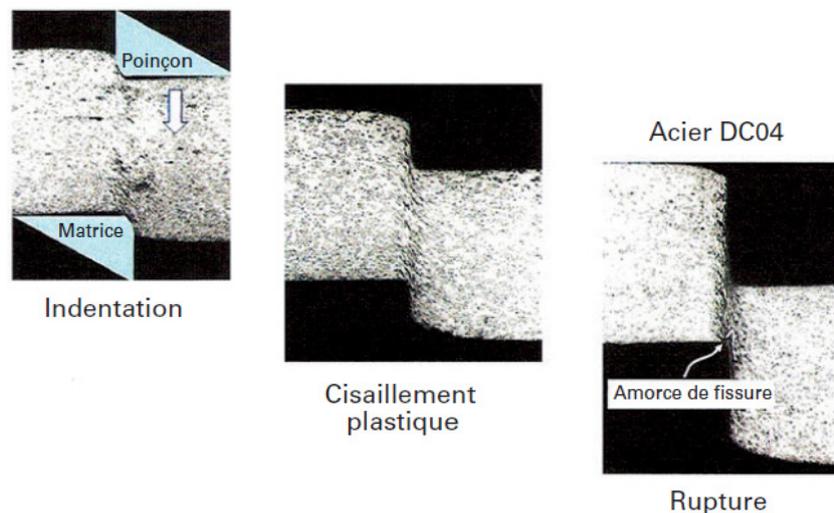


Figure 112. Phases dans l'opération de découpage

Les différents cisailages – On distingue :

- Le mode de cisailage (Fig. 113) avec des lames parallèles (Fig. 113.a) où le cisailage est simultané sur toute la longueur et on obtient une coupe généralement rectiligne. Effort important ;
- et le cisailage avec des lames obliques (Fig. 113.b) où il faut un angle important puisque F décroît. Si $\alpha > 15^\circ$ le métal peut se dérober (Fig. 113.c). Il faut trouver un compromis afin que la partie découpée et fortement fléchie ne soit pas trop déformée (Fig. 113.d).

Avec trois types de cisailles :

- A lames longues : type cisailles guillotines avec $2^{\circ}30 < \alpha < 6^{\circ}$ pour les coupes rectilignes. L'angle le plus faible ne déformant pas la longueur découpée si F_2 (fig 111.a) est annulée par une largeur de bande suffisante ;
- à lames étroites avec $\alpha = 15^{\circ}$ pour les coupes de formes curvilignes ou sinueuses avec une avance constante et une coupe progressive. Pour une épaisseur constante, la diminution de L (la longueur de la coupe) réduit la surface de contact (tôle/la lame) facilitant ainsi une oscillation de la pièce qui est libérée à chaque point mort haut de la machine et ainsi la découpe d'une pièce autre que rectiligne (cisaille à lame courte) ;

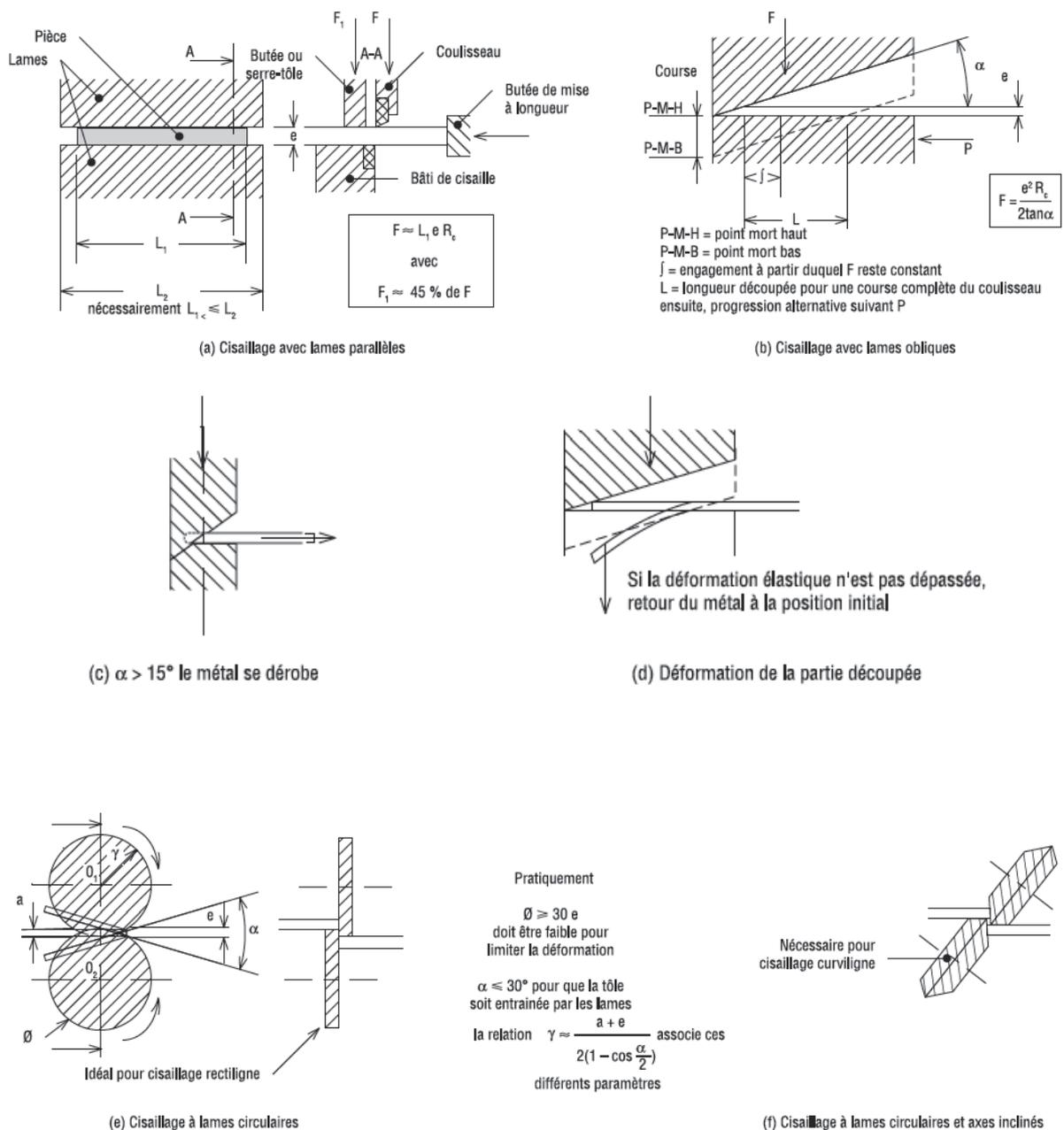


Figure 113. Les différents cisailages

- à lames circulaires (Fig. 113.e) : les lames sont rotatives et motrices. Pour un diamètre convenable des lames et bien réglé, le métal à découper est entraîné et cisailé en continu. Leurs axes peuvent être parallèles ou inclinés par rapport au plan de coupe (Fig. 113.f).

8.3 Le Poinçonnage :

8.3.1 Principe

Le poinçonnage consiste à forcer un poinçon à travers le métal. Il se détache de la pièce un morceau de forme vaguement tronconique appelé débouchure ou riblon (Fig. 114).

La forme irrégulière du trou oblige à percer à un diamètre de 1 à 2 mm supérieur au passage d'un rivet ou d'un boulon qui doit le traverser. C'est un cisailage sur un contour fermé. La section du poinçon a la forme de l'ajour à poinçonner ou de la pièce à découper :

- la tôle est mise en position entre la matrice d'une part et le poinçon et le serre-flan d'autre part (Fig. 114.a) ;
- la tôle est serrée entre la matrice et le serre-flan (Fig. 114.b) ;
- découpage de la tôle par le poinçon (Fig. 114.c) ;
- le poinçon remonte avant le serre-flan qui fait fonction de dévêtitseur : il empêche la tôle de remonter avec le poinçon et de fléchir. Enfin, le serre-flan remonte pour effectuer un autre cycle (Fig. 114.d).

Sauf moyens spéciaux, le poinçonnage, qui demande une pression considérable, est utilisé que sur des tôles d'épaisseur dépassant rarement 15 mm. C'est un procédé souvent utilisé car il est rapide et peu coûteux. Les efforts exercés sur le métal produisent un écrouissage local, parfois des amorces de déchirures et toujours des contraintes résiduelles qui réduisent sa résistance aux charges. On peut supprimer les défauts dans le métal provoqués par le poinçonnage en ôtant la zone détériorée par un alésage à la fraise qui élargit le trou.

Ce procédé est simple et rapide. Le poinçonnage permet la réalisation de pièces très diverses. Il est cependant réservé aux grandes séries. Mais l'investissement est élevé pour un outillage spécifique et fragile.

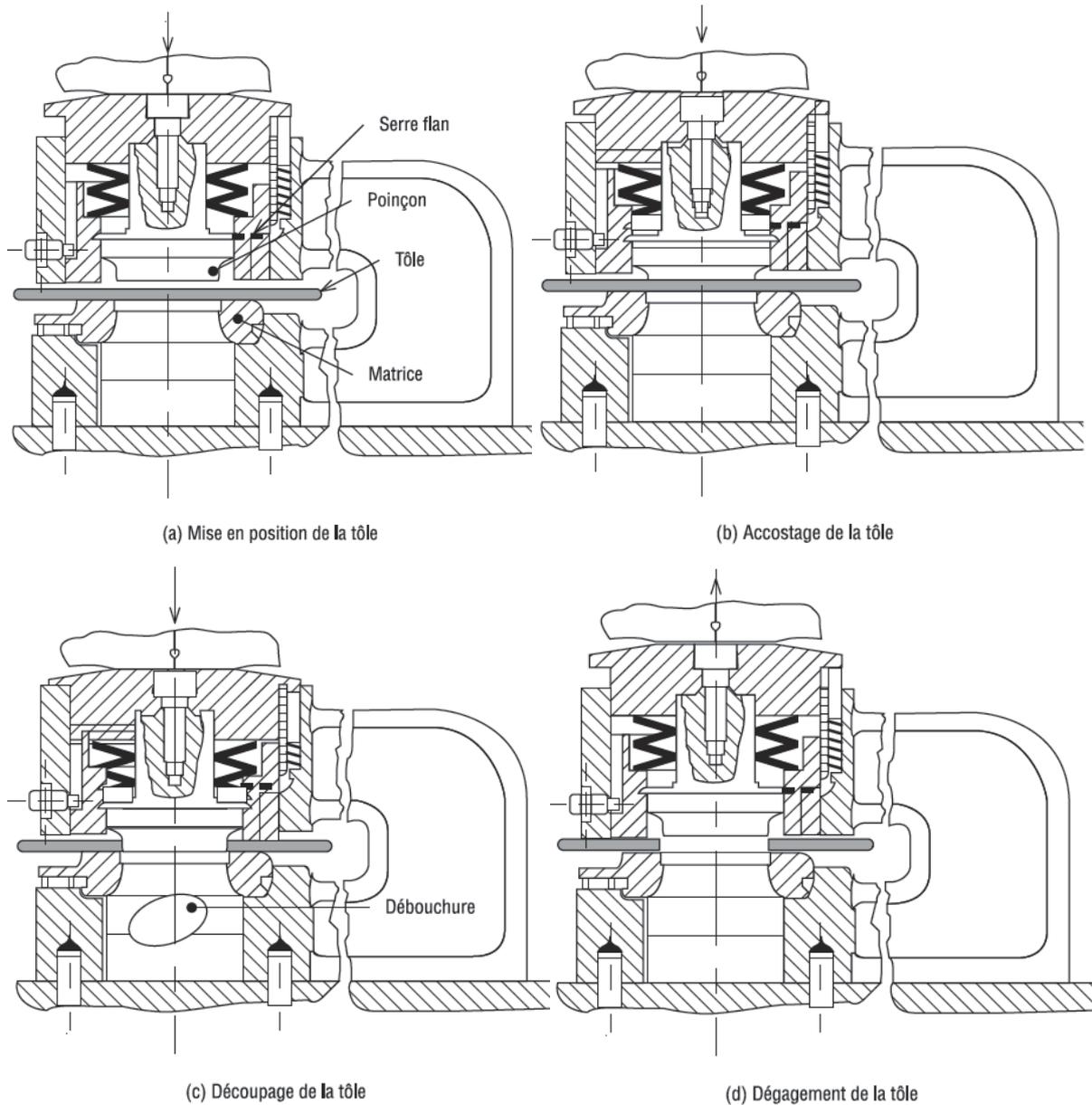


Figure 114. Principe du poinçonnage

8.3.2 Rapport épaisseur et diamètre

La résistance à la déformation d'une pièce dépend des matériaux, de la température, de la déformation elle-même ainsi que de la vitesse à laquelle s'effectue l'opération (Fig. 115).

Si nous nous en tenons uniquement aux matériaux, l'effort de poinçonnage F_p est égal au produit de la section cisailée par la résistance au cisaillement soit :

$$F_p = \text{périmètre} * \text{l'épaisseur} * R_c$$

Avec : $R_c = (0,4 \text{ à } 0,8) \times R_m$ suivant la nature du matériau à cisailier.

La résistance du poinçon (effort) est égale à la section du poinçon par la résistance élastique (contrainte) de celui-ci soit :

$$R_p = \text{section} * R_e$$

Pour que le poinçon résiste sous la charge de poinçonnage il faut nécessairement que la résistance du poinçon soit supérieure à celle nécessaire au poinçonnage. Et donc pour un poinçon rond :

$$\frac{\pi \cdot D^2}{4} \times R_e \geq \pi \cdot D \cdot e \cdot R_c$$

$$R_p > F_p$$

Nous pouvons en déduire que :

$$D \geq \frac{4 \cdot e \cdot R_c}{R_e}$$

Dans la pratique, on s'efforcera de ne jamais poinçonner à un diamètre inférieur à l'épaisseur. Comme pour le cisailage, il y a un jeu à respecter entre la matrice et le poinçon. Celui-ci est fonction de l'épaisseur de la pièce et de la résistance à l'élasticité des outils.

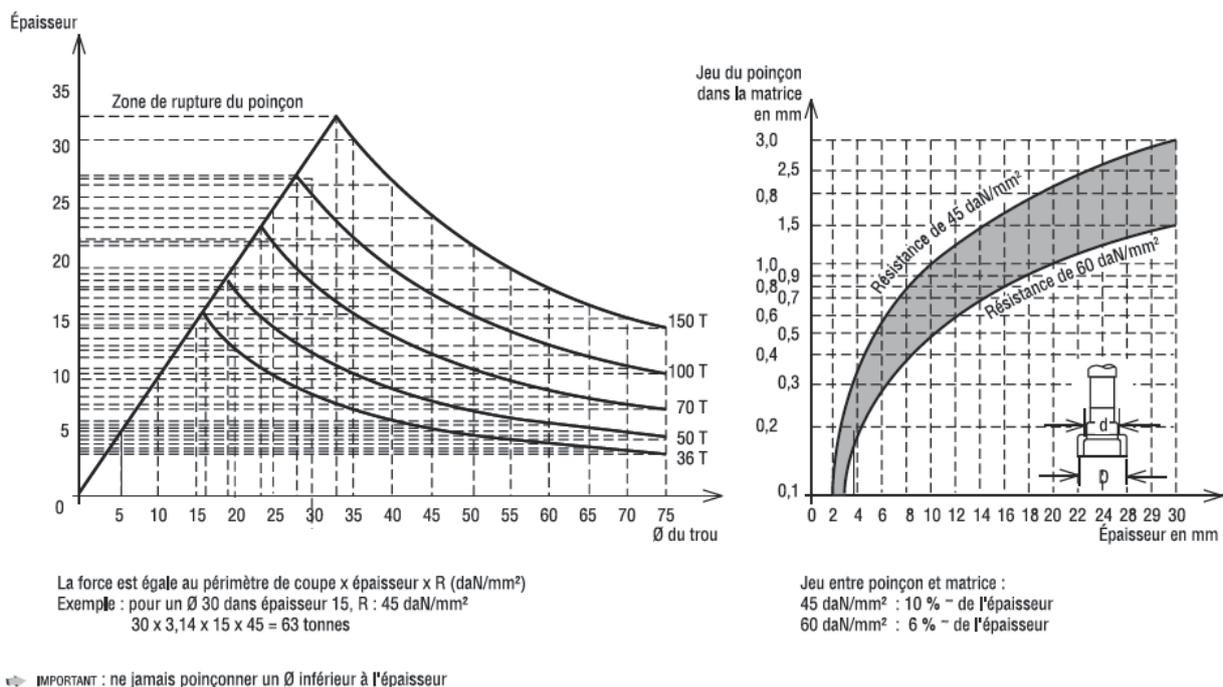


Figure 115. Rapport entre épaisseur et diamètre-jeu

8.3.3 Domaine d'application :

Le domaine est extrêmement vaste (Fig. 116) : quincaillerie, petite mécanique, appareillage électrique, automobile...

La mise en oeuvre de ce procédé exige l'observation de règles (Fig. 116.a) pour le tracé des pièces. Le non-respect de ces directives se fait au détriment de la qualité des pièces et de la

longévité des outils. Ces derniers sont fabriqués en aciers spéciaux traités du type (X 200 Cr 12 ou 100 Cr 6), ils sont donc durs (HRC = 60), mais fragiles.

L'emploi d'outils combinés ou d'outils à suivre permet de réaliser des pièces complexes, de qualité constante à chaque coup de presse (Fig. 116.b et 116.c). Ce procédé associé à un transfert automatique de la bande de tôle est très productif à condition d'organiser convenablement les découpes sur cette bande, ainsi que l'approvisionnement de la machine.

L'organisation des découpes doit être telle que le coefficient d'utilisation (surface pièce/surface bande) soit le plus grand possible, sans toutefois nuire à la nécessaire bonne tenue du déchet au cours du travail (Fig. 116.d).

L'alimentation des presses se fait soit :

- par des flancs prédécoupés de 2 m sur 1 m ;
- soit par des bobines de tôle de largeur prédécoupée à mesure sur plusieurs centaines de mètres de long.

Dans les deux cas la tôle est entraînée sur la table de la presse par des rouleaux (Fig. 116.e).

Tous les matériaux rigides disponibles en feuille et non fragiles peuvent être poinçonnés.

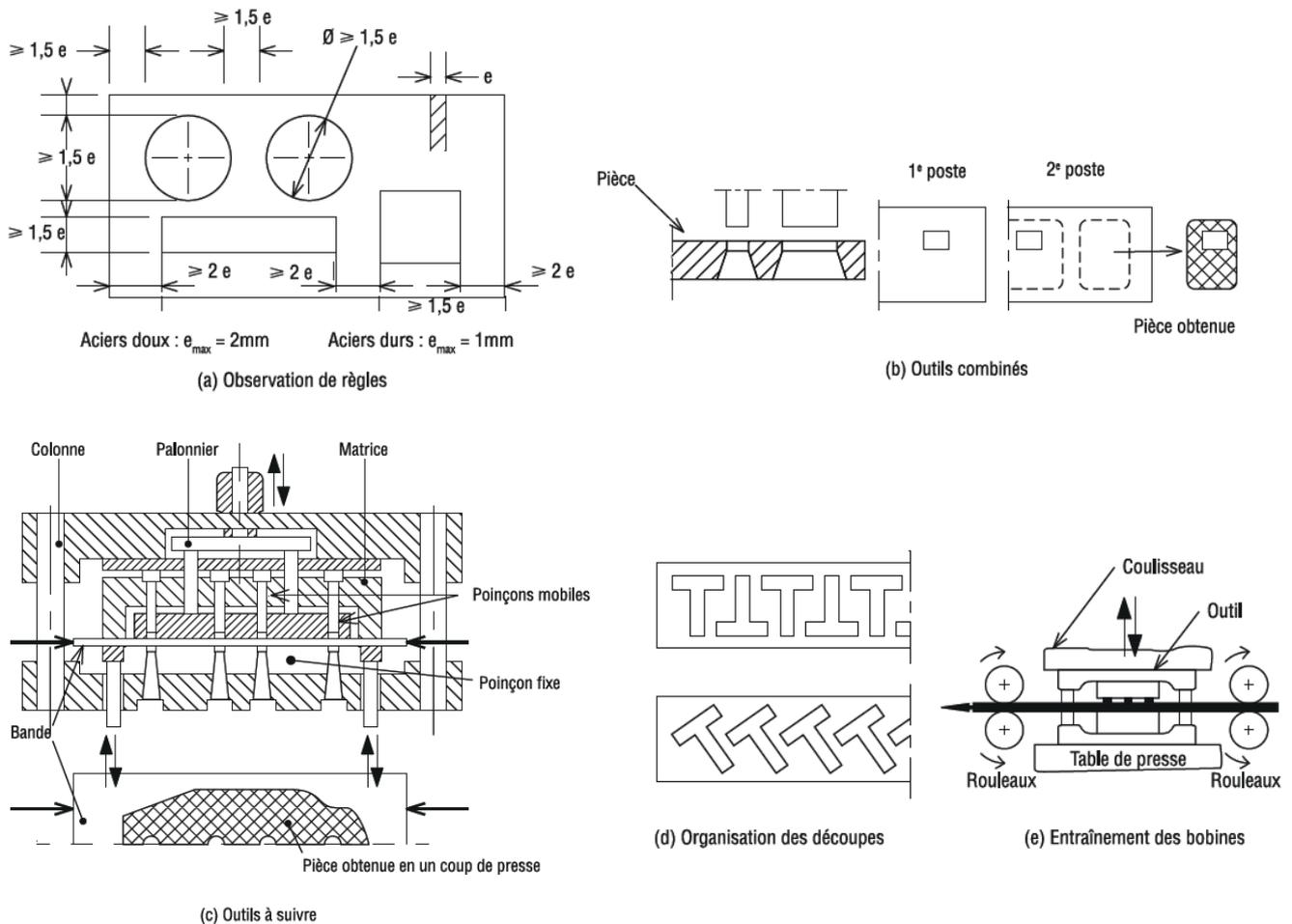


Figure 116. Application du découpage par poinçonnage

8.4 Autre application :

Le grugeage – Principe identique au poinçonnage, les grugeoirs permettent de réaliser économiquement les éléments de nombreux assemblages de constructions métalliques. C'est généralement avec une presse, (presse universelle) composée de cisailles et du poinçonnage que les opérations permettant d'obtenir les pièces sont effectuées (Fig. 117).

L'opération consiste à ôter, à l'extrémité d'une barre et sur une faible longueur, une partie du profil (Fig. 117.a). Ces opérations sont parfois nécessaires au niveau des assemblages et permettent un gain de temps. C'est une opération qui peut aussi être réalisée par découpe au chalumeau sur des profils plus importants (Fig. 117.b).

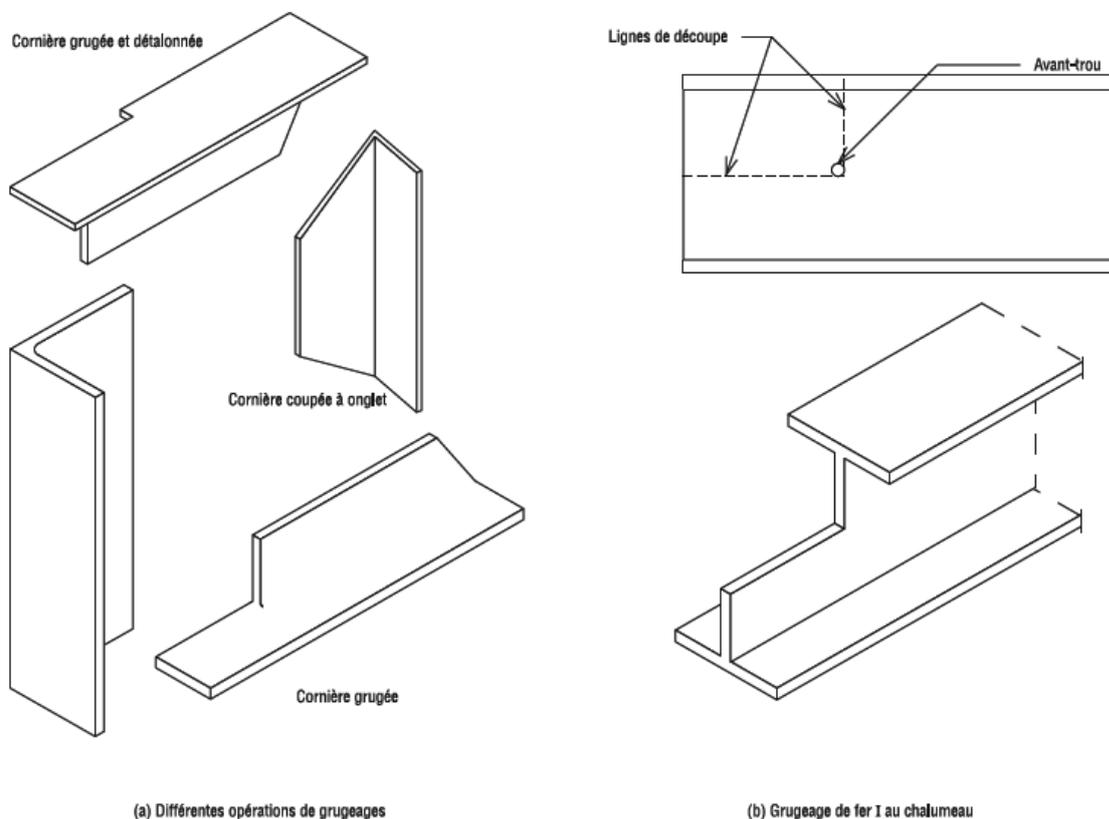


Figure 117. Le grugeage

9 Estampage :

9.1 Définition :

La mise en forme de l'acier par déformation plastique à chaud est un procédé industriel d'obtention de pièces mécaniques, aussi appelé : forge par estampage. Il est utilisé aussi bien en petites qu'en moyennes et qu'en très grandes séries de pièces, dont la masse peut varier de quelques grammes à plusieurs centaines de kilogrammes.

La pièce ainsi fabriquée porte le nom « d'avant-produit », ce qui la situe entre les « demi-produits » fabriqués en sidérurgie (par exemple les blooms, les barres ou les billettes) et les « produits » prêts à être montés dans un sous-ensemble ou un ensemble mécanique (par exemple une bielle dans un moteur thermique ou un pignon dans une boîte de vitesse).

La fabrication consiste à chauffer à haute température, environ 1 250 °C, un morceau de demi-produit d'une géométrie bien déterminée, appelé « lopin », puis de le placer entre des outillages appelés « matrices », dans lesquels est usinée en creux une « gravure » qui représente exactement la forme de l'avant-produit brut à obtenir. Une machine-outil d'estampage agissant par choc ou par pression exerce sur les outillages une force telle que le lopin est contraint d'épouser les formes de la gravure. Généralement, sur la périphérie de la gravure, dans l'outillage on usine aussi un cordon de matrice qui va former à la périphérie de la pièce estampée, un « cordon de bavure ». Cette bavure permet la maîtrise de la géométrie de la pièce finie et le cordon, qui ceinture la pièce, est ôté, le plus souvent à chaud, par cisailage sur une machine-outil annexe appelée « presse d'ébavurage ».

La pièce brute ébavurée peut subir un traitement thermique qui lui est appliqué en fonction des caractéristiques mécaniques à obtenir. Le parachèvement est souvent composé d'un grenailage et d'un calibrage à froid.

9.2 Déformation plastique en estampage :

Pour faire de la déformation plastique, il faut que l'effort exercé sur le lopin engendre dans la pièce un état de contrainte vérifiant le critère de plasticité, à savoir que la contrainte généralisée soit égale à la contrainte d'écoulement du métal.

La figure 118 montre l'évolution de la contrainte d'écoulement, de la quantité limite de déformation et de la perte au feu, en fonction de la température. Il faut bien entendu que l'effort exercé soit inférieur à la limite d'élasticité de l'outillage. C'est le lopin qui doit être mis en forme dans l'outillage et non l'inverse.

Le lopin subit une déformation plastique plus une déformation élastique, ainsi qu'un retrait et une contraction lors de son refroidissement ; tandis que la gravure de l'outillage ne subit qu'une déformation élastique et une petite dilatation due à l'échauffement pendant le travail (300 °C

environ). Il faut prendre en compte toutes ces données pour obtenir des pièces brutes aux cotes souhaitées à l'intérieur des tolérances dimensionnelles définies par les normes.

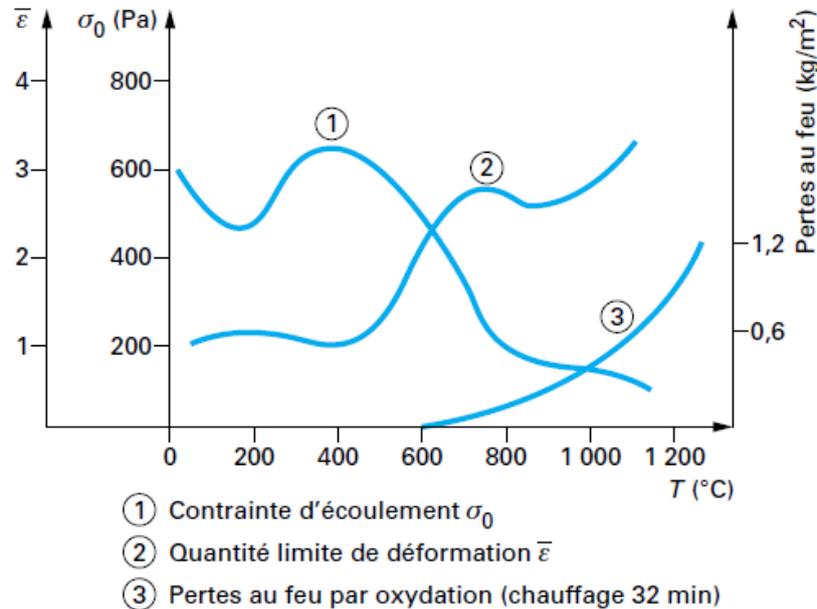


Figure 118. Évolution de la ductilité, de la contrainte d'écoulement et de l'oxydation d'un acier en fonction de la température

9.3 Techniques de fabrication :

9.3.1 Débitage :

Le volume de métal nécessaire pour faire la pièce est celui de cette dernière pièce auquel on a ajouté celui de la bavure et celui de la perte au feu. En fonction de la section du demi-produit (barres ou billettes), on calcule la longueur du lopin à obtenir. Ce dernier est généralement débité par cisailage pour les sections inférieures à celles d'un carré de 150 mm de côté et par sciage pour les sections supérieures.

L'opération de cisailage (figure 119) consiste à rompre le demi-produit qui est placé entre 2 lames, l'une fixe, l'autre mobile, coulissant l'une devant l'autre. Dans la majorité des cas, une empreinte correspondant à la forme à cisailier est usinée dans chacune des 2 lames. Le jeu entre les lames est réglable de sorte à avoir la coupe la plus perpendiculaire possible par rapport à l'arête du lopin.

Le cisailage présente l'avantage par rapport au sciage de s'effectuer à des cadences rapides et sans perte de métal. La précision de longueur, et donc de volume du lopin, est largement suffisante pour les opérations classiques. L'état de surface de la coupe est moins bon que celui du lopin scié, mais cela n'est pas du tout nuisible à l'obtention de pièces longues ou de pièces rondes débouchées. On peut, en prenant certaines précautions de réglage du jeu, améliorer cet état de surface, sinon il faut débiter les lopins par sciage.

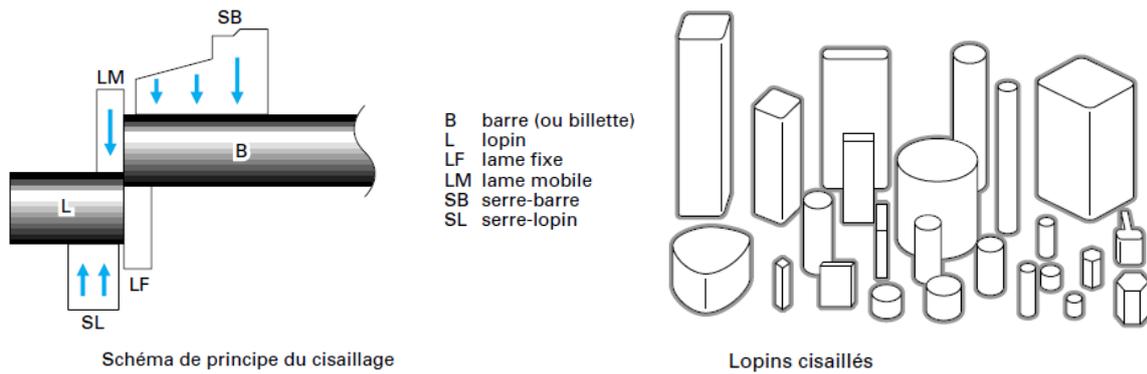


Figure 119. Opération de cisailage

9.3.2 Chauffage :

Afin de diminuer l'effort nécessaire à la mise en forme, il est nécessaire de chauffer. On trouvera figure 120 l'influence de la température sur la contrainte d'écoulement du métal estampé. Mais au cours du chauffage, les lopins se revêtent d'une couche dure d'oxydes appelée couramment « calamine ». Après estampage, on constate que cette couche ne s'est pas comportée comme le métal de base. Elle est moins déformable. La calamine a toujours une épaisseur faible mais une structure et une morphologie complexes.

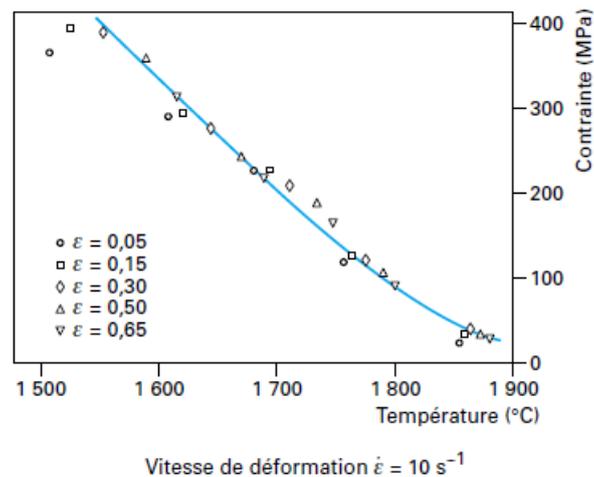


Figure 120. Évolution de la contrainte d'écoulement d'un acier en fonction de la température

Différents modes de chauffage sont utilisés :

9.3.3 Chauffage à la flamme :

Les lopins sont généralement alignés sur la sole du four. Celle-ci est fixe ou mobile, en rotation. La combustion du mélange air-gaz s'effectue dans la chambre. Une régulation automatique permet de compenser les entrées de lopins froids et les sorties de lopins chauds. Les temps de mise en route sont généralement longs : quelques heures, car le brûleur doit chauffer le four, qui lui-même doit chauffer les lopins. Les rendements énergétiques de ce type de four ont fait

de très gros progrès ces dernières années, mais ils restent inférieurs à 50 %. La vitesse de chauffage est faible.

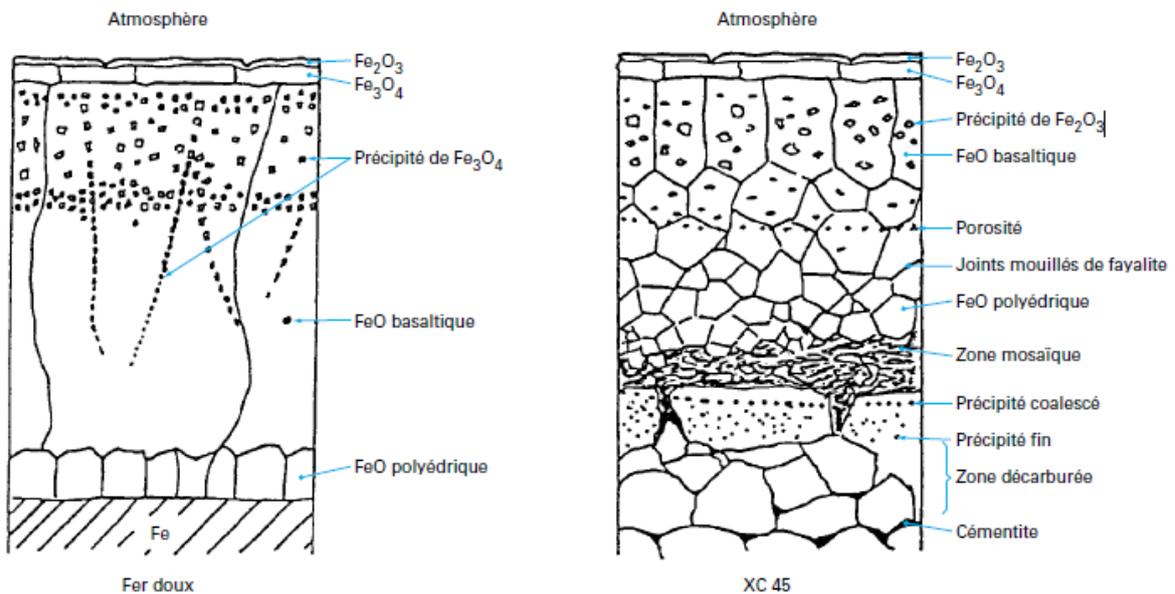


Figure 121. Coupe schématique de la calamine sur du fer doux et sur un acier XC 45

9.3.4 Chauffage électrique :

Par induction : il consiste (figure 122) à induire, dans un inducteur à l'aide d'un générateur G, à la surface du métal passant dans une bobine B créant un champ magnétique alternatif, des courants qui échauffent par effet Joule la périphérie des lopins. La chaleur ainsi créée se propage vers le centre du lopin C par conduction thermique. Ce procédé permet un chauffage rapide des lopins et limite l'épaisseur de calamine formée. Les lopins (figure 122) traversent à une vitesse constante de l'ordre de 0,2 à 5 m/min, l'inducteur selon son axe longitudinal. Cet inducteur est alimenté par un convertisseur de fréquence, lui-même alimenté en MT/BT. Les convertisseurs de fréquence sont aujourd'hui statiques à thyristors. Ils sont refroidis par un circuit d'eau.

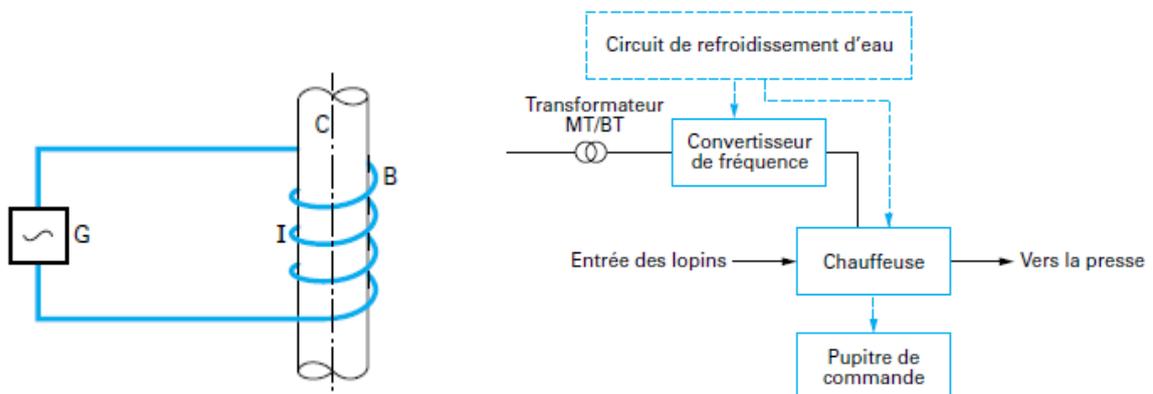


Figure 122. Principe du chauffage par induction (d'après EDF)

Les fréquences utilisées pour les aciers varient selon la section des lopins : 2 000 à 10 000 Hz pour les diamètres inférieurs à 100 mm, 500 à 1 000 Hz pour les diamètres supérieurs à 100 mm. Le rendement global des chauffeuses à induction varie entre 70 et 80 % selon le couplage réalisé entre la section de l'inducteur et celle du lopin.

Par conduction : les chauffeuses par conduction d'une puissance de 10 à 1 000 kVA ont un emploi plus spécialisé. Elles sont limitées aux lopins très allongés dont le rapport diamètre/longueur est élevé : supérieur à 8. Avec un investissement relativement faible, ces matériels permettent un chauffage encore plus rapide que les chauffeuses par induction. Le principe du chauffage par conduction est celui de l'effet Joule (figure 123). La pièce à chauffer est placée entre deux électrodes. La chaleur ainsi produite, directement à l'intérieur du lopin, confère à ce mode de chauffage une très grande efficacité énergétique : rendement voisin de 100 %. Les chauffeuses par conduction fonctionnent souvent à la fréquence du réseau. D'une manière schématique, elles comprennent : un transformateur BT/TBT, la chauffeuse proprement dite comprenant les électrodes d'amenée de courant et le système de manipulation du lopin, un système de refroidissement des électrodes et des équipements de régulation (figure 123).

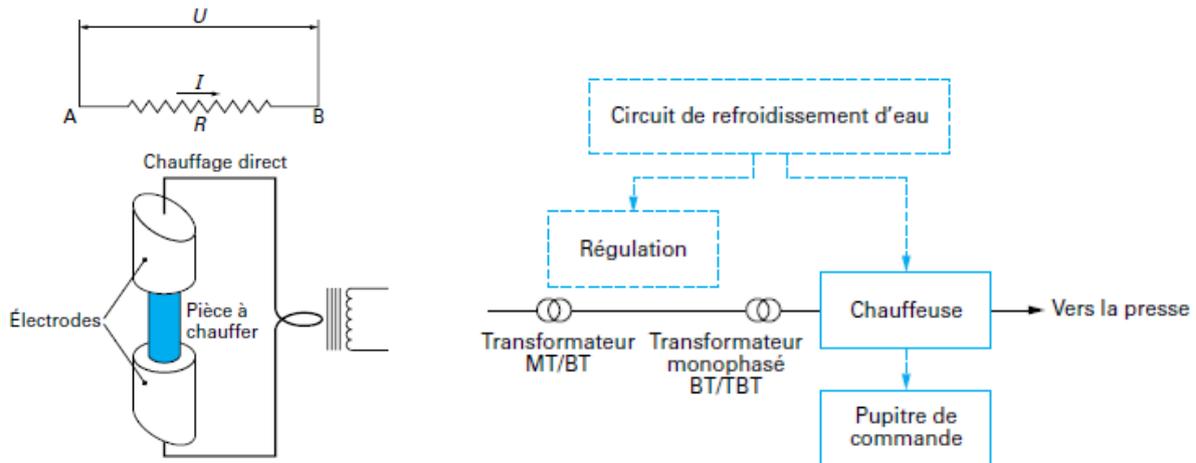


Figure 123. Principe du chauffage par conduction (d'après EDF)

9.4 Mise en forme :

Lors de l'opération d'estampage, les lopins convenablement chauffés sont mis à la forme de l'avant-produit par les gravures de l'outillage qui sont portées à une température de 150° à 200 °C maximum afin d'augmenter leur ténacité, c'est-à-dire leur résistance à la propagation brutale de fissures surtout lors du travail par chocs. Une seule exception à cette règle : le forgeage dit « isotherme » pour lequel l'outillage est préchauffé à une température voisine de celle du métal à chauffer. Cette exception se justifie dans quelques cas particuliers où les matériaux forgés ont des particularités métallurgiques qui imposent cette procédure. C'est le cas des alliages

réfractaires utilisés pour fabriquer les pales de la zone chaude des réacteurs d'avions ou des turbines à gaz.

Dans tous les cas traditionnels, le profil thermique relevé dans les matrices dépend de la zone de l'outillage, de ses dimensions et des temps de contact lopin/matrice, comme le montre la figure 124. De plus, la calamine, la lubrification et l'état de surface de l'outillage sont des paramètres qui viennent dans la pratique perturber les considérations théoriques énoncées ci-avant.

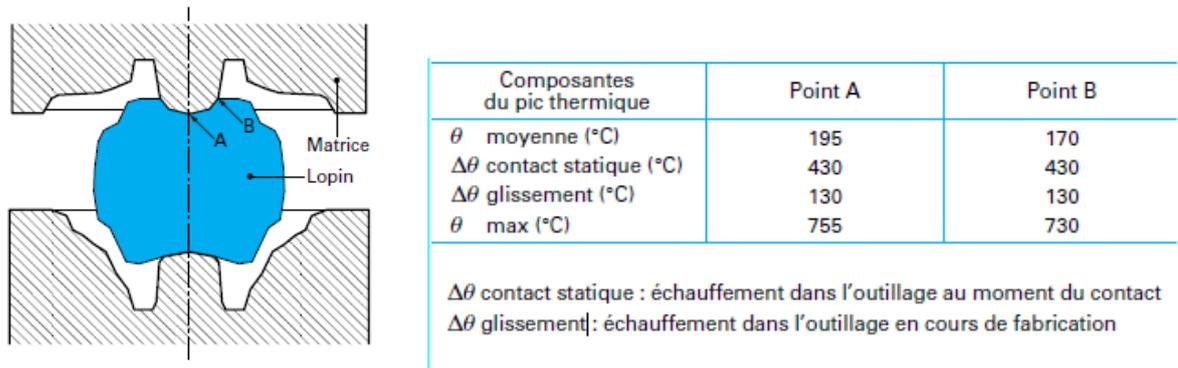


Figure 124. Température de surface de l'outillage en deux points relativement proches

9.5 Rôle du lubrifiant :

L'estampage met en jeu au moins 3 types de lubrifiants :

- gazeux : air et vapeur d'eau contenus dans la sciure de bois ;
- solide : graphite dans l'eau ou de l'huile déposé généralement par pulvérisation ;
- fluide (visqueux) : verre fondu principalement utilisé pour les pièces en alliage de titane.

Leurs propriétés thermiques sont différentes, leurs influences aussi. Tous vont remplir les trous et les interstices existants entre pièce et matrice. Ceux qui conduisent mal la chaleur joueront le rôle d'écran thermique (verres). Au contraire, ceux qui conduisent bien la chaleur joueront le rôle de joint (produits graphites) et assureront un bon contact thermique nécessaire à une bonne évacuation de la chaleur.

9.6 Machines utilisées :

Les outillages sont rapprochés l'un de l'autre :

- soit rapidement par des machines-outils de déformation par choc : marteaux-pilons (vitesse de l'ordre du m/s, durée de contact de 3 à 10 ms) ;
- soit lentement par des machines-outils de déformation par pression : presses mécaniques (vitesse de l'ordre de 0,1 m/s, durée de contact de 0,1 s) à axe vertical ou horizontal.

Chaque pièce à fabriquer pose un problème de fabrication particulier à résoudre qui se rattache toutefois à un certain nombre d'opérations élémentaires qui sont fonction de la forme finale à obtenir et du procédé d'exécution utilisé :

- les pièces pouvant être obtenues en une seule gravure : pièces simples sans grandes variations de section ou pièces cylindriques ;
- les pièces dont la mise en forme nécessite 2 gravures : pièces demandant un effort important de déformation ou pièces nécessitant une préparation de la section ;
- les pièces nécessitant une répartition préalable de l'ébauche par cambrage ou roulage ; ces opérations ayant lieu sur la même machine ;
- les pièces ayant une géométrie nécessitant une répartition de la matière à l'aide de machines annexes permettant d'obtenir des ébauches par laminage, étirage ou roulage.

Ces différentes catégories de pièces vont entraîner des choix d'outillages et de machines différents. À ces considérations techniques s'ajoutent des considérations économiques qui, en fonction de la quantité de pièces à réaliser, font que l'estampeur s'efforce toujours d'effectuer une optimisation. Il est important d'observer que dans de nombreux cas, une même pièce peut être fabriquée sur une machine-outil de choc ou sur une machine-outil de pression sans qu'il en résulte la moindre différence quant à ses propriétés et caractéristiques finales.

9.7 Cas de pièces longues :

On utilise une machine-outil de pression à axe horizontal, couramment appelée : machine horizontale à forger. Ce type de machine comprend deux matrices : une fixe et une mobile, qui serrent la barre en laissant dépasser d'un côté la zone à forger. Cette zone est mise en forme par un poinçon qui agit dans le sens horizontal normal aux matrices. On trouvera sur la figure 125, le schéma représentant les matrices et le poinçon.

Soit à réaliser la pièce de la figure 126, les règles de refoulement sont basées sur les principes suivants.

1) Il faut engager dès la première opération la totalité du volume correspondant à celui de la forme à obtenir, ce qui implique :

$$\frac{\pi \cdot d^2 \cdot L}{4} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot l}{4}$$

D'où :

$$d^2 \cdot L = D^2 \cdot l$$

Et par la suite la longueur à déformer :

$$L = \frac{D^2 \cdot l}{d^2}$$

2) On ne peut refouler en une seule passe, sans risque préjudiciable de flambement, une barre dont la longueur à déformer excède 3 fois le diamètre initial.

Si $L < 3d$, le refoulement peut se faire en une seule passe.

Si $L > 3d$, il faut envisager un ou plusieurs refoulements partiels sur une barre dont le volume engagé n'est pas fractionné ; la technique la plus couramment employée pour cette phase intermédiaire est le refoulement en bouterolles coniques.

Les dimensions des poinçons sont calculées de manière à diminuer le risque de flambage (figure 127). Le refoulement se fera progressivement par une succession de passes effectuées avec des bouterolles différentes dans des cannelures distinctes. Le nombre de passes intermédiaires est une fonction du rapport L/d initial. Les opérations intermédiaires cesseront lorsque le rapport l/d_2 sera inférieur à 3. On pourra alors procéder à la mise en forme finale.

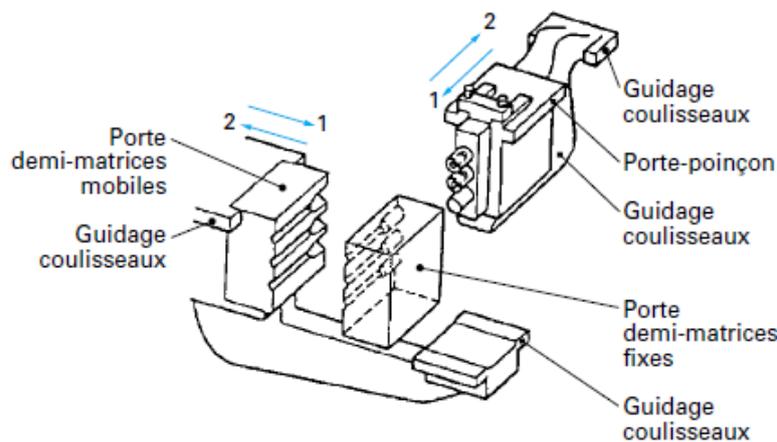


Figure 125. Schéma de principe de fonctionnement d'une machine à forger horizontale

Remarque : les dimensions des blocs matrices et de la semelle du coulisseau principal limitent à 5 au maximum le nombre de postes d'un outillage. Pour cette raison et pour que le refoulement reste envisageable économiquement, il faut que le nombre total de passes préparatoires et la finition soient au maximum égal à 5.

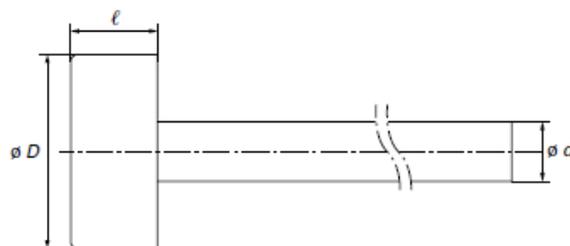


Figure 126. Pièce à réaliser

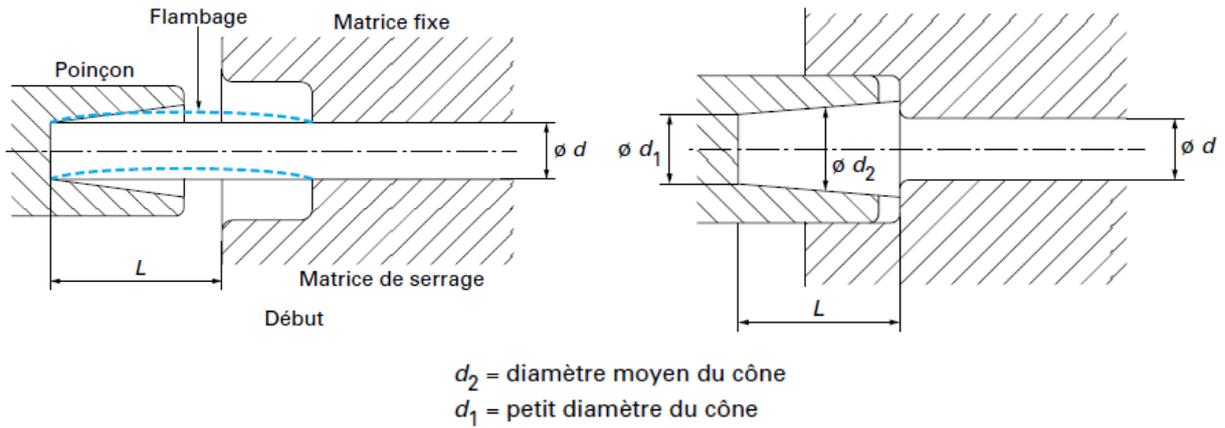


Figure 127. Début et fin du refoulement

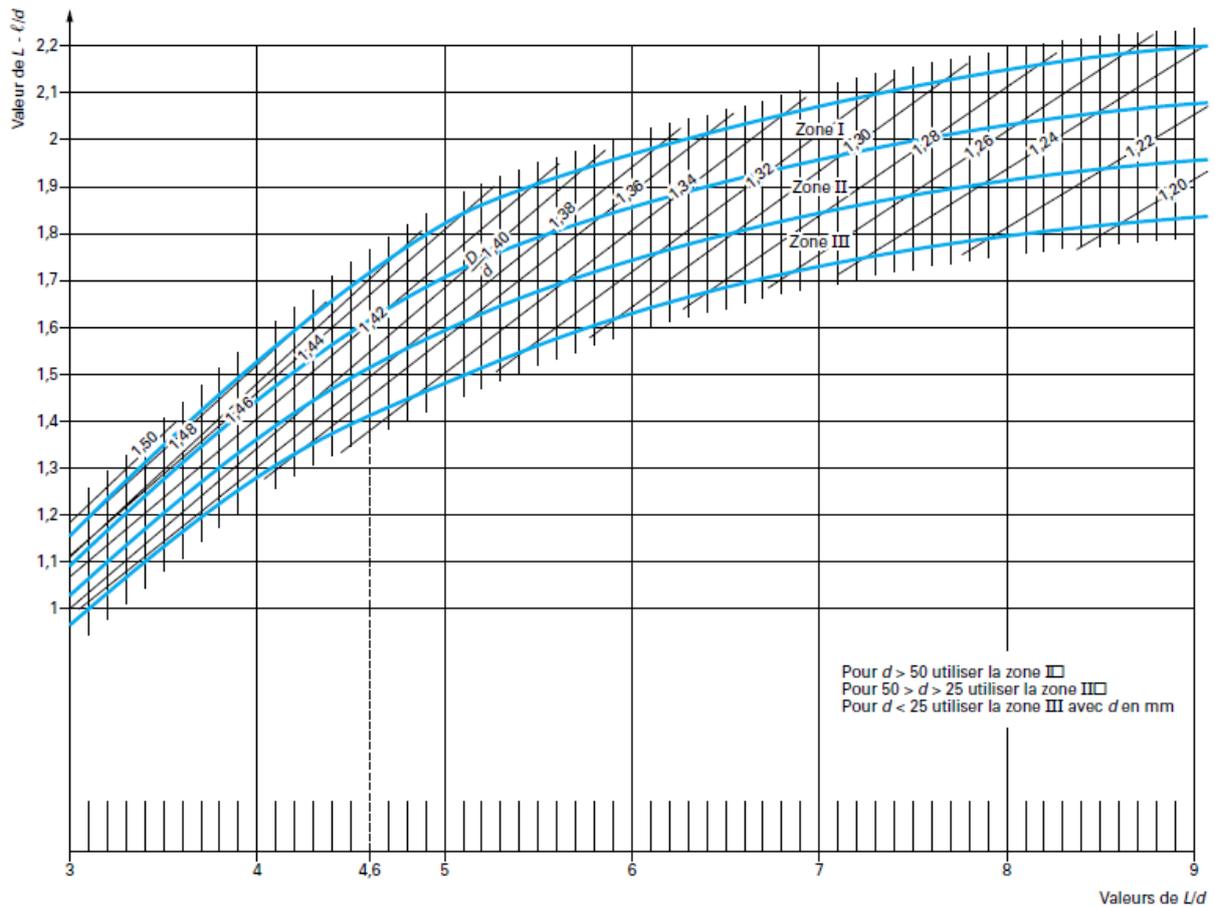


Figure 128. Abaque de calculs du refoulement

Les cônes de refoulement intermédiaires sont dimensionnés de telle manière que le petit diamètre du cône d_1 soit égal à $1,05d$.

L'abaque de la figure 128 donne à partir du rapport L/d initial ou l/d_2 consécutif à un premier refoulement conique, les valeurs des rapports D/d ($D =$ grand diamètre du cône) et $L-l/d$ qui permettront de calculer D et l , les valeurs d , d_1 et L , étant connues.

Les figures 129 et 130 et 131 donnent des exemples de fabrication de pièces réalisées sur des machines-outils de choc, de pression et horizontale, ainsi que les outillages correspondants.

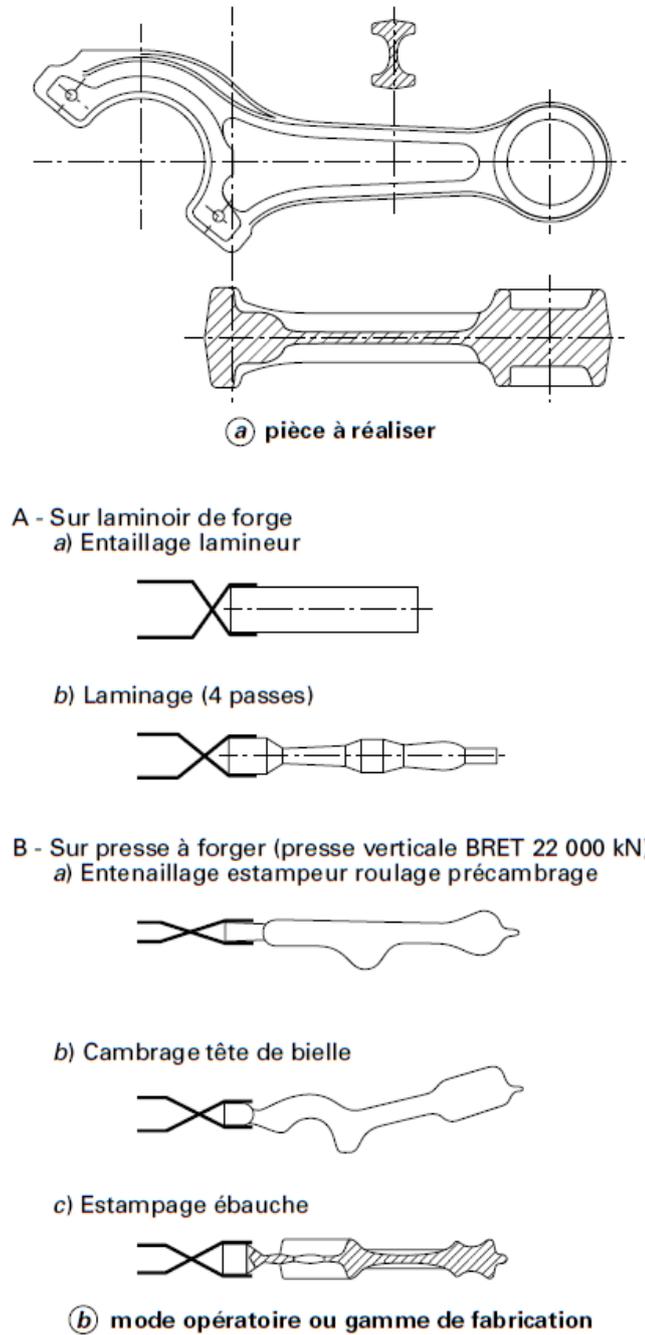
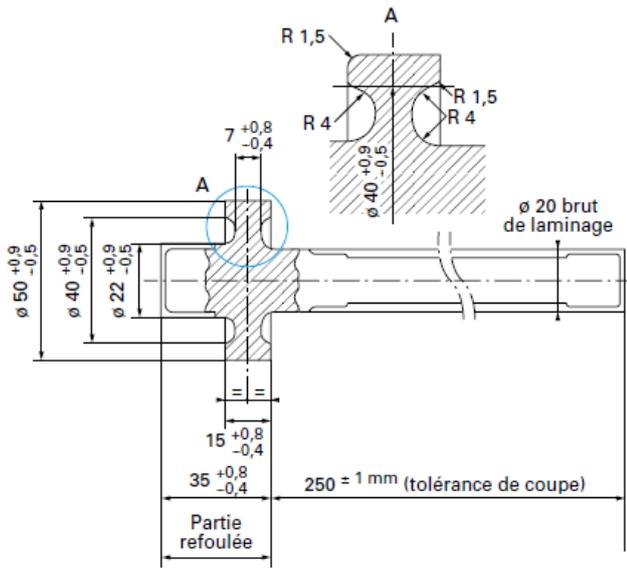
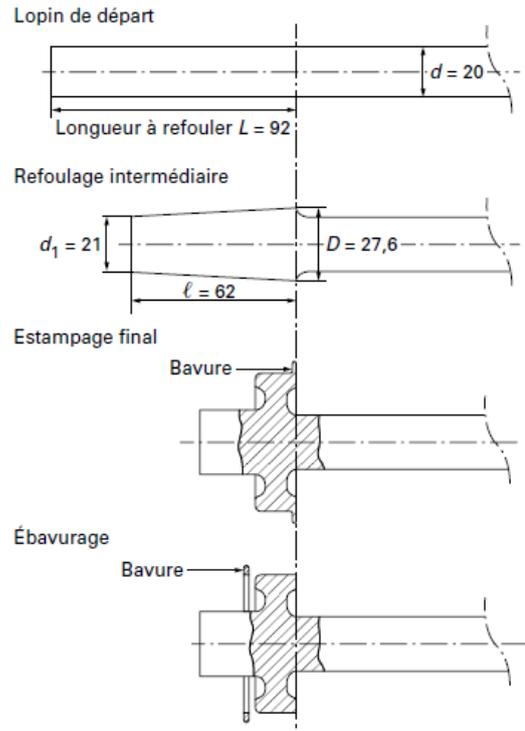


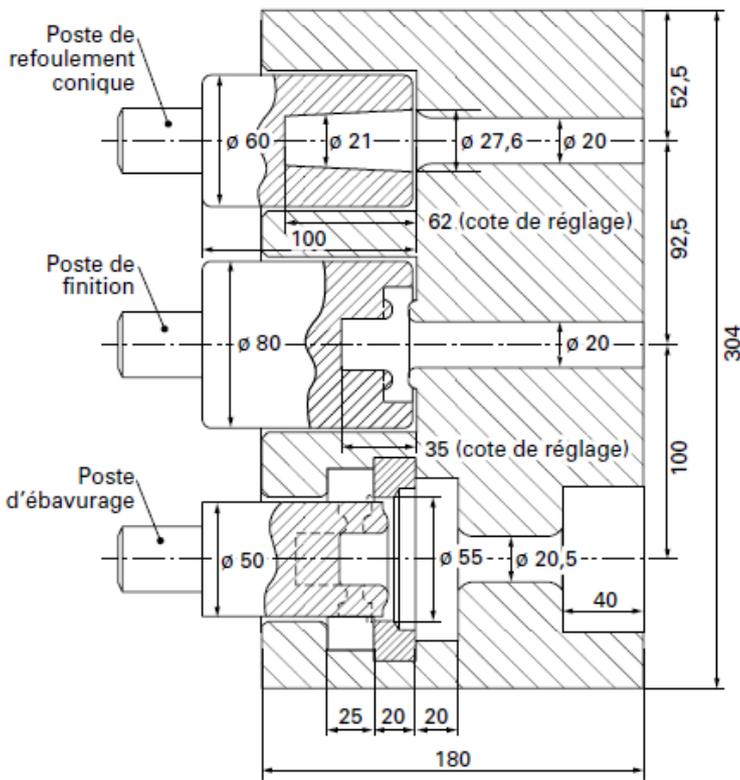
Figure 129. Exemple de bielle d'automobile fabriquée sur machine-outil de pression



(a) pièce à réaliser (cotes en mm)



(b) mode opératoire ou gamme de fabrication



(c) outillage (cotes en mm)

Épaisseur des demi-matrices : 139,5
 Matière 35 CWD 12 trempé à 950 °C (huile)
 revenu à 450 °C (réf. air) pour $R_m = 1\ 800$ à $1\ 850\ \text{N/mm}^2$

Figure 131. Exemple d'arbre à plateau fabriqué sur machine horizontale et outillage correspondant

Exemple :

Utilisation de l'abaque de la figure 128 : détermination de la gamme de forgeage de l'arbre à plateau (figure 131).

$L/d = 92/20 = 4,6 > 3$ donc il faut prévoir une phase préparatoire de refoulement en bouterolle conique.

$$d_1 = 1,05 d = 21 \text{ mm.}$$

Pour un rapport $L/d = 4,6$, l'abaque de la figure 128 nous donne par exemple :

$$D/d = 1,38 \text{ avec, } (L - l)/d = 1,5$$

D'où : $D = 27,6 \text{ mm}$ et, $L - l = 30 \text{ mm}$ soit $l = 62 \text{ mm}$

Le rapport l/d_2 ($d_2 =$ diamètre moyen du cône) étant égal à 2,55, on pourra procéder directement au formage final.

L'obtention de l'arbre à plateau nécessitera donc 3 opérations (figure 131.b) :

- un refoulement en bouterolle conique ;
- un refoulement aux formes finales ;
- un ébavurage.

9.8 Outillages :

Les matrices, poinçons, filières, lames de cisailles utilisés, présentent la particularité d'être soumis simultanément à des sollicitations intenses provenant de deux origines : thermique et mécanique. Il y a peu d'exemples industriels où les matériaux subissent des conditions de travail aussi sévères, situées le plus souvent à la limite, et même quelquefois au-delà, de ce que la métallurgie autorise, même avec des matériaux « hauts de gamme ». Ces outillages commencent à se dégrader dès le début de leur mise en service ; en conséquence ils ont une durée de vie relativement courte, de l'ordre de quelques milliers de pièces estampées seulement. Cette durée de vie est d'autant plus courte que les tolérances dimensionnelles des pièces estampées sont plus serrées. Il résulte de ce constat que la tenue des outillages est un point critique pour l'économie du procédé. Le coût des outillages représente 10 à 15 % du prix de revient d'une pièce estampée.

9.8.1 Sollicitations thermiques :

La température maximale atteinte par la surface de l'outil et la profondeur de pénétration thermique, comme le montre la figure 132, sont des paramètres essentiels de l'endommagement.

9.8.2 Sollicitations mécaniques :

Dans les cas extrêmes, les contraintes très élevées exercées lors de la fabrication conduisent à des fissurations mécaniques pouvant se présenter sous deux aspects : fissuration progressive, ou rupture brutale. Dans les autres cas, les sollicitations créent des conditions propices au

dépassement de la limite d'élasticité du matériau à la température de travail. Cela génère une plastification plus ou moins profonde de la surface (figure 133).

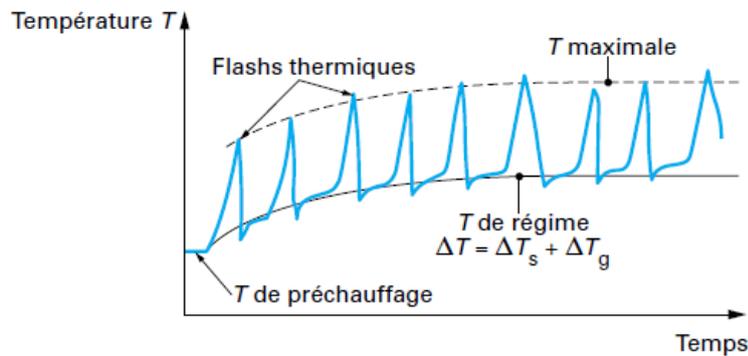


Figure 132. Cycle thermique en surface d'un outillage

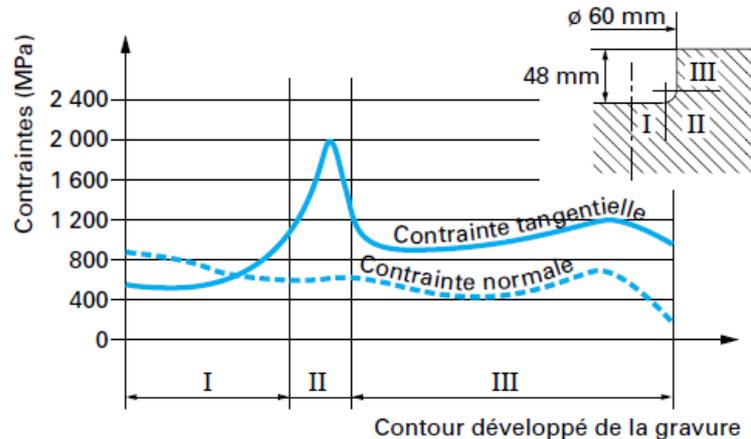


Figure 133. Contraintes tangentielle et normale sur la surface d'un outillage

Pour améliorer la tenue de l'outil, le forgeron peut faire appel à différents traitements de surface ou revêtements visant à donner une dureté élevée à la température de travail et sur une épaisseur suffisante pour résister convenablement. Le choix des compromis est résumé sur la figure 134.

L'usinage des gravures est différent suivant qu'elles vont sur une machine-outil de choc ou de pression.

Sur les machines-outils de choc, les différentes gravures : étirage, cambrage, ébauche, finition sont souvent usinées dans un même bloc (figure 135.a). Ces blocs sont généralement de grande dimension pour permettre à la surface de frappe de pouvoir absorber sans dommage la totalité de l'énergie fournie par l'engin. Cette surface est au minimum de 350 cm² par 1 000 daJ.

Les blocs sont réglés en position axiale et latérale par des accessoires : clavettes et grains de centrage (figure 135.b).

Type de machine	Profondeur de pénétration thermique	Température superficielle		
Presses hydrauliques	Élevée > 1 mm	Superalliages massifs ou rechargement		
Presses mécaniques	Moyenne < 1 mm	Nitruration ou équivalent		
Pilons	Faible < 0,030 mm	Dépôts durs minces	Dépôts durs minces stables à chaud	Dépôts durs minces très stables à chaud
		Faible < 500 °C	Moyenne de 500 à 700 °C	Élevée > 700 °C

Figure 134. Choix des traitements ou revêtements superficiels en fonction des sollicitations thermiques

Sur les machines-outils de pression, les gravures sont généralement usinées dans des blocs plus petits qui sont soit insérés dans un ensemble appelé porte-insert, soit fixés indépendamment les uns des autres dans un porte-matrices. Cette technologie permet de changer les gravures usées indépendamment les unes des autres. Par ailleurs, le cadencement et le coût sont à prendre en considération. Une machine-outil de pression a un coût horaire (taux de section) environ 3 fois plus élevé que celui d'une machine-outil de choc équivalente. Il apparaît peu rentable de faire les ébauches sur ces machines.

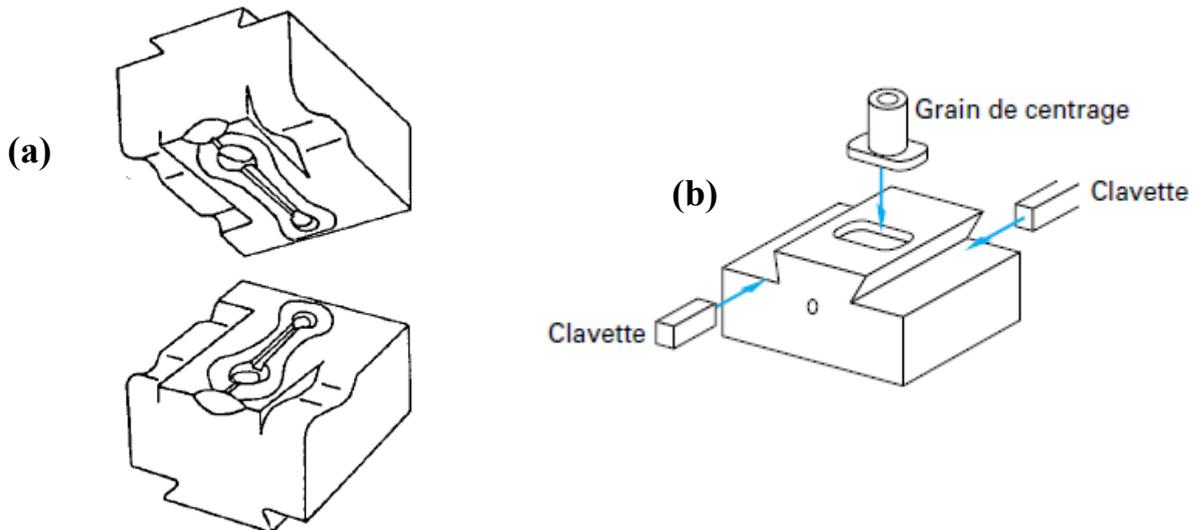


Figure 135. (a) Bloc matrice pour machine-outil de choc, (b) Clavettes et grain de centrage

On a donc souvent recours, lorsque l'importance de la série le permet, à des machines annexes telles que les laminoirs ébaucheurs à retour (figure 136). Ces machines-outils sont constituées de

2 cylindres tournant en sens opposé. On fixe sur ces cylindres des outillages appelés segments de laminoirs dans lesquels est gravé en creux la forme d'ébauche à réaliser. Ces segments réalisent un rétreint sur tout ou partie de la longueur du lopin. Si ce rétreint doit être important il faut faire plusieurs passes, conformément à la figure 28.

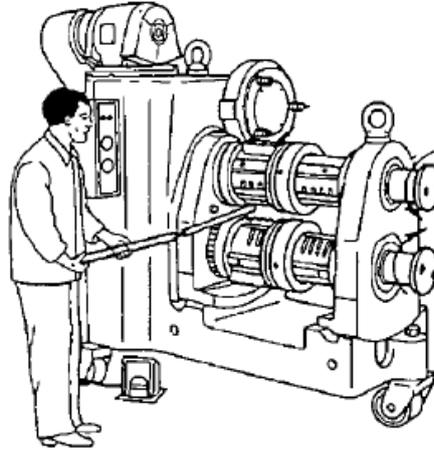


Figure 136. Laminoir ébaucheur à retour

Section de départ	 ou 	Forme obtenue	Taux maximal de réduction à chaque passe (%)	Allongement
1 ^{re} passe		Losange	~ 50 %	~ 2
2 ^e passe		Carré	35 %	~ 1,55
3 ^e passe		Losange	~ 45 %	~ 1,8
4 ^e passe		Carré	35 %	~ 1,55
Total cumulé			~ 88 %	~ 8,6

Figure 137. Taux de réduction maximale de la section obtenue sur laminoir ébaucheur à retour

9.9 Parachèvement :

Au-delà du simple grenailage dit de « nettoyage » des pièces estampées, le parachèvement de ces dernières consiste en une opération de calibrage. C'est un procédé de mise à épaisseur des pièces qui consiste à aplatir certaines parties de celles-ci entre 2 blocs plats, dont les faces sont parallèles (figure 138). Ils sont fixés l'un au sommier de la presse hydraulique, l'autre au coulisseau. Cette mise à épaisseur permet d'obtenir des tolérances d'épaisseur beaucoup plus serrées que celles obtenues brutes de forgeage, comme le montre la figure 139.

La pression moyenne de calibrage doit-être supérieure à la stricte limite d'élasticité. Par sécurité, on prendra la valeur de la charge à la rupture R_m . Si l'on veut tenir compte de la géométrie, on peut prendre comme pression moyenne :

$$p = R_m \left(\frac{1 + D}{10H} \right)$$

Avec :

p (daN/mm²) pression de calibrage,

R_m (daN/mm²) résistance à la rupture de la pièce,

D et H (mm) diamètre et hauteur de la partie à calibrer.

La force F est le produit de la pression par l'aire calibrée S :

$$F = p \times S$$

Les tolérances obtenues en calibrage dépendent de la surface à calibrer. On trouvera tableau 12 les valeurs couramment admises.

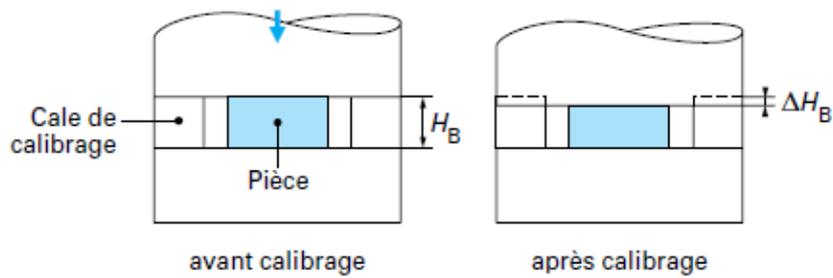
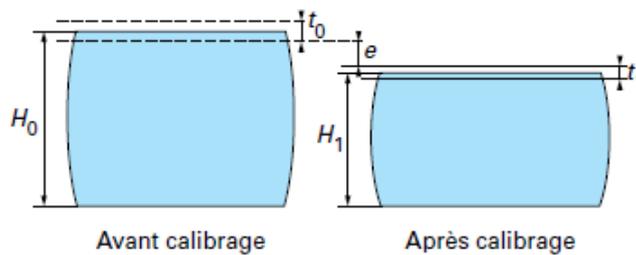


Figure 138. Calibrage d'une partie de pièce estampée



avant : la pièce a une hauteur H_0 comprise dans un intervalle de tolérance : t_0

après : elle doit avoir une hauteur H_1 comprise dans un intervalle de tolérance : $t_1 < t_0$

Figure 139. Mise en épaisseur par calibrage

Surface à calibrer (cm ²)	Tolérances (mm)
10	±0,1
20	±0,15
40	±0,20
70	±0,30
100	±0,40

Tableau 12 : Valeurs de tolérances couramment admises en calibrage

Chapitre III

La fonderie

Chapitre III : La fonderie

1 Introduction :

L'opération de moulage consiste à fabriquer un moule, généralement en matériaux réfractaires, qui porte l'empreinte en négatif de la pièce, cette empreinte étant obtenue à partir d'un modèle reproduisant la pièce à fabriquer.

L'opération de moulage est une des plus importantes du processus industriel de la fonderie. Elle détermine en effet, d'après le modèle, les formes de la pièce à couler, ses dimensions et leur précision, ses états de surface, son refroidissement, et joue un rôle prépondérant sur de très nombreux paramètres influant sur sa qualité. C'est aussi, avec le noyautage, l'opération qui entraîne les coûts les plus élevés dans les différentes opérations de fabrication. À titre d'exemple, dans des productions de grandes séries, les opérations de moulage-noyautage représentent fréquemment 40 % environ des prix de revient hors matière (moulage 30 %, noyautage 10 %).

Il convient donc que le choix d'un procédé de moulage soit fait avec le maximum de précaution pour ne pas pénaliser les productions futures, tant en qualité qu'en prix de revient.

Les procédés de moulage ont chacun des caractéristiques bien précises d'emploi qui les destinent préférentiellement à certain type de production (pièces unitaires, de moyennes ou grandes séries, en métaux ferreux, non ferreux, pièces de plus ou moins grandes précisions, etc.), ce qui nécessite, au moment du choix, de bien connaître les performances et les prix de revient de chacun des procédés possibles. Il faut notamment prendre en considération :

- la facilité de préparation et de mise en oeuvre des sables et des liants ;
- la durée de vie des sables préparés ;
- la bonne aptitude au stockage ;
- la perméabilité des sables moulés permettant une évacuation facile et rapide des gaz provenant de l'empreinte, du métal, des liants et des additifs éventuels, notamment pour les noyaux ;
- la réfractarité et la bonne tenue à la chaleur au moment du remplissage de l'empreinte par le métal liquide ;
- les bonnes caractéristiques à froid et particulièrement :
 - une résistance à la compression suffisante pour les moules,
 - des résistances au cisaillement, à la traction assez élevées pour éviter des ruptures du sable au moment du démoulage,
 - une bonne résistance à la flexion (pour les noyaux),
 - une absence de variations dimensionnelles pendant la prise (retrait ou gonflement),

- des moules rigides, notamment pour les fontes GS afin de s'opposer au gonflement graphitique à la solidification ;
 - l'absence de déformation pour les noyaux, l'absence de fluage, expansion ou retrait pendant la coulée et la solidification ;
 - l'absence de réaction du matériau de moulage ou de noyautage avec le métal liquide, qui risque de provoquer des défauts sur les pièces, comme par exemple : gerce, abreuvage, piqûres et soufflures par dégagement gazeux (hydrogène, azote, vapeur d'eau...) décarburation ou recarburation superficielle, dégénérescence du graphite sous l'influence de certains composants des liants, etc. ;
 - la facilité de débouillage au moment du décochage ;
 - les possibilités de récupération (sables chimiques) et de régénération (sables argileux) ; la compatibilité entre les systèmes de liants employés (valeurs de pH assez voisines par exemple) ;
 - les problèmes d'environnement aux postes de préparation des sables et de confection des noyaux : pas de dégagement de gaz incommodant ni de dégagement de chaleur, qui nécessiteraient des protections et des captages efficaces, pas de dégagement de vapeurs nocives et de poussières au poste de décochage, mise en décharge des sables frais ou brûlés non susceptibles de pollution des nappes phréatiques ;
 - les facilités et la sûreté des approvisionnements et le faible coût des formules de sable et des modes de moulage employés ;
 - le montant des investissements à prévoir pour les outillages, dont l'amortissement et l'entretien représentent une partie non négligeable du coût de la pièce.

Tous ces facteurs interviennent au moment du choix d'un procédé de moulage. C'est une étude complète qui doit être faite pour trouver la meilleure solution en fonction des caractéristiques des pièces demandées par le client, des cadences de production envisagées, des installations et matériels existants, des prix de revient prévisionnels et des investissements à consentir.

2 Procédés de moulage :

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

Pour satisfaire les exigences sans cesse croissantes des utilisateurs au niveau des performances et de la qualité, les procédés de moulage en sable plastique, et tout particulièrement en sable vert, ont évolué, depuis le moulage main, vers des moulages machines à basse pression puis à moyenne et haute pressions pour améliorer leur masse et leur état de surface, sans toutefois que le serrage haute

pression ne dépasse certaines limites, un excès de serrage pouvant produire d'autres défauts, dus à des perméabilités insuffisantes par exemple.

2.1 Moulage main :

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

2.1.1 Principe :

On peut mouler une pièce d'après un modèle réalisé habituellement en bois, ce modèle pouvant être parfois simplifié (modèles carcasses ou squelettes, trousseau...). Le modèle est généralement séparé en deux parties suivant un plan de joint, une demi-partie servant à faire le moule de dessous, l'autre demi-partie, le moule de dessus. Pour les plus gros moules, chaque partie de modèle peut être posée directement sur des marbres, à même le sol de l'atelier.

Toutes les parties en creux de la pièce qui ne se démoulent pas sont fabriquées dans les boîtes à noyaux pour être ensuite positionnées dans des parties prévues sur le modèle et reproduites en creux dans le moule. L'apparition des modèles en polystyrène et des sables auto-durcissants a permis de simplifier toutes ces opérations et d'apporter des gains de manutention considérables.

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

2.1.2 Matériaux et sables utilisés :

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

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

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

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

2.1.3 Description du procédé :

La figure 140 illustre la fabrication d'une pièce de moyenne importance à partir d'un modèle en bois en deux demi-parties avec châssis de moulage (figure 141).

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

2.1.4 Remarques :

- le serrage du sable de moulage se fait à la pilette manuelle ou pneumatique, ou au fouloir ; il est suivi d'un damage avant le raclage ;
 - le démoulage des modèles est effectué au palan ou à l'aide d'une démouleuse ;
 - pour les grosses pièces, les moules sont étuvés pour augmenter la résistance du sable ;
 - dans le moulage en fosse lorsque les pièces sont de grandes dimensions, les châssis sont disposés à l'intérieur d'une fosse creusée dans le sol de la fonderie pour faciliter la coulée de la pièce, les manutentions et éliminer les risques d'accident ; dans certains cas, les parois de la fosse peuvent remplacer le châssis ;
 - pour les pièces linéaires ou circulaires, l'empreinte est générée par troussage (figure 142).
- Après coulée et refroidissement, les moules sont détruits pour récupérer les pièces. Le sable de moulage est régénéré dans la sablerie.

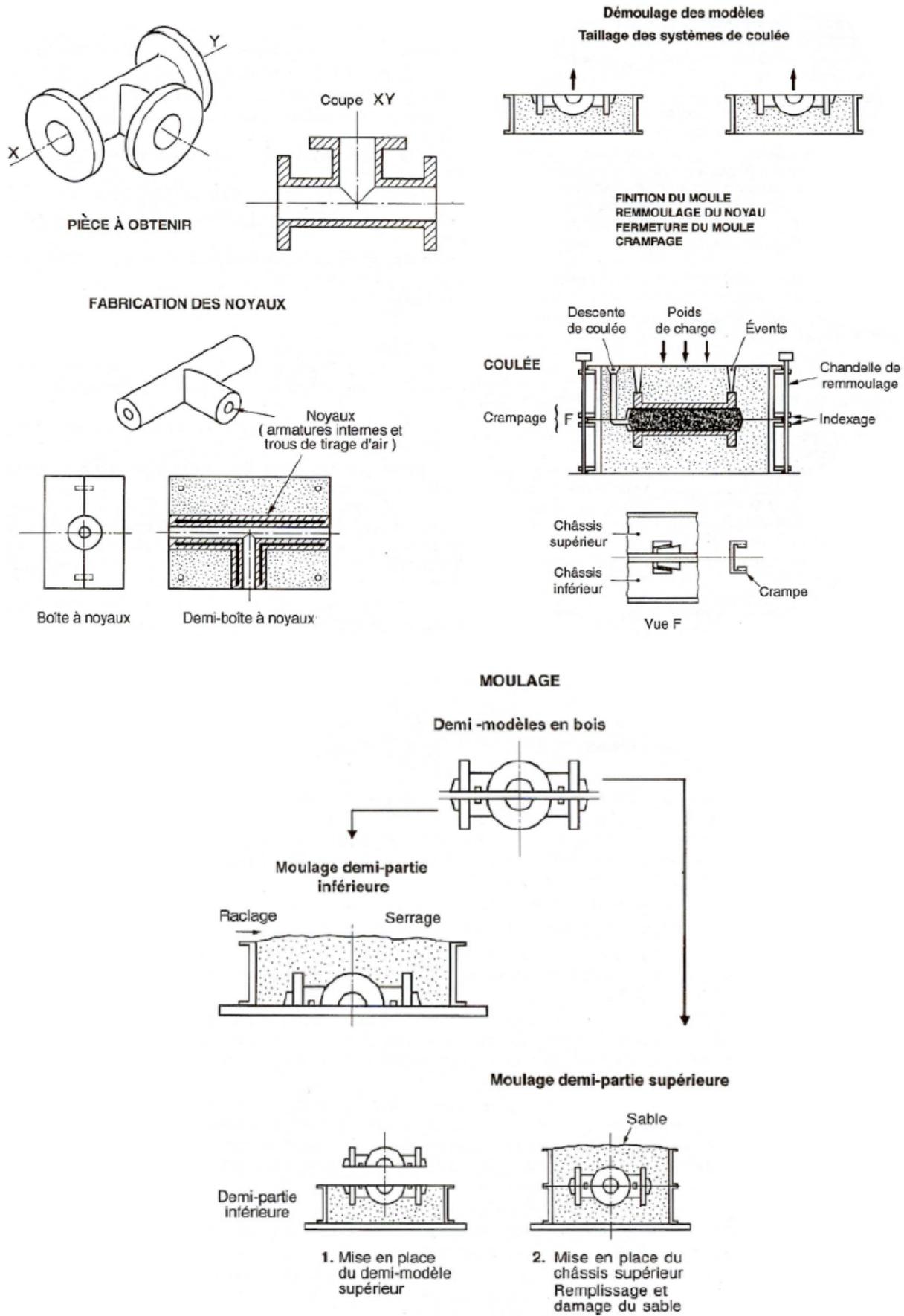


Figure 140. Fabrication d'un élément de tuyauterie par moulage main

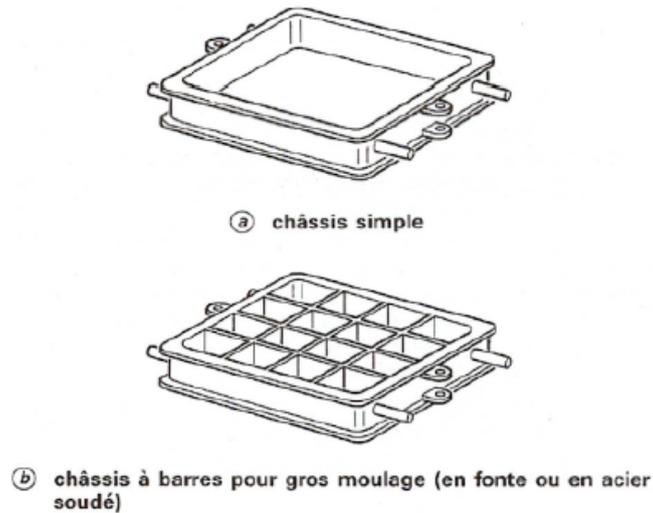
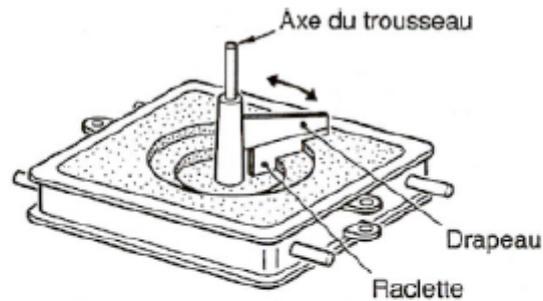


Figure 141. Châssis pour moulage main



La raclette ou trousseau donne la forme de la pièce par son mouvement de rotation.

La raclette peut aussi s'appuyer :

- sur un gabarit hélicoïdal, par exemple, pour la fabrication d'hélice,
- sur des règles pour le trousseage de pièces rectilignes.

Figure 142. Moulage au trousseau circulaire

2.1.5 Machines :

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

- des secoueurs à moules pour tasser le sable (figure 143) ;
- des machines à projection de sable (Piper) (figure 144) fixes ou mobiles, projetant le sable de moulage par l'intermédiaire d'une turbine à palette.

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

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

Les démouleuses à retournement (figure 145) facilitent le démoulage des modèles en remplaçant la classique opération d'extraction au palan après retournement des moules.

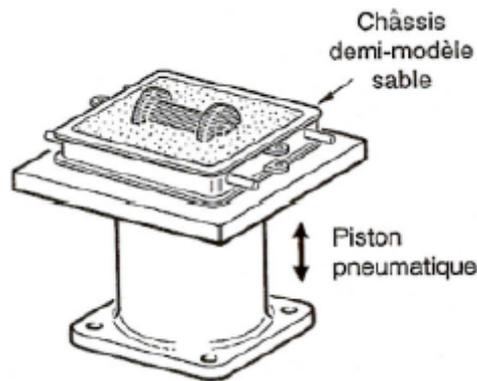


Figure 143. Secoueurs à moule

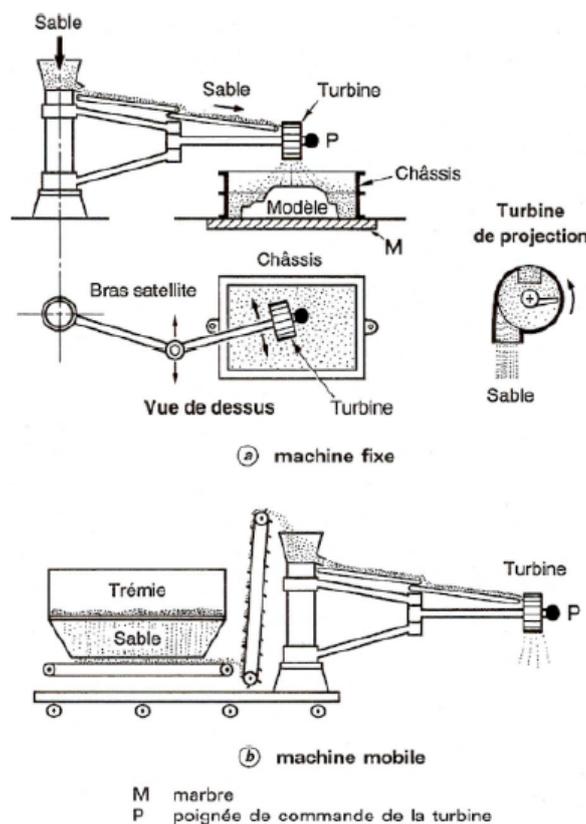


Figure 144. Machine à projection de sable (Piper)

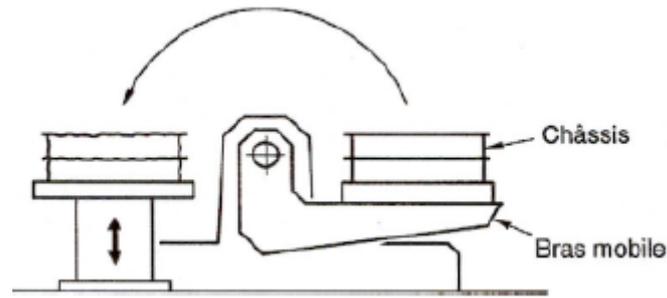


Figure 145. Machine à retourner et à démouler

2.1.6 Outillages :

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

- des planches de profil pour le moulage au trousseau de pièces circulaires, hélicoïdales ou rectilignes qui peuvent être moulées par ce procédé économique (figure 142) ;
- des modèles et boîtes à noyaux en bois ;
- des modèles en polystyrène que l'on emballe dans des sables autodurcissants ;
- des châssis de moulage, cadres rigides en acier coulé, fonte, ou profilés métalliques, disposés autour du modèle, adaptés aux dimensions du moule, pour contenir le sable de moulage et permettre son serrage. Ils peuvent être simples ou avec des barres pour les grands moules, en général carrés ou rectangulaires, et quelquefois de formes spéciales adaptées à la pièce à fabriquer (figure 141) ;
- des outils de serrage du sable, pilettes, fouloirs manuels ou pneumatiques ;
- et les outillages individuels des mouleurs (spatules...).

2.2 Moulage machine :

Le développement de la mécanisation et de l'automatisation en fonderie a toujours été un problème difficile à résoudre, compte tenu de l'agressivité d'un milieu particulièrement hostile à ce genre de matériel. La présence de silice, de métal en fusion, de poussières, une ambiance thermique élevée, comme à certains postes de coulée ou de décochage, des manutentions brutales, créent des conditions d'emploi très éprouvantes pour la mécanique et pour les matériels électriques et électroniques. Il a donc fallu que les constructeurs innovent dans tous ces domaines pour que le développement mécanique et automatique des installations de fonderie soit possible et devienne particulièrement fiable. Il n'est pas rare maintenant de voir des chantiers de moulage fortement automatisés qui, après mise au point, ont des rendements supérieurs à 0,8-0,9.

2.2.1 Principe :

La réalisation d'un moule à l'aide d'une machine à mouler nécessite après remplissage du châssis en sable de moulage deux opérations fondamentales :

- tassage et serrage du sable sur le modèle ;
- démoulage, c'est-à-dire séparation du moule et du modèle.

Suivant la pression développée sur le plan de joint, on peut distinguer deux types de serrage (figure 147) :

- le serrage basse pression de (1,5 à 4 ou 5) 10⁵ Pa (1,5 à 4 ou 5 bar) obtenu avec les machines à secousses-pression, à projection de sable, etc. ;
- le serrage moyenne et haute pressions : de (7 à 15) × 10⁵ Pa (7 à 15 bar), obtenu avec des machines à membranes, à pistons multiples, à impact, etc.

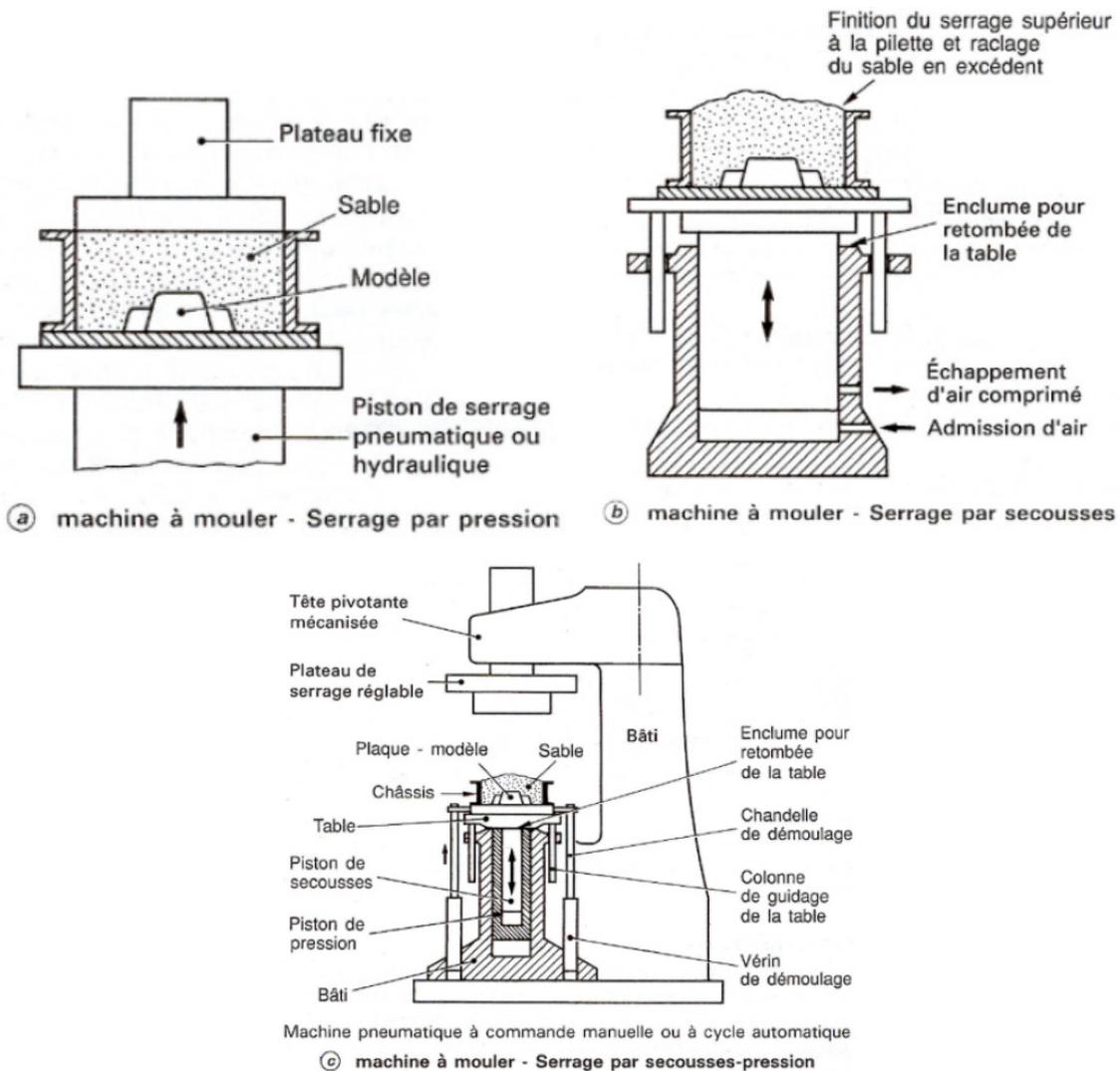


Figure 146. Moulage machine – Serrage basse pression

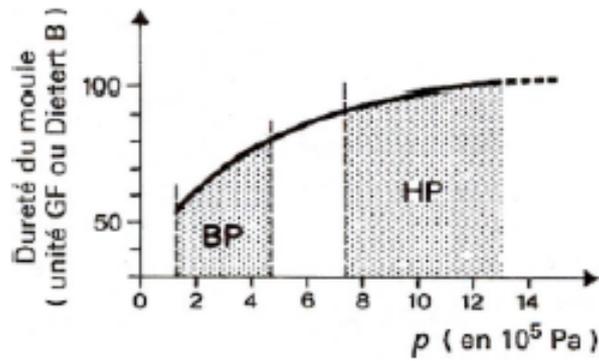


Figure 147. Variation de la dureté des moules en fonction de la pression de serrage

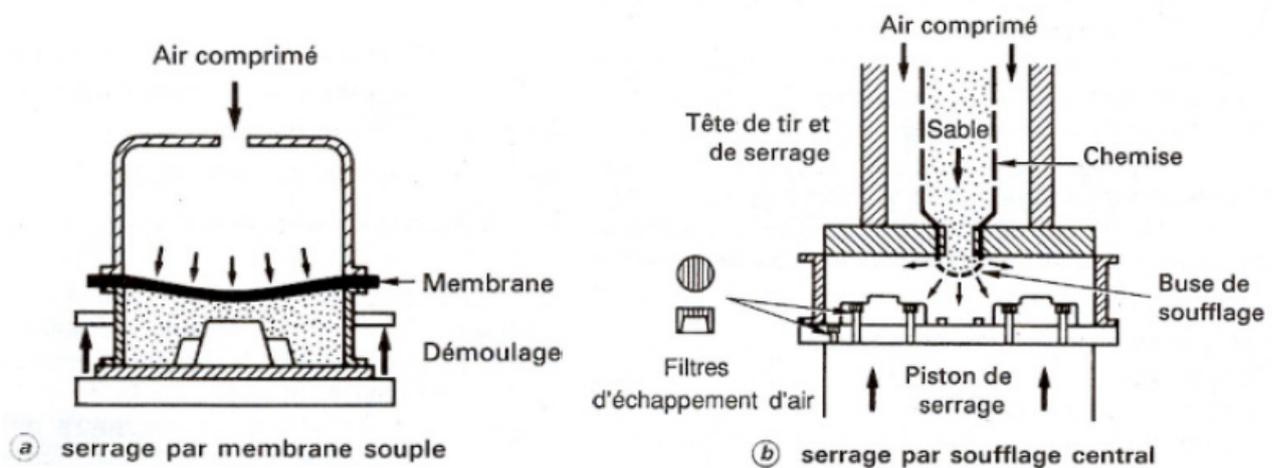


Figure 148. Moulage machine – Serrage moyenne pression

2.2.2 Moulage machine sans châssis (en mottes) :

Séduisant dans son principe, puisqu'il n'utilise pas de châssis, le moulage en mottes est plus délicat à mettre en oeuvre. La suppression des châssis représente une économie d'investissement certaine et une réduction des frais d'entretien, les châssis travaillant toujours dans des conditions très dures (silice, fonte liquide, chocs).

Par contre, l'absence de châssis entraîne des difficultés de serrage du sable entre le bord des empreintes et le bord du moule, et des risques de fuite à la coulée. Il est nécessaire de laisser dans ces endroits une plus grande quantité de sable, ce qui peut réduire le nombre de pièces par moule et oblige également à habiller le moule avec une jaquette pour assurer l'étanchéité à la coulée (figure 149).

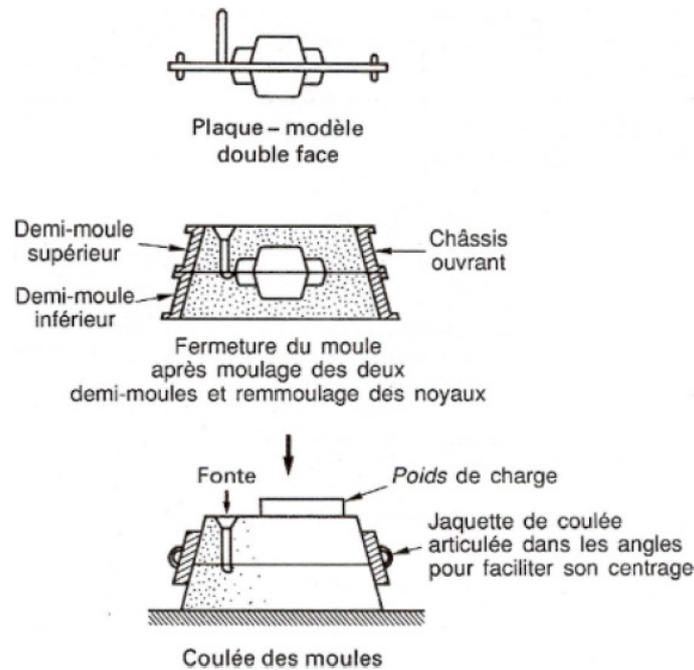


Figure 149. Moulage en motte à joint horizontal

2.2.2.1 Moulage en carapace :

L'utilisation de mélanges de sable sec et de résines thermodurcissables permet d'obtenir directement dans des empreintes chauffées à 200-240 °C des noyaux ou des carapaces, avec des temps de production de l'ordre de quelques minutes.

Né en 1942 en Allemagne, il est dû à J. Croning, mais il ne s'est développé industriellement qu'à partir de 1948. Suivant les pays, on l'appelle procédé Croning, moulage en carapace ou shell-molding.

Ce procédé met en oeuvre des mélanges de sable sec dont les grains sont préenrobés à chaud avec des résines phénoliques (2 à 5 % en masse). Au contact de l'outillage chauffé entre 200 et 300 °C par des brûleurs à gaz ou des résistances électriques, le sable est d'abord aggloméré par fusion de la résine sur une certaine épaisseur dont la polymérisation provoque le durcissement définitif. On obtient ainsi de véritables carapaces (ou croûtes) autour du modèle, carapaces que l'on assemble ensuite par collage et crantage pour former le moule. La précision des moulages est bonne mais il faut tenir compte de la dilatation des outillages portés à 200-300 °C dans l'établissement des cotes d'usinage des modèles, ce qui introduit une certaine imprécision.

2.2.2.2 Mise en oeuvre

Les carapaces sont produites sur des machines ayant un réservoir à sable qui permet, par rotation, la mise en place par gravité du sable sur la plaque-modèle chauffée, puis après cuisson et retournement du bac, la cuisson du dos de la carapace et son démoulage par des éjecteurs (figure 149.a).

Les deux carapaces formant un moule sont assemblées par agrafage ou par collage (figure 149.b) après remmoulage des noyaux si nécessaire et généralement mises dans des bacs, bloquées avec de la grenaille pour résister à la pression métallostatique au moment de la coulée du métal liquide. Elles peuvent être prévues pour être coulées verticalement ou horizontalement (figure 149.c).

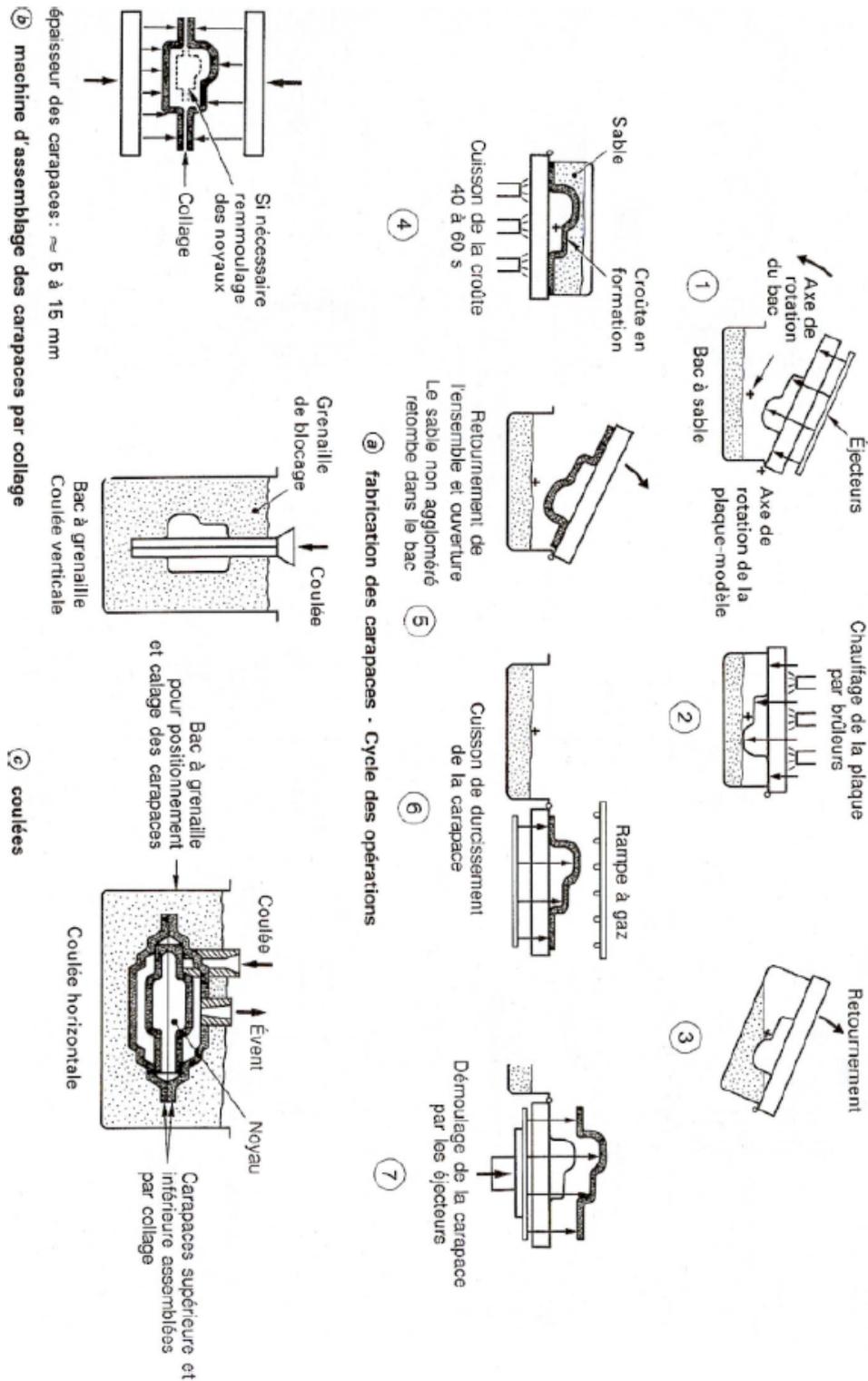


Figure 150. Moulage en carapace

2.3 Moulage à modèles perdus :

Il s'agit des procédés de moulage qui utilisent des modèles en matière fusible (polystyrène, cire, etc.) restant dans le moule au moment de sa confection et qui sont éliminés par la suite, soit pendant la coulée (cas du polystyrène), soit avant la coulée, par chauffage du moule (cas de la cire ou du mercure congelé).

Le maintien des modèles dans le moule permet de simplifier les opérations de moulage, de supprimer les noyaux et de faire venir plus facilement des formes complexes, en admettant des contredépouilles, l'opération de démoulage étant supprimée. Ces procédés permettent d'améliorer la précision dimensionnelle des pièces obtenues, de réduire également la masse des pièces et d'accroître la productivité ; ils sont donc un facteur de réduction sensible des prix de revient.

2.3.1 Moulage avec modèles en polystyrène expansé :

Ce procédé, appelé aussi moulage à modèle perdu, moulage à modèle gazéifiable ou lost foam, est d'origine américaine ; breveté en 1958 par H.F. Shroyer, il a été développé en Europe en 1962, d'abord en Allemagne, pour se répandre ensuite dans les autres pays européens.

Le principe de ce procédé consiste à fabriquer un modèle en polystyrène expansé, noyé ensuite dans le sable de moulage. À la coulée, le métal liquide vaporise le modèle et remplit peu à peu l'empreinte, d'où le nom de procédé avec modèle gazéifiable. Utilisé au départ pour la fabrication des grosses pièces unitaires (outils d'emboutissage par exemple), il s'est ensuite développé plus progressivement dans le domaine des pièces de grandes séries, tant en aluminium qu'en fonte et en acier, pour lesquelles de très nombreuses installations sont maintenant en production industrielle. Les techniques de fabrication des grosses pièces et des pièces de série étant totalement différentes,

Pour grosses pièces unitaires, le moulage se fait en châssis que l'on peut ensuite séparer si l'on veut détruire le modèle avant la coulée (figure 151). La coulée peut se faire à moule plein (figure 152) ; le polystyrène brûle en donnant un volume important de gaz qu'il faut évacuer par des dispositifs spéciaux.

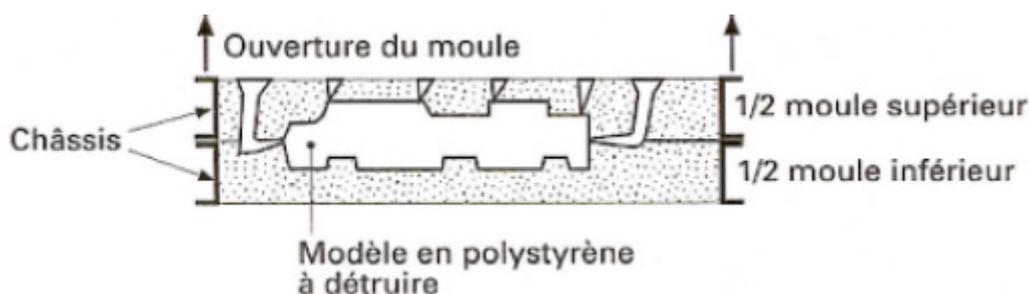


Figure 151. Moulage de grosses pièces avec modèle gazéifiable

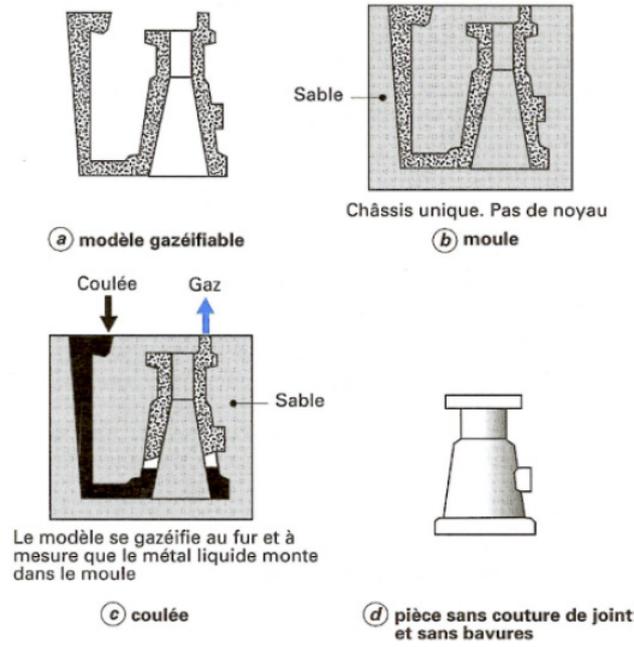


Figure 152. Moulage avec modèle gazéifiable

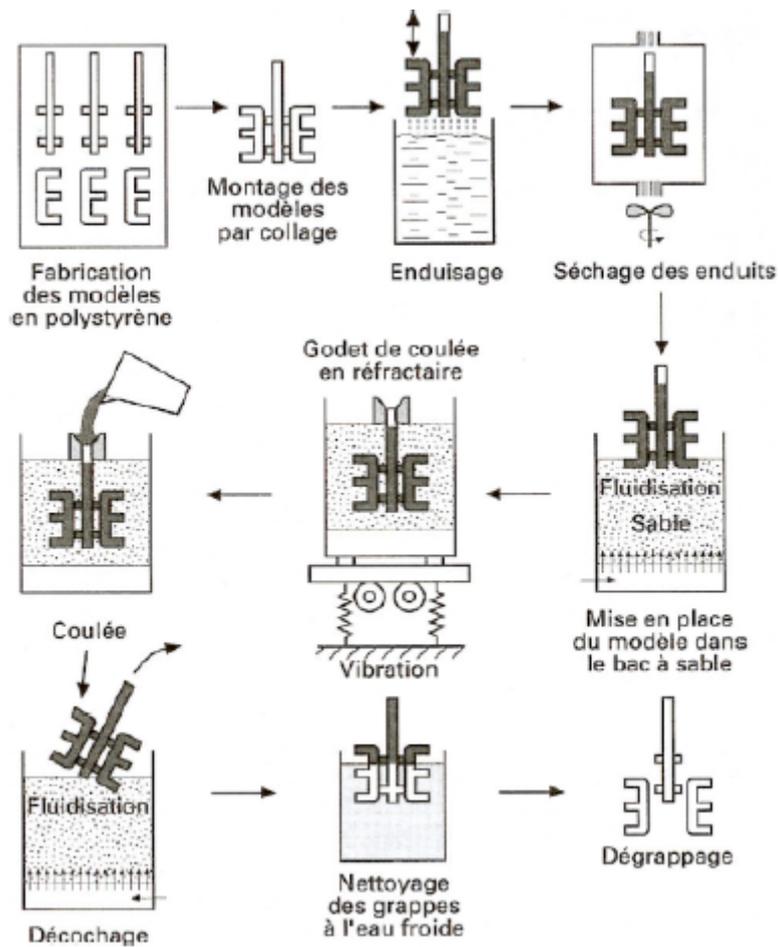


Figure 153. Procédé de moulage à modèle perdu

2.3.2 Moulage à la cire perdue :

Ce procédé, dit aussi moulage de précision, était déjà connu dans les temps très anciens pour la coulée des métaux non ferreux (statues, objets religieux, bijoux). On l'utilisa également plus tard dans certaines fabrications en bronze (canons à fûts décorés, cloches. De nos jours, on l'emploie dans des secteurs spécialisés (prothèses dentaires, bijouterie, fonderie d'art) et surtout dans des applications industrielles qui se développèrent après la guerre de 1940-45 pour la fabrication des ailettes de turboréacteurs et pour la production massive de pièces en tout genre (machines à coudre, machines textiles, armement, aviation, automobiles, etc.)

2.3.2.1 Principe :

Les modèles sont réalisés en matières fusibles (cire, urée,...), assemblés en grappes, recouverts de couches réfractaires et éliminés ensuite par dissolution ou par voie thermique. Les moules réfractaires sont frittés à haute température (1 000 °C) pour obtenir des céramiques présentant la solidité et la perméabilité nécessaires pour la coulée du métal. Celle-ci peut se faire à haute température pour obtenir des parois de faibles épaisseurs et les détails les plus fins des modèles. La caractéristique essentielle de ce procédé est de créer une première fois le modèle à une échelle donnée. Généralement, le modèle est injecté dans un outillage, puis recouvert par un élément céramique appelé carapace. Une fois celui-ci durci, le modèle injecté est éliminé de la carapace.

Dès lors on obtient un moule de fonderie dans lequel de l'alliage en fusion est coulé.

Après refroidissement, enlèvement de la carapace et découpe, chaque pièce est contrôlée individuellement avant d'être vendue au client usineur.

Les principales étapes du procédé de moulage à modèle en cire perdue sont celles décrites sur la figure 154.

1. **Confection d'un moule** pour modèles reproduisant fidèlement en creux la pièce à couler ; ce moule peut être réalisé en matériau métallique ou plastique ;
2. **Injection sous pression** d'une cire synthétique à l'état pâteux dans ce moule, cette cire en refroidissant se solidifie et constitue ainsi, une fois extraite du moule, un modèle ; autant de modèles seront à injecter que de pièces métalliques à mouler ; pour obtenir des pièces creuses, le modèle en cire sera surmoulé autour d'un noyau céramique fabriqué par ailleurs, autour duquel finalement sera moulée la pièce métallique, l'élimination du noyau permettant l'obtention de la cavité désirée (figure 155) ;
3. **Assemblage en grappe** d'un nombre bien déterminé de ces modèles autour d'une armature elle-même en cire synthétique ; selon la taille et la complexité des modèles, ce nombre peut varier de 1 à quelques dizaines voire plus ; cet ensemble dénommé grappe constitue l'unité de

coulée, il est surmonté d'un entonnoir destiné à recueillir le métal lors de l'opération de fusion-coulée décrite au point 7 ;

4. Enrobage de la grappe en cire par un assemblage de matériaux céramiques réfractaires ; cet assemblage est obtenu de la manière suivante :

— enduction de la grappe, par immersion de celle-ci dans une barbotine (bain) qui se présente sous la forme d'une suspension liquide de fines particules de matériaux céramiques. La nature des éléments constitutifs de cette barbotine ainsi que leurs caractéristiques physiques sont adaptées pour obtenir un nappage uniforme des modèles en cire,

— cette enduction est complétée par un saupoudrage d'un sable réfractaire approprié, l'ensemble est parfois désigné par le terme de stucco,

—la pellicule céramique, résultat de cette double enduction, est alors durcie par simple séchage ou par prise chimique,

—l'opération d'enduction-séchage est répétée autant de fois que nécessaire pour obtenir autour de la grappe en cire une carapace céramique d'épaisseur quasi uniforme, cette épaisseur ayant été prédéterminée pour conférer à la carapace céramique les caractéristiques désirées, entre autres conductivité thermique et résistance mécanique (figure 156) ;

5. Dégagement des cavités internes du moule-carapace par élimination des modèles en cire ou décirage :

—par fusion (dans un autoclave à vapeur d'eau, par immersion dans un bain de cire fondue ou par utilisation de micro-ondes),

—par combustion dans un four à haute température,

—ou par dissolution dans un bain approprié, (L'évacuation du matériau pour modèles s'effectue par l'entonnoir de coulée sur lequel repose le moule carapace mis tête en bas.)

—consolidation du moule-carapace par une cuisson à haute température. Les conditions de température, d'atmosphère et de temps permettent de maîtriser les phénomènes de frittage qui assurent cette consolidation du moule-carapace mais aussi la structure cristallographique de ses différents constituants céramiques ;

6. Fusion d'un lingot de métal dans un creuset et coulée de ce métal liquide, par l'intermédiaire de l'entonnoir décrit au point 3 dans les cavités du moule-carapace naguère occupées par les modèles en cire mais où demeurent les éventuels noyaux céramiques utilisés lors de la confection des modèles ;

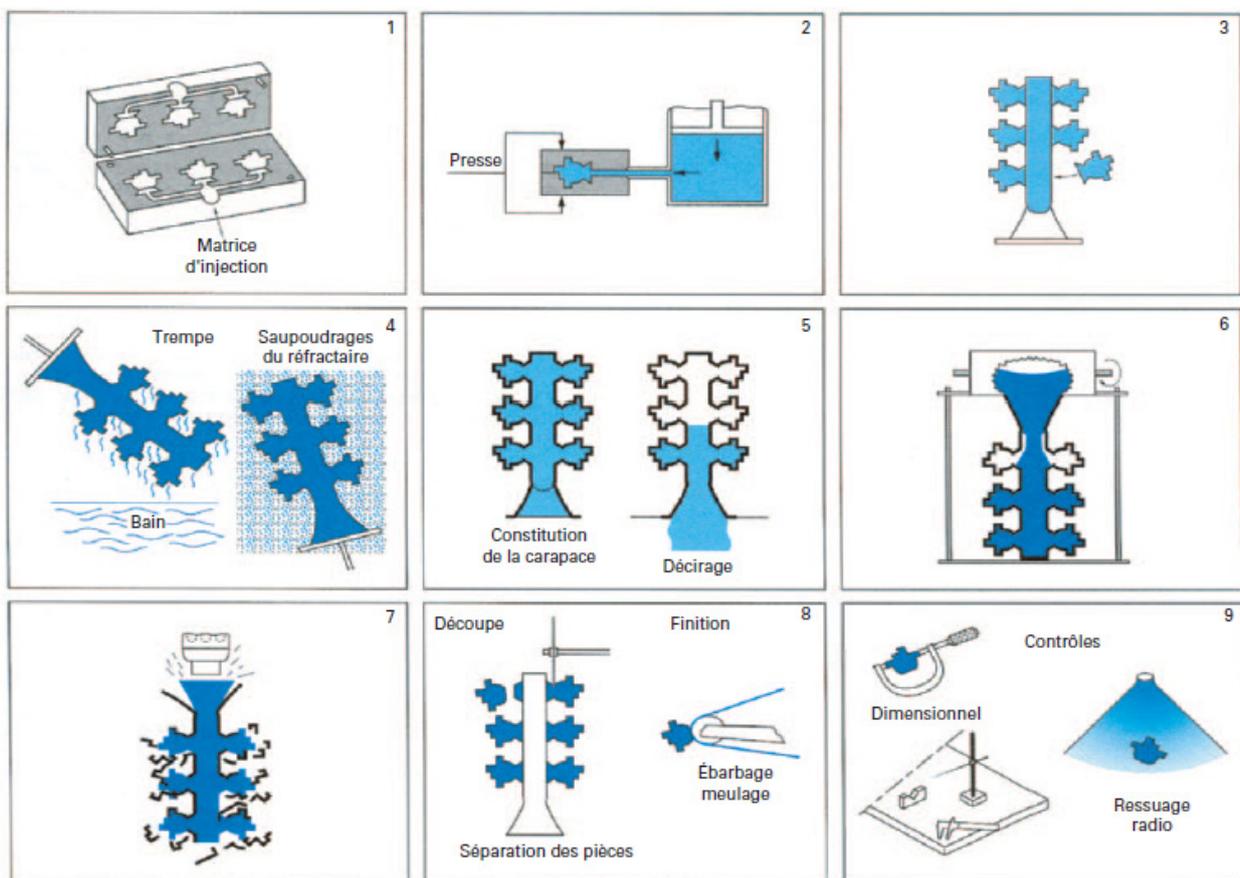
7. Après refroidissement naturel ou contrôlé du moule et solidification de l'alliage métallique coulé, élimination de la carapace par émiettement de celle-ci. Cette opération dénommée décochage peut être réalisée :

—soit par l'application de vibrations ou de chocs d'intensité mesurée avec l'aide de techniques abrasives telles que le sablage, le grenailage ou le jet d'eau sous forte pression,

—soit par dissolution en un milieu approprié ;

8. **Séparation par tronçonnage** des chenaux d'alimentation qui ont constitué l'armature de la grappe en cire et éventuellement des masselottes, pour récupérer unitairement les pièces métalliques moulées ;

9. **Inspection Assurance/Qualité.** Lorsque ces pièces comportent en leur sein un noyau céramique, ce dernier est dissous dans une solution alcaline concentrée portée à ébullition ou dans un bain de sels fondus, de potasse ou de soude, cette opération permettant de dégager la cavité interne de la pièce sans affecter la santé métallurgique de la pièce moulée.



1 Outillage d'injection

2 Injection des modèles (cire ou plastique)

3 Montage : construction de la grappe

4 Trempe et saupoudrage du réfractaire

5 Constitution de la carapace et décirage (élimination des modèles)

6 Fusion de l'alliage et remplissage du moule-carapace

7 Destruction de la carapace

8 Découpe et finition

9 Contrôles (dimensionnel, ressuage, radiographique)

Figure 154. Procédé de moulage à modèle en cire perdu

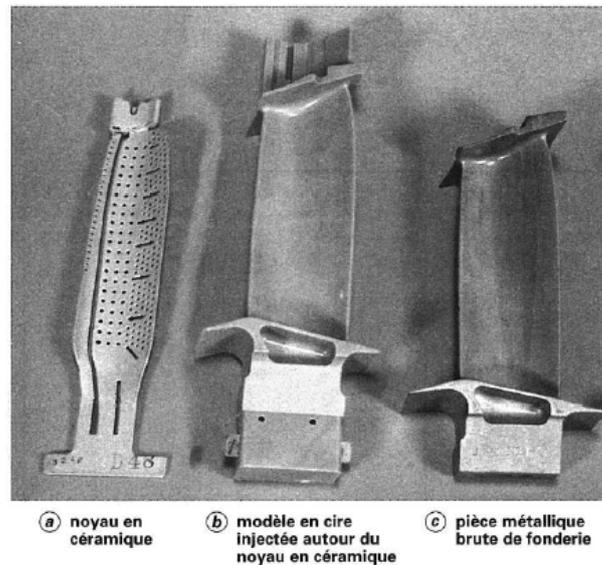


Figure 155. Exemple d'une pièce à trois stades de fabrication

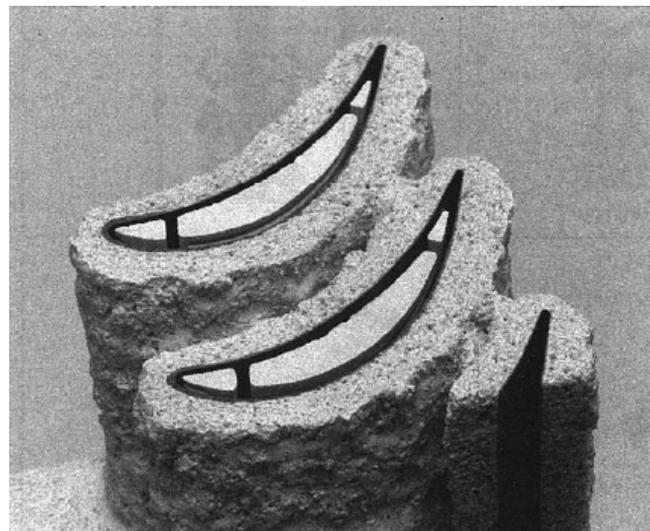


Figure 156. Écorché d'un moule-carapace contenant des noyaux céramiques

2.4 Moulage en moules métalliques :

Grâce à l'emploi de moules métalliques, le moulage en coquille présente les caractéristiques suivantes pour les moules :

- rigidité de l'empreinte ;
- grande précision dimensionnelle ;
- excellent état de surface des éléments moulants ;
- conductivité thermique élevée des empreintes qui donnent aux pièces moulées :
- un meilleur état de surface ;
- des caractéristiques mécaniques plus élevées de l'alliage coulé, conséquence d'une vitesse de refroidissement et de solidification plus élevée, donnant un grain plus fin et une matière plus

compacte ; mais des contraintes résiduelles à l'état brut peuvent nécessiter un traitement thermique de détente des pièces surtout pour les métaux ferreux ;

— une plus grande précision des dimensions des pièces avec la possibilité de faire venir, bruts de fonderie, des trous de fixation et de permettre une réduction appréciable des surépaisseurs d'usinage.

Le moulage en coquille supprime l'emploi du sable de moulage et par conséquent toutes les installations de préparation du sable (sablierie, broyeurs...), de transport, de stockage et de mise en forme (machine à mouler) de ce sable. Les manutentions sont simplifiées, les consommations d'énergie réduites, les pollutions et nuisances relatives au sable supprimées et les investissements sont souvent moins coûteux. Il faut toutefois noter que, pour certaines fabrications, le noyautage au sable reste obligatoire (cas des culasses par exemple). Il faudra, dans ce cas, une installation de préparation de sable à noyaux et des machines à souffler les noyaux. Mais cela restera tout de même très spécifique.

2.4.1 Différents procédés de moulage en coquille :

Ces procédés sont classés et différenciés suivant le mode de mise en oeuvre du métal liquide :

Moulage en coquille par gravité : C'est le procédé de moulage en coquille le plus simple. On coule directement le métal liquide à l'aide d'une louche ou d'une petite poche de coulée dans l'empreinte d'un moule métallique qui peut comporter ou non des noyaux métalliques ou en sable suivant les pièces à fabriquer et leur complexité.

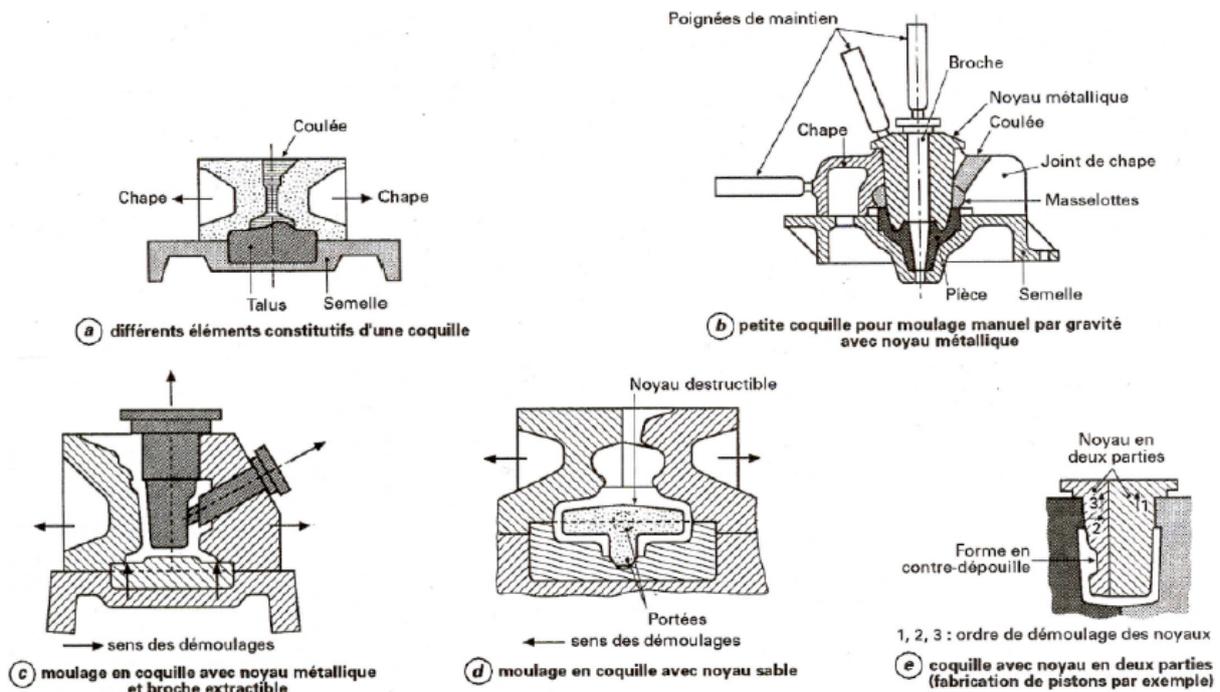


Figure 157. Systèmes de coulée du moulage en coquille par gravité

Moulage en coquille basse pression : Le moule est placé directement sur le four de coulée (figure 158). L'alliage liquide contenu dans un creuset étanche en graphite est refoulé dans le moule par une pression d'air comprimé ou d'azote appliquée sur la surface du métal. Le métal monte dans le tube d'injection réfractaire et pénètre dans le moule par un trou de coulée situé à la partie inférieure du moule. La pression est maintenue pendant tout le temps de la solidification de la pièce puis, au moment où l'on relâche la pression, tout le métal resté liquide dans le tube d'injection redescend dans le four. Les pressions utilisées ne dépassent pas 0,1 MPa (40 à 60 kPa pour des pièces en aluminium par exemple).

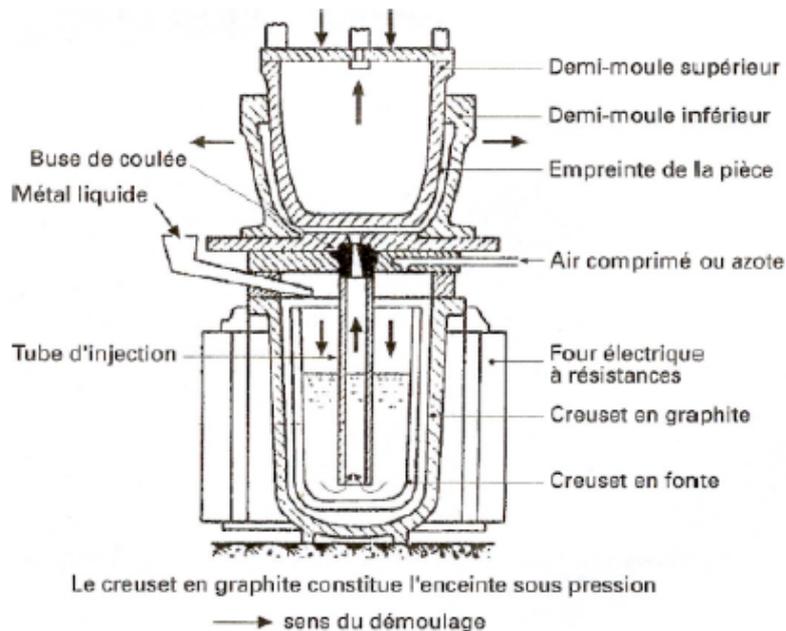


Figure 158. Moulage en coquille basse pression

Moulage sous pression : Dans ce procédé, l'alliage liquide est injecté sous forte pression dans l'empreinte d'un moule métallique. L'alliage, poussé par un piston dans un conteneur en acier spécial au chrome-molybdène, est introduit dans le moule par une buse d'injection. En phase finale, la pression peut atteindre 70 à 80 MPa, voire 100 MPa ou plus. L'injection se fait en un temps très court, 0,1 s en moyenne.

Les moules sont montés sur les plateaux d'une presse hydraulique horizontale, de grande puissance (jusqu'à 30 MN et plus de force de fermeture) pour éviter au moment de l'injection toute ouverture intempestive de l'outillage et toute fuite au plan de joint. Les pressions et les systèmes d'injection, les forces de fermeture des machines, dépendent de nombreux facteurs, notamment du genre d'alliage coulé, de la forme et du volume de la pièce. Les pièces produites sont précises, légères, et les cadences de production très rapides. Par contre, les outillages et les machines représentent des investissements très coûteux qui font réserver ce procédé à des fabrications de moyennes ou grandes séries.

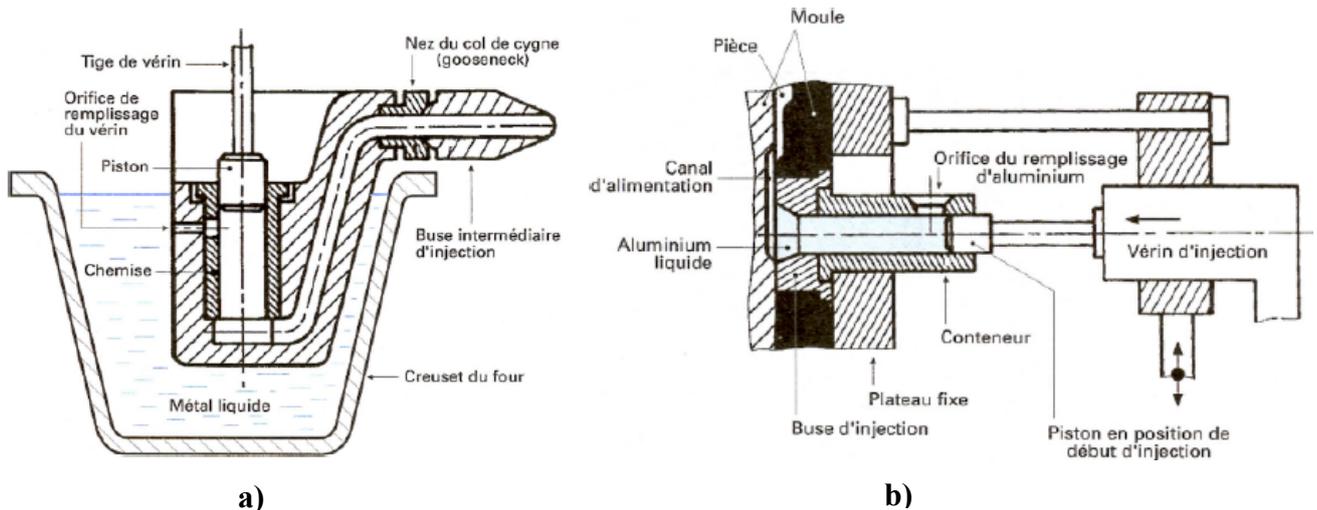


Figure 159. Moulage sous pression : Système d'injection : a) à chambre chaude, b) à chambre froide

Moulage sous très haute pression : Le forgeage liquide (figure 160) est une variante du procédé de squeeze casting apparu vers le début des années 80 au Japon. Il s'applique aux alliages légers et se distingue des autres procédés en moules métalliques par :

- un remplissage très calme de l'empreinte ;
- une solidification sous une pression très élevée (100 MPa et jusqu'à 150 MPa), ce qui confère aux pièces fabriquées de très bonnes caractéristiques mécaniques grâce à une structure très fine et à l'absence de porosités et permettra également de réaliser des composites à matrice métallique renforcée de fibres céramiques, par exemple.

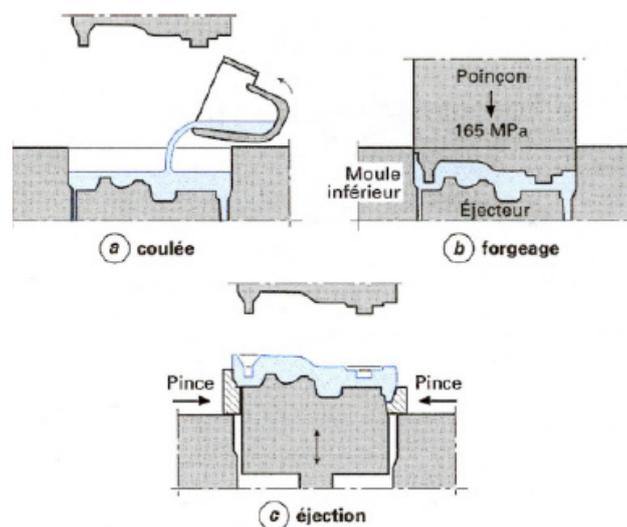


Figure 160. Schéma du procédé de forgeage liquide

Moulage en coquille centrifugée : Utilisé dans la presque totalité des cas pour fabriquer des corps creux cylindriques sans noyaux, le moulage par centrifugation consiste à couler le métal

liquide dans un moule animé d'un mouvement de rotation autour de son axe principal. Les masses liquides sont soumises à une force centrifuge tendant à les éloigner de l'axe de rotation et à les plaquer contre les parois du moule.

D'une façon générale, le moule tourne à une vitesse telle qu'il crée une accélération moyenne de l'ordre de plusieurs centaines et jusqu'à $1\,000\text{ m/s}^2$ ou plus, dans certains cas.

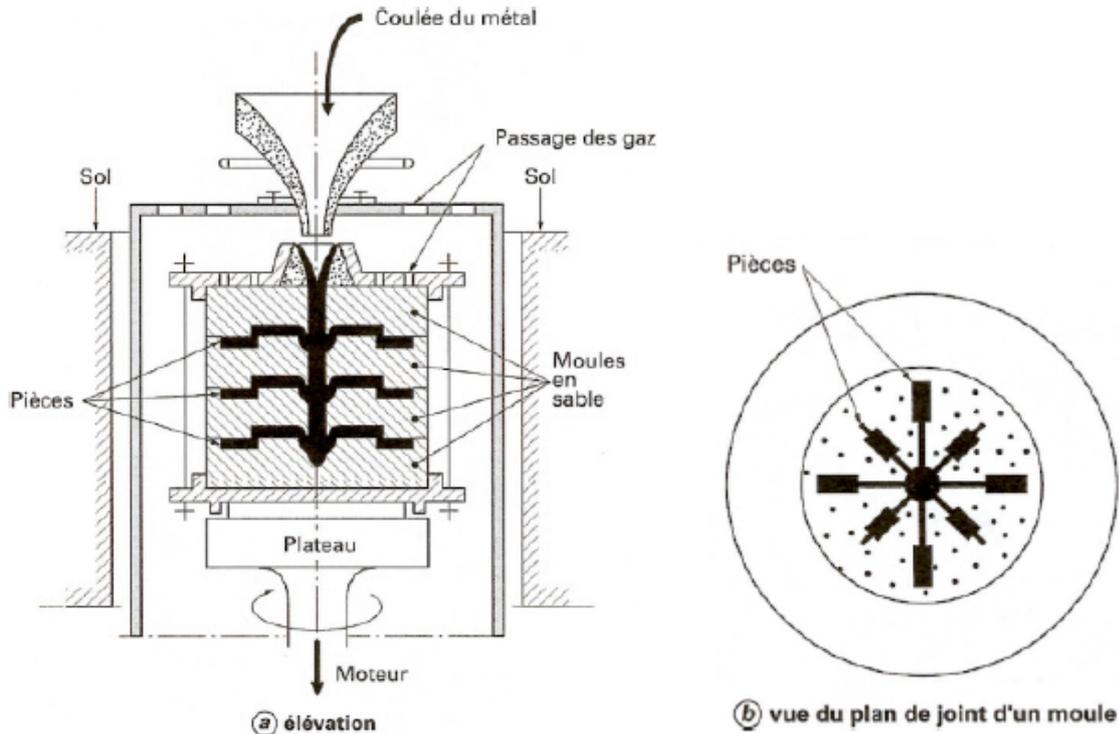


Figure 161. Machine de coulée sous pression centrifuge à axe vertical

2.4.2 Alliages coulés :

Ce sont généralement des alliages non ferreux (aluminium, laiton, bronze, etc.) qui sont utilisés dans ce genre de fabrication. Les métaux ferreux, à cause des températures plus élevées de coulée, sont rarement employés, sauf pour des fabrications très spécifiques comme, par exemple, les tuyaux en fonte, les pièces de grandes séries pour l'automobile (collecteurs, cylindres de freins...). L'usure rapide des outillages dans ce cas pénalise lourdement les prix de revient ; ils ne peuvent donc s'amortir que pour de très grandes séries.

2.4.3 Outillages :

Leur définition commence par celle des formes de la pièce qui permettra de préciser les sens de moulage, la venue des parties creuses (noyaux métalliques, noyaux en sable, broches, etc.), les dépouilles (généralement de 1 à 3 %), les retraits, les systèmes de refroidissement du moule, la position des éjecteurs, les systèmes de remplissage, de coulée et les masselottes.

Les moules sont constitués d'au moins deux parties métalliques dont l'assemblage reproduit les formes extérieures de la pièce et le système de coulée. Des dégagements d'air du moule et des gaz provenant des noyaux sont à prévoir pour faciliter la coulée et la bonne venue de la pièce. Les outillages de moulage en coquille doivent présenter un certain nombre de qualités [permanence des formes à chaud (250 à 400 °C pour les pièces en aluminium), bonne résistance aux contraintes thermiques, bonne précision dimensionnelle, démoulage facile sans arrachement, etc.] qui font choisir pour réaliser ces moules des matériaux métalliques comme les fontes lamellaires, les fontes GS faciles à couler et à usiner. Les parties les plus soumises à usure, comme les talus, les broches et les noyaux, sont souvent réalisées en acier usiné, trempé, revenu (par exemple 35 NC 15 ou 35 CDSV 05) pour améliorer leur résistance à l'usure. Ces moules doivent avoir un certain nombre de parties mobiles dont l'effacement permettra le dégagement de la pièce, l'extraction des noyaux et le démoulage de la pièce. Toutes les parties moulantes sont en général usinées sur des fraiseuses à reproduire ou sur des machines d'électroérosion ; plus rarement, elles sont obtenues brutes de fonderie. Elles sont fixées sur les éléments coulissants de la coquille pour pouvoir être facilement démontées et remplacées.

Paramètres	Procédés de moulage			Observations
	Coquille gravité	Coquille basse pression	Sous pression	
Cadences instantanées	15	20	20 à 50	Cadences instantanées moyennes exprimées en nombre de coulées ou d'injections/h
Mises au mille	1,8	1,1 à 1,2	1,3	Rapport $\frac{\text{masse métal coulé}}{\text{masse pièce}}$
Séries minimales	1 000	5 000	20 000	
Types de moules et noyaux	Moules métalliques Noyaux métalliques ou en sable	Moules métalliques Noyaux métalliques ou en sable	Moules métalliques Noyaux uniquement métalliques	Moules et noyaux métalliques essentiellement en fonte et aciers spéciaux
Durée des moules	40 000 à 150 000	40 000 à 150 000	70 000 à 150 000	Exprimée en nombre de coulées, très variable suivant la nature du moule, les cadences, l'entretien, etc.
(1) Les moules peuvent comporter plusieurs empreintes. Les chiffres indiqués correspondent à des valeurs moyennes.				

Tableau 13 : Comparaison des procédés de moulage en moules métalliques

Chapitre IV

Mise en œuvre des poudres : le frittage

Chapitre IV. Mise en œuvre des poudres : Le frittage

1 Mise en forme :

Dans la pratique la plus courante, on comprime la poudre à froid afin d'obtenir un objet ayant une cohésion suffisante pour qu'il puisse être manipulé et transporté jusqu'au four de frittage. Pour des propriétés mécaniques élevées, on recherche dès cette opération une forte masse volumique, autrement dit une porosité résiduelle assez faible.

Les pièces comprimées à froid sont particulièrement belles et brillantes, surtout sur leurs faces latérales dans le cas de la compression uniaxiale. Elles paraissent solides, mais leur résistance mécanique est généralement inférieure à 10 MPa.

C'est l'opération de frittage qui leur donne des propriétés mécaniques convenables. Elle consiste à chauffer le comprimé à une température telle que les grains de poudre se soudent entre eux par des déplacements d'atomes à l'état solide, ou par une sorte de brasure lorsqu'il existe une certaine quantité de liquide dans le comprimé au cours de l'opération.

La compression est le plus souvent uniaxiale mais, comme cela conduit à certaines limitations de forme, d'autres moyens sont parfois employés tels que la compression isostatique. Il existe d'ailleurs de nombreuses autres méthodes dont le développement industriel est souvent faible mais qui montrent bien la flexibilité du procédé.

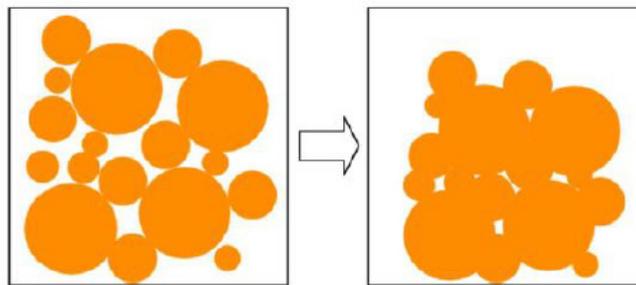


Figure 162. Métallurgie des poudres

2 Procédés de fabrication des poudres :

2.1 Le broyage mécanique :

De copeaux ou fragments métalliques, procédé ancien, se pratique dans des broyeurs à hélices tournant à contre-courant à 3 000 tr/mn ; un cyclone placé en aval du broyeur permet le triage des grains et le renvoi du refus au broyeur. Les poudres obtenues sont généralement oxydées et écrouies, ce qui nécessite un recuit ultérieur ; de plus la capacité de production est faible.

Ce procédé s'applique principalement pour la fabrication de poudre d'aluminium en paillettes par traitement de déchets de feuilles d'aluminium dans des broyeurs à billes. En raison des risques d'explosion, il est nécessaire d'opérer en atmosphère neutre avec un dosage en oxygène compris entre 6 et 10 % (minimum pour permettre une légère oxydation superficielle des

paillettes qui les protège d'une combustion rapide et maximum pour éviter l'explosion en cours de broyage). On ajoute également de l'huile et de la stéarine.

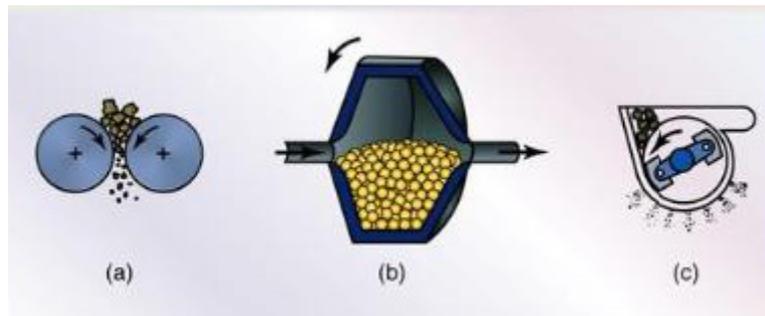


Figure 163. Broyage mécanique

2.2 L'atomisation :

Est le procédé le plus général pouvant s'appliquer à tous les métaux, et surtout il est pratiquement le seul pour la fabrication de poudres d'alliages ou poudres pré-alliées dans lesquelles chaque grain a la composition moyenne de l'alliage. Un jet de métal en fusion est divisé par action d'un jet d'un fluide sous pression (liquide ou gaz).

La grosseur et la forme des grains peuvent être modifiées sous l'influence de facteurs tels que : composition du métal (action d'additions), caractéristiques du bain en fusion (température, désoxydation, viscosité, dimensions du filet), caractéristiques du jet de fluide d'atomisation (nature, température, pression, débit, forme et angle d'incidence, turbulence), atmosphère de protection (vide, azote, argon, vapeur d'eau). Les fluides de pulvérisation sont généralement l'eau, l'air, l'azote, l'argon, la vapeur d'eau sous des pressions de 4 à 50 bars. Il existe plusieurs variantes de ce procédé (Fig. 164) :

- procédé vertical d'atomisation, le jet de métal en fusion étant divisé sous l'action d'un fluide arrivant verticalement par des buses annulaires ou rectilignes orientables, procédé horizontal d'atomisation, le fluide étant pulvérisé horizontalement sur le métal en jet unique ou multiple,
- procédé hydromécanique opérant en deux temps : le métal est d'abord divisé par pulvérisation d'eau puis les fragments à l'état pâteux sont à nouveau divisés par les couteaux d'un dispositif rotatif à disques (6 couteaux à 3 000 tr/mn),
- procédé du tourniquet hydraulique (Roberts) : la pression d'eau s'obtient par l'effet de petites tuyères placées en extrémité d'un disque tournant à 6 000 tr/mn dans l'axe d'un tube d'amenée d'eau à faible pression.

Dans les procédés d'atomisation par l'eau, il est nécessaire d'effectuer un séchage sous vide de la poudre pour éviter son oxydation.

Un autre procédé de division du bain de métal liquide consiste à effectuer un dégazage explosif sous vide ou sous hydrogène.

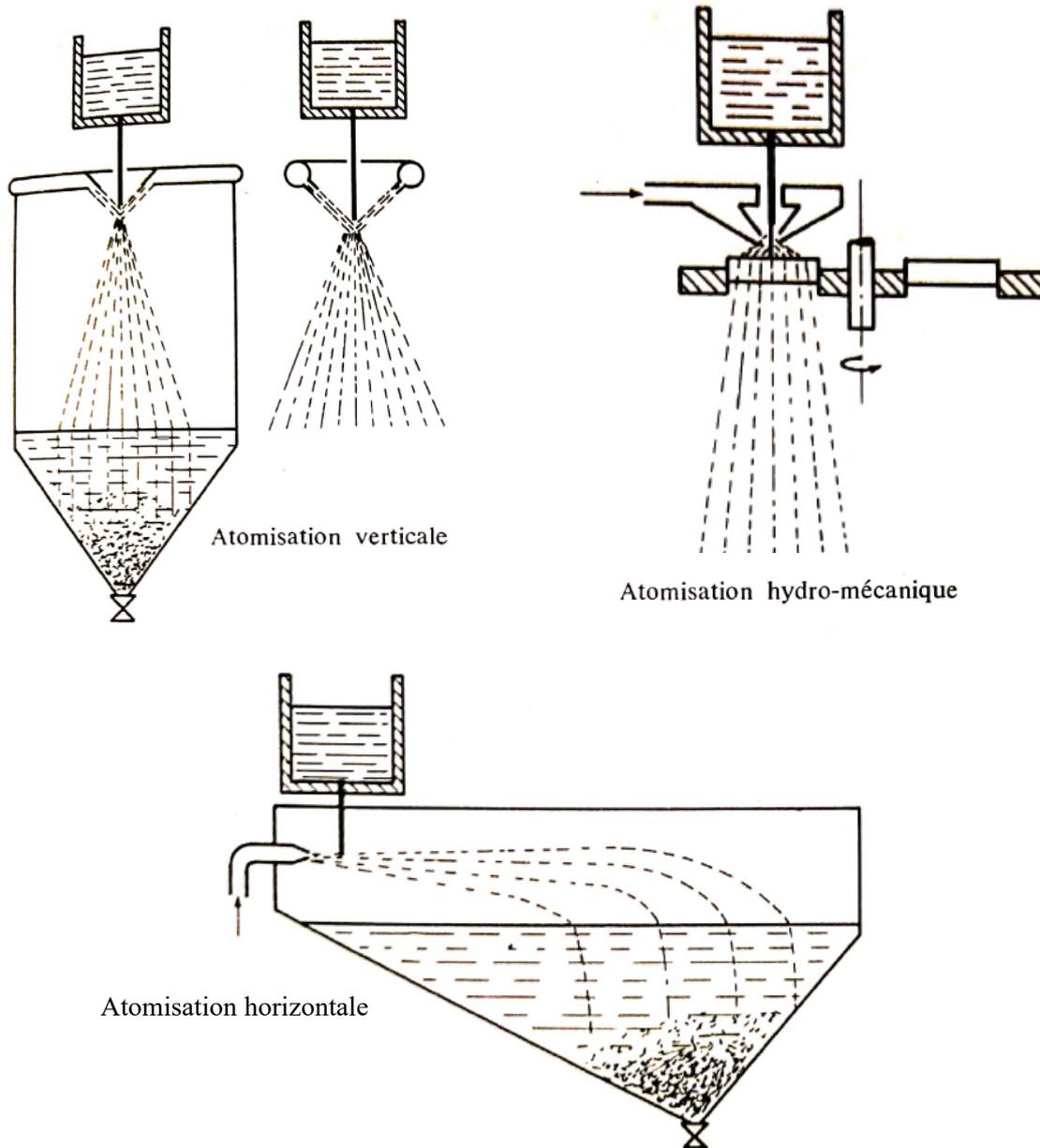


Figure 164. Procédés d'atomisation des poudres

2.3 La réduction d'oxydes :

Est le procédé donnant mondialement le plus fort tonnage de poudre ; procédé Hoganas d'obtention de poudre de, est charge fer. Le minerai de fer enrichi divisé (magnétite suédoise) est chargé avec un réducteur, charbon ou coke, et un peu de CaCO_3 dans des pots chauffés durant une semaine vers $1\ 100\ ^\circ\text{C}$. Les galettes d'éponge de fer obtenues sont broyées et la poudre subit une réduction finale sous hydrogène.

3 Caractéristiques des poudres :

Les poudres sont caractérisées par :

— La composition chimique : teneur en impuretés, en additions, en humidité, en matières minérales non métalliques (silicates, aluminates).

Une caractéristique importante est la teneur en oxygène, ou taux en oxyde, particulièrement dans le cas d'oxydes difficilement ou non réductibles dans le milieu gazeux de frittage (oxydes de chrome par exemple). Cette teneur est déterminée par l'essai de chauffage avec perte d'hydrogène.

— La structure des grains : l'examen micrographique renseigne sur l'état recuit ou l'écroissance des cristaux, la répartition des constituants (eutectoïde, phase non miscible, composés définis), la présence et la répartition des oxydes (réseau inter cristallin, carapace d'oxyde entourant chaque grain), la compacité des grains (porosités, occlusions, grains creux).

— La forme des grains en relation avec le procédé de fabrication : lamellaire (ou soucoupe), sphérique, arrondie ou ovoïde, irrégulière ou déchiquetée, anguleuse, dendritique (Fig. 165).

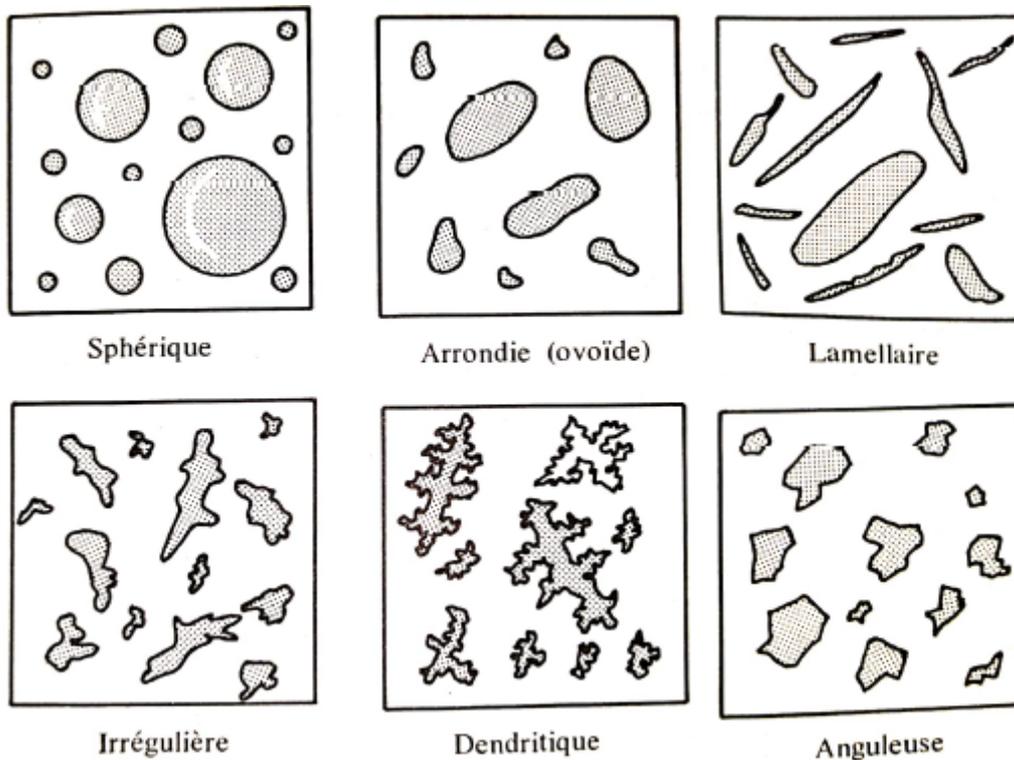


Figure 165. Principales formes des grains de poudres

—L'aspect et la surface spécifique des grains : lisse, rugueuse.

—La grosseur des grains et leur répartition granulométrique : cette caractéristique importante pour l'utilisation des poudres est difficilement mesurable en grandeur réelle. Elle doit être définie suivant la méthode de mesure car d'autres facteurs interviennent (forme, aspect des grains). La répartition granulométrique a un rôle primordial sur la compacité, la densité apparente et la répartition judicieuse des vides (Fig. 166).

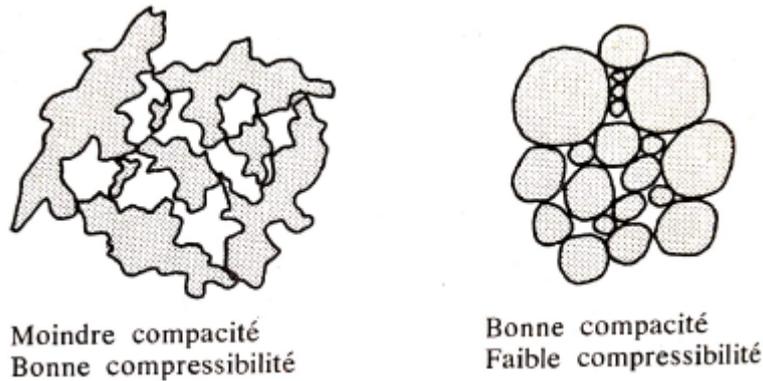


Figure 166. Répartition granulométrique de poudre irrégulière et de poudre sphérique

La grosseur des particules s'exprime par un diamètre moyen ou par la dimension de la maille dans laquelle peut encore passer la particule.

Poudres grossières : taille de 200 à 50 microns

Poudres fines : taille de 50 à 10 microns

Poudres ultrafines : taille de 10 à 0,1 microns

— La masse volumique ou densité apparente de la poudre à l'état libre ou après tassage à volume constant ; cette caractéristique sert à déterminer le volume occupé par la poudre avant compression ce qui définit les dimensions de l'outillage sur presse. Elle est déterminée par écoulement dans un entonnoir à travers un orifice calibré (flowmeter de Hall)

— La facilité de l'écoulement de la poudre à travers un orifice calibré ou facteur d'écoulement, renseigne sur la possibilité réelle de la poudre pour le remplissage des matrices avant compression. A titre indicatif (orifice de 2,5 mm de diamètre) :

Grains sphériques ou arrondis 5 à 20 secondes

Grains irréguliers ou déchiquetés 20 à 35 secondes

Grains dendritiques, éventuellement non-écoulement.

— La compressibilité caractérise l'amplitude de la poudre à se comprimer sous une pression déterminée, ce qui conditionne à la fois les dimensions de l'outillage (matrice et chambre à poudre) et les caractéristiques de la presse (force maximale).

3.1 Compression uniaxiale :

Le principe de la compression à froid de poudres métalliques est schématisé par la figure 1 dans le cas de la fabrication d'un cylindre. L'outillage comprend une matrice, placée dans une table de presse, et deux poinçons cylindriques.

Dans la première phase, on remplit la matrice de poudre et la position du poinçon inférieur détermine le volume de remplissage donc la masse finale du cylindre.

Dans la deuxième phase, le poinçon supérieur ferme la matrice puis les deux poinçons convergent l'un vers l'autre sous une pression de 400 à 700 MPa dans le cas des pièces mécaniques.

La troisième phase est l'éjection, dans laquelle le poinçon inférieur monte jusqu'au niveau supérieur de la matrice, ce qui permet de pousser le cylindre sur la table de la presse, tandis que le poinçon inférieur redescend à sa position de remplissage.

La poudre est approvisionnée automatiquement, à partir d'une trémie, par l'intermédiaire d'un sabot qui est un récipient coulissant sur la table de la presse. La matrice est, le plus souvent, en carbure fretté, et les poinçons sont en acier traité à haute résistance (exemple : Z 190 CN 13). On utilise le carbure pour sa résistance à l'usure car on imagine facilement que les poudres, à tous les stades de la compression et de l'éjection, sont assez abrasives et, sous l'effet de la pression, tendent à se souder aux parois et à provoquer des grippages. L'adjonction de lubrifiant aux poudres, dans l'opération de mélange préalable, diminue fortement les frottements sur les parois et donc les risques de grippage.

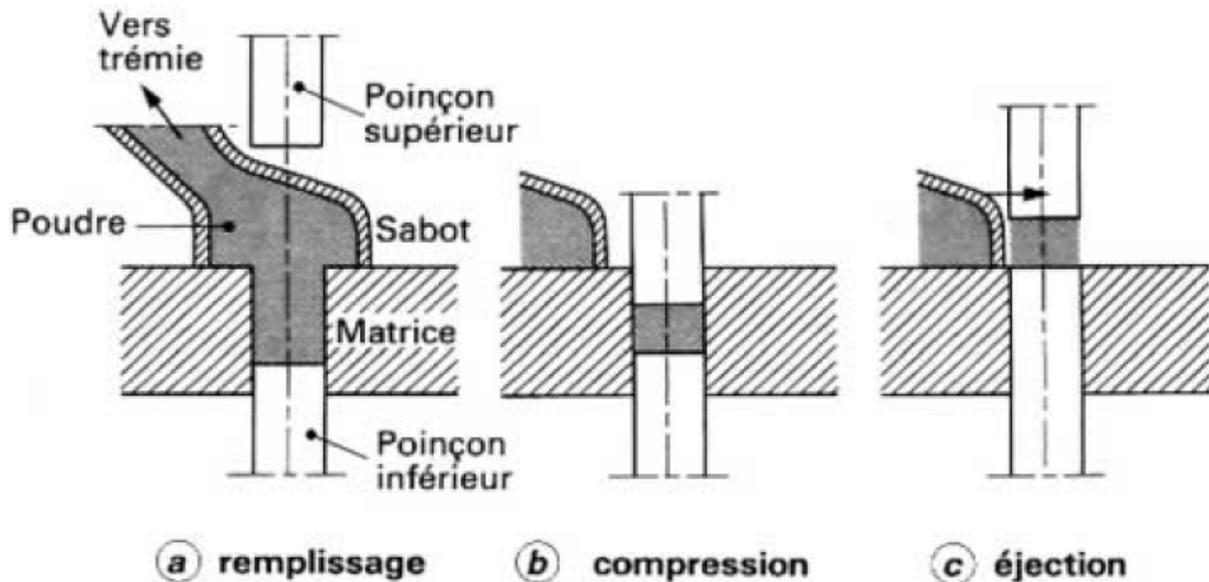


Figure 167. Cycle de compression d'un cylindre

Les poudres métalliques se comportent, sous certains aspects, comme des fluides lorsqu'elles sont peu ou pas comprimées et elles se rapprochent des solides au fur et à mesure de l'augmentation de la masse volumique. On conçoit qu'il n'est pas possible, pratiquement, d'obtenir un comprimé parfaitement dense c'est-à-dire sans porosité résiduelle. La densité du comprimé, par rapport au métal plein, varie en fonction de la composition chimique des poudres et, bien entendu, de la pression utilisée.

Dans le cas des mélanges à base de fer, la porosité résiduelle est rarement inférieure à 7 %. Il y a, pour cela, différentes raisons, la plus importante étant l'existence du lubrifiant qui, avec une teneur en masse de 0,8 % occupe, à cause de sa faible densité relative, un volume de 6,5 %. Cela conduit à une masse volumique limite de 7 350 kg/m³.

Pour des poudres de métaux plus mous tels l'aluminium ou le plomb, la porosité résiduelle peut être très faible mais on se heurte alors au problème de l'évacuation de l'air qui est enfermé lorsque les pores ne communiquent plus entre eux. Dans ce cas, on est donc conduit également à ne pas dépasser une certaine densité relative. Faute de cela, le comprimé peut exploser ou se fendre horizontalement en multiples couches lors de l'éjection.

3.2 Outillages de compression :

Les pièces les plus simples à mouler sont les pièces de forme cylindrique ou prismatique. On peut utiliser dans ce but une matrice fixe (fig. 167) qui repose sur la table de la presse et dont le fond est constitué par un poinçon d'éjection qui demeure immobile pendant la compression, opération qui n'est effectuée que par le poinçon supérieur, La masse volumique des pièces obtenues par compression unilatérale n'est évidemment pas uniforme. Les couches de poudre situées au voisinage du poinçon mobile sont les plus tassées et viennent s'arc-bouter sur les parois verticales de la matrice. Les frottements qui en résultent diminuent d'une manière très sensible l'effort de compression transmis aux couches inférieures, et la masse volumique du comprimé décroît sur toute la hauteur de la pièce.

L'addition de lubrifiant permet de diminuer les frottements sur les parois de la matrice. On réduit ainsi les écarts de densité sans les supprimer complètement, et on améliore la compressibilité, c'est-à-dire la masse volumique moyenne atteinte pour une pression donnée.

Afin de pouvoir obtenir des comprimés d'assez forte épaisseur et de masse volumique sensiblement constante, on utilise des presses ou des artifices (matrice flottante, fig. 168) permettant une compression bilatérale, le poinçon inférieur et le poinçon supérieur se déplaçant symétriquement par rapport à la matrice au cours de sa compression. La zone neutre de plus faible densité se trouve ainsi reportée à mi-hauteur de la pièce dont l'épaisseur peut donc être doublée par l'emploi de la compression bilatérale.

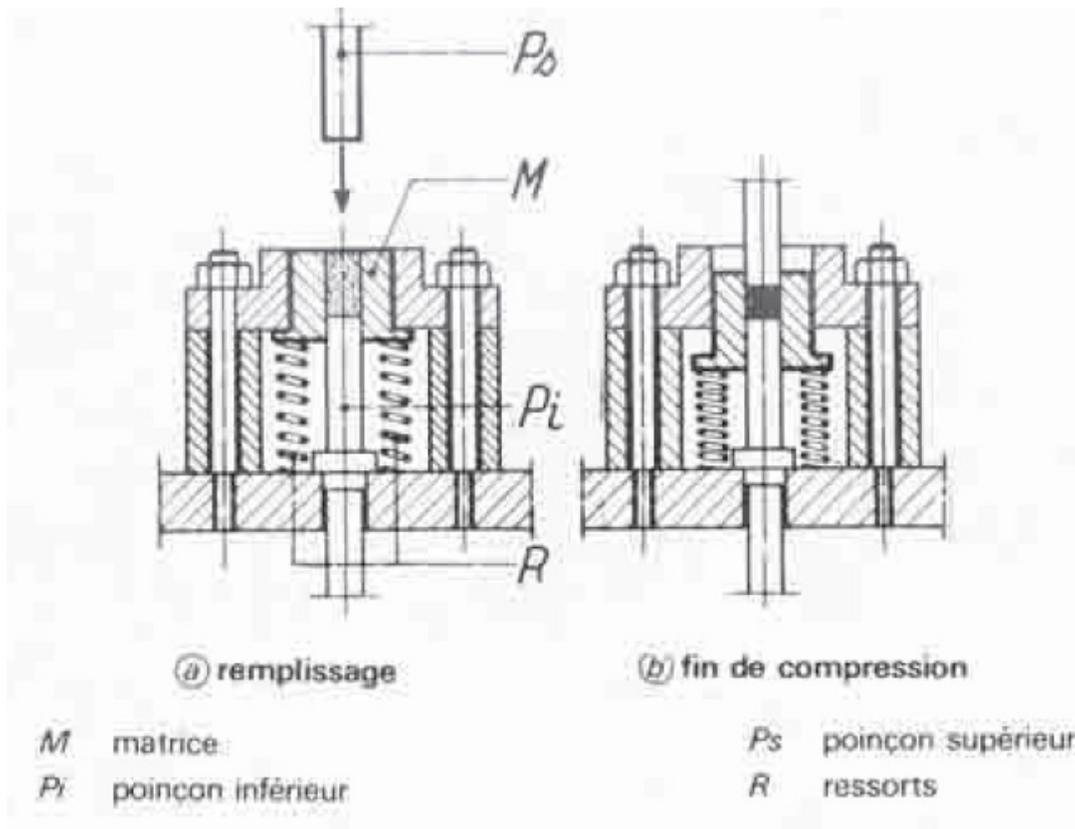


Figure 168. Matrice flottante.

Lorsque la pièce à mouler comporte des sections de hauteurs différentes (dans le sens de la compression), il faut prévoir autant de poinçons à mouvements indépendants (fig. 169) qu'il existe de sections de hauteurs différentes dans la pièce à mouler. On constate, en effet, qu'au cours de la compression, les trajectoires des particules de poudre demeurent très voisines de droites parallèles aux parois de la matrice, sans qu'il n'existe pratiquement aucune possibilité de transfert latéral, comme on l'observerait en comprimant une pâte plastique. Pour obtenir un comprimé de densité uniforme, il est donc indispensable qu'au moment du remplissage de la matrice les hauteurs occupées par la poudre, au droit de chaque section, soient proportionnelles aux hauteurs en fin de compression des sections correspondantes.

Ce résultat ne peut être obtenu que par l'emploi de poinçons indépendants dont les courses doivent être proportionnelles à la hauteur finale des sections correspondantes et au rapport de compression de la poudre utilisée.

Le rapport de compression est défini comme le rapport entre la hauteur de la colonne de poudre au remplissage et la hauteur finale du comprimé. Il est aussi égal au rapport des masses volumiques de la poudre comprimée et de la poudre non tassée à l'état de remplissage.

Le volume de remplissage est défini par la face supérieure de la matrice et le bord supérieur du poinçon inférieur en position initiale. Le remplissage de la cavité de la matrice est fait

volumétriquement, la poudre s'écoulant librement à partir d'un sabot qui s'amène au-dessus de la matrice. Ensuite ce sabot, en se retirant, arase la poudre dans la cavité au niveau de la face supérieure de la matrice.

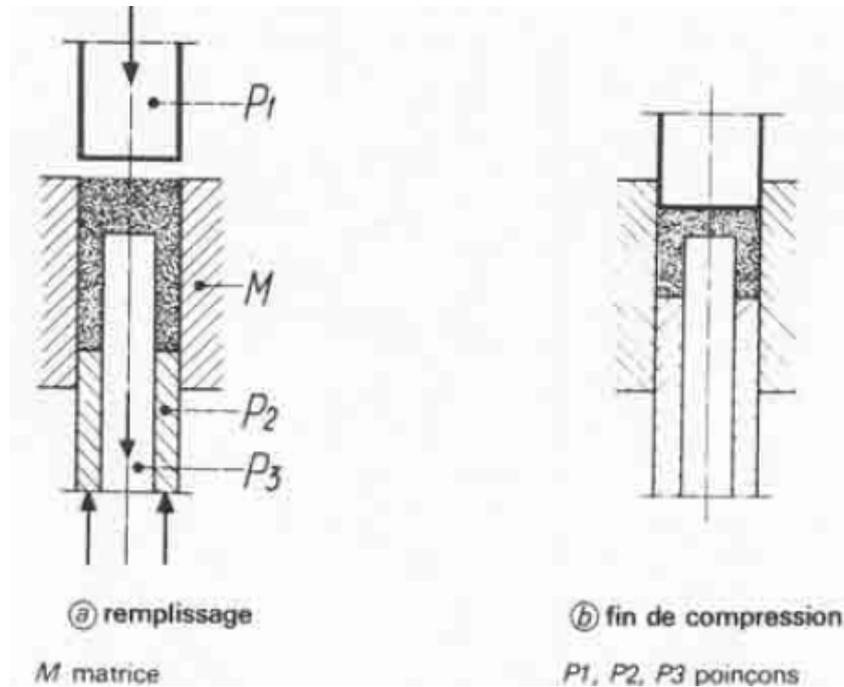


Figure 169. Matrice à poinçon multiple

Les positions des différents poinçons d'une même matrice doivent obligatoirement être déterminées d'une manière positive au moyen de verrouillages, au moment du remplissage et en fin de compression. Au cours de la compression, on peut, à la rigueur, laisser les poinçons inférieurs se déplacer librement en fonction des réactions transmises par la poudre comprimée dans la matrice. Il est toutefois préférable de prévoir une commande positive de tous les poinçons d'une même matrice, ce qui nécessite l'emploi de presses très complexes.

Les matrices pour moulage de pièces compliquées sont, elles-mêmes, d'une exécution délicate, comme le montre la matrice représentée sur la figure 170 et qui correspond au moulage d'une pièce d'arme. Un tel outillage, dont la durée de vie peut varier de 20 000 à 50 000 pièces pour une matrice en acier, ou atteindre le million de pièces pour une matrice en carbure de tungstène, ne peut être amorti que sur des séries dont l'importance justifie les frais d'établissement correspondants.

La pièce à réaliser a la forme d'un T. La matrice M comporte quatre poinçons inférieurs P₁, P₂, P₃, P₄. Le poinçon P₃, correspondant à la zone de plus forte épaisseur, est fixe.

Au début de l'éjection, les quatre poinçons sont solidaires et la descente de la matrice M provoque l'éjection de la parue horizontale de la section en T de la pièce. Pour libérer la partie encastrée (branche verticale du T), en fin d'injection, le poinçon P₄ est abaissé par rapport aux

autres. Dans ce but, le coin C, agissant sur le galet G, efface la fourchette F et libère le poinçon P₄ qui est rappelé vers le bas par un ressort (non figuré sur ce schéma)

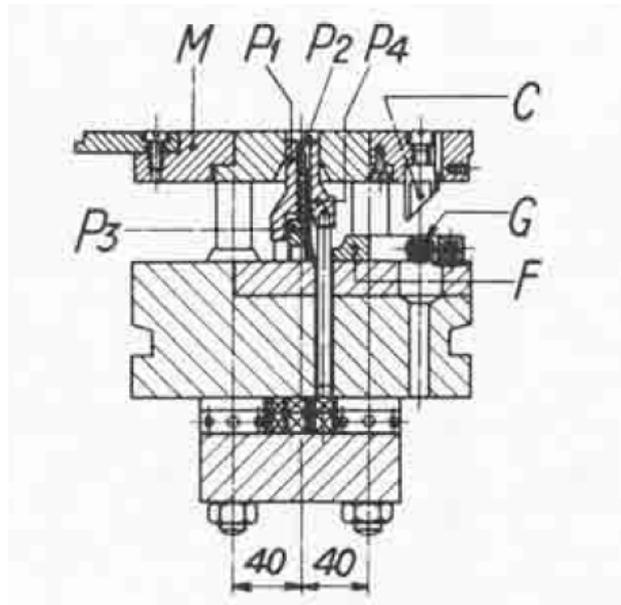


Figure 170. Matrice pour élévateur de fusil Mauser

3.3 Compression uniaxiale avec vibration. :

Il y a un grand intérêt de faire vibrer l'outillage de compression pendant le remplissage de la matrice et au cours de la compression. On peut atteindre une densité moyenne très uniforme dans la pièce, en appliquant une pression très faible.

Une poudre de cuivre est comprimée normalement à la masse volumique de 6.5 g/cm^3 sous une pression de 200 MPa (2 kbar). La même masse volumique est atteinte après une vibration préalable à la fréquence de 160 Hz, d'amplitude 0.15 mm, de durée 10 s. puis compression sous 10 MPa (0,1 kbar).

3.4 Compression isostatique :

La compression isostatique à froid en moule humide consiste à placer la poudre dans un récipient, en caoutchouc naturel ou en élastomère, dont la forme est affine de la forme désirée. L'ensemble est ensuite placé dans une enceinte contenant un liquide dont on augmente la pression jusqu'à une valeur comprise entre 100 et 500 MPa.

Ce procédé permet d'obtenir des formes très diverses, mais la précision dimensionnelle des comprimés n'est généralement pas très grande. Si l'on désire avoir une dimension précise, comme c'est le cas, par exemple, du diamètre intérieur d'un tube, on peut comprimer la poudre extérieurement par un tube en élastomère en plaçant au centre une tige d'acier. La généralisation de ce type d'insert n'est pas facile et les formes possibles sont alors très limitées.

Ce type de compression ne s'est pas beaucoup développé car l'ensemble des manipulations conduit à des productions de faible cadence.

La compression isostatique à froid en moule sec schématisée par la figure 171 permet, en principe, de résoudre le problème de la cadence. Le moule élastique est ouvert au moins d'un côté, et, après remplissage, on ferme le moule mécaniquement et on fait agir la pression par un liquide placé entre l'enveloppe élastique et un bloc d'acier. Avec un seul outillage, on atteint facilement 500 pièces par heure et on peut aller beaucoup plus vite à l'aide de presses rotatives multi-empreintes. Ce procédé est assez utilisé en céramique, par exemple pour la fabrication des bougies de moteur. Il est très peu utilisé en métallurgie des poudres car les taux de compression élevés conduisent à des déformations importantes des enveloppes et cela pose des problèmes d'étanchéité difficiles à résoudre.

Une application possible est la fabrication des chemises de moteurs d'automobiles. Il s'agit, en première approximation, d'un tube, et l'on peut utiliser un insert central en acier. La déformation de l'enveloppe extérieure est alors relativement faible.

Les deux procédés de compression isostatique ont deux avantages importants par rapport à la compression en matrice. Le premier est que l'uniformité de la masse volumique est excellente ce qui évite les risques de fissures et conduit à une déformation homogène au cours du frittage. Le second est de pouvoir éviter l'adjonction de lubrifiant ce qui permet de réaliser le frittage de pièces de grandes dimensions. La difficulté d'évacuer le lubrifiant au cours du frittage n'existe pas.

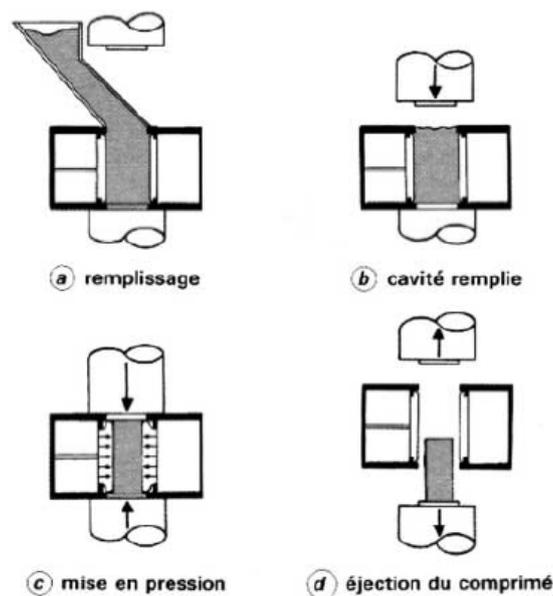


Figure 171. Compression isostatique en moule sec

3.5 Laminage. Extrusion :

Le laminage de poudre qui est une compression uniaxiale a été réalisé industriellement pour du nickel et expérimentalement, à échelle importante, pour du cuivre et du fer. Dans le cas du nickel, une trémie approvisionne la poudre dans un laminoir dont les axes des cylindres sont dans un plan horizontal.

La bande qui en sort est suffisamment solide pour pouvoir se courber avec un grand rayon et entrer horizontalement dans le four de frittage. À la sortie du four, la bande est laminée puis frittée à nouveau et ressort entièrement dense.

Avec un laminoir classique, une autre méthode consiste à déposer la poudre sur une bande d'acier dur qui forme une boucle tendue entre le cylindre inférieur du laminoir et un rouleau placé en amont. La poudre est ainsi comprimée entre la bande et le rouleau supérieur. Il est plus facile, dans ce cas, d'assurer une répartition régulière de la poudre déposée sur la bande horizontale et, si on le désire, on peut réaliser des tôles composites de plusieurs métaux ou alliages.

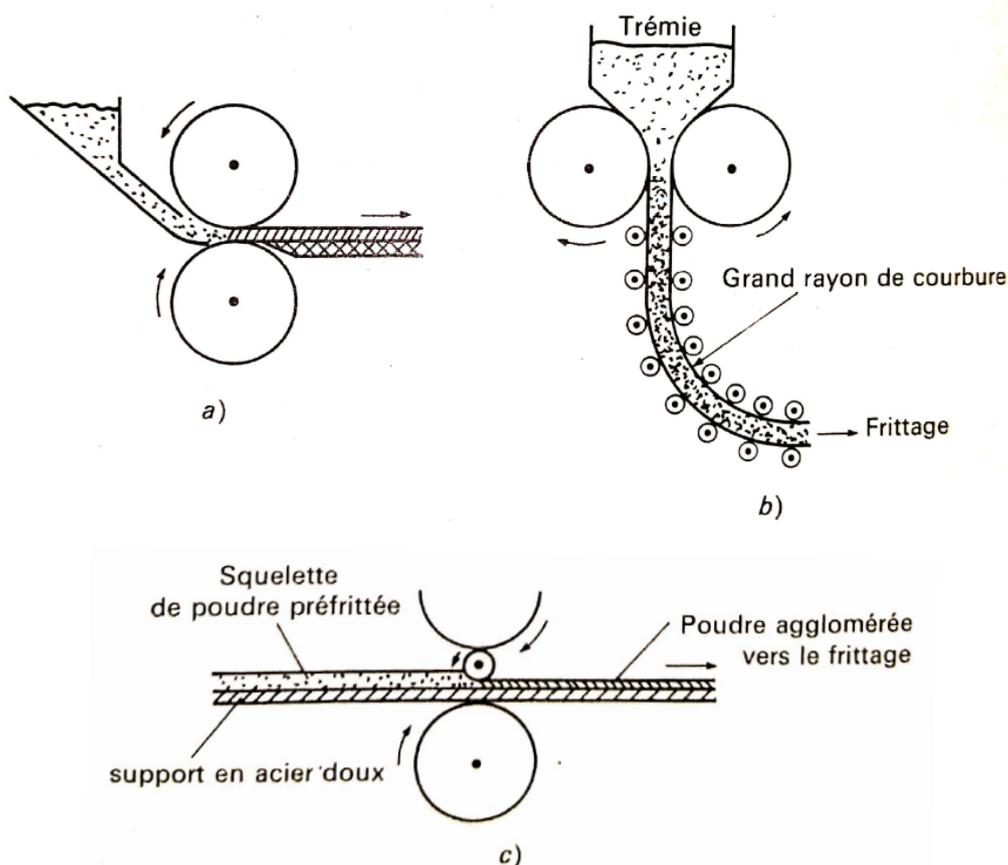


Figure 172. Procédés de laminage des poudres : a) horizontal, b) vertical, c) sur support (bande bimétallique)

Le laminage de poudre simplifie les opérations et diminue les pertes de matière. Cependant, il ne peut être économique, pour les métaux courants, que dans la mesure où le prix de la poudre

est voisin ou inférieur au coût du lingot coulé. Il a été envisagé pour le fer, lors d'études de réduction directe de minerais, et pour le cuivre récupéré qui, au cours de la purification par électrolyse, donne facilement une poudre utilisable.

L'extrusion à chaud ou à froid d'ébauches comprimées isostatiquement a été réalisée avec succès. L'ébauche peut avoir été obtenue par projection de poudre sur un support (procédé Osprey) et ce type de production est bien adapté à la fabrication de tubes en acier inoxydable. On supprime ainsi plusieurs opérations et les pertes de matière sont notablement réduites.

4 Frittage :

Le frittage est l'opération de traitement thermique effectuée sous atmosphère de protection qui permet une liaison intime physico-chimique entre les grains de poudre agglomérés au préalable ou libres dans un moule. Sous l'influence combinée de la température et du temps le produit seulement aggloméré devient un matériau cohérent plus ou moins compact. La température de frittage est inférieure au point de fusion de la phase la moins fusible de telle sorte que le produit au cours du frittage ou bien reste totalement solide, ou bien reste partiellement solide.

Durant le frittage divers phénomènes se produisent et souvent simultanément dans l'ordre général suivant (Fig. 173) :

- liaison entre les particules, à partir des points de contact des grains agglomérés par compression ; la forme des grains et la pression de compression favorisent les points de contacts pour le transfert des atomes par diffusion,
- développement des plages de contact entre grains,
- diminution des vides entre grains jusqu'à la fermeture de ces pores et dans un métal pur ou dans une phase unique, retrait dimensionnel en résultant,
- arrondissement des pores et élimination des pores les plus fins,
- grossissement des pores restant les plus importants. Il est, de fait, pratiquement impossible d'éliminer totalement tous les pores dans le frittage en phase solide uniquement ; pour obtenir une compacité totale il est nécessaire de faire appel à une phase liquide d'infiltration dans les pores.

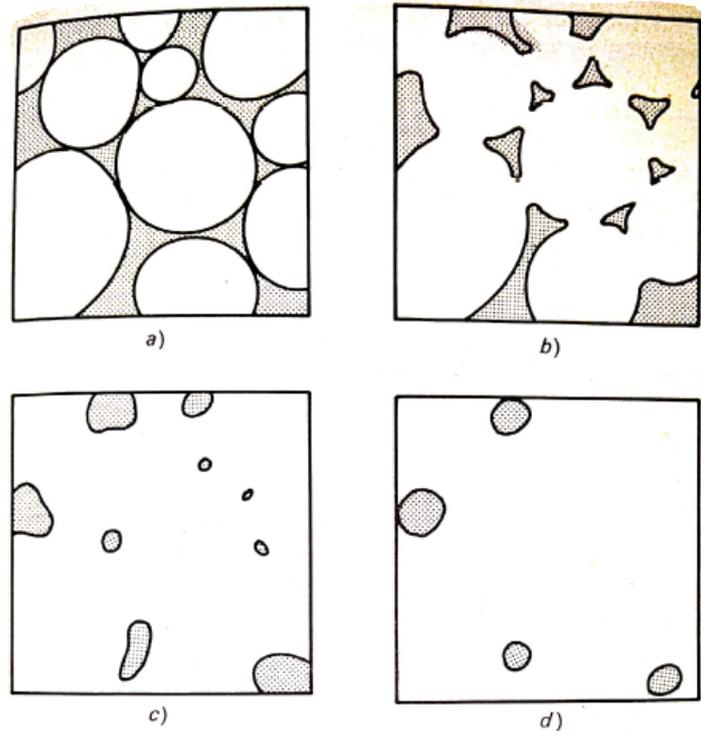


Figure 173. Stades successifs du frittage de poudre sphérique : a) liaison entre grains ; b) développement des surfaces de contact ; c) fermeture et isolement des pores ; d) arrondissement et élimination des pores.

Le mécanisme du frittage particulièrement complexe, résulte de la superposition de plusieurs phénomènes physico-chimiques élémentaires de deux types, soit transports de matière, soit transformations :

Evaporation. Condensation (ou sublimation). Tout métal a une tension d'évaporation qui existe déjà à la température ambiante, et qui croît rapidement avec la température. Les éléments et les impuretés en phase gazeuse se transportent d'un grain à l'autre, et des parties convexes vers les parties concaves. L'évaporation est favorisée par activation en atmosphères réductrices d'halogènes.

Diffusion superficielle. Elle se produit à une température qui est environ, en degrés C, les 3/10 de la température de fusion en degrés K. La mobilité des atomes tend, par suite de différence de tension superficielle, à éliminer les parties concaves.

Diffusion en volume. Elle se produit à une température qui est environ, en degrés C, la moitié de la température de fusion en degrés K. C'est le phénomène le plus important du frittage. Il résulte de la mobilité interne des atomes dans les grains et du phénomène classique de diffusion par suite des gradients de concentration. Ce phénomène est fonction du temps.

Ecoulement plastique. Il se développe à haute température, car la tension critique de déformation du métal est d'autant plus faible que la température est plus élevée, et cette tension

est si faible que des glissements se produisent pour des efforts du même ordre de grandeur que la tension superficielle des grains. On a donc un phénomène de fluage local, fonction du temps.

Phénomènes chimiques superficiels. Ils ont lieu à toutes les températures, mais surtout à température de début du frittage. Il y a mise à nu du métal par suite de réduction des oxydes, et dégazage des grains (atmosphères réductrices, frittage sous vide).

Recristallisation. Elle est fonction de la température, du temps, et aussi du taux d'écrouissage. Les grains de poudre ont été écrouis au cours de la compression, donc au cours du frittage on a les phénomènes classiques de destruction des tensions, de restauration, d'apparition de germes, de grossissement des germes, de grossissement des cristaux suivant de nouveaux réseaux.

Grossissement des grains. C'est la phase qui suit la recristallisation, elle est aussi fonction du temps et de la température. Elle diminue les vides (pores) entre les grains de poudre initiaux. Ces pores tendent vers de très petites sphères, mais, il reste toujours une faible porosité.

Le comportement du matériau au cours du frittage diffère s'il s'agit de poudre d'un métal pur ou d'un seul constituant ou bien s'il s'agit de poudres de plusieurs métaux ou constituants formant alliage in-situ

Frittage à l'état solide :

Il s'effectue à une température telle qu'il n'y fusion d'aucun des constituants du système pendant l'opération. $T_{\text{frittage}} < T_{\text{fusion}}$.

Frittage en phase liquide :

Il se produit lorsqu'on est en présence d'un mélange de poudres à bas et à haut point de fusion ; la température de frittage est supérieure à la température de fusion du composant le plus facilement fusible, de telle sorte que ce dernier baigne la phase solide résiduelle pendant toute ou partie de la durée de l'opération.

5 Fours de frittage :

Les types de fours de frittage sont très nombreux et leurs caractéristiques dépendent de la température à atteindre, du temps de maintien, de la nature de l'atmosphère, du type de chauffage, du cycle de chauffage et refroidissement, de la forme et dimensions des pièces, des quantités de pièces à fritter, etc. Nous citerons quelques fours typiques et plus spécifiques de leur application à la métallurgie des poudres.

5.1 Fours à passage en continu ou discontinu :

Pour le frittage le plus courant en grande production, des pièces en bronze ou ferreuses, ils sont caractérisés par : une zone d'entrée indépendante chauffée pour l'élimination du lubrifiant, une zone de chauffage à haute température, et une zone de refroidissement par jaquette avec circulation d'eau.

On distingue les fours à moufle dans lesquels les résistances chauffantes ou les brûleurs à gaz sont extérieurs au moufle ce qui les protègent de l'atmosphère, et les fours étanches par la carcasse extérieure du four (Fig. 174).

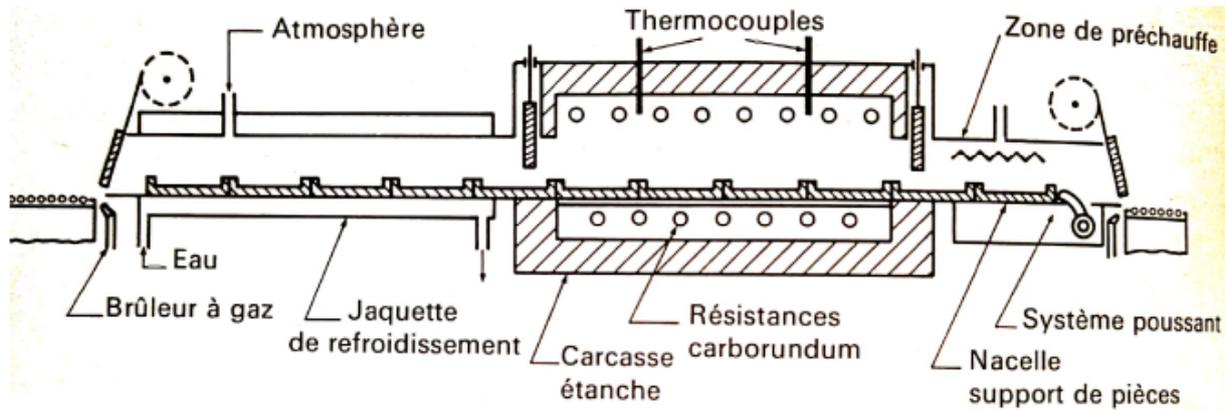


Figure 174. Four continu de frittage (convoyeur à poussoir)

Le système de transport des pièces à travers le four est également varié : soit système de nacelles en céramique ou graphite contenant les pièces qui avancent par l'action discontinue d'un poussoir (Fig. 174), soit transport discontinu des nacelles par poutre, soit système à chaîne et tapis sur lequel soit posés les nacelles ou même directement les pièces, soit système à rouleaux entraînés.

Pour le frittage en continu de bande de poudre comprimée par laminage, la bande est entraînée par un tapis ; dans le cas du frittage de bande bimétallique constituée de poudre d'alliage déposée sur un feuillard d'acier doux, le transport à travers le four s'effectue soit à l'aide d'un tapis, soit même directement par traction de la bande passant dans un moufle de protection.

5.2 Fours à cloche :

Utilisés plus particulièrement pour la compression à chaud ou le frittage sous pression ; ces procédés combinent l'action de la pression d'agglomération et la température pour le frittage soit directement sur de la poudre placée dans le moule chauffé, soit sur des produits agglomérés par pré-frittage à plus basse température (Fig. 175). Cette technique particulière est pratiquée lorsque l'on recherche une grande compacité, ou dans le cas du frittage de matériaux composites (garnitures de freins, disques d'embrayages métalliques additionnés de silice et graphite), d'alliages diamantés, d'alliages et matériaux réfractaires (Cermets) et de carbures métalliques

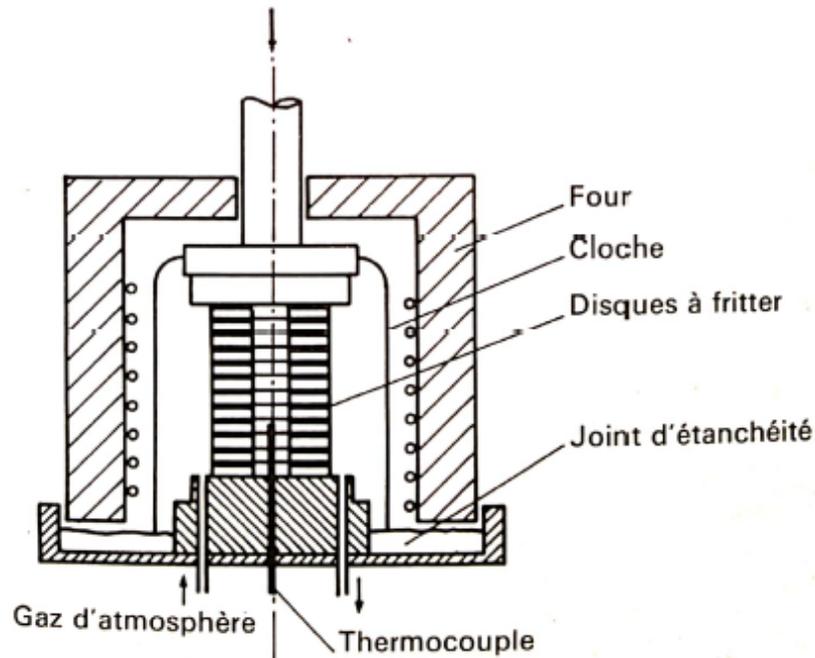


Figure 175. Four à cloche de frittage sous pression (frittage de disques de friction).

5.3 Fours statiques à moufle :

Généralement utilisés pour des frittages spéciaux de laboratoire ou pour de petites productions, les nacelles contenant les pièces étant introduites, déplacées et déchargées manuellement.

5.4 Fours à creusets :

Chauffés par résistance électrique ou par induction permettent le frittage sous vide à haute température, l'ordre de 1 500 à 3 °C, de métaux spéciaux (Mo, UO₂ et alliages nucléaires).

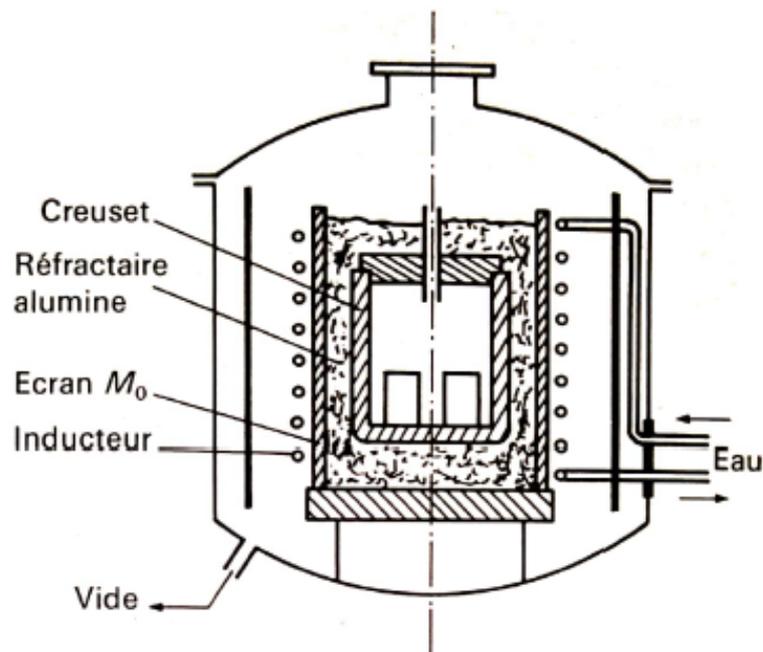


Figure 176. Four de frittage à induction sous vide

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- 1- Aide-Mémoire : Métallurgie Mise en Forme et Traitements. René CAZAUD, René LE ROUX. DUNOD, 1974.
- 2- Le Formage des Tôles Fortes. C. BOUCHELIER, Centre Technique des Industries Mécaniques CETIM, 1982.
- 3- Déformation Plastique des Tôles. R. QUATREMER, Aide-Mémoire Technor, Librairie DELAGRAVE, 1981
- 4- Aide-Mémoire Fonderie : Alliages, Procédés, Propriétés d'Usage, Défauts. Gilles DOUR. DUNOD, 2004
- 5- L'emboutissage de L'Acier. Alain COL. DUNOD. 2010
- 6- Cours Procédés de Mise en Forme. Mohamed MAZARI, UDL de Sidi Bel-Abbes
- 7- Elaboration des Métaux Ferreux (Fontes et Aciers). S. BENSAADA
- 8- Procédés de mise en forme, Mourad JERBI, ISET de Nabeul. 2018
- 9- Techniques de Production. M'hemed SAMIR. ISET de Nabeul. 2005
- 10- Science des matériaux de construction. GHOMARI Fouad. Univ. De Tlemcen.
- 11- Etude quantitative de la rupture de cylindres de laminoirs à table lisse, J.-M. Boissenot et al. Revue de Métallurgie 74.6 (1977): 333-345.
- 12- Techniques de l'Ingénieur- Traité Mécanique
- 13- Procédés d'obtention de pièces brutes. Hedi Chtourou. IPEI Sfax